

## MODELISATION DES SCENARIOS DE DEFAILLANCE LIES A UNE VIDANGE RAPIDE DU BIEF SUR LES BARRAGES LATERAUX DE LA CNR

### *Modelling failure scenarios of Rhône River embankment dams related to sudden drawdown of the reservoir*

Hélène CHAPUIS, Christophe PICAULT, Jérémy MEYNET, Aurélie JOUVE  
CNR, Compagnie nationale du Rhône, 2 Rue André Bonin 69316 LYON Cedex 04  
[h.chapuis@cnr.tm.fr](mailto:h.chapuis@cnr.tm.fr)

Rémi BEGUIN  
ISL Ingénierie, LYON  
[beguin@isl.fr](mailto:beguin@isl.fr)

## MOTS CLEFS

Stabilité, barrages latéraux, talus amont, vidange rapide, Rhône, étude de danger

## KEY WORDS

Stability, embankment dams, upstream embankment, sudden drawdown, Rhône, hazard study

## RÉSUMÉ

*La Compagnie Nationale du Rhône exploite 19 aménagements hydroélectriques le long du Rhône, et gère 400 km de barrages latéraux en remblais, dont la charge hydraulique permanente est comprise entre 5 et 20 mètres.*

*Dans le cadre de la justification de ses ouvrages en remblais vis-à-vis d'une vidange rapide des biefs, la CNR a mené une étude visant à appréhender la stabilité des talus amont de ses barrages latéraux en fonction de la vitesse d'abaissement du plan d'eau et de l'amplitude de cet abaissement.*

*La première version des EDD présentait les conditions de dimensionnement initiales des ouvrages CNR vis-à-vis de cette sollicitation (2 mètres d'abaissement instantané du plan d'eau), mais sans rattacher cette condition à un scénario particulier.*

*Les recommandations CFBR d'octobre 2015 relatives à la stabilité des ouvrages en remblais identifient, pour la situation de vidange rapide, les deux scénarios à prendre en compte : une rupture de digue ou une fausse manœuvre d'un ouvrage hydraulique.*

*Dans le cadre de la seconde version des EDD, la CNR a donc entrepris d'analyser l'ensemble des scénarios d'exploitation susceptibles d'engendrer un abaissement rapide de plan d'eau : brèche dans un barrage latéral, rupture d'une vanne de barrage, ouverture intempestive d'une vanne de barrage. Cette analyse a conduit à retenir différents scénarios dont les plus pessimistes en termes de vitesse d'abaissement et en termes d'amplitude d'abaissement sont les suivants :*

- Gradient de 20 cm/minute sur une hauteur d'1 mètre*
- Hauteur de 4 mètres à un gradient de 1,66cm/minute*

*Une simulation Plaxis en transitoire des écoulements internes dans le barrage et sa fondation a été établie pour ces scénarios. Les champs de contraintes hydrauliques obtenus ont été intégrés dans le logiciel Talren afin d'établir un coefficient de sécurité vis-à-vis du glissement de talus amont.*

*Les scénarios et cette méthode d'analyse ont été appliqués sur différents types de barrages latéraux :*

- Barrages munis d'une recharge amont drainante en graviers de pente 3H/1V, à noyau très perméable (graviers) ou noyau peu perméable (limons)*

- Barrages munis d'un perré amont en dalles béton de différentes pentes (3H/2V ; 2H/1V) et de constitution de corps de digue variable (graviers ou limons), fondées sur matériaux alluvionnaires ou sur substratum marneux selon le cas.

Les conclusions de l'analyse sont présentées sous la forme d'une étude paramétrique dans laquelle les coefficients de sécurité au glissement amont sont fonction de la vitesse d'abaissement et de l'amplitude d'abaissement.

## ABSTRACT

The Compagnie Nationale du Rhône operates 19 hydroelectric facilities along the Rhône River and manages 400 km of lateral embankment dams, with a permanent hydraulic load ranging from 5 to 20 meters.

In the context of justifying its embankment structures stability regarding rapid drawdown of the reservoirs, CNR conducted a study to understand the stability of the upstream slopes of its lateral dams based on the rate of water level lowering and the extent of this lowering.

The first version of the hazard studies carried out ten years ago presented the initial design conditions of the CNR structures with respect to this stress (2 meters of instantaneous water level lowering), but without linking this condition to a particular scenario.

The CFBR recommendations of October 2015 dedicated to the stability of embankment structures identify, for the situation of rapid drawdown, the two scenarios to be considered: an embankment breach or a false operation of an hydraulic structure like the unintended opening of a gated dam.

In the second version of the hazard studies, CNR therefore undertook to analyse all the operating scenarios that could lead to a rapid lowering of the water level: breach in a lateral dam, failure of a dam gate, unintended opening of a dam gate. This analysis led to the selection of various scenarios, the most pessimistic in terms of lowering speed and extent being the following:

- A gradient of 20 cm/minute over a height of 1 meter
- A height of 4 meters at a gradient of 1.66 cm/minute

A Plaxis simulation of the transient internal flows in the dam and its foundation was established for these scenarios. The obtained hydraulic stress fields were integrated into the Talren software to establish a safety coefficient against upstream slope sliding. The scenarios and this analysis method were applied to different types of embankments built along the Rhône River:

- Embankment equipped with a draining upstream layer made of gravel with a slope of 3H/1V, that covers a very permeable core (gravel) or a less permeable core (silts)
- Embankment equipped with an upstream facing in concrete slabs with different slopes (3H/2V; 2H/1V) and varying core constitution (gravel or silts), founded on alluvial materials or on a marly substratum.

The conclusions of the analysis are presented in the form of a parametric study in which the upstream sliding safety coefficients are a function of the lowering speed and extent.

## 1. CONTEXTE ET ENJEUX

L'Arrêté Technique Barrage (arrêté du 6 août 2018 fixant les prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages) demande dans son chapitre V relatif aux événements et incidents exceptionnels l'étude, pour les barrages en remblais aux capacités de drainage limitées, d'une situation transitoire de vidange pour laquelle il est nécessaire de vérifier l'état limite de stabilité du talus amont.

Les recommandations CFBR (recommandations pour la justification des barrages en remblai, octobre 2015) précisent que cette situation rare à exceptionnelle va correspondre, pour les barrages latéraux, à un scénario de vidange du bief faisant suite à une rupture de l'endiguement ou à la fausse manœuvre d'un ouvrage hydraulique.

L'étude menée par CNR a porté une vision plus large en analysant l'ensemble des événements susceptibles de générer un abaissement rapide de plan d'eau. Ces événements sont listés ci-après, avec les justifications quant à leur prise en compte comme événement initiateur d'un abaissement rapide ou non :

- Une augmentation transitoire (sous forme d'onde) des niveaux d'eau en amont de l'usine. Ce phénomène d'intumescence (ordre de grandeur 1 à 2 mètres), associé à des déclenchements d'usine notamment, est transitoire (de l'ordre de la minute) ; il ne permet pas une saturation de la digue (plusieurs heures sont nécessaires pour atteindre une saturation de la clé amont en faisant l'hypothèse d'une perméabilité de  $10^{-4}$  m/s et une épaisseur de 4 m). Le phénomène n'a donc pas d'incidence sur la stabilité de l'ouvrage. De plus, les récents essais de déclenchement réalisés à Montélimar (2021) et Bourg-lès-Valence (2015) n'ont pas révélé de dégradation du talus amont des digues.
- L'ouverture intempestive de plusieurs vannes du barrage : cette ouverture sera dans tous les cas séquentielle (les automates de pilotage et l'énergie disponible ne permettent pas l'ouverture de toutes les vannes simultanément) et avec un gradient bien inférieur à celui rencontré lors de la rupture d'une vanne, en lien avec le temps de manœuvre pas à pas.
- La rupture instantanée de plusieurs vannes du barrage : en cas par exemple d'exhaussement du plan d'eau au-delà de la cote de dimensionnement des vannes, la rupture de plusieurs organes est extrêmement peu probable : le risque principal est la rupture de la vanne la plus sollicitée et/ou fragile dans cette configuration hydraulique et cette rupture conduirait à une baisse du niveau amont et une augmentation du niveau aval qui permettra de réduire la charge sur les autres vannes.
- La rupture d'autres organes mécaniques à l'usine (par exemple : vanne déchargeur ou évacuateur de corps flottants, porte des écluses). En cas de rupture, le sur-débit aval serait faible, en lien avec les dimensions de ces organes, de l'ordre du débit d'un groupe de production. Il ne provoquerait donc pas d'abaissement rapide significatif du plan d'eau dans le canal.
- La rupture instantanée d'une vanne de barrage a été retenue comme un événement susceptible d'engendrer une baisse rapide du plan d'eau amont,
- La formation d'une brèche dans l'endiguement à la suite d'un phénomène d'érosion interne ou d'un glissement a également été retenu comme événement initiateur d'un abaissement rapide du plan d'eau.

## 2. FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE ET SPECIFICITES DES AMENAGEMENTS CNR

Les barrages latéraux de la CNR le long du Rhône ont été édifiés avec les matériaux issus du terrassement du canal. Il y a principalement des alluvions sablo graveleuses, et localement une couche d'épaisseur plurimétrique de limons déposés sur ces alluvions. Il s'ensuit que le corps des barrages latéraux est constitué soit de sables et graviers, soit de limons, en fonction de la nature des matériaux trouvés lors de la réalisation du canal.

Les ouvrages sont ainsi constitués en grande partie de matériaux perméables à peu perméables, et sont fondés sur des alluvions, également perméables.

Les concepteurs ont donc mis en place en pied aval un épaulement en sables et graviers non compactés, simplement déversés, destiné à drainer les eaux qui percolent au travers de l'ouvrage. Cet épaulement est notoirement plus épais sur les barrages dont le corps est en graviers, en lien avec les débits de percolation attendus, bien plus élevés que les débits percolants au travers des corps de barrage constitués de limons.

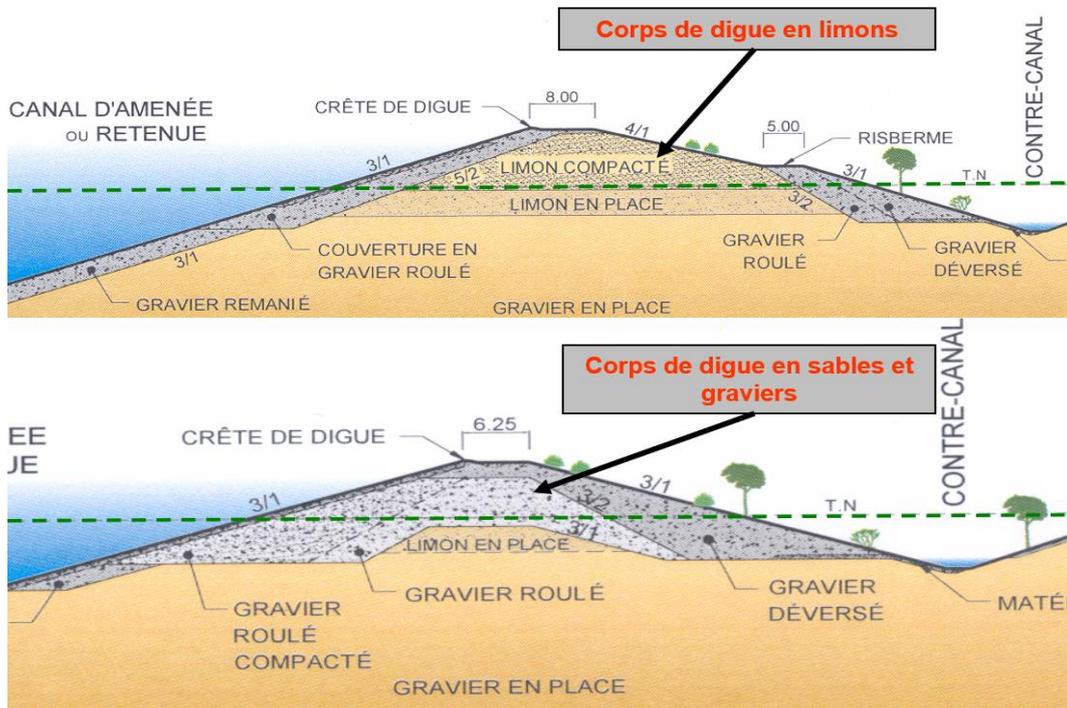


Figure 1 : Profils types des barrages latéraux du Rhône, corps en limons (en haut) ou en graviers (en bas)

En talus amont des barrages, les concepteurs ont disposé un massif en sables et graviers. Il a plusieurs fonctions, dont celles :

- De drainer les eaux contenues dans le corps de l'ouvrage en cas d'abaissement rapide du plan d'eau,
- D'apporter une résistance mécanique vis-à-vis du glissement pour les barrages dont le corps est constitué de limons.

Ce massif amont en sables et graviers est nettement plus épais au droit des barrages à corps limoneux (épaisseur de 4 m ou plus, comptée horizontalement) comparativement au massif amont lorsque le corps du barrage est en graviers.

Enfin, le talus amont est couvert d'une protection de nature variable (enrochements, bitume, béton) vis-à-vis des actions du courant et/ou du batillage.

### 3. NOTE D'HYPOTHESES

Les hypothèses à définir pour l'établissement des calculs de stabilité à la vidange rapide du talus amont des endiguements concernent les aspects suivants :

- Vitesse d'abaissement et niveaux d'abaissement en fonction de l'analyse des différents scénarios de rupture/défaillance.
- Géométrie des ouvrages.
- Caractéristiques hydrauliques et géotechniques des matériaux constituant la digue et sa fondation.

#### 3.1. Détermination du gradient hydraulique (vitesse d'abaissement) et niveau d'abaissement

Le choix de la vitesse d'abaissement et du niveau d'abaissement a été effectué sur la base à la fois d'une analyse des REX et données historiques et de modélisations hydrauliques récentes de différents scénarios de rupture et de défaillance.

## Analyse du REX historique

Une note d'archive de 1980 intitulée « Stabilité d'une recharge amont en condition non drainée pour Belley » indique que des désordres sont apparus sur les aménagements de Baix-Logis Neuf et Beauchastel pour des talus de pente 2H/1V, pour une amplitude de vidange de 1 à 2 m et une vitesse d'abaissement de 40 cm/min (actions de déclenchements/réenclenchements répétés des groupes sans compensation au barrage, opération rendue impossible désormais par les automates de sécurité). La note précise également qu'aucun des talus dressés à 3/1 n'a été dégradé du fait de cette vidange rapide.

Dans ce même document, il est mentionné qu'un essai sur modèle grandeur nature a été réalisé avec les matériaux du site de Belley en condition de « vidange lente » 10 cm/min et de vidange rapide 40 cm/min sur des amplitudes de 2 et 4 m dans le cadre de la conception de l'aménagement.

## Modélisation hydraulique 2022 de scénario de rupture et de défaillance entraînant une vidange rapide

Suite à l'étude des différents événements susceptibles d'engendrer un abaissement rapide du plan d'eau, les deux scénarios suivants ont été retenus et analysés au moyen d'une modélisation hydraulique pour le cas d'une vidange rapide :

- Rupture instantanée d'une vanne du barrage.
- Brèche dans l'endiguement par érosion interne / glissement.

Les scénarios d'abaissement rapide sur les aménagements de Pierre-Bénite, Donzère et Belley ont notamment été modélisés, via le modèle hydraulique Crue 1D. Il s'agit d'un modèle d'écoulement à surface libre du linéaire du Rhône, modèle hydrodynamique unidimensionnel, ramifié (plusieurs entrées et plusieurs sorties) et maillé (résolution d'écoulement concurrents à l'intérieur du modèle), utilisant des lois d'ouvrages sur le linéaire (seuils, barrages régulés, ...) et recourant aux équations de Saint Venant et Manning Strickler. Le modèle est donc adapté à la détermination du gradient d'abaissement du plan d'eau sous événement imposé (rupture de vanne ou brèche sur une digue).

Les hauteurs et vitesses d'abaissement du niveau d'eau au droit des profils concernés ont été calculées et comparées pour définir les situations les plus pénalisantes utilisées dans la suite de l'étude.

### Rupture d'une vanne du barrage de Donzère :

Le barrage de Donzère possède 6 vannes : 5 vannes larges de 31 m et une 6ème large de 45 m (la plus large de tous les aménagements CNR). La hauteur d'eau initiale en amont du barrage est de l'ordre de 9,50 m.

La rupture de cette vanne est modélisée de façon quasi-instantanée (moins de 5 min, durée minimale possible pour garantir la stabilité des calculs dans le cadre du modèle hydraulique de Donzère). La rupture provoque un abaissement de la cote amont barrage de 1 m en 5 minutes (environ 20 cm/min). Le niveau d'eau décroît ensuite plus lentement selon une vitesse moyenne de 1,66 cm/min.

### Rupture d'une vanne du barrage de Saint-Pierre-de-Bœuf :

Le barrage de Saint-Pierre-de-Bœuf (aménagement de Péage-de-Roussillon) possède 6 vannes larges de 20 m (ce qui constitue la largeur moyenne des vannes segments des ouvrages CNR). La hauteur d'eau maximale devant les vannes est de 11,50 m (ce qui constitue la hauteur d'eau moyenne devant les vannes des barrages mobiles CNR).

La rupture est modélisée de façon quasi-instantanée (1 min pour la stabilité du modèle hydraulique de Péage). La rupture provoque un abaissement immédiat du niveau d'eau amont barrage de 40 cm dans les 5 premières minutes (8 cm/min), puis un abaissement suivant une vitesse plus lente d'environ 1 cm/min.

### Rupture d'une vanne du barrage de Lavours :

Le barrage de Lavours (aménagement de Belley) possède 4 vannes larges de 18 m (largeur minimale des vannes sur le Rhône). La hauteur d'eau en amont de l'ouvrage est de 8,50 m (frange basse des hauteurs d'eau à l'amont des barrages au fil de l'eau du Rhône).

La rupture quasi-instantanée d'une vanne conduit à un abaissement de 30 cm en 5 min (6 cm/min), puis plus lentement suivant un gradient de 1,35 cm/min ensuite.

Brèche dans les endiguements :

L'abaissement du niveau d'eau est plus constant lorsque celui-ci est lié à la simulation d'une brèche dans les endiguements : en effet, celle-ci est réalisée en 1h, alors que la rupture d'un ouvrage est considérée comme quasi-instantanée.

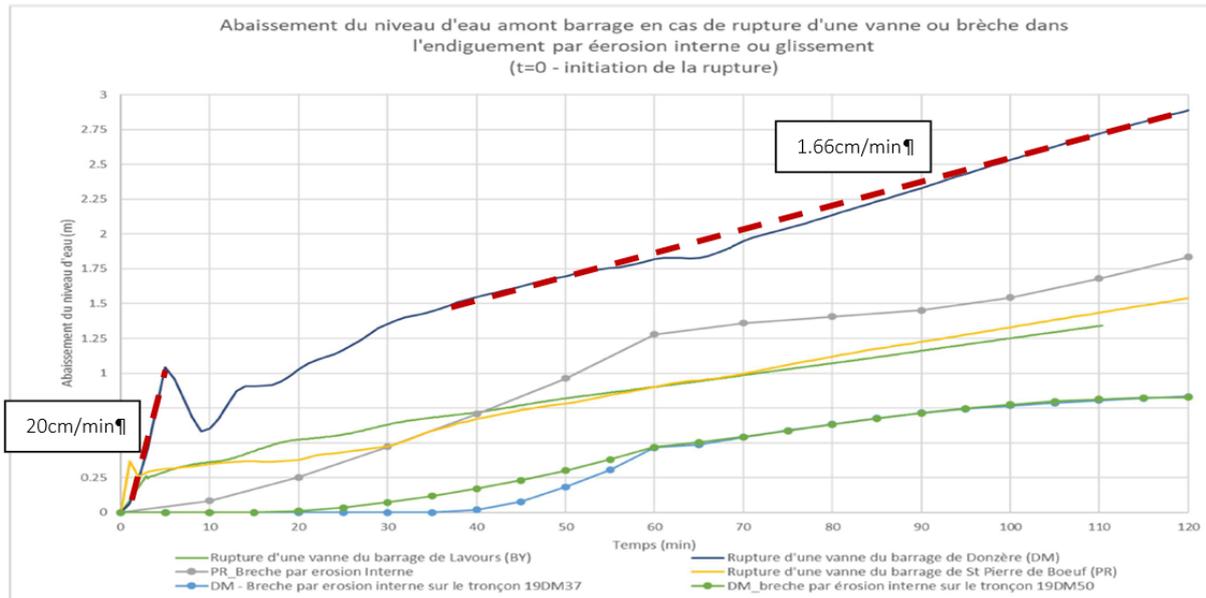


Figure 2 : Abaissement du niveau d'eau amont barrage en cas de rupture d'une vanne, ou en cas de brèche dans les scénarios d'érosion interne, pour les aménagements de Donzère, Belley et Péage-de-Roussillon

Gradient et hauteur d'abaissement retenus :

À l'issue d'une étude préliminaire basée sur les gradients issus d'une enquête historique d'une part (13cm/h et 40cm/min) et les gradients obtenus par la modélisation d'événements hydrauliques initiateurs (cf figure ci-dessus), deux gradients enveloppe issus de la modélisation de 2022, ont été retenus :

- Le premier pic représente un abaissement de 1 m avec une vitesse de 20 cm/min ;
- Le plateau qui suit, représente une vitesse de 1.66 cm/minute, qui a été considéré pour un abaissement de 4 m (valeur obtenue sur une durée plus longue de simulation).

La cinétique d'ouverture d'une brèche étant bien inférieure à l'effacement instantané d'une vanne de barrage, les gradients d'abaissement de plan d'eau générés sont plus faibles.

### 3.2.Géométrie des ouvrages et hypothèses hydrauliques et géotechniques des matériaux

Digues « classiques »

Les digues « classiques » correspondent aux digues graviers et digues limons. Une analyse de la représentativité de ces 2 types d'endiguements avec une pente de talus amont au plus égale à 3H/1V montre qu'ils correspondent à plus de 93 % du linéaire des endiguements CNR.

La pente du talus amont est prise égale à 3H/1V.

Prise en compte de la protection amont

L'effet stabilisateur de la couche d'enrochements est négligé. La couche d'enrobés a également été négligée.

L'épaisseur de la recharge en graviers prise en compte est de 4 mètres de largeur (comptée horizontalement) pour les digues limons.

Deux hypothèses sont prises sur la perméabilité du gravier et également sur celle du limon.

Les hypothèses détaillées sont récapitulées dans le tableau ci-dessous :

		P1 : Digue en gravier		P2 : Digue en limon avec recharge		
		Gravier K1	Gravier K2	Limon K1	Limon K2	Recharge
<b>Densités</b>						
yd	kN/m <sup>3</sup>	19	19	21	21	19
ys	kN/m <sup>3</sup>	26	26	26	26	26
n		0.269	0.269	0.192	0.192	0.269
indice des vides		0.368	0.368	0.238	0.238	0.368
ysat	kN/m <sup>3</sup>	21.6	21.6	22.9	22.9	21.6
yw	kN/m <sup>3</sup>	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81
<b>Perméabilités</b>						
Kh	m/s	1.00E-03	1.00E-04	2.00E-07	1.00E-08	3.00E-04
Kv	m/s	5.00E-04	5.00E-05	1.00E-07	5.00E-09	3.00E-04
Anisotropie Kh/Kv		2	2	2	2	2
Courbe rétention		"Coarse"	"Coarse"	"Medium"	Medium fine	"Coarse"
<b>Mécanique</b>						
φ'	°	35	35	25	25	35
c'	kPa	0	0	0	0 puis 7	0

Figure 3 : Tableau des caractéristiques mécaniques et hydrauliques retenues pour les matériaux constituant les digues graviers et limons

### Digues « atypiques »

Ces digues atypiques représentent au plus 30 km environ des endiguements CNR (soit moins de 6 % du linéaire). Il peut s'agir de digues plus étroites, recouvertes d'une carapace béton ou maçonnée.

Plusieurs profils, représentatifs de la variabilité ces digues atypiques, ont été retenus. Le choix des profils a été fait de manière à disposer de différentes pentes de talus amont (3H/2V ou 2.5H/1V en partie haute et 3H/2V ou 2H/1V en partie basse), ainsi que de différentes configurations du drainage en fondation de l'ouvrage notamment.

On présentera dans ce qui suit la digue de l'Ouvèze qui a par exemple fait l'objet d'une modélisation :

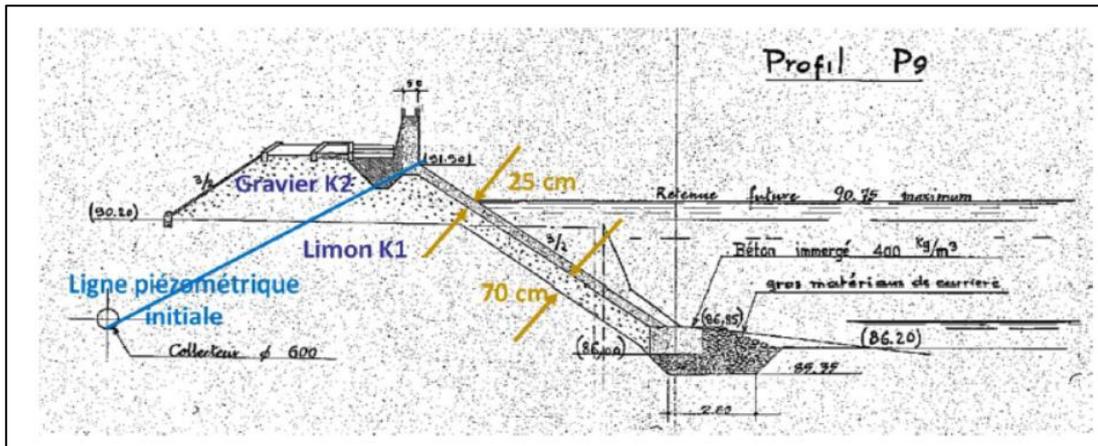


Figure 4 : Géométrie retenue pour la digue type Ouvèze avec une pente de talus amont à 3H/2V

Pour cette configuration, 2 types de fondations (argile ou sables et graviers) ont été considérées compte tenu du contexte local (variabilité des matériaux de fondation).

## 4. METHODOLOGIE

### 4.1. Méthodologie générale et synthèse des cas principaux étudiés

La méthodologie retenue est une modélisation non couplée : d'abord une modélisation transitoire purement hydraulique, puis une modélisation à la rupture mécanique. Ce choix correspond aux recommandations CFBR, qui indiquent que cette méthodologie est considérée comme sécuritaire dans la majorité des cas. Elle a l'intérêt de prendre en compte explicitement le drainage de l'ouvrage pendant la vidange et sa dépendance à la perméabilité des sols.

En l'absence de sols particulièrement compressibles ou imperméables, la réalisation d'une modélisation couplée hydraulique/mécanique n'a pas été jugée nécessaire, sachant par ailleurs que son résultat aurait été dépendant des hypothèses de rigidité des sols retenues.

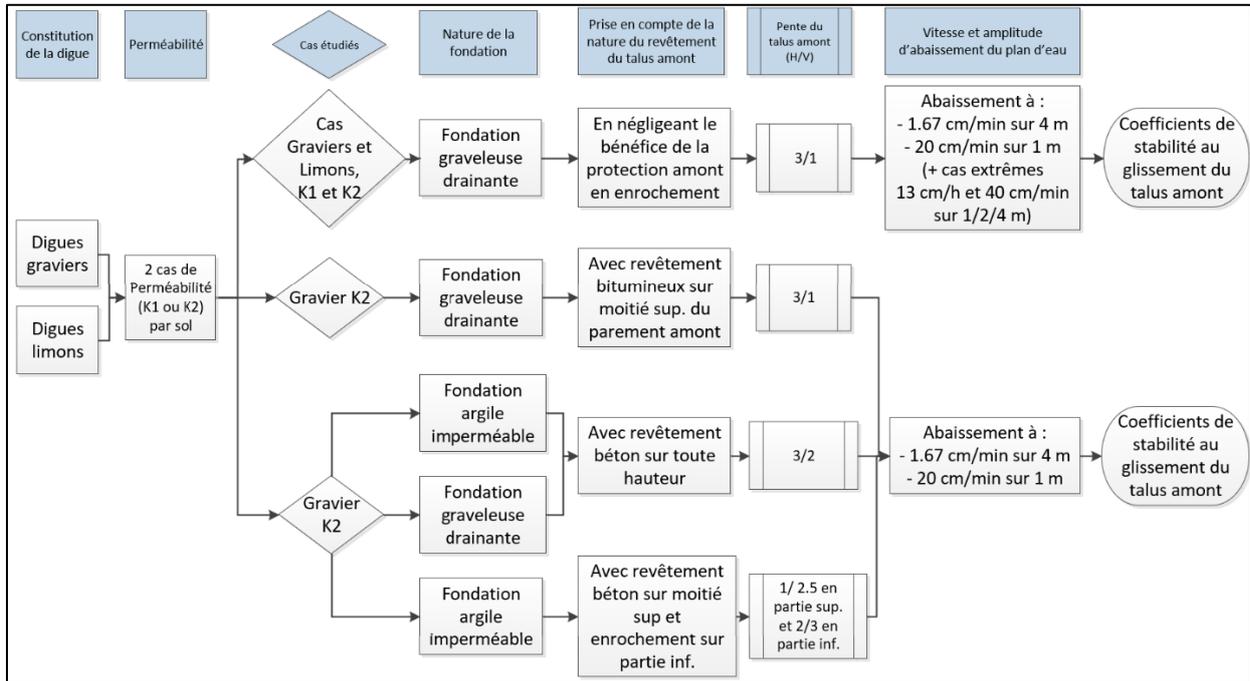


Figure 5 : Synoptique global des cas étudiés

#### 4.2. Modélisation hydraulique

La modélisation hydraulique a été réalisée à l'aide du logiciel Plaxis.

Dans une première phase, une modélisation est réalisée pour identifier un état stationnaire des écoulements pour un niveau d'eau du Rhône théorique en limite de surverse.

Ensuite une modélisation transitoire est réalisée pour déterminer le champ de pression au cours de la vidange, pour les hypothèses de vitesses d'abaissement et de niveaux d'abaissement retenus dans les hypothèses hydrauliques.

Le maillage retenu ainsi que les conditions aux limites sont illustrés sur la figure ci-dessous :

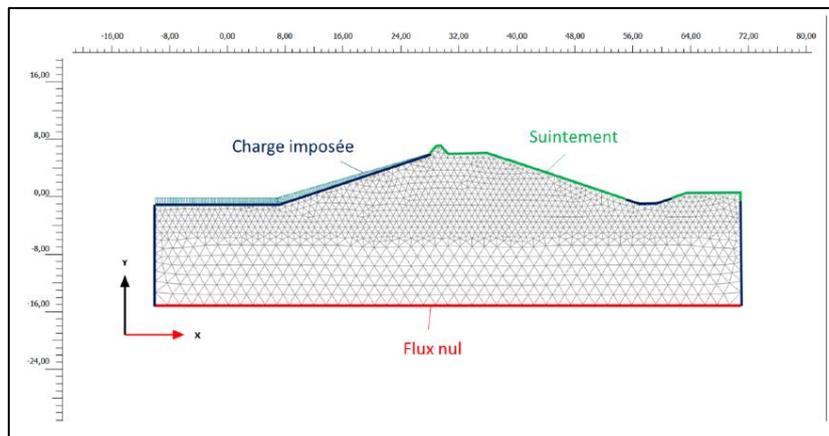


Figure 6 : Maillage et conditions aux limites retenus pour la modélisation hydraulique

Le choix du maillage a été établi à la suite d'une étude de sensibilité. Le maillage de 2000 éléments a donc été retenu, permettant un bon compromis entre temps de calcul et précision.

Les conditions aux limites sont une charge hydraulique imposée en talus amont (7 à 8 mètres) et sur le contre-canal (1m).

La Figure 7 présente pour illustration les champs de pression obtenus pour les digues graviers, l'étude préliminaire initiée avec deux gradients extrêmes : 13cm/h correspondant aux Directives d'exploitation et 40cm/min, gradient mentionné dans l'analyse du REX historique. Les résultats sont encadrés par deux cas extrêmes : une quasi-absence de drainage et un drainage complet avec une absence de pressions résiduelles.

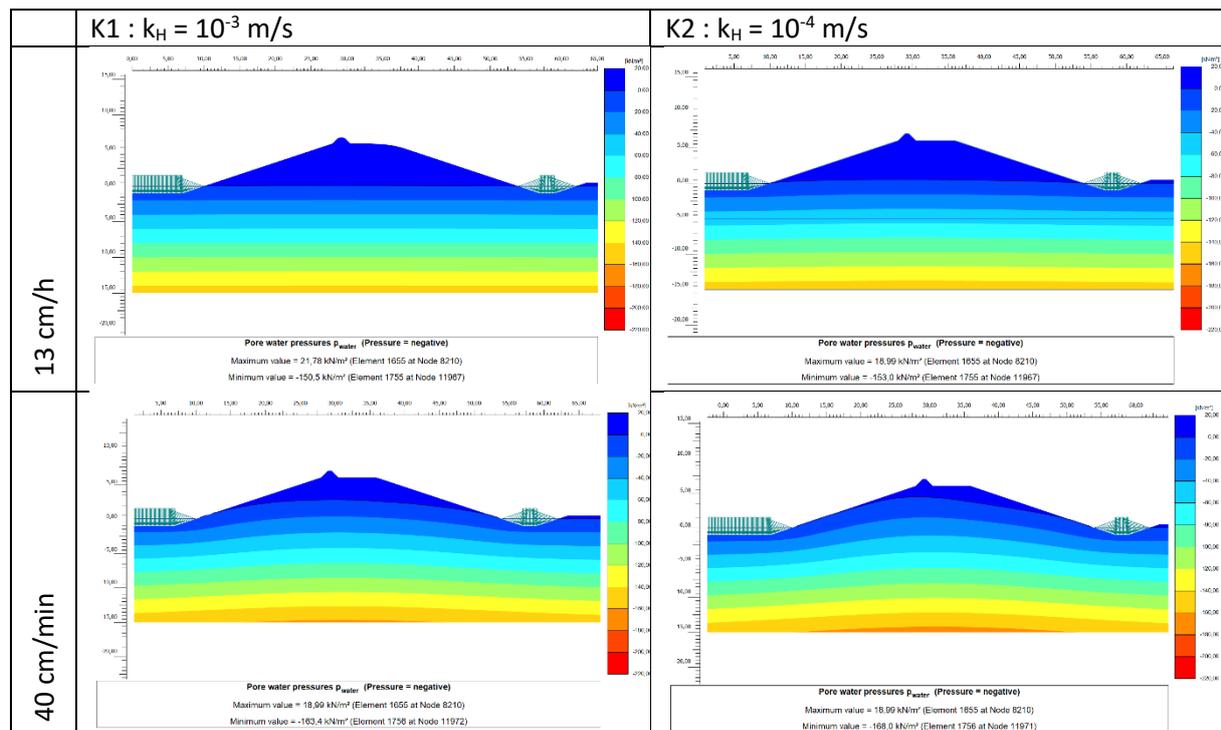


Figure 7 : Comparaison des champs de pression obtenus en fin de vidange pour différentes combinaisons de vitesse d'abaissement et perméabilité : les deux illustrations du haut montrent l'absence de gradient hydraulique dans l'ouvrage quelque soit la perméabilité du remblai. Les deux illustrations du bas montrent l'influence de la perméabilité sur les gradients lorsque l'abaissement est extrêmement rapide (40cm/min) : le dôme piézométrique dans l'ouvrage est accentué lorsque la perméabilité est plus faible (en bas à droite).

### 4.3. Modélisation mécanique

La stabilité mécanique du talus amont est alors évaluée (méthode de Bishop en glissement circulaire au moyen du logiciel Talren) afin de déterminer le facteur de sécurité. Celui-ci est évalué par une méthode traditionnelle (sans prise en compte de coefficient partiel). Le champ de pression interne à la digue, obtenu lors des simulations hydrauliques, est pris en compte dans les calculs de stabilité mécanique.

Le coefficient de sécurité est comparé au coefficient requis en situation rare des recommandations CFBR (à savoir 1.32 en méthode traditionnelle), en l'absence d'analyse probabiliste de l'événement considéré (qui aurait éventuellement pu justifier de l'utilisation d'un coefficient en situation extrême).

Seuls les cercles de glissement recoupant une épaisseur de talus minimale de 1 m sont pris en compte afin de s'affranchir des cercles de peau. En effet, les ouvrages réels disposent d'une protection de surface d'angle de frottement nettement plus élevé (enrochements), ici non modélisée, qui évite que ces phénomènes de peau surviennent. Un exemple de cercle typique est présenté Figure 8.

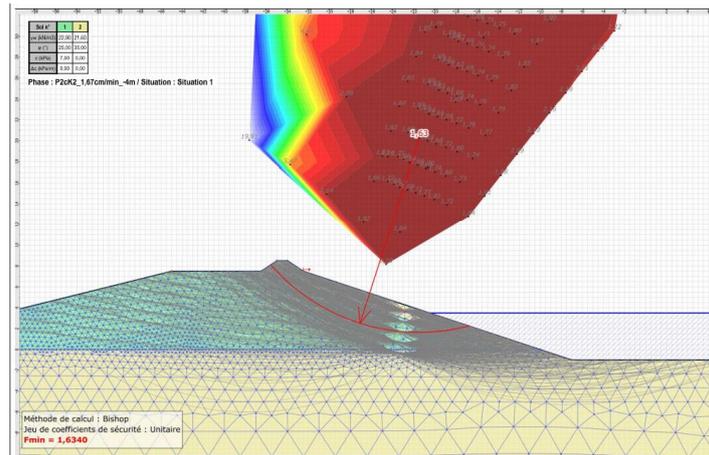


Figure 8 : Cercle critique pour le cas P2cK2 au palier -4 m à 1,67 cm/min, pour le profil limon P2cK2

## 5. RESULTATS - ENSEIGNEMENTS

### 5.1. Résultats pour les digues dites classiques

#### Etude de sensibilité

L'étude de sensibilité concernant la cinétique, l'amplitude de l'abaissement et la perméabilité du corps de digue a clairement mis en évidence la dégradation des Facteurs de Sécurité pour des vitesses plus rapides ou pour des perméabilités inférieures. Les Facteurs de Sécurité sont plus élevés pour la digue gravier, dépassant le FS requis de 1,32 pour tous les cas testés jusqu'à -4 m d'abaissement. Pour la digue limon, l'atteinte des FS requis dépend de la cinétique, de l'amplitude de l'abaissement et de la perméabilité. La stabilité est minimale (c'est-à-dire que le coefficient  $F_s$  est minimal) à -4 m d'abaissement. En cas d'abaissement supplémentaire les cercles interceptent la fondation graveleuse, de résistance mécanique supérieure au noyau limon et donc le coefficient de sécurité  $F_s$  augmente par rapport à sa valeur pour 4m d'abaissement.

#### Hypothèses retenues et coefficients de sécurité obtenus

Les limons et graviers constitutifs des digues du Rhône présentent une variabilité granulométrique le long de la vallée et corrélativement une variabilité de perméabilité. Pour l'hypothèse conservatrice de perméabilité la plus faible ( $K_2 : 10^{-4}$  m/s pour les graviers et  $10^{-8}$  m/s pour les limons) le FS obtenu est supérieur au  $F_s$  minimal requis de 1,32.

Scenarii		FS	
Cinétique (cm/min)	Abaissement (m)	Gravier, $K_2$	Limon $K_2$ , $c'=7$ kPa <sup>1</sup>
20	-1	1,71	1,42
1,67	-4	1,66	1,63

Figure 9 : Résultats en coefficient de sécurité pour les digues graviers et limons pour l'hypothèse basse de perméabilité et les scenarii types d'abaissement.

#### Influence du revêtement bitumineux sur les pressions interstitielles

Un calcul de sensibilité a été mené sur l'influence de l'enrobé bitumineux pour une digue type graviers. Le revêtement quasi étanche engendre une perte de charge et rabat la ligne piézométrique de la situation initiale (stationnaire) de plus d'1 mètre. Pour autant, le drainage des graviers en cours de vidange est toujours possible par la partie basse (non revêtue) du parement amont. Les pressions interstitielles en cours de vidange sont donc finalement inférieures lorsque l'on prend en compte ce revêtement, par rapport au profil de digue gravier classique. Cela a pour conséquence d'améliorer le facteur de sécurité mécanique final.

<sup>1</sup> Pour cette hypothèse de perméabilité, les limons sont supposés très fins et une cohésion de 7 kPa justifiée

## 5.2. Résultats pour les digues atypiques

Pour les digues atypiques, nous présentons ci-après l'exemple de la digue type « Ouvèze ». Outre la présence d'un revêtement en dalles béton en parement amont et d'une pente de talus amont raide (3H/2V), cette digue présente la particularité intéressante pour notre étude d'être fondée pour partie sur des matériaux argileux et pour partie sur des alluvions sablo-graveleuses, ce qui correspond à deux capacités de drainage en fondation très différentes.

La résistance des dalles béton a été traduite sous la forme d'une valeur de cohésion prise égale à 90 kPa.

Les deux tableaux ci-après présentent les résultats obtenus :

Scenarii		FS
Cinétique (cm/min)	Abaissement (m)	Profil avec dalle béton, assise en argile, Et $c'_{\text{béton}} = 90 \text{ kPa}$
20	-1	1,62
1,67	-4	1,20

Figure 10 : Résultats en coefficient de sécurité pour la digue de l'Ouvéze en considérant un sol d'assise en matériaux argileux

Scenarii		FS
Cinétique (cm/min)	Abaissement (m)	Profil avec dalle béton, assise en graviers, Et $c'_{\text{béton}} = 90 \text{ kPa}$
20	-1	1,93
1,67	-4	1,43

Figure 11 : Résultats en coefficient de sécurité pour la digue de l'Ouvéze en considérant un sol d'assise sablo-graveleux

On constate un gain de sécurité lorsque le sol d'assise est drainant, notamment pour les grandes amplitudes d'abaissement de plan d'eau (coefficient de sécurité de 1.20 en cas d'assise argileuse non drainante lorsque l'abaissement atteint 4 m d'amplitude à une vitesse de 1.67 cm/min comparativement à un coefficient de 1.43 pour une assise sablo-graveleuse drainante).

## 5.3. Synthèse

Pour exploiter facilement cette étude générique, un paramètre adimensionnel représentatif des phénomènes a été défini à l'issue de l'étude. Ce paramètre est défini comme le ratio entre la vitesse d'abaissement du plan d'eau et la vitesse de drainage de l'ouvrage (La vitesse de drainage étant estimée par  $V=kh.i$  avec  $kh$  la perméabilité horizontale du noyau de l'ouvrage en m/s et  $i$  le gradient hydraulique au sein de l'ouvrage côté amont). Ce paramètre simple permet d'intercomparer facilement plusieurs profils de barrages latéraux.

Cette étude, prenant en compte des caractéristiques d'ouvrages et de matériaux génériques plutôt sécuritaires (cf. chap. 3.2) à l'échelle de la vallée du Rhône, a permis d'identifier les paramètres intrinsèques qui influencent le plus la tenue au glissement du talus amont en vidange rapide, qui sont au premier ordre : la perméabilité du corps de l'ouvrage et le caractère drainant de sa fondation.

Cette étude démontre que 90 % des digues / barrages latéraux classés B de la CNR restent stables pour ces valeurs de vidange rapide issues des scénarios recommandés par le CFBR, et qu'il n'y a pas de risque de rupture (pour les cas spécifiques des calculs sont réalisés). Ces études sont utilisées dans le Bilan de Conception des EDDs. Pour dépasser ces valeurs d'abaissement et de gradient, et potentiellement impacter la stabilité de nos endiguements, le scénario serait probablement une rupture complète d'un ouvrage béton (barrage de retenue ou barrage-usine). Compte tenu d'une probabilité jugée extrêmement peu probable pour ces scénarios, le risque d'instabilité en cas de vidange rapide est écarté à l'analyse préliminaire des risques des EDD des aménagements CNR (hors cas particulier à recalculer).

## RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] 2009, Alonso Pérez de Agreda, E., & Pinyol Puigmartí, N. M. "Slope stability under rapid drawdown conditions". In First Italian Workshop on Landslides (pp. 11-27).
- [2] 2022, GeophyConsult, « Stabilité de parement amont en cas de vidange rapide », geophy00260BPE041.
- [3] 2020, R. Granjon, « Hypothèses Géotechniques le long de la vallée du Rhône, pour les Etudes de Dangers version 2 ».
- [4] 2002, V. Merrien-Soukatchoff, Y. Gunzburger, « Utilisation des classifications de massifs rocheux pour l'analyse du comportement de pentes. Présentation de deux cas d'application ». Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG 2002, Nancy.