

Mission de maîtrise d'oeuvre pour les travaux de fiabilisation
des digues communales de Nevers en rive droite
Tranche optionnelle 2 : MOE Travaux de création d'un
déversoir en aval du canal de dérivation de la Nièvre
Avant-Projet – Annexe 1 : Note de calcul



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

Avant-Projet – Annexe 1 : Note de calcul

Tranche optionnelle 2 : MOE Travaux de création d'un déversoir en aval du canal de dérivation de la Nièvre



	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	05 Janvier 2022
Contact	VJO / NSI/ JAU

Titre du document	Mission de maîtrise d'oeuvre pour les travaux de fiabilisation des digues communales de Nevers en rive droite Tranche optionnelle 2 : MOE Travaux de création d'un déversoir en aval du canal de dérivation de la Nièvre Avant-Projet – Annexe 1 : Note de calcul
Référence du document :	NA00414_NEVERS_RD_AVP_Ouest_NDC_deversoir_v0.docx
Indice :	0

Date émission	Indice	Observation	Dressé par	Vérifié et Validé par
01/04/2022	0	Première édition	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 Ouest	9
2.3	Critères de conception	9
2.4	Efficacité hydraulique	10
3	Conception détaillée	11
3.1	Configuration de l'existant et solutions d'aménagement possibles	11
3.2	Étude de la solution coursiers à pente constante avec fossé de dissipation	11
3.3	Étude de la solution déversoir en escaliers en gabions	16
4	Conclusion	20

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 des études de maîtrise d'œuvre relatives à la création d'une zone de surverse en aval de canal de dérivation de la Nièvre.

Figure 1-1 : Vue 3D de l'emplacement de la zone de surverse modélisée sous Telemac



L'objectif de la présente note est de présenter la note de calcul du déversoir de la zone de surverse du val Ouest.

2 Principes de conception générale

2.1 Principes d'aménagement

L'objet du présent paragraphe est d'étudier la pertinence, les incidences, les conditions de réalisation et le cout prévisionnel d'une zone de surverse permettant d'inonder le val Ouest à partir de Q200+25cm. Celle-ci est aménagée sur la levée du canal de dérivation RD, ce secteur se caractérise par :

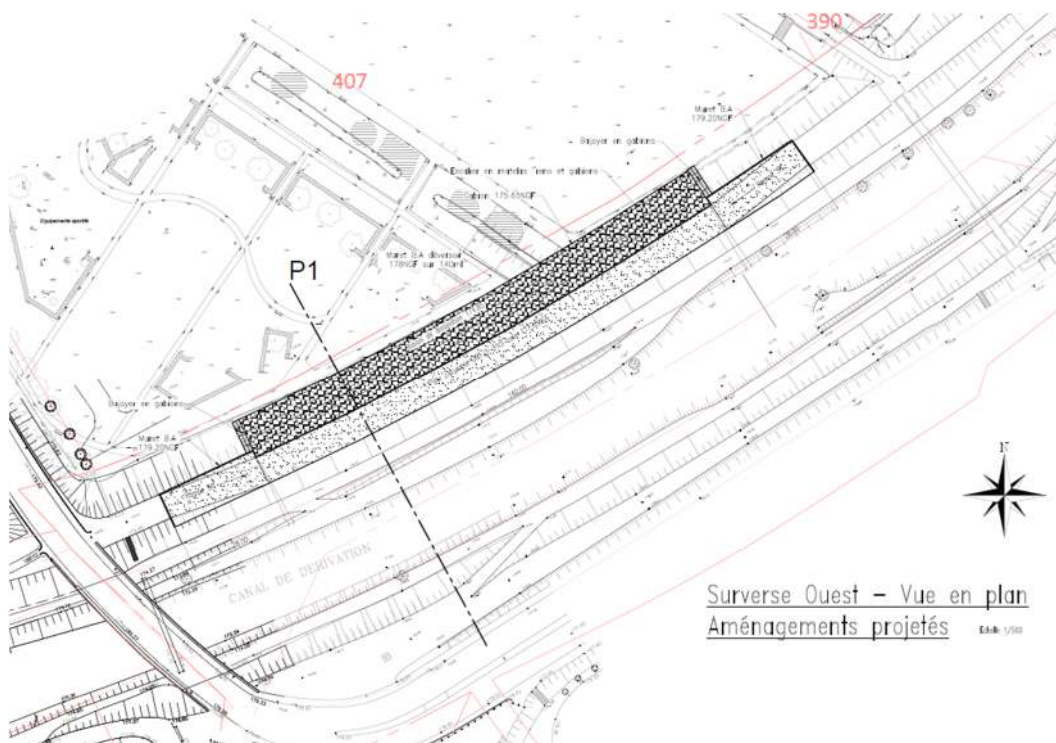
- Un talus côté enherbé canal
- Une crête aménagée de 6.1m de large avec un chemin permettant la circulation des piétons et cyclistes constituant le quai de Médine
- Un talus côté zone protégée présentant une pente douce 3H/1V avec de l'herbe rase et quelques arbres

De fortes contraintes pour le choix du type d'aménagement réalisé côté zone protégée sont constituées par les restrictions suivantes :

- Restrictions sur le type d'occupation :
 - interdiction de tout aménagement ultérieur sortant du cadre des usages actuels : usage de parc urbain au droit des parcelles (000BC) 406, 407
 - interdiction de constructions au droit des parcelles 406 et 407
- Restriction sur les sols :
 - interdiction de toutes fouilles, excavations, triturations des sols, constructions avec fondations, plantations et cultures à plus de 50 cm de profondeur l'évacuation des terres de déblais en centre d'élimination adapté
 - le maintien ou le rétablissement de l'étanchéité de surface partout où elle existe
 - la réfection de l'étanchéité de surface en cas d'éventuels travaux de réfection de clôtures, infrastructures urbaines ou plantations

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 projetée (extrait de la vue en plan)



L'objectif est ainsi de réaliser le projet dans une emprise minimale de manière à éviter notamment les terrassements sur la zone aval de la digue.

2.2 Calage de la zone de surverse Ouest

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 RD du canal de la Nièvre, 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 + 25cm, ce qui correspond à la cote 178 m NGF.
- Les dernières modélisations réalisées, prenant notamment en compte les aménagements rive gauche de Nevers et le calage de la zone de surverse Est à Q200, indiquent :
 - o que le niveau maximal de la Loire en rive droite au niveau du futur déversoir Ouest, 177.75 m NGF. La cote de surverse est donc définie à 178.00mNGF.
 - o que pour une crue de période de retour $T = 500$ ans, le niveau en amont de l'ouvrage est de 178.19 m NGF. Pour une crue de période de retour 1000 ans, celui-ci est de 178.5 m NGF.

2.3 Critères de conception

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) Limiter l'emprise de la zone de surverse dans le val pour respecter les contraintes sur le type d'occupation et les sols.

2.4 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.

Cette optimisation permet d'améliorer le coefficient de débit et de ramener la longueur d'aménagement nécessaire à 140 mètres linéaires contre 200 auparavant (cf. Etudes préliminaires), tout en y faisant transiter (conformément aux hypothèses retenues dans le cadre des études préliminaires) le débit de 20.1m³/s prévus pour une crue Q500 par les modèles Télémac 2D.

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. Ainsi, il conviendra d'être vigilant sur l'éventuelle nécessité d'une étanchéité du contact poutre/parement lors de l'exécution de l'ouvrage.

3 Conception détaillée

3.1 Configuration de l'existant et solutions d'aménagement possibles

La pente naturelle du talus sur la zone est proche de 3H/1V. La limitation d'emprise de l'aménagement Val Ouest impliquée par les contraintes aval pousse à étudier les solutions de déversoirs dont l'emprise doit être contenue, et donc avec des pentes plus fortes et aménagés dans l'emprise actuelle de la digue.

Les solutions de déversoirs à pente constante et d'escaliers en gabions sont ainsi étudiées.

Pour une crue de période de retour 500 ans, le niveau amont est de 178.19 m NGF, la hauteur de surverse est de 19cm.

3.2 Étude de la solution coursiers à pente constante avec fossé de dissipation

3.2.1 Rappel des principes de surverse 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 Cemagref¹ :

- 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 ρ : poids unitaire de l'eau 10 000 N/ m³

i : pente du talus (V/H)

K_s : coefficient de Strickler caractéristique de la rugosité du talus

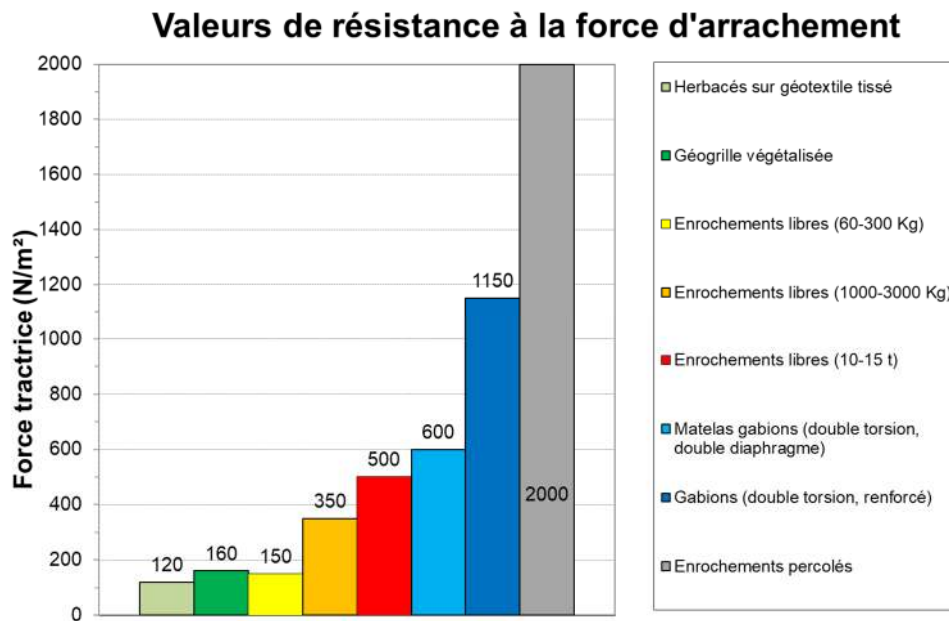
V : vitesse en m/s

[1] ¹ 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.*

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.

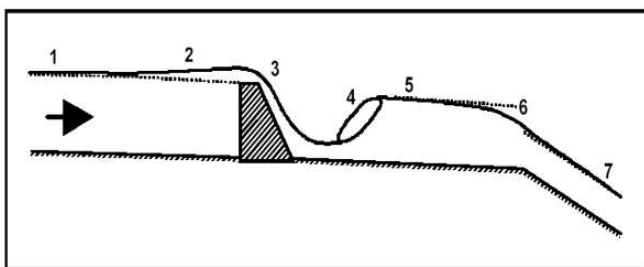
Figure 3-1: Résistance à l'arrachement de divers matériaux



La dissipation d'énergie

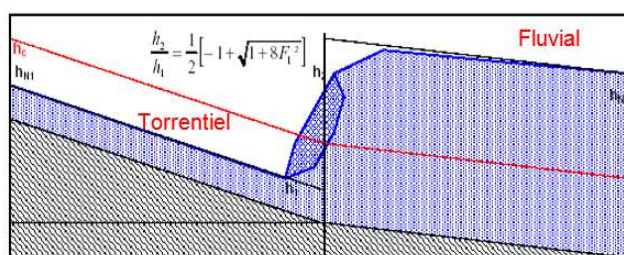
Une autre contrainte apportée par la surverse est la dissipation d'énergie. En effet le passage d'un régime torrentiel à un régime fluvial est générateur de fortes perturbations : le ressaut (cf. schémas ci-dessous).

Figure 3-2: Schéma de principe du ressaut hydraulique



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



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

3.2.2 Méthodologie et hypothèses

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

La pente étudiée est de 2 pour 1 de manière à ne pas aboutir à des vitesses trop importantes et à rester dans l'emprise de la digue.

La mise en place d'un seuil mince en poutre de couronnement à la cote 178mNGF permet d'améliorer les conditions d'écoulement par rapport à un arasement de toute la digue à cette cote dont le fonctionnement hydraulique serait celui d'un seuil épais.

L'amélioration de la débitance par ce seuil mince permet également d'économiser du linéaire aménagé. Le seuil et la fosse sont modélisés à l'aide Flow-3D.

Avec le seuil mince, le débit de 20.1m³/s peut être atteint avec une longueur d'aménagement de 140m.

La hauteur de la poutre est prise égale à 35 cm. La lame d'eau étant de 19 cm, l'écoulement sera dénoyé dans tous les cas. Après le seuil une partie plane de 3m est aménagée en crête de digue pour permettre à l'écoulement de se stabiliser avant la rupture de pente.

Figure 3-3: Géométrie avec coursier à pente constante et fosse de dissipation



La pente est prise égale à 2 pour 1 de manière à confiner l'aménagement dans l'emprise actuelle de la digue. Dans ces conditions de débit et de pente, avec un niveau aval fixé par le raccord au terrain naturel à la cote 175.65 m NGF la longueur théorique du ressaut est de 1.5m.

Le bassin de dissipation est aménagé sur 3m avec une profondeur de 50cm afin de pouvoir largement absorber et contenir le ressaut.

3.2.3 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...

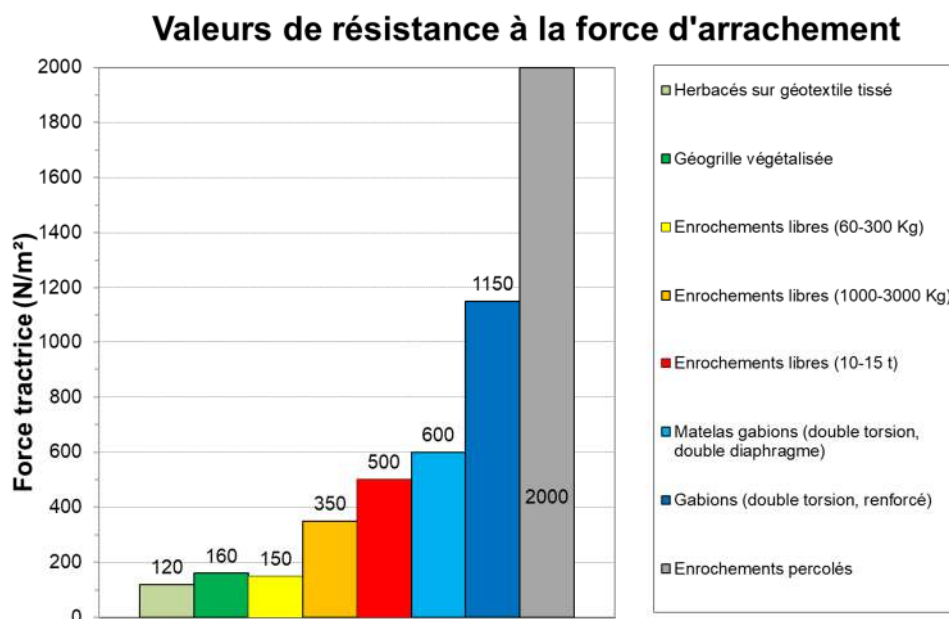
3.2.4 Modèle et résultats

Afin de correspondre à des revêtements de type matelas en enrochements libres, gabions, ou enrochements percolés, un coefficient de rugosité K_s 25 est choisi sur l'aménagement.

Le modèle 3D mis en place sur cette géométrie permet d'obtenir une lame d'eau de 14cm, et des vitesses de 2.6m/s en moyenne dans la section pour une crue d'occurrence Q500, pour une force tractrice de 280N/m².

Compte tenu de ces vitesses, les solutions de revêtement envisageables sont les enrochements libres, les enrochements percolés et les matelas en gabions.

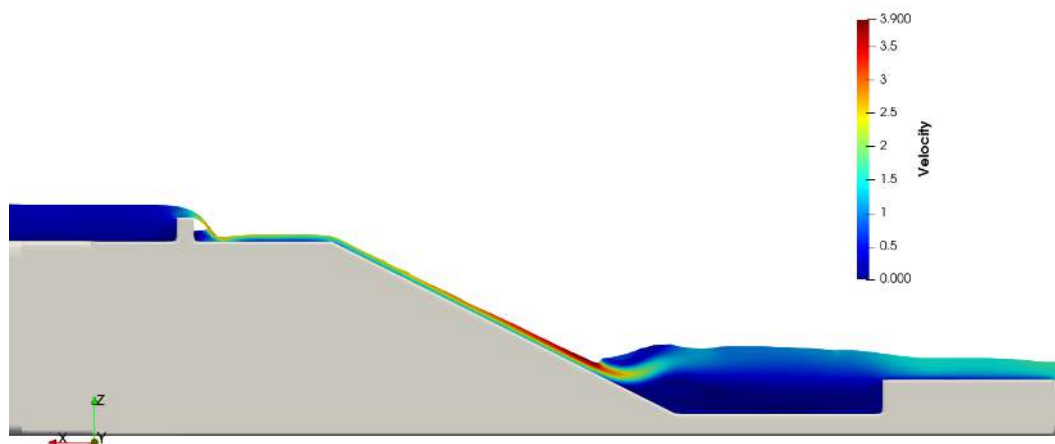
Figure 3-4 : Résistance à l'arrachement de divers matériaux



Les revêtements en enrochements libres sont moins intéressants pour l'aménagement de cette zone car à terme ils présentent un plus grand risque de désordre, malveillance, un entretien nécessaire plus important que les revêtements en matelas de gabions ou enrochements percolés. Les enrochements bétonnés sont quant-à-eux plus coûteux globalement car ils requièrent plus de volumes et plus de déblais que les matelas en gabions. Les solutions en enrochements bétonnés sont également plus adaptées à des surverses avec des lames d'eau et vitesses plus importantes. La solution de revêtement en matelas de gabions est donc la solution privilégiée et étudiée pour cette configuration de zone de surverse à pente constante.

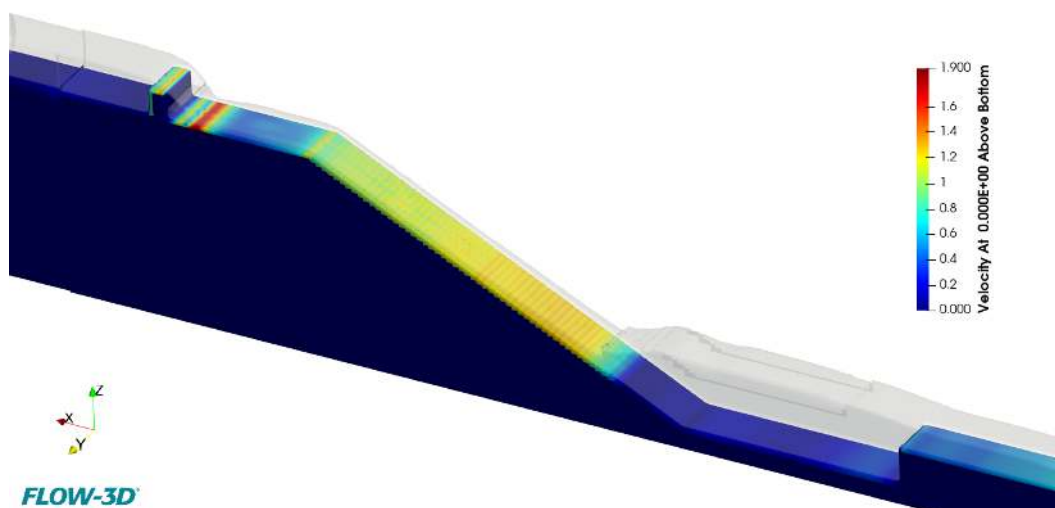
Les résultats sur le modèle montrent un écoulement satisfaisant sur le déversoir et un ressaut contenu dans la fosse de dissipation.

Figure 3-5 : Coupe des vitesses sur le déversoir



FLOW-3D

Figure 3-6: Vitesses au contact du déversoir



FLOW-3D

3.3 Étude de la solution déversoir en escaliers en gabions

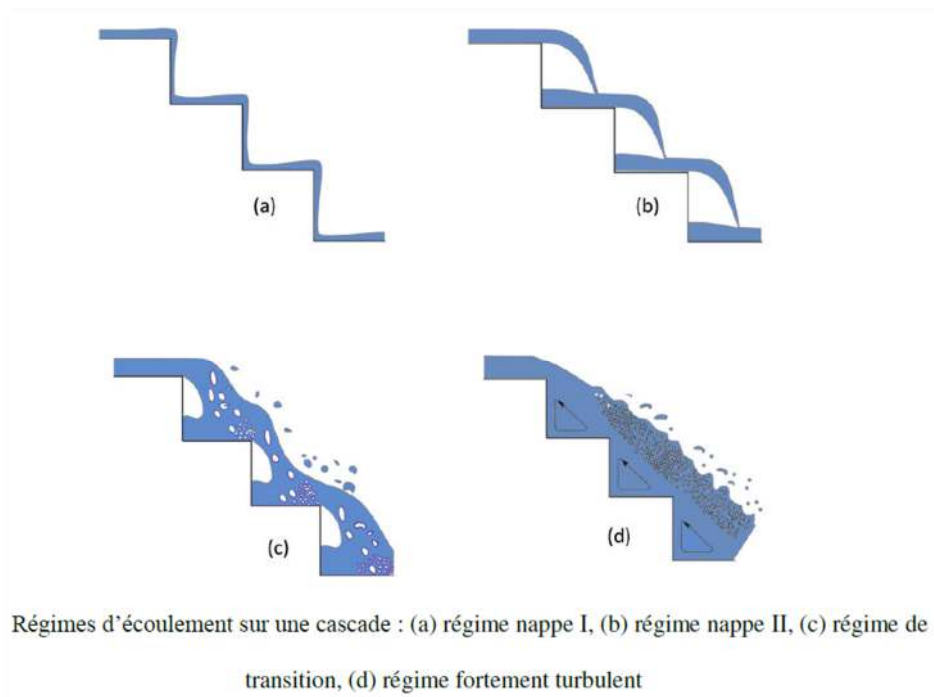
3.3.1 Approche préliminaire

Les principaux critères dimensionnant les déversoirs en escaliers sont le débit spécifique (débit par mètre linéaire), la hauteur de chute, la hauteur et la pente des marches.

Ici, les hauteurs de marche sont fixées par les hauteurs de gabions possibles. Les plus courantes sont 0.5m et 1m, les matelas de gabions de 0.3m de hauteurs existent aussi mais au vu des vitesses pouvant survenir sur les déversoirs en escaliers vis-à-vis de la faible taille des enrochements dans les matelas cette solution de 0.3m est écartée pour la configuration en escaliers.

De point de vue hydrodynamique, l'écoulement sur les cascades peut être classé en trois régimes : régime nappe, régime intermédiaire (ou de transition) et régime fortement turbulent.

Figure 3-7: Les différents régimes d'écoulement sur des marches d'escaliers



- Régime nappe : l'écoulement est une série de petites chutes consécutives. Généralement, ce type d'écoulement est obtenu pour les faibles débits et/ou les grandes longueurs de marches. Cet écoulement peut être divisé en deux sous-régimes (voir figure insérée ci-après) :
 - Régime nappe 1 : Aux faibles débits, l'eau en chute sur les cascades adhère sur la totalité de la surface des contremarches formant ainsi un film homogène qui prend la forme de la cascade (figure a).
 - Régime nappe 2 : La vitesse d'arrivée d'eau est suffisamment importante que l'eau décolle des contremarches en formant des jets libres (figure b).
- Régime fortement turbulent : Dans ce régime d'écoulement, des recirculations dont les axes sont horizontaux se forment entre les bords extérieurs des marches. Elles sont maintenues entre les marches grâce aux contraintes de cisaillement. Généralement, ce type d'écoulement est obtenu pour les grands débits et/ou les petites longueurs de marches (voir figure d). La colonne d'eau en écoulement sur la cascade est « supportée » par les bords extérieurs des marches et les vortex d'eau en recirculation. Dans ce cas, les marches et les vortex forment un « pseudo-fond » avec des « pseudo-rugosités » représentées par les marches. L'échange entre la colonne d'eau et les zones de recirculation se fait de façon continue.
- Régime transitoire : La transition entre les deux régimes précités se fait de façon continue et il n'existe pas une limite facilement identifiable. Dans certaines gammes de paramètres opératoires, les régimes fortement turbulents et nappe peuvent coexister sur différentes régions d'une même cascade. D'où l'intérêt d'introduire un régime intermédiaire qui marque le passage entre le régime nappe et le régime turbulent (voir figure c).

Les débits sur cette zone de surverse conduisent à des régimes de type nappe.

Les approches 1D sur ces déversoirs montrent que plusieurs pentes sont possibles, le débit spécifique limite dans les configurations étudiées étant grand devant le faible débit spécifique nécessaire ici.

Les modélisations 3D montrent cependant que pour des pentes trop fortes (supérieure à $3H/2V$) la nappe tend à sauter la première ou la deuxième marche.

Les modélisations 3D vont permettre de mieux approcher le comportement hydraulique du débit qui surverse selon plusieurs configurations de déversoirs.

3.3.2 Modèle et résultats

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

- Poutre en béton armé : $K_s = 70$
- Déversoir en escaliers et fosse de dissipation en gabions : $K_s = 25$
- 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. Plus la pente du déversoir en escaliers est faible et plus celui-ci dissipe l'énergie de l'écoulement, et donc moins le bassin de dissipation a besoin d'être étendu.

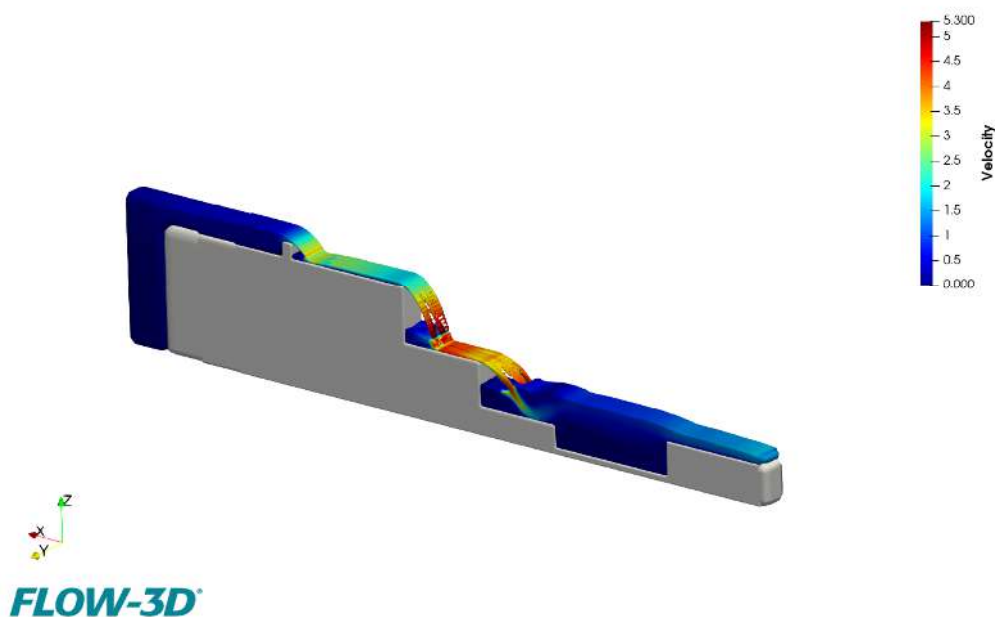
Les cas considéré est celui de la crue de période de retour 500ans (178.19 m NGF).

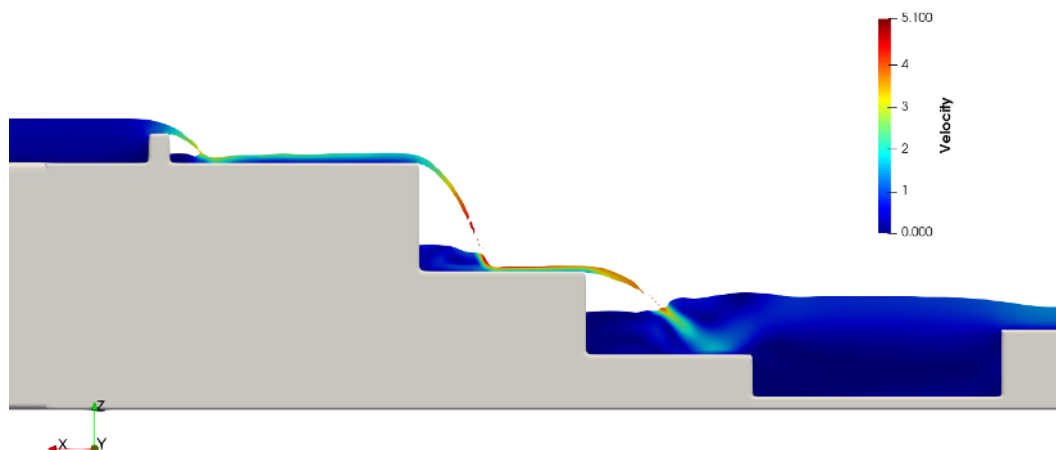
Dans un premier temps, la condition limite aval est celle d'un écoulement libre, le TN aval étant fixé à la cote 177.65 m NGF.

Quelle que soit la pente du déversoir en escaliers, la lame d'eau résultante sur le déversoir est de 19cm.

Rappelons que les modèles ne prennent pas en compte la porosité des gabions, l'épaisseur des lames d'eau sur chaque marche en gabions est ainsi surestimée.

Figure 3-8: Écoulement sur le déversoir en escaliers avec une pente de 2/1.

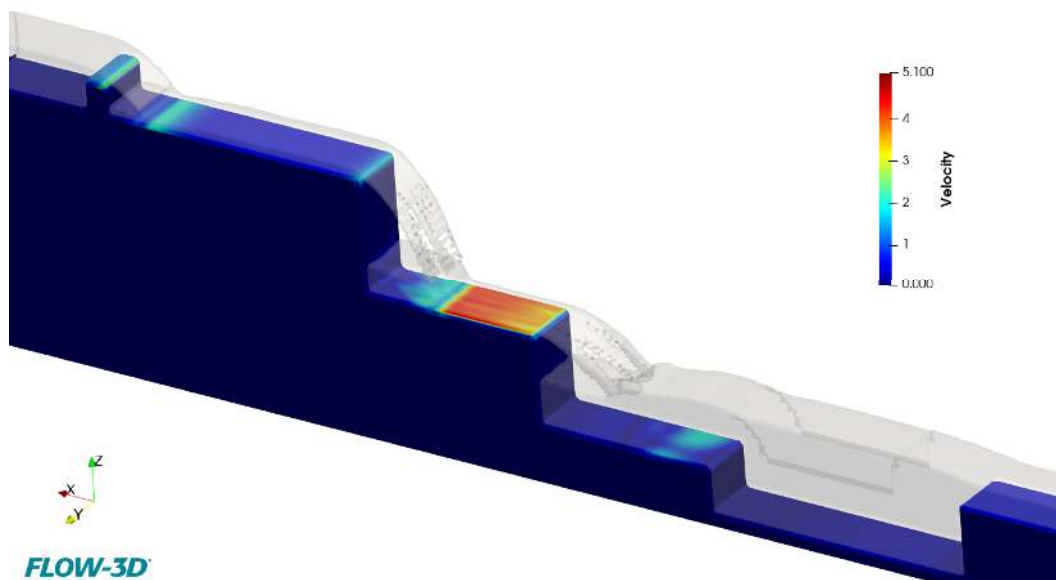




FLOW-3D

Lorsque la pente est de 2H/1V, la dissipation sur les marches est très satisfaisante avec un régime de nappe. Le choix de marches de 1m de haut a été réalisé pour des dispositions constructives, celles-ci permettent également d'optimiser les volumes de gabions nécessaires à l'aménagement de la zone due surverse. La porosité des gabions n'étant pas modélisée, la lame d'eau réelle sera plus faible et jaillira moins loin de marche en marche, car une partie de l'écoulement transitera à travers les gabions, dissipant également une partie de l'énergie.

Figure 3-9: Vitesses au contact du déversoir



FLOW-3D

4 Conclusion

Au stade de l'AVP actuel, la solution d'un déversoir en escaliers est privilégiée par rapport à celle d'un matelas en gabions en pente.

En effet, sur le long terme, les matelas de gabions posés en pente peuvent avoir une déformation plus importante du fait du déplacement de matériaux à l'intérieur, phénomène pouvant être accentué lorsqu'il y a surverse.

Ainsi, pour un coût d'aménagement quasi-similaire, la solution des gabions en escaliers offre une solution plus pérenne et qui présente également plus de marge hydrauliquement, si des crues plus importantes que la Q500 devaient survenir : la solution de déversoir en escaliers offrant une meilleure dissipation et résistance à l'écoulement.



BRL
Ingénierie



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*

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