

COMMENT ATTENUER LES CONSEQUENCES DE L'AGRESSION D'UN BARRAGE PAR LA RUPTURE D'UN OUVRAGE AMONT ?

How can we manage the consequences of dam damage caused by the failure of an upstream dam?

Chloé CHENE, Eric VUILLERMET

BRLi, 1105 av pierre Mendès France, 30000 Nîmes,
chloe.chene@brl.fr, eric.vuillermet@brl.fr

Magali TRILLA,

Département des P.O,
magali.rouge@cd66.fr

MOTS CLEFS

Etude de danger, onde de rupture, chaîne de barrages, sûreté

KEY WORDS

Safety Review Risk Assessment, Failure wave, *serie of dams*, *safety*

RÉSUMÉ

L'étude de danger permet d'identifier les risques potentiels pour un barrage classé. Les défaillances ou limites de l'ouvrage sont abordées. L'analyse fonctionnelle externe permet également d'identifier un agresseur extérieur. L'EDD a alors pour objet :

- d'identifier l'agresseur extérieur ;*
- de caractériser les situations génératrices d'un danger pour l'ouvrage classé, objet de l'EDD ;*
- le cas échéant, d'identifier, dans le chapitre 9, les mesures de réduction du risque à mettre en place à l'égard de cet agresseur.*

Le barrage de Vinça en est un exemple. L'étude de danger de 2013, par l'analyse fonctionnelle externe du barrage, a mis en avant un risque de surverse de la digue du col Saint Pierre et du barrage en cas de rupture du barrage en amont. Suite à ce constat, le maître d'ouvrage a engagé une étude pour savoir s'il était possible de réduire le risque de surverse en adaptant les modalités de gestion de l'ouvrage de Vinça.

Cette étude s'est basée sur l'onde de rupture du barrage amont ayant été considérée dans le Plan Particulier d'Intervention (PPI), les consignes du PPI du barrage amont et les possibilités et les modalités de gestion du barrage de Vinça.

Sur la base de l'analyse de ces données, il a été engagé des simulations hydrauliques sur modèle 1D dans l'objectif de définir le temps disponible et la répartition dans le temps des différentes tâches à effectuer, à savoir la transmission d'informations et la manœuvre des vannes. Ce timing permet ensuite d'identifier précisément les informations et les actions à engager. A également été testée l'incidence d'un événement météorologique cumulé à la rupture de l'ouvrage.

A partir de ces tests, il a été défini un logigramme décisionnel pour connaître les actions à engager en fonction de la situation. Cet outil servira de support de discussion entre les services de l'Etat, les maîtres d'ouvrage et les Exploitants des ouvrages pour définir les procédures de maîtrise des risques à mettre en place.

ABSTRACT

The Safety Review Risk Assessment (SaRRA) identifies potential risks for a classified dam. The failures of the structure are addressed. The external functional analysis also enables us to identify an external aggressor. The purpose of the SaRRA is to :

- identify the external event;*
- characterize the situations that generate a hazard for the classified structure covered by the SaRRA;*
- If necessary, to identify, in chapter 9, the risk reduction measures to be put in place with regard to this aggressor.*

The Vinça dam is a case study. The 2013 risk assessment, based on an external functional analysis of the dam, highlighted the risk of overtopping the Col Saint Pierre dike and the dam in the event of an upstream dam failure. Following this finding, the owner undertook a study to determine whether it was possible to reduce the risk of overtopping by adapting the management methods for the Vinça dam.

This study was based on the failure wave of the upstream dam, which had been considered in the Flood Prevention Plan (PPI), the PPI instructions for the upstream dam, and the possibilities and methods of managing the Vinça dam.

Based on the analysis of these data, hydraulic simulations were carried out on a 1D model, with the aim of defining the time available and the time distribution of the various tasks to be carried out, i.e. information transmission and gate operation. This timing is then used to precisely identify the information and actions to be taken. We also tested the impact of a cumulative meteorological event on the failure of the structure.

Based on these tests, a decision-making flowchart was defined to identify the actions to be taken depending on the situation. This tool will be used as a basis for discussion between government departments, owners and operators of structures, to define the risk management procedures to be implemented.

1. L'EDD IDENTIFIE LES POTENTIELS DE DANGER

1.1. La démarche

A travers l'analyse des agresseurs extérieurs, l'EDD peut faire ressortir la présence d'un barrage amont comme agresseur potentiel du barrage en son aval. S'il y a rupture de ce barrage amont, une onde est générée sur le cours d'eau. Cette onde peut provoquer une montée rapide de la retenue du barrage aval, la surverse du barrage aval et potentiellement sa rupture.

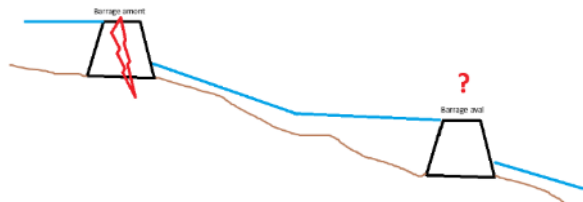


Figure 1: Problématique de la rupture du barrage amont sur une chaîne de barrage

L'amplitude de cette onde est conditionnée par le volume du barrage amont et par la longueur et la forme du bief séparant les deux barrages.

Le barrage amont, qui peut constituer un danger, est généralement classé en A ou B et dispose donc d'une étude de l'onde de rupture (issus de son EDD ou de son classement en barrage PPI). Toutefois, il est généralement fait l'hypothèse dans le cas d'une onde de rupture, que tous les ouvrages, en aval de l'ouvrage dont la rupture est étudiée, sont passifs. Autrement dit, aucune action de manœuvre de vanne n'est réalisée sur l'ouvrage pendant le passage de l'onde.

Il est classiquement considéré des hypothèses sécuritaires sur les niveaux d'eau et sur la débitance des ouvrages. En conséquence, la hauteur d'eau calculée au droit du barrage aval est très sécuritaire par ce type d'étude. L'objectif d'une étude d'onde de rupture est de quantifier l'inondation et les vitesses que génère l'onde sur le cours d'eau aval pour identifier les populations impactées tout en appréciant l'incidence sur un barrage aval (le passage de l'onde engendrera-t-elle sa rupture conduisant à une deuxième onde de rupture ? L'effet domino). Cette information est une donnée clé pour la mise en place des plans de préventions pour protéger ces populations en cas de rupture de l'ouvrage.

Fort de ce constat, on peut s'interroger sur les actions qui pourraient être menées sur la gestion hydraulique du barrage aval pour atténuer les effets de l'arrivée de l'onde et ce dans l'objectif d'éviter de mettre en péril le second barrage, voire de contenir en tout ou partie les volumes et réduire l'impact sur le tronçon aval du cours d'eau.

1.2. Le cas d'application du barrage de Vinça

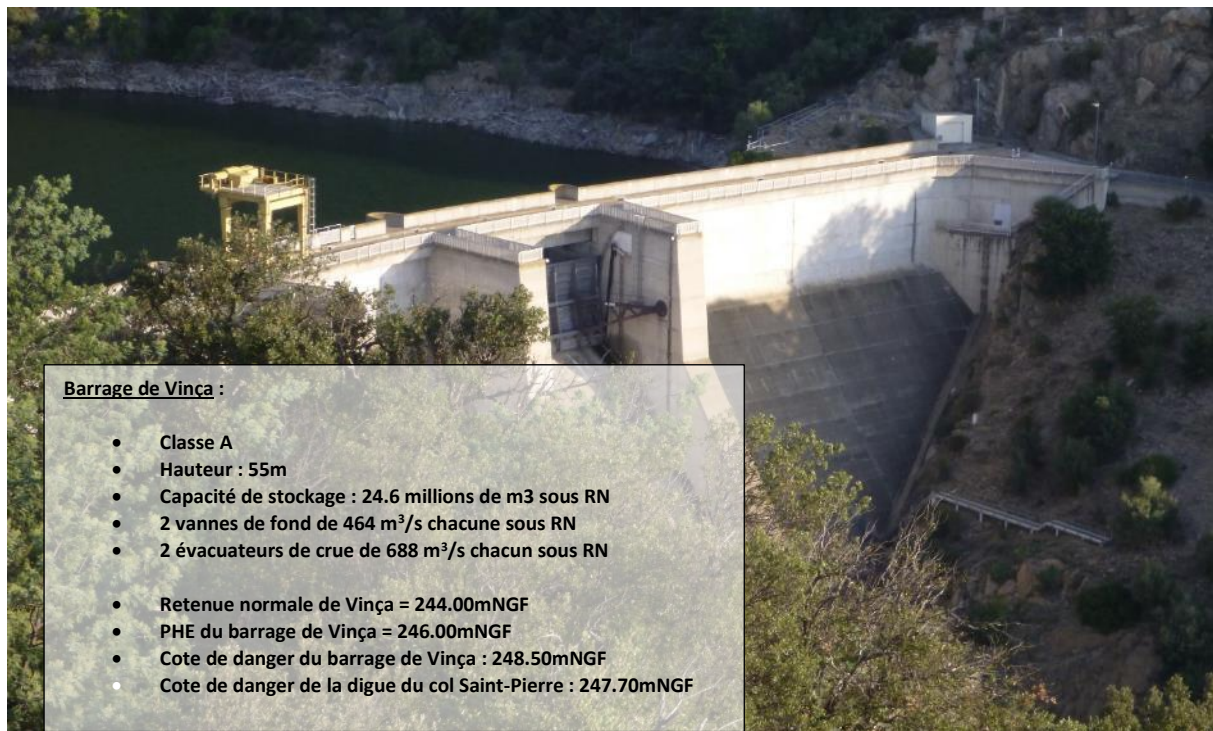


Figure 2: Description du barrage de Vinça (Source : BRLI)

De manière concrète, l'étude de danger du barrage de Vinça, barrage de classe A situé sur la rivière de la Têt dans les Pyrénées Orientales, a identifié comme agresseur potentiel le barrage des Bouillouses, situé 60km en amont, barrage poids en maçonnerie de 17,50m de haut et dont la capacité de la retenue est de 17.46 millions de mètres cubes à sa cote maximale normale d'exploitation.

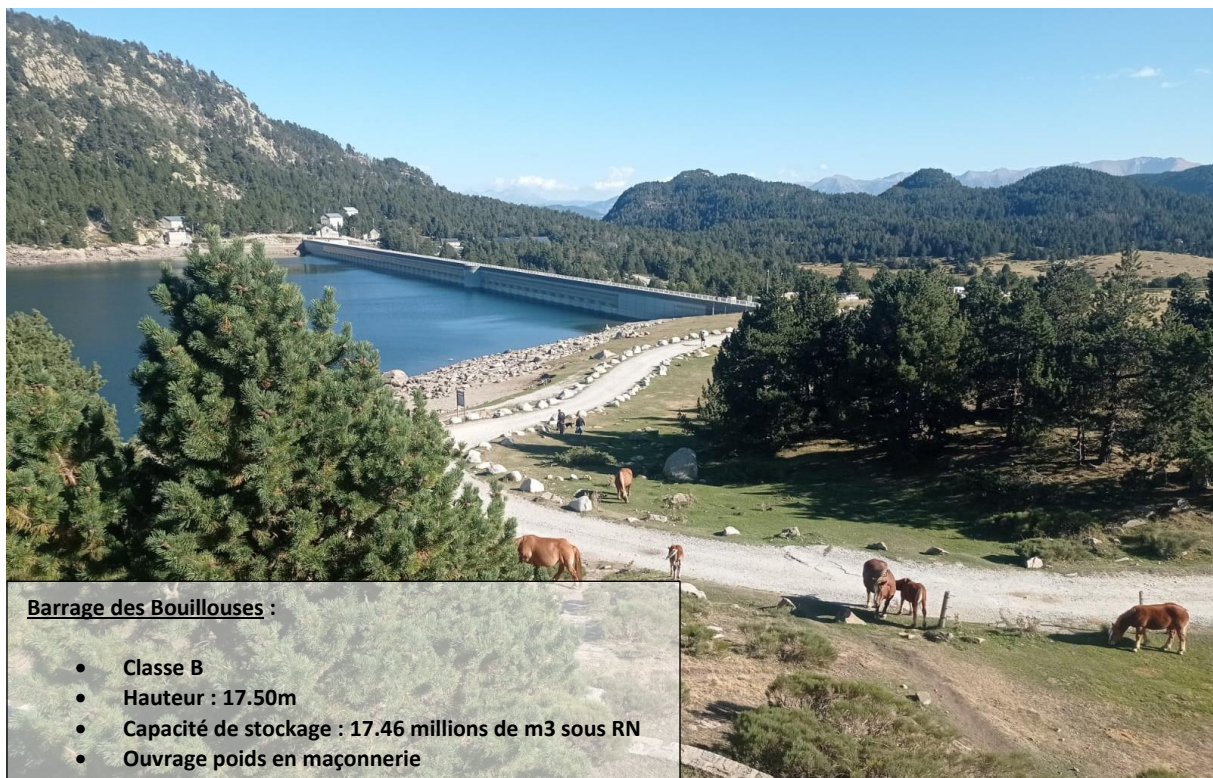


Figure 3 : Description du barrage des Bouillouses (Source : BRLI)

L'étude de l'onde de rupture du barrage des Bouillouses montre que l'onde à l'entrée de la retenue du barrage de Vinça apporte un volume de 7,4 millions de mètres cubes. Le volume restant de la retenue est stocké temporairement dans le lit majeur par étalement de l'onde. Le volume à l'entrée de la retenue de Vinça, engendra une surcote au droit du barrage de Vinça atteignant 248,19 m NGF. Ce niveau est supérieur de 2,16m au PHE du barrage. La cote de danger du barrage principal n'est pas dépassée. Toutefois, la retenue de Vinça dispose d'un point bas au niveau d'une digue de fermeture. La cote de danger de cette digue est dépassée, il y a surverse sur cet ouvrage en remblai et sa rupture est pressentie.

L'étude de cette onde indique que les hypothèses concernant le barrage de Vinça sont les suivantes :

- Barrage de Vinça initialement à la cote de la RN
- Tous les organes de l'ouvrage de Vinça sont fermés

Ces hypothèses peuvent être jugées très défavorables. En conséquence, pour réduire le potentiel de risque, l'étude de danger du barrage de Vinça questionne sur les possibilités d'adapter la gestion hydraulique du barrage de Vinça pour atténuer les sollicitations au droit des ouvrages de Vinça, voire éviter de les mettre en péril.

2. EXISTE-T-IL UN POTENTIEL DE REDUCTION DU RISQUE ?

2.1.Méthodologie

Dans l'objectif d'identifier et de quantifier le potentiel de danger d'un tel événement, il convient d'essayer de le comparer :

- À des événements mieux maîtrisés tels que les crues, bien que la cinétique de l'onde générée par une rupture puisse être complètement différente.
- À la capacité d'évacuation des organes du barrages
- À la capacité de stockage du barrage

Ces comparaisons permettront d'estimer si l'adaptation d'un mode de gestion pour cet événement peut permettre de diminuer le potentiel de danger au niveau de l'ouvrage aval ou non.

2.2. Cas d'application

Dans le cas du barrage de Vinça, les caractéristiques de l'onde évaluée à l'extrémité amont de la retenue de Vinça sont :

- Débit de pointe : $Q_{\text{pointe}} = 1\,826 \text{ m}^3/\text{s}$
- Gradient maximal de montée de l'onde : $1.65 \text{ m}^3/\text{s}/\text{s}$ soit une atteinte du débit de pointe en 20 min
- Volume de l'onde 7.4 millions de mètres cubes

Cet événement en termes de débit de pointe se situe entre la crue centennale et la crue millénale avec un volume très inférieur.

Le gradient de la crue de projet, de période de retour 5 000 ans, est de $871 \text{ m}^3/\text{s}/\text{h}$. L'onde possède donc un gradient qui est pratiquement sept fois plus important.

En termes de capacité d'évacuation, le barrage de Vinça possède une capacité maximale de $2\,300 \text{ m}^3/\text{s}$ sous RN. Cette capacité permet d'évacuer le débit de pointe de l'onde.

	244 m NGF	246 m NGF
Vanne de fond	$464 \text{ m}^3/\text{s}$	$472 \text{ m}^3/\text{s}$
Évacuateur de crue	$688 \text{ m}^3/\text{s}$	$993 \text{ m}^3/\text{s}$

Tableau 1: Capacité des organes du barrage de Vinça

Au regard de la capacité de retenue du barrage, il est recherché la cote du plan d'eau permettant d'absorber l'onde dans la retenue sans agir sur les vannes. On constate que la retenue de Vinça est capable de répondre à cet objectif. Cela implique que la retenue du barrage soit initialement en dessous de la cote de 241.50 m NGF pour qu'elle reste en deçà de la cote des Plus Hautes Eaux (PHE).

Cette analyse a permis de conclure qu'en terme de débit de pointe de l'onde et de volume de l'onde, la retenue de Vinça peut atténuer voire effacer l'onde de rupture amont. En revanche, le gradient de l'onde est très important, il constitue le point critique de cet événement. Le barrage possède donc la capacité d'absorber une partie de cette onde à condition de pouvoir manœuvrer les vannes de l'ouvrage suffisamment rapidement ou d'anticiper l'arrivée de l'onde. La cinétique de l'événement étant particulière, il convient de rechercher une adaptation des consignes de gestion de l'ouvrage pour cet événement spécifique.

3. LES LEVIERS POUR REDUIRE CE RISQUE

3.1. Identification des leviers

Pour estimer le potentiel de réduction des risques, il est possible de jouer sur plusieurs paramètres :

- Les informations transmises au barrage aval par le barrage amont
- L'instant où ces informations sont reçues
- Les consignes données au barrage aval

Ces paramètres sont estimés en fonction des possibilités techniques, humaines et éventuellement réglementaires du barrage.

A titre d'information, la simulation de la propagation de l'onde de rupture montre que l'onde arrive au niveau du pont de Marquixanes 2h05 après la rupture du barrage des Bouillouses. Par sécurité, il est retenu la valeur de 1h50.

La combinaison de ces possibilités donne lieu à un certain nombre de scénarii qu'il convient de tester. Pour cela il convient de définir l'état de remplissage initial du barrage, le moment où une action est engagée et le type d'action engagée.

Dans cette situation exceptionnelle, il a été retenu de pouvoir déroger au règlement d'eau.

Sur le barrage de Vinça, il a été choisi de tester les actions suivantes :

- L'anticipation ouverture des vannes de surface
- L'anticipation de l'ouverture des vannes de fond
- L'absence d'anticipation de l'événement avec une ouverture progressive ou instantanée des vannes de fond à l'arrivée de l'onde dans la retenue.

Le résultat de ces actions est étudié dans différentes conditions de remplissage initiales du barrage traduisant le niveau initial de la retenue, l'état d'ouverture des vannes ou le cumul possible de la rupture du barrage des Bouillouses pendant un épisode de crue.

La combinaison de ces actions et de ces situations initiales permet de définir un certain nombre de scénarii dont il convient de tester les plus pertinents.

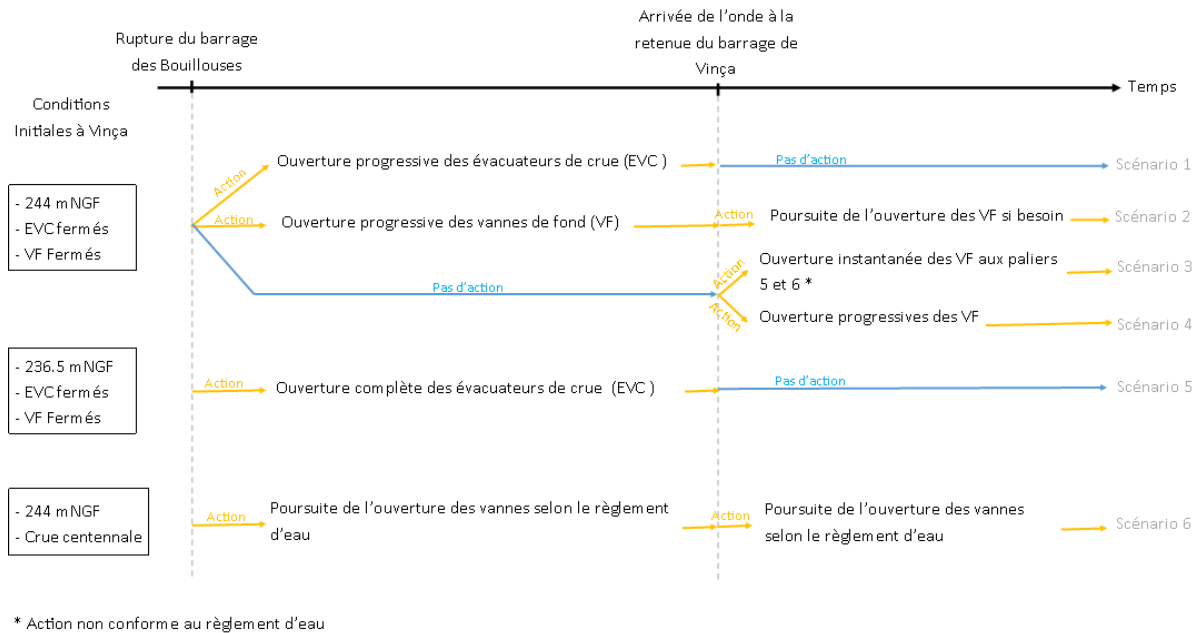


Figure 4 : Scénarii d'adaptation de gestion de l'ouvrage testés au barrage de Vinça

Pour ordre de grandeur, un abaissement préventif de la retenue à 241.50mNGF permet le stockage de l'onde sans manœuvre des vannes et sans dépasser la cote des PHE.

3.2.Mesure de l'impact de ces leviers

Pour rappel, l'onde de rupture du barrage amont définit généralement le niveau d'eau au droit du barrage aval dans des conditions défavorables, notamment par l'absence d'action au niveau du barrage aval. La cote maximale atteinte au niveau du barrage aval définie par cette étude peut donc être qualifiée de sécuritaire.

Pour tester ces scénarios, on utilise modèle hydraulique duquel on pourra extraire l'évolution du niveau en amont et des débits au droit du barrage aval. Il est regardé en particulier la cote maximale atteinte dans la retenue lors du passage de l'onde.

Dans le cadre du scénario 1 étudié à Vinça, on considère une ouverture par palier des vannes de surface. Cette ouverture est déclenchée dès la rupture du barrage amont. L'ouverture est stoppée à l'arrivée du pic de crue au barrage de Vinça.

Les vannes s'ouvrent alternativement. Un palier est franchi toutes les 10 min soit un temps de 20 min entre deux paliers pour une même vanne. Les vannes de fond restent fermées. Les vannes s'ouvrent avec un déphasage de 10 min.

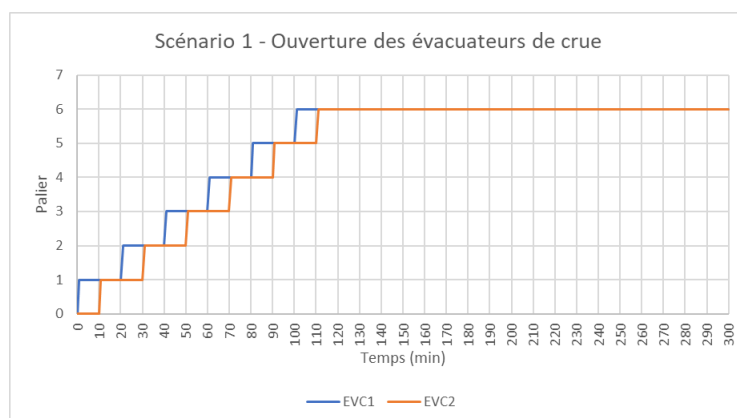


Figure 5 : exemple de scénario d'ouverture de vannes du barrage de Vinça

La variation de niveau dans la retenue est illustrée ci-dessous.

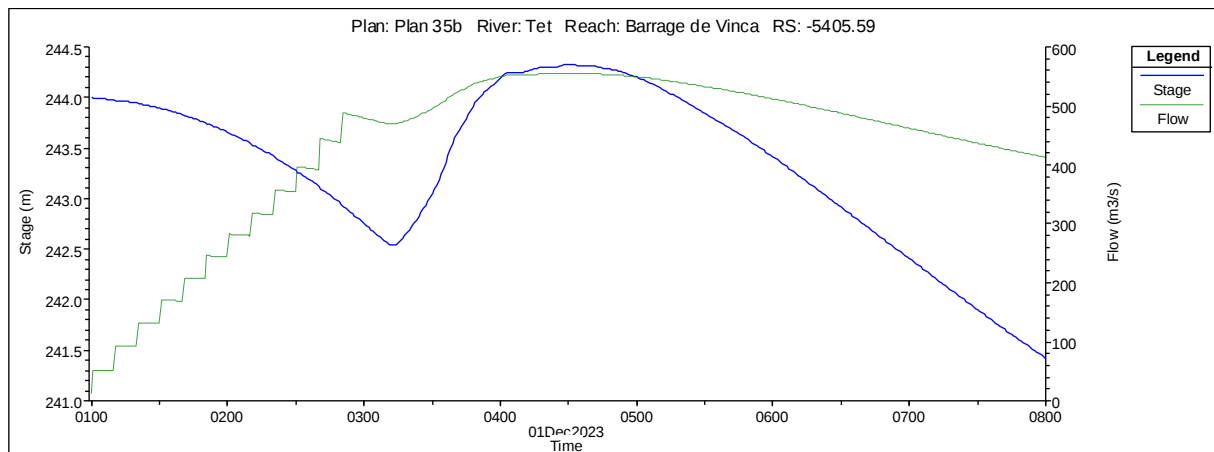


Figure 6 : Résultats d'un scénario d'ouverture de vannes testé

On constate que l'ouverture des vannes permet de réduire fortement la cote maximale atteinte et ainsi, de ne pas mettre en péril l'aménagement de Vinça. La cote maximale atteinte est lors du passage de l'onde de rupture est de 244.32 m NGF, bien en dessous des PHE de l'ouvrage. Elle est associée à un débit sortant de 554 m³/s, débit risquant de créer des désordres importants en aval du barrage : les premiers débordements sont observés à 400 m³/s.

Les conclusions des simulations sont synthétisées dans le tableau ci-dessous :

Scénario	Vannes de fonds		Evacuateurs de crue		Début de l'ouverture des vannes	Cote plan retenue initiale	Cote maxi atteinte	Cote maxi > cote de danger (247.70)	Qs.max (Q2ans=230m³/s)	Commentaire
	Position initiale	Manœuvre	Position initiale	Manœuvre						
1	Fermées	Aucune	Fermés	Ouverture progressive jusqu'aux paliers 6	Rupture de Bouillouses	244.00	244.32	Non	555 m³/s	Débit maximum générant des dégâts à l'aval
2	Fermées	Ouverture progressive jusqu'aux paliers 7 et 8	Fermés	Aucune	Rupture de Bouillouses	244.00	245.96	Non	470 m³/s	Atteinte des PHE Débit maximum générant des dégâts à l'aval
3	Fermées	Ouverture instantanée au paliers 5 et 6	Fermés	Aucune	Arrivée du pic de crue dans la retenue	244.00	246.97	Non	250m³/s	Montée rapide du niveau à l'aval du barrage. Débit sortant acceptable vis-à-vis des enjeux aval
4	Fermées	Ouverture progressive	Fermés	Aucune	Arrivée du pic de crue dans la retenue	244.00	247.25	Non	350 m³/s	Surverse probable sur barrage de Vinça par les vagues
5	Fermées	Aucune	Fermés	Ouverture Complète	Rupture de Bouillouses	236.50	239.89	Non	370 m³/s	-
6	Fermées	Ouverture progressive	Fermés	Ouverture progressive	Arrivée de la crue centennale	244.00	246.79	Non	1847 m³/s	Q100ans < Qs.max < Q1000ans La PHE est dépassée mais la cote de surverse du barrage et la cote de danger ne sont pas atteintes.

Figure 7 : Synthèse des résultats de simulations

Les simulations des scénarii permettent de confirmer qu'il existe des possibilités pour réduire le risque de rupture de Vinça. Elles ont permis de mettre en avant un certain nombre de constats qui vont servir de base pour discuter avec les maitres d'ouvrages et les exploitants des deux ouvrages, Bouillouses et Vinça, des dispositions à mettre en place pour ne pas mettre en péril ce dernier.

A titre d'illustration, les constats sont les suivants :

- En dessous d'une cote de retenue de 241.50 m NGF, la rupture du barrage des Bouillouses n'engendrerait pas un niveau d'eau supérieure au PHE sur la retenue de Vinça et ce sans action particulière sur le barrage ;

- L'ouverture instantanée des vannes de fond aux paliers 5 et 6 lors de l'arrivée du pic de l'hydrogramme de rupture du barrage des Bouillouses permet de limiter la hauteur dans la retenue de Vinça à 246.97 m NGF, cote restant en dessous de la cote de danger des ouvrages mais au-dessus des PHE. En revanche, l'ouverture instantanée de ces vannes provoque une rapide montée du niveau aval de la Têt pouvant engendrer des dommages à l'aval. Le débit sortant reste cependant de l'ordre du débit de pointe de crue de période de retour 2 ans sur la Têt ;
- En adaptant la gestion des vannes dès la rupture des Bouillouses, hors concomitance d'une crue centennale, il est possible de limiter la cote atteinte par la retenue pour que celle-ci reste en dessous ou égale à la cote de danger de la digue de fermeture, tout en limitant le débit sortant pour atténuer les dégâts provoqués à l'aval. La condition indispensable à ces scénarios est que l'Exploitant soit préalablement mobilisé et donc que l'alerte soit donnée au barrage de Vinça avant la rupture constatée du barrage amont.
- Le cumul de la crue centennale et de la rupture de l'ouvrage des Bouillouses n'entraîne pas un sur risque de surverse sur l'aménagement de Vinça.

4. MISE EN PLACE DE MESURE DE REDUCTION DE CE RISQUE

4.1. La communication, enjeu crucial

Que dit le PPI ?

Il convient dans un premier temps de regarder ce qui est indiqué dans le PPI du barrage en défaut :

- Ce PPI prévoit-il d'alerter le barrage aval ?
- A quel moment ? Cet instant est-il suffisamment tôt pour permettre au barrage aval de réagir ?
- Par quel biais ?
- Quelles informations sont transmises ?

Classiquement, quatre seuils d'alerte sont définis sur un barrage :

- Vigilance renforcée : crue risquant d'être dangereuse pour la sûreté de l'ouvrage, ou en cas de faits anormaux ou susceptibles de compromettre la tenue de l'ouvrage
- Préoccupation sérieuse : les mesures prises n'améliorent pas la tenue de l'ouvrage et son comportement s'aggrave, ou la probabilité de la survenance d'un événement extérieur se confirme (crue exceptionnelle, glissement de terrain)
- Péril imminent : l'exploitant estime qu'il n'a plus le contrôle de l'ouvrage
- Alerte en cas de rupture constatée

Il peut être intéressant d'alerter le barrage aval dès le premier stade d'alerte, notamment dans le cas de deux barrages rapprochés, de manière que le barrage aval s'organise pour pouvoir déclencher des manœuvres le cas échéant.

L'étude préconise de faire transiter l'information directement entre Exploitants avec information aux Maîtres d'Ouvrage et Service de Préfecture. L'objectif est que l'information transite de manière à ne pas être un frein à une manœuvre d'anticipation pour limiter la hauteur d'eau de la retenue.

Partager les résultats de l'étude avec le maître d'ouvrage et le gestionnaire du barrage amont ?

L'étude terminée, il est préconisé d'échanger les conclusions de l'étude avec le maître d'ouvrage du barrage amont pour valider les modalités de communications des informations à transmettre.

Pour cela, le point de départ est la communication. Il convient de définir à quel moment et par quel biais le barrage amont alerte le barrage aval de sa rupture et comment le barrage aval confirme la bonne réception de l'information. Cette action étant une action supplémentaire à faire dans une situation de crise, il convient d'établir un protocole simple et clair qui puisse facilement être intégré dans l'organisation en place.

4.2. Logigramme

La réception de l'information constitue le point de départ de l'organisation à mettre en place au niveau du barrage aval. Le protocole de communication et d'action permet d'établir un logigramme décisionnel intégrant les éléments de la situation considérée au droit du barrage aval.

Dans ce logigramme, il est important de faire apparaître :

- L'information reçue par le barrage aval : quand et état de la situation amont
- Les actions à mettre en place pour permettre une manœuvre du barrage en cas d'urgence
- Le moment où le barrage aval est prêt à manœuvrer
- Le moment où les actions sont déclenchées
- Le type d'action à déclencher en fonction de la situation : sur ce point, le logigramme doit être particulièrement clair pour favoriser sa bonne application en situation de crue. Le nombre de paramètres regardés pour définir les actions doit être le plus réduit possible et les actions doivent être claires et simples.

Le risque de rupture du barrage amont engendre un état de crise sur le barrage aval. Il convient également d'indiquer dans le logigramme, en fonction de l'avancement de la crise du barrage amont, l'état de crise du barrage aval. Ces états déclenchent des actions définies dans le PPI, Plan de Particulier d'Intervention, du barrage aval.

Dans le cadre du barrage de Vinça, le logigramme proposé est illustré ci-dessous. Il retranscrit l'état de crise aux deux barrages. Dans ce cas, les seuils d'alertes sont décalés d'un rang entre les deux barrages. Pour manœuvrer le barrage de Vinça, il est nécessaire qu'un barragiste soit sur site. Il est appelé à se rendre sur site dès l'état de préoccupation sérieuse au barrage des Bouillouses. Une action n'est engagée au barrage de Vinça que lorsque la rupture du barrage des Bouillouses est constatée. L'action est définie en fonction du niveau de la retenue et de la simultanéité d'une crue ou non.

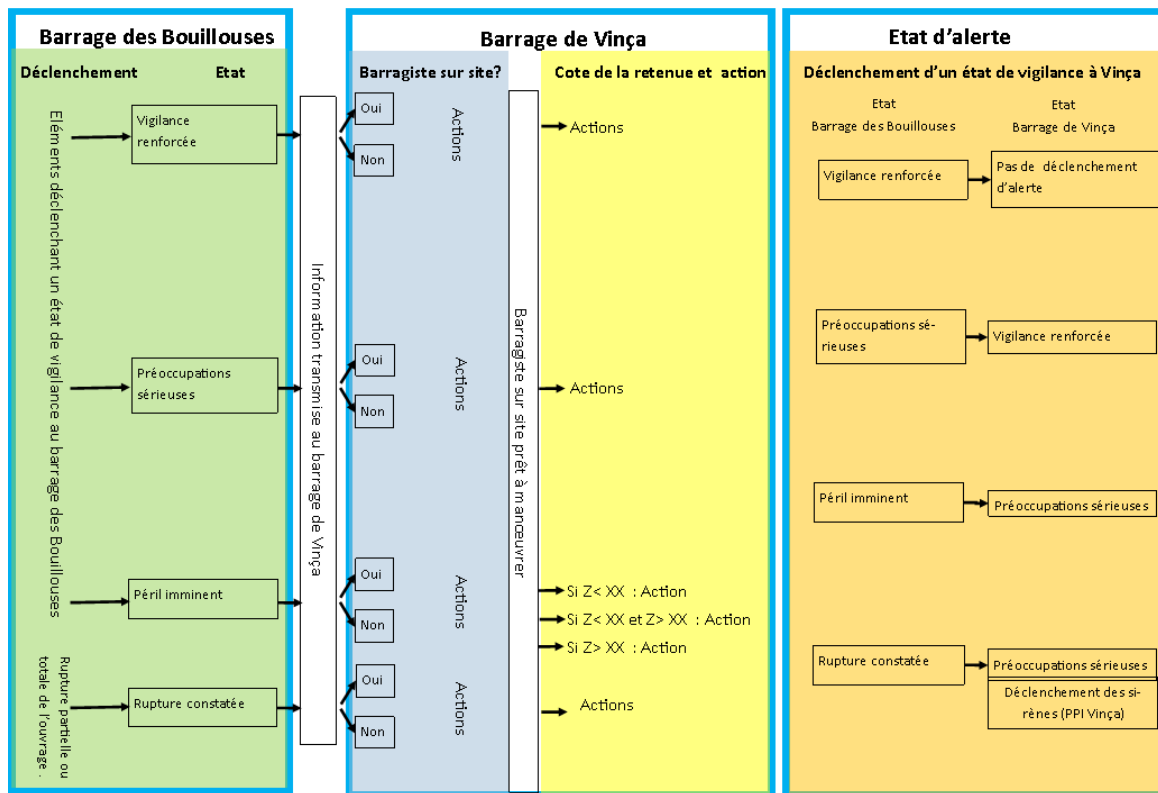


Figure 8 : Principe de logigramme à mettre en place

Concernant l'aménagement de Vinça il convient de valider conjointement ce logigramme avec le barrage amont afin de s'assurer que l'information de l'état de crise du barrage est rapidement communiquée au barrage aval en particulier en cas de rupture de l'ouvrage. L'information doit être transmises sans délais.

5. LES SUITES A DONNER

Une fois, ce travail de définition de mesures de réduction de risques achevé et approuvé par les deux maîtres d'ouvrages, il conviendra de remettre en conformité les documents régissant cet état de crise à savoir le PPI de chacun des ouvrages et les consignes de crises de chacun des ouvrages.