

Mission de maîtrise d'oeuvre pour les travaux de fiabilisation des digues communales de Nevers en rive droite

**Avant-Projet - Annexe 1 : Note de calcul zone de surverse**



**CONSULTING**

SAFEGE  
Parc d'Activités du Champ de la Chaîne  
41 Boulevard du Pré Plantin  
Bâtiment B  
58005 NEVERS Cedex



Direction France Est

SAFEGE SAS - SIÈGE SOCIAL  
Parc de l'île - 15/27 rue du Port  
92022 NANTERRE CEDEX  
[www.safege.com](http://www.safege.com)

# Avant-Projet - Annexe 1 : Note de calcul zone de surverse

Mission de maîtrise d'oeuvre pour les travaux de fiabilisation des digues communales de Nevers en rive droite



	Safège - Parc d'Activités du Champ de la Chaîne 41 Boulevard du Pré Plantin Bâtiment B 58005 NEVERS Cedex
	BRL ingénierie 1105 Av Pierre Mendès-France BP 94001 30001 NIMES CEDEX 5

Date du document	16 Juillet 2021
Contact	VJO / NSI/ JAU

Titre du document	Étude AVP pour le renforcement des digues de Nevers rive droite - Note de calcul zone de surverse
Référence du document :	NA00414_NEVERS_RD_AVP_Annexe1_NDCsurverse
Indice :	0

Date émission	Indice	Observation	Dressé par	Vérifié et Validé par
24/01/2021	0	Première version	AHA / NSI	NSI / JAU

---

## SOMMAIRE

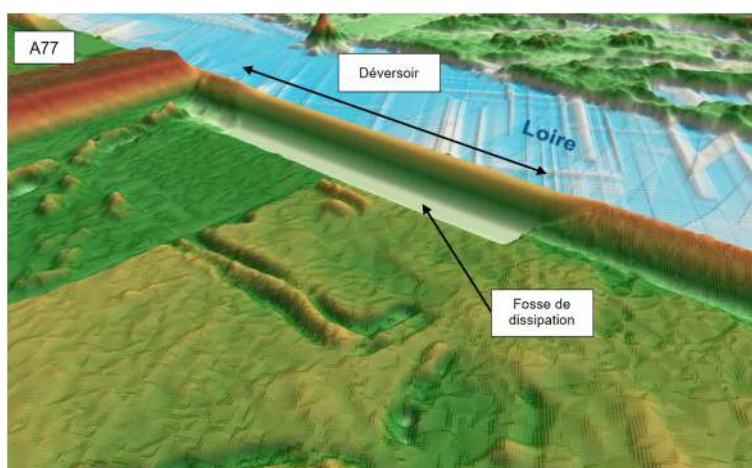
1	Préambule .....	7
2	Principes de conception générale .....	8
2.1	Principes d'aménagement .....	8
2.2	Calage de la zone de surverse Est .....	9
2.3	Critères de conceptions .....	10
2.4	Pérennité de l'ouvrage jusqu'à la crue d'occurrence Q1000 .....	10
2.5	Efficacité hydraulique.....	10
2.6	Traficabilité .....	10
2.7	Optimisation des couts .....	11
3	Conception détaillée .....	13
3.1	Rappel des principes de surverses et ressaut hydraulique .....	13
3.2	Choix du type de protection .....	15
3.3	Détermination des caractéristiques géométriques de la zone de surverse .....	16
4	Conclusion .....	22

## 1 Préambule

Dans le cadre de la mission de maîtrise d'œuvre pour les travaux de fiabilisation des digues communales de Nevers rive droite, Nevers agglomération, dans la continuité d'EGRIAN et des EDD, a confié au groupement SAFEGE/BRLi la réalisation d'études préliminaires relatives à la création de zones de surverse et/ou arasement de certaines portions de levées associées à modification administrative de système d'endiguement.

Ces études, décomposées en plusieurs sous-étapes (Étude hydraulique, Étude du cheminement des eaux, Expertise des stations de pompages et d'une note de synthèse globale) on notamment conduit le maître d'ouvrage à retenir, pour le Val EST, une zone de surverse :

- En aval immédiat des remblais de l'A77
- Calée pour la crue d'occurrence 200 ans (Q200)
- D'une longueur d'environ 200m afin de permettre un remplissage du val en environ 10 heures et un débit de surverse pouvant atteindre 89 m<sup>3</sup>/s



**La présente note de calcul a pour objet de présenter les réflexions et justifications relatives à cette zone de surverse.**

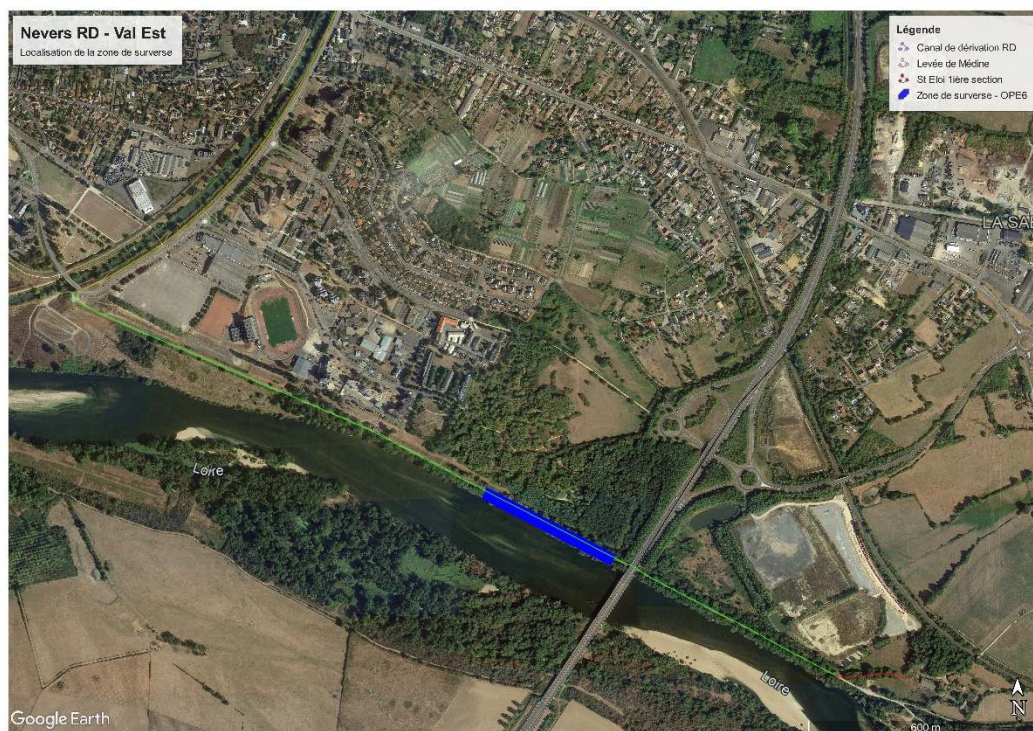
## 2 Principes de conception générale

### 2.1 Principes d'aménagement

L'objet du présent paragraphe est d'étudier la pertinence, les incidences et les conditions de réalisation d'une zone de surverse permettant d'inonder le val Est à partir de Q200. Celle-ci est aménagée sur la levée de Satin Eloi, 2<sup>ème</sup> section, ce secteur se caractérise par :

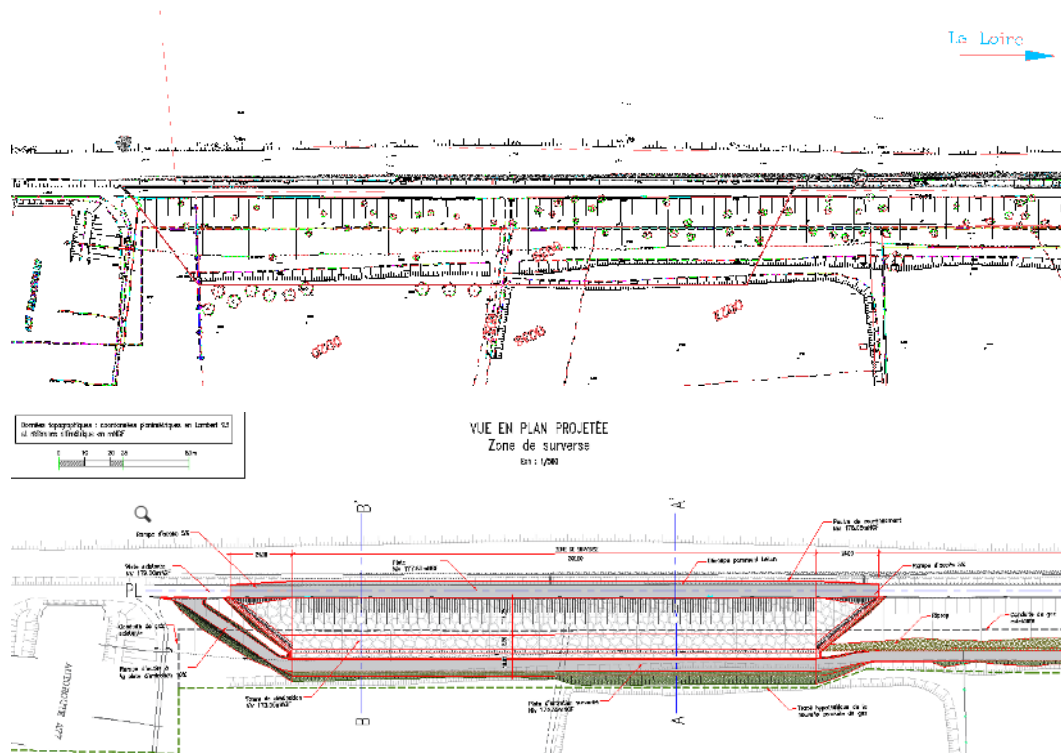
- Un talus côté Loire protégé par un parement béton (en bon état général) et des enrochements en pied
- Une crête aménagée avec un chemin permettant la circulation des piétons et cyclistes
- Un talus côté zone protégée présentant une pente douce avec de l'herbe rase et quelques arbres

La localisation retenue pour réaliser cette zone de surverse est présentée sur l'extrait de carte suivant :



L'emprise retenue pour réaliser cette zone de surverse est présentée sur l'extrait de plan suivant :

Figure 2-1: Emprise de la zone de surverse retenue (extrait de la vue en plan)



## 2.2 Calage de la zone de surverse Est

L'étude de cette zone de surverse a fait l'objet d'études préliminaires et des modélisations spécifiques qui ont conduits aux constats suivants :

- Situé en aval de l'autoroute, afin d'assurer un remplissage efficace du val et ainsi, d'une part la pérennisation du système d'endiguement vis-à-vis du risque d'érosion interne jusqu'à une crue d'occurrence Q500, et, d'autre part, de minimiser le risque de brèche en cas de surverse généralisée, il a été retenu un début de déversement pour un niveau de crue de période de retour  $T = 200$  ans.
- Les dernières modélisations réalisées, prenant notamment en compte les aménagements rive gauche de Nevers et le récent calage de la zone de surverse projetée à Q200, indiquent
  - o que le niveau maximal de la Loire en rive droite, atteint pour une telle crue est de 178.1 m NGF en extrémité amont, 178.08m NGF en extrémité aval et 178.05 m NGF en partie centrale et sur une majorité du linéaire. Dans le cadre des modélisations, la cote de surverse a donc été retenue à 178.05mNGF.
  - o que pour une crue de période de retour  $T = 500$ ans, le niveau en amont de l'ouvrage est, en partie centrale de la zone de surverse, de 178.55 m NGF. Pour une crue de période de retour 1000ans, celui-ci est de 178.83 m NGF.

---

### 2.3 Critères de conceptions

Les critères retenus dans le cadre de la conception de la zone de surverse sont les suivants :

- 1) Garantir la pérennité de l'ouvrage jusqu'à la crue d'occurrence Q1000 qui correspond au niveau des premières surverses ;
- 2) Garantir l'efficacité hydraulique de la zone de surverse afin d'assurer des débits de surverse et, de fait, un remplissage du val à minima équivalent avec les résultats des études préliminaires ;
- 3) Maintenir la traficabilité en crête ;
- 4) Optimiser les coûts.

### 2.4 Pérennité de l'ouvrage jusqu'à la crue d'occurrence Q1000

Afin de vérifier la pérennité de l'ouvrage jusqu'à Q1000, 2 modélisations ont été réalisées à l'aide du logiciel Flow3D. Il s'agit :

- d'une crue d'occurrence Q500,
- et d'une crue d'occurrence Q1000,

Il est précisé que ces modélisations ont été effectuées en considérant en condition aval, par sécurité, un écoulement libre.

### 2.5 Efficacité hydraulique

Afin d'optimiser les conditions d'écoulement, il a été retenu le contrôle de la surverse par la mise en place d'une poutre sommitale.

L'écoulement hydraulique sur le déversoir est ainsi optimisé. En effet, d'un point de vue hydraulique le débit est alors déterminé par une loi de seuil mince.

Il convient de noter qu'usuellement, une attention particulière doit être portée au mode et à la profondeur de fondation de la poutre sommitale pour se prémunir du risque d'écoulement sous celle-ci qui pourrait remettre en cause sa pérennité. Dans le cas de la zone de surverse Est, la poutre sera réalisée dans la continuité du parement béton qui sera soigneusement découpé au préalable. Ainsi nous ne sommes pas concernés par cette problématique de fondation.

Il conviendra néanmoins d'être vigilant sur la nécessité d'étanchéité du contact poutre/parement lors de l'exécution de l'ouvrage.

### 2.6 Traficabilité

Afin de maintenir la traficabilité en crête (véhicule d'entretien, véhicule léger mais aussi PMR) il a été retenu les principes suivants :

- Ne pas réduire la largeur trafficable en crête en positionnant la poutre de couronnement côté Loire ;

- Mettre en œuvre des rampes avec des pentes maximales de 5% ;
- Recouvrir la protection qui sera mise en œuvre en crête d'une épaisseur de 5 à 10cm de clavicette.

### 2.7 Optimisation des coûts

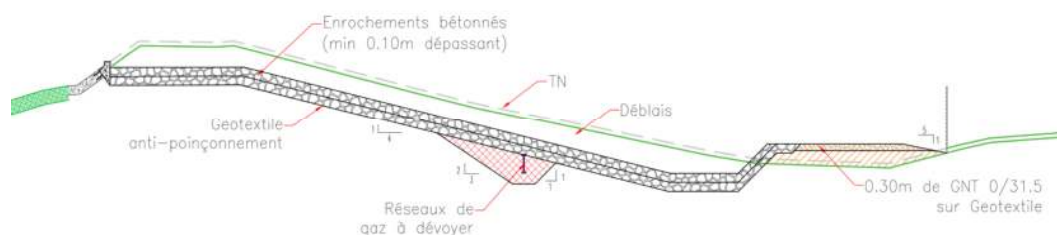
Dans le cadre des réflexions relatives à la zone de surverse Est, il a été recherché à optimiser les coûts d'investissements, d'une part, en privilégiant une solution technique usuelle à la fois pérenne dans le temps et nécessitant peu d'entretien et, d'autre part, en adaptant tant que possible la géométrie projetée aux caractéristiques de l'état actuel.

Le premier point relève des études détaillées présentées au paragraphe 3 ci-dessous.

Concernant le deuxième point, il convient de noter :

- que la pente naturelle du talus sur la zone est de l'ordre de 4H/1V. Ainsi dans un premier temps une pente de 4H/1V a été étudiée.
- que ces ordres de grandeur de pentes excluent les aménagements de type « déversoir en gradins » car ceux-ci induiraient des déblais et des sujétions de chantier très importants ;
- que la présence d'une conduite GRDF, qu'il a été convenu avec le MOA de purger à l'occasion des travaux, a conduit à remettre en cause cette pente prévisionnelle de 4H/1V ;

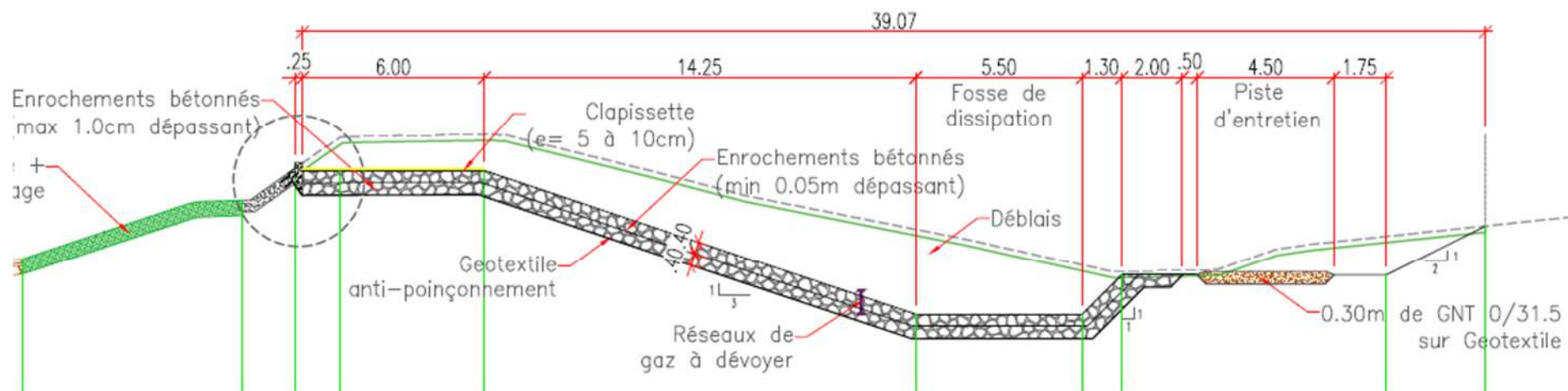
En effet, la profondeur et la localisation de la conduite conduisait ponctuellement à des déblais importants et, de fait, présentait des risques en termes de re-compactage et tassements différentiels.



Ainsi, la pente de 4H/1V n'a pas été jugée pertinente et, afin de supprimer ces risques de déblais/compactage et tassements différentiels, une pente de coursière à 3H/1V a été retenue.



Figure 2-2: Vue en coupe de la zone de surverse



## 3 Conception détaillée

### 3.1 Rappel des principes de surverses et ressaut hydraulique

#### Les forces tractrices

La surverse, c'est-à-dire le débordement de l'eau au-dessus de la digue conduit généralement et rapidement à la brèche des ouvrages en remblais par érosion régressive du talus côté aval puis de la crête.

Ce mécanisme a notamment été étudié par le Cemagref<sup>1</sup> :

- Etape 1 : Début de la surverse, attaque en pied
- Etape 2 : Erosion du pied du talus aval par la force du courant en pied de digue
- Etape 3 : Erosion régressive du talus aval
- Etape 4 : Accélération des désordres par l'apparition de glissements et ouverture d'une brèche
- Etape 5 : la brèche s'élargit en érodant la digue de part et d'autre

La compréhension de ce mécanisme de rupture met en évidence la vulnérabilité notamment du pied des talus avals : les vitesses de courant sont à cet endroit les plus importantes. Les éléments de protection à mettre en place doivent donc résister aux forces tractrices, variables en fonction des vitesses, mises en jeu lors de la surverse.

La force tractrice peut être estimée selon la formule suivante [2]:

$$\tau(N/m^2) = \rho \times i^{1/4} \times K_s^{-3/2} \times v^{3/2}$$

Avec  $\rho$  : poids unitaire de l'eau 10 000 N/m<sup>3</sup>

$i$  : pente du talus (V/H)

$K_s$  : coefficient de Strickler caractéristique de la rugosité du talus

$V$  : vitesse en m/s

La conception des déversoirs et le choix des dispositifs de protection doivent être effectués en tenant compte de cette force.

Le graphique suivant donne, en fonction forces tractrices, les domaines de résistance à l'arrachement de plusieurs revêtements.

---

[1] <sup>1</sup> P.Mériaux, P.Royet et C.Folton ©Cemagref Edition 2004. *Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations. Guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires.*

### Valeurs de résistance à la force d'arrachement

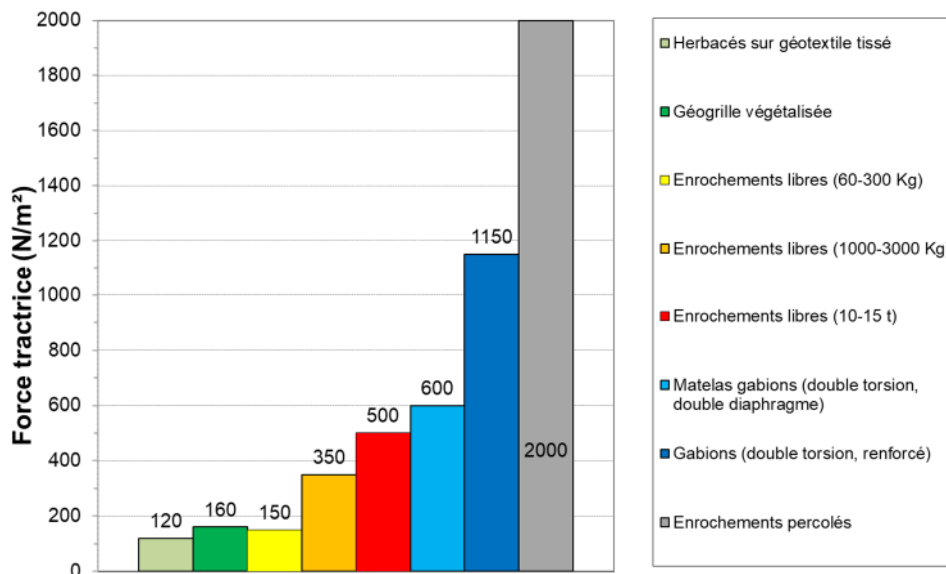
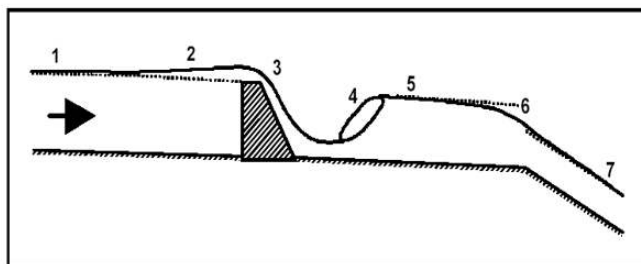


Figure 3-1: Résistance à l'arrachement de divers matériaux

### La dissipation d'énergie

Une autre contrainte apportée par la surverse est la dissipation d'énergie. En effet le passage d'un régime torrentiel (le long du talus) à un régime fluvial (en aval de l'ouvrage) est générateur de fortes perturbations : le ressaut (cf. schémas ci-dessous).



écoulements uniforme, graduellement varié, rapidement varié.

- 1 : uniforme fluvial
- 2 : fluvial graduellement décéléré
- 3 : rapidement accéléré (fluvial puis torrentiel)
- 4 : ressaut
- 5 : uniforme fluvial
- 6 : rapidement accéléré (fluvial puis torrentiel)
- 7 : uniforme torrentiel

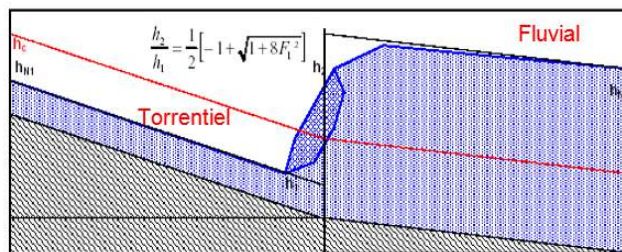


Figure 3-2: Schéma de principe du ressaut hydraulique

Les déversoirs doivent en effet assurer cette fonction pour éviter la propagation des turbulences engendrées par le déversement au-delà de l'ouvrage. Ces turbulences pourraient en effet être à l'origine de désordres qui par érosion régressive pourraient impacter l'ouvrage lui-même.

Cette dissipation d'énergie peut être assurée :

- Sur le talus aval :
  - Soit par la rugosité naturelle des éléments mis en place (enrochements)
  - Soit par la réalisation de jets croisés (gabion ou matelas reno)
  - Soit par des macros rugosité (éléments en saillie),
- En pied de talus par la création d'une fosse de dissipation

Les caractéristiques de l'écoulement sur le déversoir ainsi que le ressaut sont calculés de manière experte, puis modélisés avec un outil de type CFD 3D.

### 3.2 Choix du type de protection

La détermination des vitesses et forces d'entraînement sur les talus peuvent conduire à proposer plusieurs variantes de protection.

Il convient néanmoins de préciser que le dimensionnement de la protection à mettre en œuvre doit être validé par une approche complémentaire. Dans le cas d'une protection en enrochements libres, le diamètre/poids moyen des blocs devra par exemple faire l'objet d'un calcul spécifique et dans le cas d'ouvrages en gabions, un recours à la norme NFP 94-325-2 de novembre 2006 sera nécessaire.

Une rapide première approche 1D a permis de mettre en évidence les ordres de grandeurs suivants :

- Pour Q500 :
  - une lame d'eau de 16cm,
  - des vitesses de 4.3m/s en moyenne dans la section, et des forces tractrices de 540N/m<sup>2</sup> ;
  - un ressaut théorique de l'ordre de 4.2m.
- Pour Q1000 :
  - une lame d'eau de 23cm,
  - des vitesses de 5.5m/s et des forces tractrices de 780N/m<sup>2</sup> ;
  - un ressaut théorique de l'ordre de 6.5m.

**Compte tenu de ces vitesses, la solution de revêtement adapté pour les deux occurrences est la solution en enrochements percolés au béton.**

Il est noté que :

- de par leur rugosité naturelle, si la percolation ne les recouvre pas totalement, les enrochements ont une très bonne capacité de dissipation d'énergie ;
- la percolation permet de réaliser un ensemble monolithique résistant ;
- la percolation présente l'avantage de réduire les contraintes d'entretiens ultérieurs.

### 3.3 Détermination des caractéristiques géométriques de la zone de surverse

Afin de préciser/optimiser :

- la dimension de la fosse de dissipation,
- et l'épaisseur des protections à mettre en œuvre,

Des modélisations ont été effectuées à l'aide du logiciel Fow3D.

#### 3.3.1 Présentation de Flow-3D

Flow-3D© est un logiciel CFD (Computational Fluid Dynamics) développé par Flow Science Inc. Le logiciel approche les solutions numériques des équations différentielles de Navier-Stokes au moyen d'une méthode aux éléments finis et d'une technique VOF (Volume of Fluid) pour calculer la surface libre.

Flow3D© est un des logiciels leader du marché concernant les écoulements à surface libre. Il dispose de nombreux modules et est très utilisé dans l'industrie mécanique (fonderie, peinture, microfluidique...) pour des problématiques complexes faisant appel aux phénomènes de viscosité, de tension superficielle, de gradient thermique, de turbulence, de cavitation, d'entraînement d'air...

Dans ce contexte, les sujets abordés dans le cadre de l'hydraulique traditionnelle à surface libre du monde des ouvrages hydrauliques, apparaissent plus simples : faible influence de la tension superficielle, du facteur thermique ou de la viscosité...

Toutefois, de nombreux modules de calculs ont été spécifiquement implémentés au logiciel pour prendre en compte la problématique liée à l'hydraulique des grands ouvrages (surface libre ou en charge).

Flow-3D© a par ailleurs fait l'objet d'une qualification par le CIH-EDF après dix ans de tests sur modèles physiques et sur le parc d'ouvrages hydrauliques d'EDF.

Flow-3D©, outre le code de calcul diphasique CFD, offre de nombreuses possibilités utiles pour nos métiers :

- Prise en compte d'objets mobiles (vannages, embâcles..),
- Possibilité de mettre des maillages de type 2D (résolvant les équations de Barré de Saint-Venant pour éloigner les conditions limite aval sans grever les temps de calculs),
- Possibilité d'intégrer des pertes de charge singulières au travers de grille,
- Modules de transport solide et d'érosion,
- Gestion des interactions fluide/structure...

#### 3.3.2 Modèles

Les coefficients de rugosité retenus pour le modèle Flow-3D sont les suivants :

- Poutre béton armé calée à 178.05 NGF (correspondant à la cote de surverse pour la crue Q200 pour la majorité du déversoir)

- Crête : enrochements bétonnés assez lisses :  $K_s=40$  (même rugosité que maçonnerie)
- Coursier et fosse de dissipation en enrochements bétonnés (avec enrochements dépassant d'environ 10cm) :  $K_s=25$
- Zone enherbée aval :  $K_s=20$

La logique de dimensionnement du bassin de dissipation a montré que les considérations hydrauliques de ressaut à contenir et d'énergie à dissiper étaient assez peu contraignantes, mais que les considérations d'optimisation des volumes de déblais pour la réalisation de l'aménagement conduisent à une solution de bassin de dissipation légèrement surdimensionné hydrauliquement.

Deux cas ont été considérés :

- celui de la crue de période de retour 500ans (178.55 m NGF),
- et celui d'une crue de période de retour 1000 ans (178.83 m NGF).

La condition limite aval est celle d'un écoulement libre, le TN aval étant fixé à la cote 174.35 m NGF.

D'un point de vue géométrique conformément aux résultats présentés précédemment, il a été modélisé :

- une pente de 3H/1V
- une fosse de dissipation de 5.5m calée à 173.05 m NGF.

### 3.3.3 Résultats

#### Crue Q500

La lame d'eau résultante sur le déversoir est de 18cm ; l'écoulement sur le déversoir s'effectue à une vitesse de 5.7m/s en surface, 4m/s en moyenne sur la profondeur d'eau.

Le débit total est de 138.4 m<sup>3</sup>/s pour 200ml de surverse.

Comme prévu suite à l'approche 1D, ces valeurs de vitesse et les forces tractrices associées (500N/m<sup>2</sup>) confirment la pertinence d'une protection en enrochements bétonnés.

De plus, le modèle 3D montre que le ressaut est de type oscillant et contenu dans le bassin de dissipation.

Celui-ci permet d'absorber ce ressaut avec une bonne marge de sécurité pour la crue Q500.

Figure 3-3: Écoulement sur le déversoir pour une crue de période de retour 500 ans - vitesses

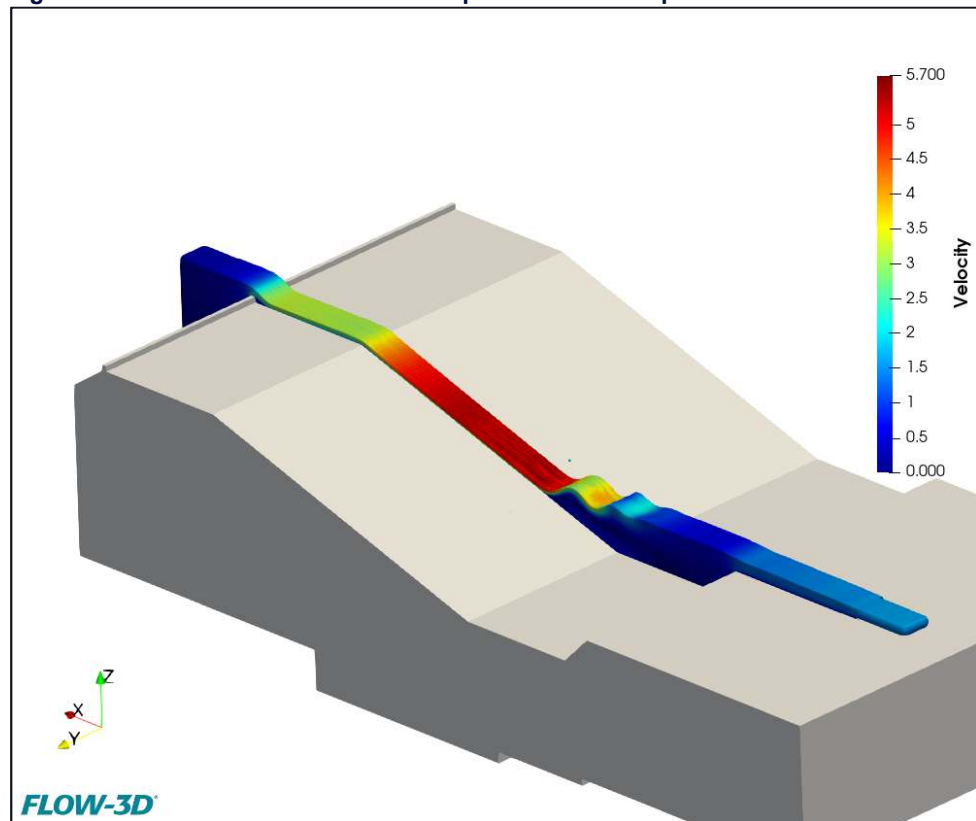
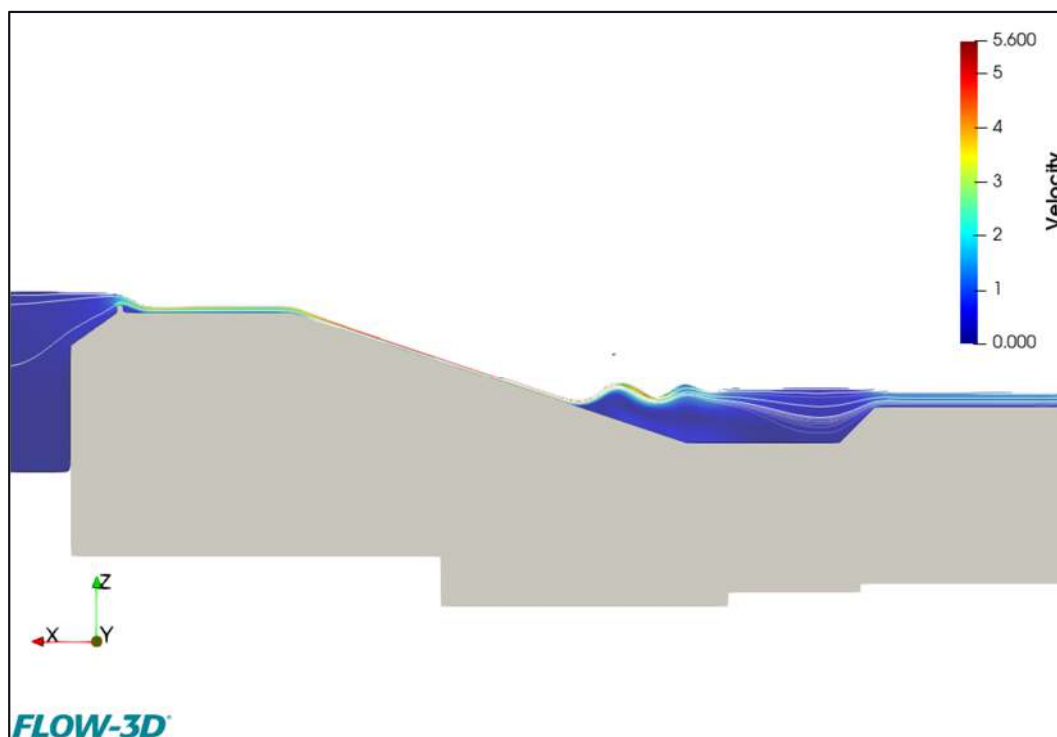


Figure 3-4: Coupe de l'écoulement et ressaut hydraulique oscillant dans la fosse pour une crue Q500 - vitesses



### Crue Q1000

Dans le cas d'une crue Q1000, le débit sur le déversoir est de 257m<sup>3</sup>/s pour les 200m linéaires de déversoir.

Les vitesses maximales sont de 7.5m/s en surface, 5.3m/s en moyenne sur la profondeur de la lame d'eau de 24cm.

Comme prévu suite à l'approche 1D, ces valeurs de vitesse et les forces tractrices associées (740kN/m) confirment la pertinence d'une protection en enrochements bétonnés.

De plus, le modèle 3D montre que le ressaut est de type établi et contenu dans la fosse de dissipation.

Figure 3-5: Écoulement sur le déversoir pour une crue de période de retour 1000 ans - vitesses



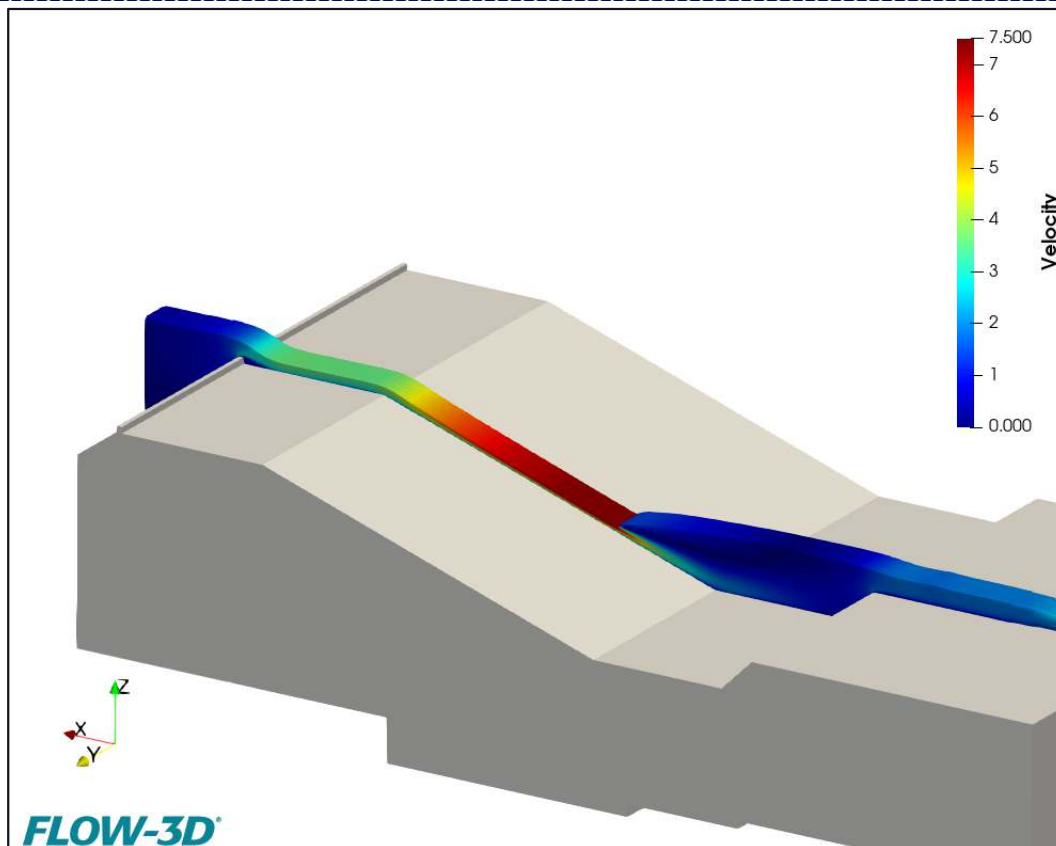
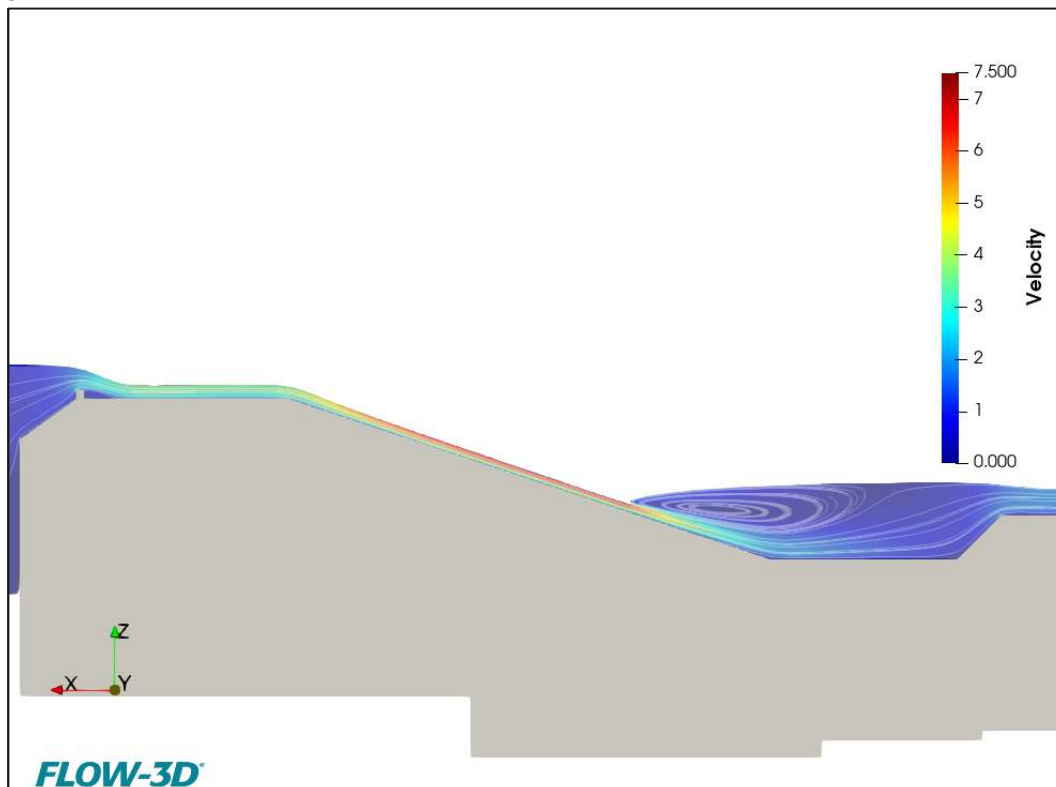


Figure 3-6: Coupe de l'écoulement et ressaut hydraulique oscillant dans la fosse pour une crue Q1000 – vitesses

s



#### Épaisseur des enrochements percolés

Afin de définir l'épaisseur de la protection en enrochements percolés, il a été retenu deux principes :

- Le diamètre moyen D50 des enrochements correspond à la moitié du diamètre moyen qu'il aurait été nécessaire de mettre en œuvre dans une solution de type enrochements libres (déterminé à l'aide de la formule d'Isbach)
- L'épaisseur de la protection, afin de permettre une mise en œuvre soignée et de faciliter le bétonnage est fixée à  $2 \times D50$ .

Ainsi, il a été retenu des enrochements de 60/120 kg ( $d_{50}=80\text{Kg}$ ), mis en œuvre en deux couches de 40cm d'épaisseur.

#### Les bajoyers

La hauteur des bajoyers est un point qu'il convient de ne pas négliger. En effet, si la lame d'eau venait à passer au-dessus de ceux-ci, une érosion régressive pourrait conduire à une rupture du parement aval en un laps de temps très bref. En effet, une fois l'érosion amorcée, l'eau peut également pénétrer sous le bajoyer, accélérant ainsi le processus d'érosion. Ce point sera vérifié dans le cadre de la phase PRO.

---

### 4 Conclusion

Dans le cadre de la phase AVP objet de la présente note de calcul, afin de garantir la pérennité de l'ouvrage pour des occurrences allant jusqu'à 1000 ans, il est recommandé de s'orienter vers une zone de surverse correspondant aux principes de conception suivants :

- Talus à 3H/1V protégés par enrochements 60/120 Kg, percolés sur deux couches de 40cm, avec saillis de l'ordre de 10cm pour garantir un Ks de l'ordre de 25.

Dans le cadre de la phase PRO, les points suivants devront être précisés/optimisés :

- La méthodologie de réalisation de la poutre de couronnement et les sujétions relatives à l'étanchéité du raccord avec l'existant ;
- Le profil en long des bajoyers et les revanches associées ;
- La dimension de la fosse de dissipation qui semble pouvoir être optimisée, notamment en tenant compte de l'inondation du val lors de l'atteinte des pics de crue Q500 et Q1000 ;
- La définition des barbacanes et éjecteurs à mettre en œuvre en pied de talus et au droit de la fosse de dissipation afin d'évacuer d'éventuelles sous-pressions.



[www.brl.fr/brli](http://www.brl.fr/brli)

*Société anonyme au capital de 3 183 349 euros  
SIRET : 391 484 862 000 19 - RCS : NÎMES B 391 484 862  
N° de TVA intracom : FR 35 391 484 862 000 19*

**BRL**  
*Ingénierie*

1105, avenue Pierre Mendès-France  
BP 94001 - 30 001 Nîmes Cedex 5  
FRANCE  
Tél. : +33 (0) 4 66 87 50 85  
Fax : +33 (0) 4 66 87 51 09  
e-mail : [brli@brl.fr](mailto:brli@brl.fr)