

# Les endiguements de l'Ariège, entre torrents et rivière de plaine : quelle définition de la protection apportée par les aménagements historiques ?

## *Flood defence systems in Ariège catchment, in a mountainous environment: how to describe the protection provided by existing structures?*

**A.Brune<sup>1</sup>, C. Cambefort<sup>1</sup>, N. Pepin<sup>2</sup>, V. Koulinski<sup>3</sup>, F. Zoccarato<sup>4</sup>, G. Nuti<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Cerema, Bron, France, [anne.brune@cerema.fr](mailto:anne.brune@cerema.fr)

<sup>2</sup> ISL, Saint-Jean-de-Luz, France, [pepin@isl.fr](mailto:pepin@isl.fr)

<sup>3</sup> ETRM, Les Chapelles, France, [etrm@cegetel.net](mailto:etrm@cegetel.net)

<sup>4</sup> SYMAR Val d'Ariège, Foix, France, [fzoccarato.symarvalariego@orange.fr](mailto:fzoccarato.symarvalariego@orange.fr)

### Résumé

Être gestionnaire de système d'endiguement en 2023 implique de connaître le mode de fonctionnement des ouvrages en place, leurs capacités de résistance et leurs limites face aux phénomènes auxquels ils peuvent être soumis. La difficulté est accrue dans un contexte torrentiel où les phénomènes sont difficilement prévisibles et mesurables. C'est l'exercice auquel a été confronté le Syndicat mixte d'aménagement des rivières du Val d'Ariège, qui voit son périmètre d'action s'agrandir en 2019 avec la mise en œuvre de la compétence GEMAPI, et hérite à cette occasion d'un patrimoine d'ouvrages classés en tant que digues de protection contre les inondations au titre du décret 2007, dont certains sont situés en moyenne montagne.

Les questions qui se posent alors concernent la définition des études à mener pour compléter la connaissance des ouvrages en place, et analyser leur aptitude à former un système d'endiguement au titre du nouveau décret 2015. Il s'agit, dans un temps très court, de définir les données techniques à acquérir et d'optimiser la commande pour pouvoir couvrir plusieurs sites en parallèle.

Cet article présente la stratégie adoptée pour traiter le cas de deux systèmes d'endiguement historiques du bassin de l'Ariège. Deux systèmes d'endiguement avec des situations différentes qui ont nécessité chacun une approche sur mesure pour qualifier la protection apportée. La première étape a consisté à analyser la documentation existante à l'échelle du bassin et à l'échelle de chaque système. Un cahier des charges a été établi pour compléter les données géotechniques et réaliser des diagnostics d'une part, et acquérir des données topographiques d'autre part. L'élaboration des diagnostics approfondis a conduit à mettre à jour l'analyse hydrologique du bassin, et à bâtir les analyses de transport solide au cas par cas. Les méthodologies d'analyse des risques de défaillance, basées sur des approches multi-scénarios pour les ouvrages de protection torrentielle, ont été adaptées pour chaque potentiel système d'endiguement en fonction du contexte et des données disponibles.

Les diagnostics ainsi réalisés ont permis une première approche de définition des niveaux de protection possibles, devant guider le maître d'ouvrage dans les choix ultérieurs de réalisation d'études de dangers ou d'éventuels travaux. Outre l'aspect réglementaire, l'acquisition de connaissances supplémentaires sur le fonctionnement des sites soumis aux aléas torrentiels permet au gestionnaire d'adapter ses modes d'intervention et de surveillance.

### Mots-clés

Systèmes d'endiguement, contexte torrentiel, diagnostic, étude de dangers, niveau de protection

### Abstract

In France, the organisations in charge of flood defence systems management, need to gather several data about the performance of hydraulic structures. They have to prove that the levee systems remain stable during floods, and they also need to know when the level of normal service is outreached. This is all the more complicated in a mountainous environment, where climatic phenomena are difficult to predict and to relate to river behaviour. This was the task that had to undergo the "SYMAR Val d'Ariege", the local structure in charge of flood prevention in the Ariege catchment, located in the Pyrenees mountains, south of France. In 2019, the SYMAR Val d'Ariege inherited several flood defence systems whose structural performance had to be characterized in order to comply with French regulation on hydraulic structures.

To achieve this, the SYMARVA had to capitalize on historical knowledge about these levee systems, regarding hydraulics as well as geotechnique. Then, it was necessary to complete this knowledge with the help of engineering consultants, especially to produce risk assessment study for the levee systems.

This article details the process by which two historical levee systems were characterized. Although both these levee systems are subject to flash floods as well as debris flows, their geographical situation differ. Each of them required an adapted analysis, based on historical data as well as new topographical, geotechnical and geomorphological data. The analysis of historical documentation helped the SYMARVA to understand the global functioning of the existing structures and their catchments. It allowed to focus on missing data to complete the description of both sites. Hydrology and sediment transport data have been updated. Using these data, two diagnosis have been elaborated, that give information to the manager of levee systems about the structural performances that can be provided by existing structures. Methodologies to characterize failure probabilities have been adapted for each site, taking into account available data and site expertise.

These completed diagnosis give updated information about the level of protection provided by the existing structures, that is difficult to characterize in a mountainous environment. It's a key information for levee systems manager, who can then organize levees monitoring and try to anticipate flood response and crisis situations.

### Key Words

Levee systems, mountainous environment, hazard study, levee diagnosis, level of protection

## Introduction

Les endiguements du SYMAR Val d'Ariège (Syndicat Mixte d'Aménagement des Rivières du Val d'Ariège) reflètent la complexité de la caractérisation des systèmes de protection contre les inondations en contexte torrentiel, dont la spécificité a été mise en lumière au travers de publications récentes [1], et pour lesquels les méthodologies d'analyse de risques sont encore en développement. Les difficultés résident dans la qualification des phénomènes de crues fortement morphogènes, voire de laves sollicitant les ouvrages de protection, dans l'analyse de leur capacité à résister à ces sollicitations jusqu'à un certain niveau de protection, dont le maintien dans le temps nécessite une surveillance adaptée par le gestionnaire.

Le SYMAR Val d'Ariège se voit confier la compétence GEMAPI en 2019, ce qui inclut la gestion entre autres de deux systèmes d'endiguement en contexte torrentiel, soumis à la réglementation sur les ouvrages hydrauliques. L'échéance de régularisation administrative au 30 juin 2023 par le biais d'un dossier contenant une étude de dangers, accélère la nécessité de compléter la connaissance existante de ces systèmes.

Les endiguements de Merens-les-vals et Verdun sont présentés avec leurs spécificités, les stratégies adoptées pour la réalisation des études de dangers, les apports de ces études pour l'organisation d'une surveillance adaptée, en s'appuyant sur les moyens à disposition du gestionnaire.

## Spécificités de chaque site

Compte tenu du suivi assuré par le gestionnaire historique des ouvrages, la réalisation d'études de dangers des potentiels systèmes d'endiguement selon la nouvelle forme édictée par l'arrêté ministériel de 2017 modifié en 2019, a pu s'appuyer sur une base documentaire existante. Celle-ci contenait des renseignements - parfois partiels - sur la constitution des ouvrages, les phénomènes climatiques rencontrés localement, la réponse hydromorphologique des bassins versants. Des analyses avaient été produites, contenant une première approche de description des phénomènes de transport solide dans les bassins. La présence d'aménagements des cours d'eau et des versants par le RTM témoignait également de la prise en compte déjà ancienne des dégâts potentiels provoqués par les crues des torrents étudiés, d'une volonté de compréhension des phénomènes et de réduction de leur intensité. Ce retour d'expérience, complété des éléments de suivi du gestionnaire (visites de surveillance) a permis d'identifier les données à compléter et d'établir une stratégie pour la réalisation des études de dangers dans un délai assez court.

*Merens, un paysage et un régime hydromorphologique marqués par des aménagements de versants efficaces*

Le site de Merens est caractérisé par un torrent chenalisé, le Nabre, dans toute sa partie aval jusqu'à sa confluence avec l'Ariège, traversant le village de Merens dans un lit quasiment rectiligne bordé de berges maçonnées, surmontées parfois de murets en pierres ou de remblais en terre.

4 Les endiguements de l'Ariège, entre torrents et rivière de plaine : quelle définition de la protection apportée par les aménagements historiques ?

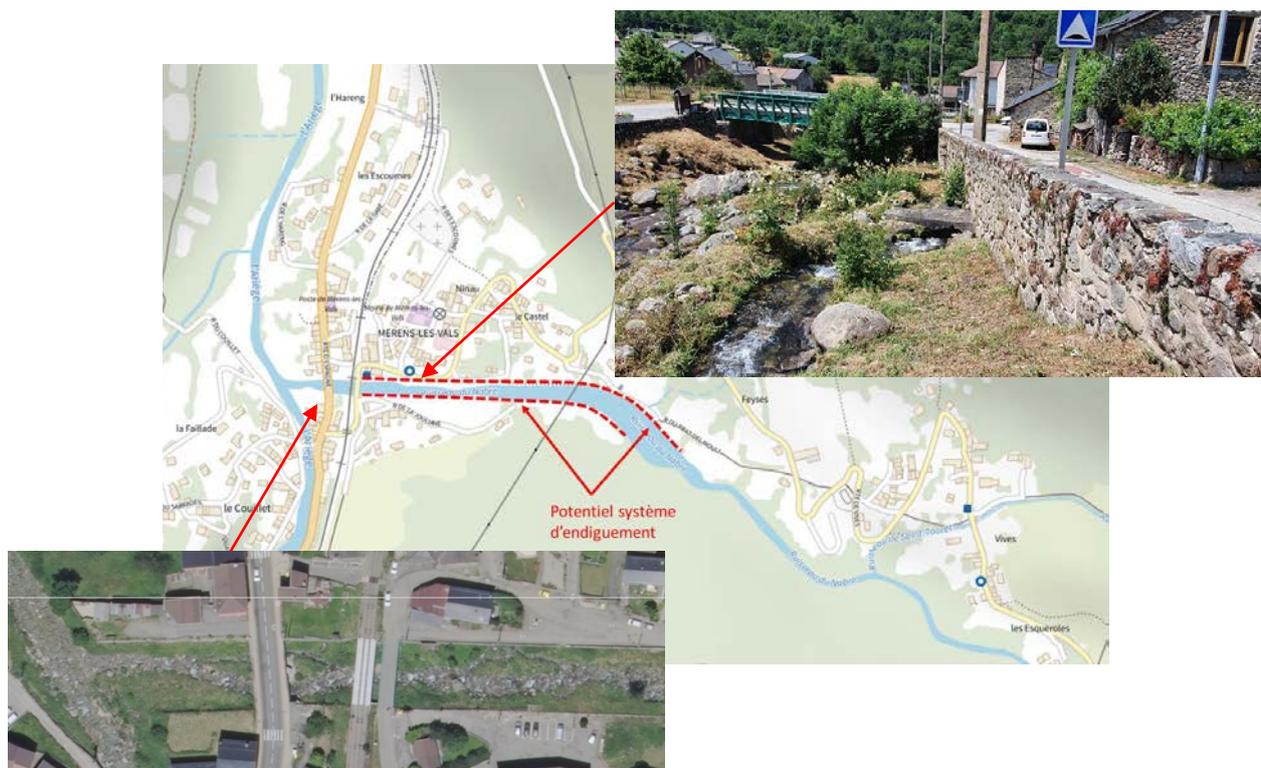


FIGURE 1. Localisation du système d'endiguement de Merens-les-vals (plan Geoportail, photo ISL).

L'aval du cours d'eau est surmonté de trois ouvrages de franchissement routiers et ferroviaire. À cet endroit, il fait transiter les eaux et apports solides du bassin tout entier couvrant une superficie totale de 15 km<sup>2</sup> environ. En particulier, le sous bassin du San Touret en rive droite du Nabrè, capable de générer des laves torrentielles, est particulièrement productif et constitue la majeure partie des apports solides capables de transiter jusqu'au village de Merens. Les événements catastrophiques du passé ont amené le RTM à réaliser différents aménagements sur les torrents et leurs versants : reboisement, stabilisation du lit du san touret et de ses affluents, plage de dépôt... Qui ont permis de réduire l'apparition de phénomènes dangereux liés aux crues avec charriage.



FIGURE 2. Ouvrages de franchissement en aval du Nabre.

Au niveau des ouvrages de protection devant constituer un futur système d'endiguement, peu de données ont été retrouvées. Il a été nécessaire de compléter les données de géométrie et de caractérisation des sols supports pour la réalisation du diagnostic préalable à l'étude de dangers. Un budget important a été consacré à l'acquisition de données topographiques, essentielles à l'analyse qui a suivi.

Une analyse approfondie des pentes du profil en long a été menée, de manière à mieux caractériser les volumes solides charriables, déposables, et les conséquences en termes de dépassement des ouvrages dans la traversée du village.

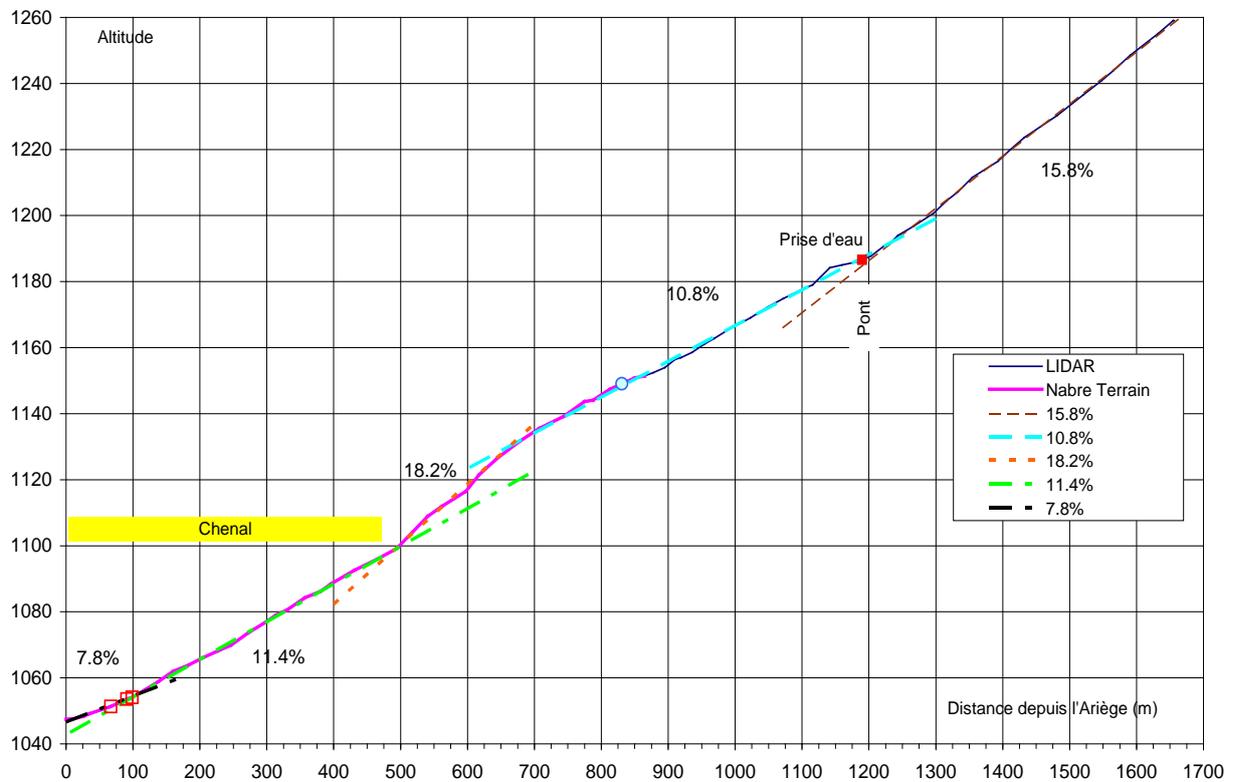


FIGURE 3. Profil en long du Nabre aval et zone endiguée (en jaune) – source ETRM/ISL.

### *Verdun, un site marqué par des laves historiques dévastatrices*

L'ouvrage de protection, bâti sur le cône de déjection du torrent des Moulines à Verdun, témoigne de la violence des phénomènes connus par le passé. L'analyse réalisée par ETRM [3] rappelle le caractère particulièrement meurtrier de ce torrent capable de faire transiter des laves charriant des blocs de plusieurs tonnes jusqu'aux zones habitées. L'histoire récente n'a pas vu se renouveler de tels événements, bénéficiant sans doute de l'efficacité des aménagements du RTM sur l'amont du bassin versant.

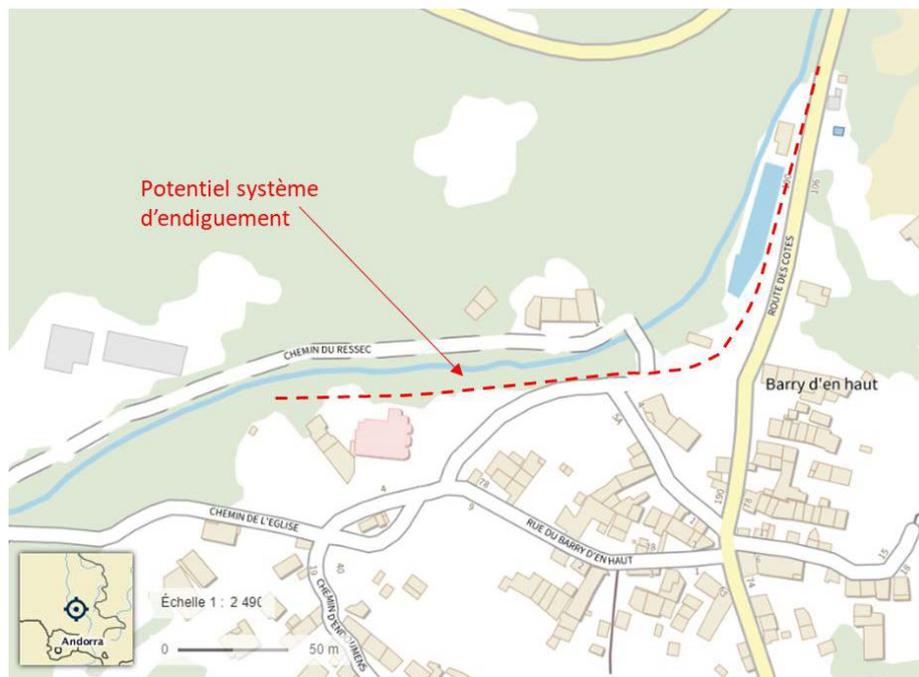


FIGURE 4. Localisation du système d'endiguement de Verdun (carte Géoportail).

L'ouvrage de protection principal constituant le potentiel système d'endiguement, réalisé au début des années 1900, est clairement identifiable sur le site et dans un état correct de conservation. La difficulté de caractérisation du système de protection global et de son fonctionnement réside dans les contraintes représentées par les aménagements présents dans l'environnement immédiat de la digue principale : ouvertures non batardables en partie supérieure de l'ouvrage, passerelles de franchissement du cours d'eau limitant la section hydraulique, lit mineur fortement boisé...



FIGURE 5. Aménagements dans le chenal – passerelle de franchissement du torrent – ouverture.

### *Stratégie de réalisation des études de dangers*

L'analyse de l'état actuel des ouvrages et de la documentation existante a pu faire ressortir les points suivants [6] :

- la connaissance de l'hydrologie, des phénomènes climatiques et de comportements possibles des torrents et cours d'eau bénéficiaient d'un retour d'expérience documenté à actualiser ;
- l'état de conservation des ouvrages et des abords permettait une visualisation du rôle de protection apparent des ouvrages, ainsi que des points faibles potentiels ;
- il était nécessaire de procéder à des **acquisitions de données** topographiques et géotechniques d'une part, et d'approfondir la description des phénomènes **de transport solide** d'autre part.

Afin de statuer sur la pertinence de la définition ou non de systèmes d'endiguement, il a été décidé de réaliser les études en deux temps :

- dans un premier temps ont été élaborés les diagnostics, devant apporter des éléments au gestionnaire sur les niveaux de protection potentiels des ouvrages dans leur état actuel. *L'acquisition de données géotechniques et topographiques a fait l'objet de marchés dédiés en parallèle, afin de s'adapter aux besoins des diagnostics. En particulier, l'acquisition de données topographiques a représenté un poste déterminant, pour un des rares territoires à ne pas être couvert par les levés Lidar récents.*
- Puis, une fois les objectifs de protection partagés entre les différents acteurs concernés (gestionnaire, élus), ont été réalisées les études de dangers correspondantes. Des niveaux de protection ont été proposés qui tiennent compte des particularités de chaque site.

### **L'élaboration des études de dangers : des approches adaptées aux données disponibles et incertitudes restantes**

L'étape de diagnostic approfondi préalable a été déterminante dans la compréhension des phénomènes et la description des sollicitations possibles des ouvrages. Elle s'est appuyée sur une analyse expertisée des écoulements sous forme de charriage ou de laves torrentielles, et la capacité des chenaux endigués à les contenir. Elle a permis d'identifier les principaux facteurs limitants, liés notamment à la présence de franchissements (ponts). Sans détailler ici la démarche complète d'étude de dangers qui a suivi, sont mis en valeur quelques points caractéristiques des systèmes d'endiguement de Merens et de Verdun, illustrant les particularités du contexte torrentiel.

#### *La description des systèmes*

- La délimitation des potentiels systèmes d'endiguement s'est appuyée sur les ouvrages déjà classés, en complétant légèrement le tracé, de façon à correspondre complètement aux ouvrages identifiés sur le terrain.
- Dans les deux cas, les bassins versants amont ont été aménagés par le RTM (reboisement, seuils, plages de dépôts). Ces aménagements ont prouvé leur efficacité dans la réduction de l'intensité des phénomènes sollicitant les ouvrages [2], [3]. Étant situés à distance des systèmes d'endiguement, et bénéficiant d'un suivi spécifique, ces aménagements n'ont pas été intégrés aux systèmes d'endiguement. Cependant une possible défaillance a été analysée comme correspondant à un scénario de lave torrentielle qui dépasserait de toute

façon la capacité des ouvrages. À l'occasion de la réalisation des études de dangers, des échanges ont eu lieu entre le gestionnaire et le RTM qui visent à mettre en relation l'ensemble des acteurs de la chaîne d'alerte.

- Autre caractéristique des ouvrages torrentiels : ceux-ci sont peu voire pas mis en charge au niveau de protection défini. Pour autant la protection est effective dès les crues fréquentes, dans la mesure où la chenalisation des torrents empêche l'inondation des zones habitées par divagation des cours d'eau. Il a donc été jugé pertinent de définir des systèmes d'endiguement à partir des protections existantes.

#### Analyse des performances des systèmes

- Caractérisation des sollicitations

- Aléa hydrologique : l'estimation des débits « liquides » caractéristiques, par les méthodes empiriques et calculatoires habituelles, s'est montrée peu cohérente avec le retour d'expérience historique. Pour autant des valeurs de débit « décennal » et « centennal » ont été utilisées dans la mesure où elles permettaient la description de scénarios d'écoulement, combinés à des phénomènes de charriage, suffisamment discriminants pour présenter un intérêt dans la description des phénomènes possibles.
- Transport solide : la réflexion a porté sur la capacité de transport des torrents en crue, reposant sur l'analyse des profils en long et l'estimation des pentes d'équilibre. Deux cas se sont présentés :
  - Dans le cas de Merens, le cours d'eau présente deux ruptures de pente dans l'environnement du secteur endigué, apportant autant d'incertitude sur les volumes solides déposés ou transportés en crue. Il a donc été nécessaire d'établir plusieurs scénarios de volumes solides transportés, pour envisager la gamme de hauteur d'engravement possible au niveau de la rupture de pente aval (jugée la plus critique), au droit du système d'endiguement.

	Nabre amont	Ruisseau de Saint Touret	Vraisemblance
<i>Scénario 1</i>	7 % 1 400 m <sup>3</sup>	Aucun apport	Forte
<i>Scénario 2</i>		Charriage maximum (3 000 m <sup>3</sup> )	Moyenne
<i>Scénario 3</i>		Lave torrentielle (20 000 m <sup>3</sup> )	Faible
<i>Scénario 4</i>	10.8 % Apport max. en charriage 8 000 m <sup>3</sup>	Aucun apport	Moyenne
<i>Scénario 5</i>		Charriage maximum (3 000 m <sup>3</sup> )	Faible
<i>Scénario 6</i>		Lave torrentielle (20 000 m <sup>3</sup> )	Faible

FIGURE 6. Définition de scénarios de transport solide pour Merens (ETRM).

- Dans le cas de Verdun, la pente présente une certaine régularité sur le linéaire endigué. L'incertitude sur les volumes transportés étant moindre, il a pu être procédé à une modélisation de l'évolution des fonds, en se concentrant sur une

autre incertitude déterminante ici : le blocage constitué par les ponts amont, intermédiaire et aval, ou au contraire leur rupture.

- Dans les deux cas, les mécanismes de transport solide, perturbés soit par des ruptures de pente ou par une réduction de la section hydraulique (franchissements), ont fait ressortir que les crues avec un débit faible, générant un fort engravement, pouvaient être bien plus défavorables que les crues avec un débit plus élevé, capables d'un meilleur transport solide.

- Le phénomène de lave torrentielle a été étudié, qui conduit dans chaque cas au dépassement de la capacité des endiguements. Leur apparition, jugée peu probable au regard des aménagements des bassins versants, reste possible notamment en cas de défaillance de ceux-ci. L'organisation d'une alerte spécifique serait à réfléchir.
- Une attention particulière a été portée aux phénomènes d'embâcles, en lien avec l'état fortement végétalisé des versants et des lits, rendant d'autant plus critiques les réductions de section hydraulique constituées au niveau des ouvrages de franchissement. Ce sont ces dernières qui déterminent le niveau de protection.

#### Caractérisation de la résistance des ouvrages

- Dans les deux cas, l'apparition d'une lave torrentielle est réputée dépasser la capacité des ouvrages. L'analyse de la résistance des ouvrages s'est donc concentrée sur les différents scénarios d'écoulements avec charriage pour estimer un niveau de protection correspondant à ces phénomènes courants.
- La capacité des endiguements à résister à des écoulements avec charriage a été appréciée au regard des mécanismes de défaillances potentielles par surverse ou par érosion externe (dont l'affouillement). Sans mise en charge des ouvrages, il est apparu que le point déterminant la définition des niveaux de protection résidait dans l'atteinte d'une surverse ou d'un contournement, qui ont été envisagés comme se produisant suite à un engravement, ou encore suite à une rupture préalable de la protection par affouillement. La capacité des ouvrages à empêcher les venues d'eau dans la zone protégée a été appréciée au regard de la revanche disponible, en considérant le niveau d'encombrement du lit mineur, notamment au droit des ouvrages de franchissement limitants.

#### *Propositions de niveaux de protection et zones protégées*

- La difficulté réside dans la définition d'un niveau facilement observable pour lequel toute combinaison de phénomènes possibles d'écoulement avec charriage (et dépôts) est contenue dans le système d'endiguement.
- En conséquence, un niveau de protection a été proposé en cohérence avec les risques prépondérants de surverse ou contournement, et avec les moyens de surveillance du gestionnaire. Il est matérialisé par une cote à ne pas dépasser au niveau des ponts limitants, en l'absence de lave torrentielle. La zone protégée recouvre l'ensemble des zones qui pourraient être atteintes par les divagations du cours d'eau en l'absence de chenalisation du lit.

#### *Organisation de la surveillance*

- Compte tenu des distances séparant chaque système et de l'impossibilité d'un suivi à

distance, des relais locaux sont indispensables pour un suivi rapproché en crue. Une organisation avec le personnel des communes est en cours de mise en place pour la surveillance de l'atteinte des niveaux de protection ;

- La réalisation des études de dangers apporte autant d'éléments de compréhension utiles au gestionnaire :
  - o dans l'identification des phénomènes susceptibles de mettre en défaut les protections (taille des embâcles, niveau et localisation des engravements).
  - o dans l'identification des points de faiblesse des systèmes (franchissements limitants, passages non batardables).

Les consignes ont pu être mises à jour suivant ces recommandations.

- La principale difficulté réside dans la mise en place d'un système d'alerte adapté, compte tenu de la variété des phénomènes pouvant entrer en jeu (charriage, embâcles, laves), et de leur rapidité d'apparition.

## Conclusion

La réalisation des études de dangers a permis une clarification du rôle des ouvrages et de leurs faiblesses. S'il reste des incertitudes inhérentes au contexte torrentiel sur les phénomènes pouvant solliciter les ouvrages et leur traduction en probabilité d'apparition dans une analyse de risques, la démarche d'étude de dangers en particulier l'étape de diagnostic, a permis de préciser le rôle et les limites des systèmes de protection en place. Des éléments clés de compréhension des phénomènes ont été identifiés qui permettent au maître d'ouvrage d'optimiser les moyens de surveillance en crue, et de prioriser les interventions futures.

Sur les deux systèmes en contexte torrentiel, les ouvrages de franchissement ont été identifiés comme limitant compte tenu des apports solides pouvant transiter au droit des enjeux. À chaque fois, les niveaux de protection sont définis par rapport à des niveaux atteints par la ligne d'eau au passage des ponts. Ils constituent également des repères facilement identifiables en l'absence d'échelles limnimétriques. La consolidation du système d'alerte constitue l'un des éléments principaux de la robustesse du système de protection et des pistes de progression ont pu être identifiées.

## Références

- [1] Queffelec Y. *et al.* (2019). *spécificité des systèmes d'endiguement et de l'analyse de risque en contexte torrentiel*, colloque Dignes maritimes et fluviales de protection contre les inondations, mars 2019.
- [2] ETRM (2022). *Étude du torrent du Nabre dans la traversée de Mérens-les-Vals.*
- [3] ETRM (2022). *Étude du ruisseau des Moulines dans la traversée de Barry-d'en-haut à Verdun.*
- [4] ISL (2022). *Diagnostic approfondi de la digue du ruisseau des Moulines à Verdun.*
- [5] ISL (2022). *Diagnostic approfondi de la digue du ruisseau du Nabre à Merens-les-vals.*
- [6] Cerema (2020). *Études de dangers des systèmes d'endiguement – assistance à maîtrise d'ouvrage pour le compte du SYMAR Val Ariège.*