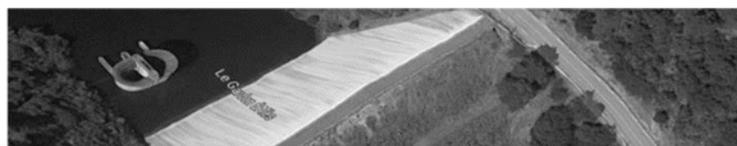




SÉCURISATION DU COMPLEXE HYDRAULIQUE FORMÉ PAR LES BARRAGES DE SAINTE-CÉCILE D'ANDORGE ET DES CAMBOUS



Pièce **9** a2₃



DOSSIER DE DEMANDE D'AUTORISATION ENVIRONNEMENTALE

BARRAGE DE SAINTE-CÉCILE D'ANDORGE

Rapport d'études de Projet (PRO) – ANNEXES N°7 à 12

Documents établis par les organismes agréés à l'occasion de la conception des barrages, de l'exécution de leurs travaux et de leur première mise en eau (arrêté de mars 2017)



CHANGER LE SENS DE VOTRE QUOTIDIEN 

ANNEXE 7 RAPPORT DE MODELISATION PHYSIQUE



DEPARTEMENT DU GARD

MAITRES D'ŒUVRE : ISL - BRL

MISE EN SECURITE DU BARRAGE DE STE
CECILE D'ANDORGE PAR LA MISE EN PLACE
D'UN EVACUATEUR DE CRUE



MODELE EN SIMILITUDE
RAPPORT DE CONSTRUCTION
ET ANALYSE DES RESULTATS

JUILLET 2021



Version	2	3	4
Rédigé par	<p>Prénom-Nom : Ch. TOUZET M. DU Fonction : RPC LMH Chargé d'études DGB Visa : Le : 27/05/21</p>	<p>Prénom-Nom : Ch. TOUZET <i>Touzet</i> M. DU Fonction : RPC LMH Chargé d'études DGB Visa : Le : 24/06/21</p>	<p>Prénom-Nom : Ch. TOUZET <i>Touzet</i> M. DU Fonction : RPC LMH Chargé d'études DGB Visa : Le : 20/07/21</p>
Vérifié par	<p>Prénom-Nom : Ch. RICHIT Fonction : Chef Département DLG Visa : Le : 27/05/21</p>	<p>Prénom-Nom : Ch. RICHIT Fonction : Chef Département DLG Visa :</p> <p>Le : 29/06/2021</p>	<p>Prénom-Nom : Ch. RICHIT Fonction : Chef Département DLG Visa :</p> <p></p> <p>Le : 20/07/2021</p>

SOMMAIRE

1.1	RAPPEL DU CONTEXTE DE L'ETUDE.....	6
1.2	RAPPEL DES EVOLUTIONS DU MODELE	6
1.3	RAPPEL DES OBJECTIFS DE LA MODELISATION PHYSIQUE	8
2	PRESENTATION DU MODELE 2020.....	9
2.1	DESCRIPTION DU MODELE ET DE SES DERNIERES EVOLUTIONS.....	9
2.1.2	TRAVAUX DE MODIFICATION DE LA CAISSE	13
2.1.3	DESCRIPTION DE LA NOUVELLE MAQUETTE DE L'EVC ET DES RIVES.....	17
2.1.4	DESCRIPTION DE LA TULIPE	18
2.2	ALIMENTATION ET EVACUATION DU MODELE	21
2.2.1	DESCRIPTION DE L'ALIMENTATION	21
2.2.2	DESCRIPTION DE L'EVACUATION.....	21
3	RESENTATION DE L'INSTRUMENTATION ET DU PROTOCOLE DE MESURES.....	22
3.1	PROTOCOLE DE MESURE	22
3.1.1	NIVEAUX D'EAU DANS LA RETENUE	22
3.1.2	HAUTEURS D'EAU SUR LES OUVRAGES	24
3.1.3	PROFILS DE VITESSE DANS LA RETENUE	25
3.1.4	VITESSES PONCTUELLES AU MOULINET.....	25
3.1.5	MESURE DE PRESSION.....	27
3.1.6	MESURE DE L'ENERGIE DISSIPEE.....	28
3.1.7	MESURE DE DEBIT	29
3.2	DETERMINATION DES INCERTITUDES ASSOCIEES	30
3.2.1	METHODE D'ESTIMATION.....	30
3.2.2	RESULTATS	33
4	RECEPTION DU MODELE.....	36
4.1	CALAGE TOPOGRAPHIQUE DES OUVRAGES.....	36
4.2	ETANCHEITE	38
4.3	STABILITE.....	38
5	PRESENTATION DES RESULTATS	39
5.1	CONDITION D'ECOULEMENT DANS LA CAISSE DU MODELE	39
5.1.1	DEBIT	39
5.1.2	COTE DU PLAN D'EAU	40
5.1.3	PROFIL DE VITESSE DANS LA RETENUE	42
5.2	CONDITIONS D'ECOULEMENT A L'ENTONNEMENT DE L'EVC A SURFACE LIBRE	49
5.2.1	HAUTEUR D'EAU	49
5.2.2	VITESSE D'ECOULEMENT	51
5.2.3	COEFFICIENT DE DEBIT DU DEVERSOIR.....	52
5.2.4	MESURE DE PRESSION.....	54

5.3	CONDITIONS D'ÉCOULEMENT SUR LE COURSIER	55
5.3.1	HAUTEUR D'EAU	55
5.3.2	VITESSE D'ÉCOULEMENT	58
5.3.3	MESURE DE PRESSION.....	58
5.4	ETUDE DE LA DISSIPATION SUR LE COURSIER	62
5.5	CONDITIONS D'ÉCOULEMENT ET DE DISSIPATION DANS LE BASSIN AVAL.....	65
5.5.1	HAUTEUR D'EAU	65
5.5.2	VITESSE D'ÉCOULEMENT	65
5.5.3	SUBMERSION DE LA GALERIE DE DRAINAGE.....	69
5.5.4	DISSIPATION DE L'ÉNERGIE	70
6	ETUDE DU RISQUE DE CAVITATION	73
7	ETUDE DE L'INTERACTION DES EVACUATEURS.....	75
8	ETUDE DU RISQUE D'EMBACLE.....	77
9	CONCLUSIONS	84
9.1	AMELIORATION DU MODELE V3.....	84
9.2	REPRESENTATIVITE DU MODELE	84
9.3	SYNTHESES DES RESULTATS	84
	ANNEXE 1 : MESURE DE LA COTE D'EAU.....	86
	ANNEXE 2 : OBSERVATION DU RESSAUT HYDRAULIQUE ET DE L'AERATION	88
	ANNEXE 3 : MESURE DE LA HAUTEUR D'EAU	89
	ANNEXE 4 : MESURE DE LA VITESSE D'ÉCOULEMENT.....	94
	ANNEXE 5 : MESURE DE LA PRESSION.....	96
	ANNEXE 6 : COMPARAISON DES 2 MODELES.....	101

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : modèle 2014/2015	6
Figure 2 : Vue en plan de l'évacuateur.....	7
Figure 3 : Vue en coupe de l'évacuateur	7
Figure 4 : Photo du fond et des berges du modèle V3 avant l'essai (photo prise en mars 2021)..	9
Figure 5 : Photo générale du modèle V3 (photo prise en été 2021)	10
Figure 6: Positionnement du mur de tranquillisation du modèle par rapport à la retenue du barrage.....	13
Figure 7 : Plan d'exécution du modèle V3	14
Figure 8 : Alimentation du modèle.....	15
Figure 9 : Mur de tranquillisation	15
Figure 10 : Topographie des berges modélisée dans la caisse.....	16
Figure 11 : Modélisation des berges amont	16
Figure 12 : Evacuateur / sortie galerie et fosse	17
Figure 13 : Aval et pont.....	17
Figure 14: Evacuateur et aval	18
Figure 15 : coupe de la tulipe (1961)	18
Figure 16 : Photo tulipe.....	20
Figure 17 : Plans tulipe	20
Figure 18 : Points alimentation / évacuation du modèle	21
Figure 19 : Mesure niveau plan d'eau	22
Figure 20 : Flotteur avec prisme utilisé pour vérifier l'horizontalité du plan d'eau	23
Figure 21 : Mesures sur seuil	24
Figure 22 : Mesure dans le coursier	24
Figure 23 : Mesure en aval	24
Figure 24 : Mesures catamaran.....	25
Figure 25 : Mesure vitesse dans EVC	26
Figure 26 : Mesure vitesse aval	26
Figure 27 : Mesure de dissipation énergie	28
Figure 28 : Caisse du modèle V3 et le profil de vitesse mesuré avec Qliner	39
Figure 29 : Localisation des points de mesure de hauteur d'eau dans la caisse.....	40
Figure 30 : Revanche faible pour la crue Q100 000.....	42
Figure 31 : Répartition de vitesse sur le profil en travers (Q1000)	43
Figure 32 : Répartition verticale de vitesse sur les points de mesures (Q1000).....	44
Figure 33 : Répartition de vitesse sur le profil en travers (Q10 000).....	45
Figure 34 : Répartition verticale de vitesse sur les points de mesures (Q10 000)	46
Figure 35 : Répartition de vitesse sur le profil en travers (Q100 000).....	47
Figure 36 : Répartition verticale de vitesse sur les points de mesures (Q100 000).....	48
Figure 37 : Synthèse des résultats des hauteurs d'eau dans l'entonnement.....	49
Figure 38 : Photos de l'écoulement dans l'entonnement	50
Figure 39 : Répartition de vitesse sur le profil en travers dans l'entonnement (échelle réelle).....	51
Figure 40 : Vue en plan et vue en coupe du déversoir.....	52
Figure 41 : Comparaison entre les μ du modèle et les valeurs calculées avec les formules.....	54
Figure 42 : Mesure de pression dans l'entonnement (échelle réelle)	55
Figure 43 : Mesure de la hauteur d'eau sur le PT 4 pour Q1000	56

Figure 44 : Synthèse des résultats des hauteurs d'eau dans le coursier.....	56
Figure 45 : Revanche suffisante dans le coursier pour la crue Q100 000	57
Figure 46 : Profil en long de la ligne d'eau pour les 3 crues.....	57
Figure 47 : Point de mesure des vitesses d'écoulement dans le coursier.....	58
Figure 48 : Mesure de pression dans le coursier (échelle réelle).....	59
Figure 49 : Profils en long de la ligne d'eau et de la cote piézométrique et la charge hydraulique	60
Figure 50 : Illustration des trois types d'écoulement sur un coursier en marche : a) écoulement en nappe ; b) écoulement en transition ; c) écoulement en mousse (skimming flow).....	62
Figure 51 : Zone aérée dans le coursier	64
Figure 52 : Points de mesure de la hauteur d'eau dans la partie aval du modèle	65
Figure 53 : Types de ressaut en fonction du nombre de Froude et les ressauts observés.....	66
Figure 54 : Points de mesure des vitesses d'écoulement dans la partie aval du modèle	67
Figure 55 : Caractéristiques d'écoulement dans la partie aval pour Q1000.....	68
Figure 56 : Caractéristiques d'écoulement dans la partie aval pour Q10 000	68
Figure 57 : Mise en charge du pont pour la crue Q100 000.....	69
Figure 58 : Localisation des galeries de drainage et la mise hors d'eau de la galerie inférieure pour Q1000.....	69
Figure 59 : Bassin pris en compte pour calculer le volume	72
Figure 60 : Indice de cavitation pour Q10 000 et Q100 000	74
Figure 61 : Impact de la tulipe sur la hauteur d'eau dans l'entonnement	75
Figure 62 : Photo des Embâcles.....	77
Figure 63 : Essais avec des embâcles venant de la rive gauche (Q10 000).....	79
Figure 64 : Essais avec des embâcles venant du milieu de la retenue (Q10 000).....	81
Figure 65 : Essais avec des embâcles venant de la rive droite (Q10 000)	83

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Principales grandeurs à l'échelle	11
Tableau 2 : Matériaux utilisés pour construire le modèle	12
Tableau 3 : Débits caractéristiques de la tulipe	19
Tableau 4 : Valeurs des débits injectés et évacués (modèle).....	21
Tableau 5 : incertitudes liées aux instruments de mesure	33
Tableau 6 : Incertitudes liées au phénomène et globales élargies	34
Tableau 7 : Incertitudes échelle réelle avec k facteur d'élargissement égal à 2	35
Tableau 8 : comparaison des altitudes réelles et théoriques sur modèle.....	36
Tableau 9 : comparaison des altitudes réelles et théoriques en NGF	37
Tableau 10 : Synthèse de conditions hydrauliques des essais à l'échelle de modèle (L/s).....	40
Tableau 11 : Synthèse de conditions hydrauliques des essais à l'échelle réelle (m ³ /s)	40
Tableau 12 : Cote d'eau mesurée avec les pointes limnimétriques (valeurs converties à l'échelle réelle).....	41
Tableau 13 : Horizontalité du plan d'eau dans la retenue vérifiée avec le flotteur (valeurs converties à l'échelle réelle)	41
Tableau 14 : Vitesse d'écoulement à l'entrée de l'écoulement (échelle réelle en m/s).....	51
Tableau 15 : Calcul du coefficient de débit du déversoir.....	52
Tableau 16: Vitesses d'écoulements mesurés dans le coursier.....	58
Tableau 17 : Comparaison de la cote d'apparition de l'écoulement aéré	63
Tableau 18 : Hauteurs d'eau mesurées dans la partie aval (échelle réelle)	65
Tableau 19 : Vitesses d'écoulement (m/s) mesurées dans la partie aval (échelle réelle)	67
Tableau 20 : Charge résiduelle après le bassin de dissipation mesurée dans le bassin de dissipation.....	70
Tableau 21 : Taux de dissipation de l'énergie.....	71
Tableau 22 : Puissance volumique du bassin de dissipation.....	71
Tableau 23 : Impact de la tulipe sur le plan d'eau.....	75
Tableau 24 : Impact de la tulipe sur le plan d'eau.....	76

BIBLIOGRAPHIE

Boes R. M. Guidelines on the design and hydraulic characteristics of stepped spillways [Conference] // XXIVème congrès des grands barrages. - 2012.

COYNE A and BELLIER J Barrage Sainte-Cécile : Rapport sur le modèle réduite de l'évacuateur de crues et des pertuis [Report]. - 1962.

Fritz H. M. and Hager W. H. Hydraulics of Embankment Weirs [Article] // Journal of Hydraulic Engineering. - 1998. - 963-971 : Vol. 124(9).

Hager W. H. and Schleiss A. J. Constructions hydrauliques. Écoulements stationnaires [Book]. - [s.l.] : Presses polytechniques et universitaires Romandes, 2009. - Vol. 15.

PREAMBULE

1.1 RAPPEL DU CONTEXTE DE L'ETUDE

Dans le cadre de la mise en sécurité du barrage de Ste Cécile d'Andorge, le laboratoire de Mesures Hydrauliques (LMH) de la Société du Canal de Provence (SCP) a été retenu suite à l'appel d'offres du Conseil Départemental du Gard portant sur la modélisation physique d'un nouvel évacuateur de crues sur remblai, dans le cadre des études de l'avant-projet et du projet de la mise en sécurité du barrage de Sainte Cécile d'Andorge.

1.2 RAPPEL DES EVOLUTIONS DU MODELE

Le LMH a réalisé un modèle physique de l'évacuateur du barrage de Sainte Cécile en 2014 / 2015 :

- mise en eau : fin septembre 2014
- plusieurs configurations testées entre le 4^{ème} trimestre 2014 et le 1^{er} trimestre 2015 :
 - Configurations V1 : configuration initiale
 - Configuration V2.1 : seuil prolongé et entonnement modifié (note de musique)
 - Configuration V2.2 : seuil initial et entonnement modifié (note de musique)
- janvier 2017 dernière utilisation à l'occasion d'une réunion avec le CTPBOH



Figure 1 : modèle 2014/2015

Les études du nouveau projet ayant commencées en 2019, le modèle après rénovation a été repris et adapté pour les essais sur le nouveau projet, dans le cadre d'un nouveau contrat.

Le modèle actuel 2020/2021 a évolué de la façon suivante :

- dans la partie amont jusqu'au seuil non compris, la caisse a été augmentée (voir § 2.1.2) et les berges dans la retenue en rive droite et gauche ont été représentées,
- la partie aval (seuil / évacuateur / fosse / Rives) a été entièrement refaite pour correspondre aux évolutions du projet et aux nouveaux plans fournis.

La conception a été faite d'après les plans suivants transmis par ISL :

- Plan 20_073-1-16Topo200_V5.dwg reçu le 07/01/2021
- Plan 20_073-1-16-SCA MNT_V5.dwg reçu le 07/01/2021
- Plan 19F148_PRO_SCA_001_B.dwg reçu le 06/01/2021
- Plan 19F148_PRO_SCA_002_A.dwg reçu le 06/01/2021
- Fichier Geom_3_fin_fosse.igs reçu le 07/01/2021

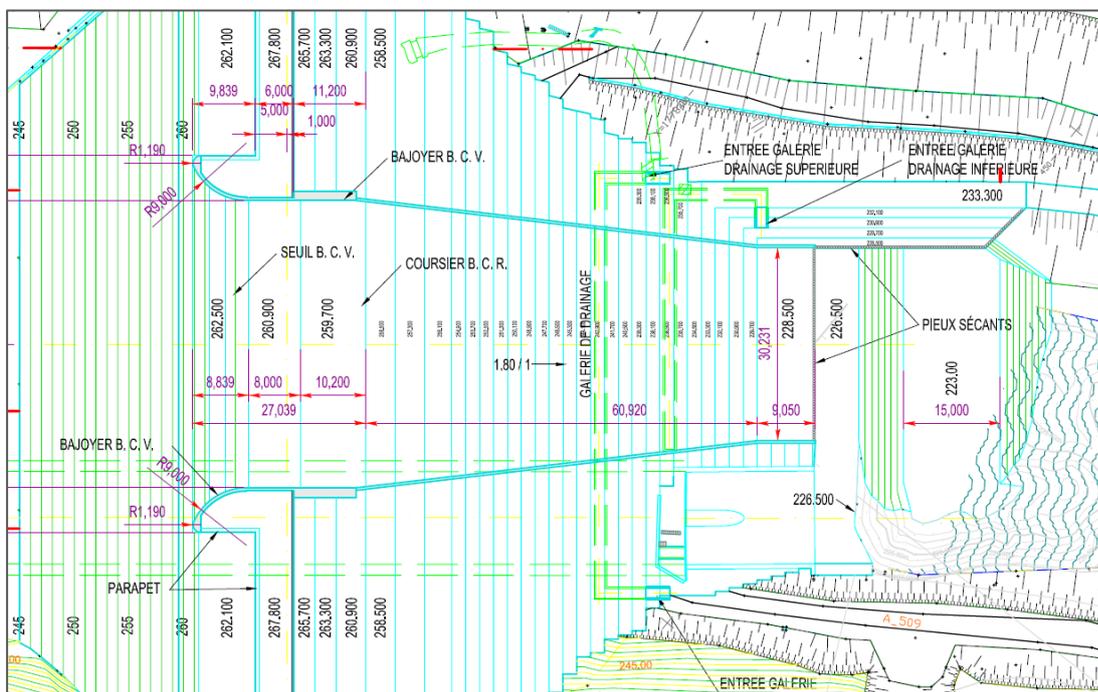


Figure 2 : Vue en plan de l'évacuateur

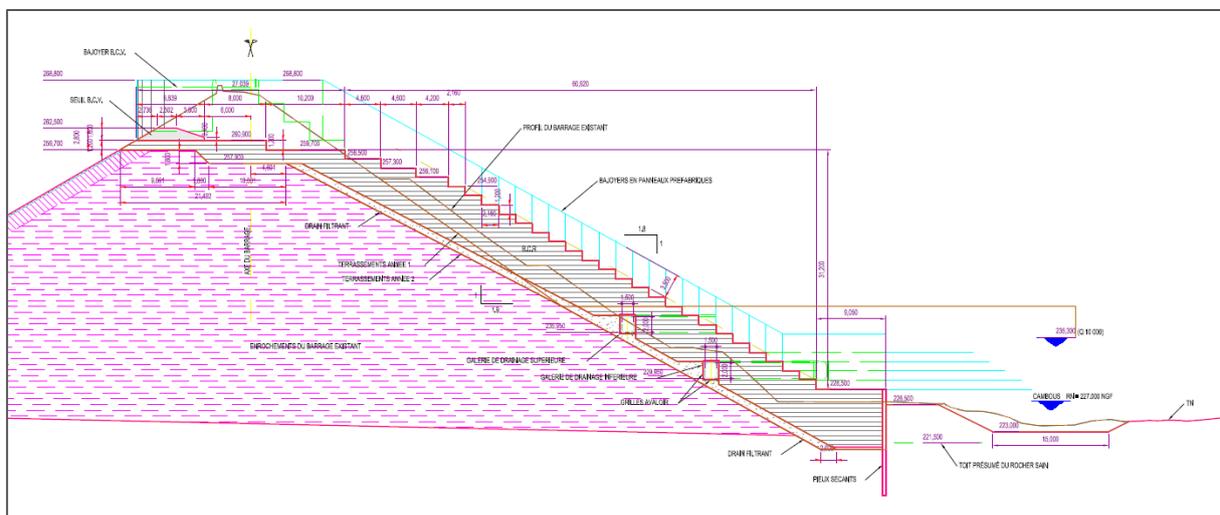


Figure 3 : Vue en coupe de l'évacuateur

1.3 RAPPEL DES OBJECTIFS DE LA MODELISATION PHYSIQUE

Les objectifs de la modélisation sont les suivants :

- Détermination des niveaux de retenue des 4 crues étudiées,
- Détermination de la loi de débitance du nouvel évacuateur de crue et de son incertitude,
- Description des écoulements sur le nouvel évacuateur de crue,
- Etude de la dissipation d'énergie sur les marches du coursier,
- Etude de la dissipation d'énergie dans le bassin en pied et de la puissance érosive (La dissipation d'énergie volumique est à extraire pour estimer l'ampleur de l'érosion du bassin),
- Etude du risque de cavitation,
- Etude de l'interaction des deux évacuateurs de crues.

2 PRESENTATION DU MODELE 2020

Dans la suite du rapport, le modèle actuel sera désigné V3, il fait suite aux itérations V2.1 et V2.2 étudiées en 2014/2015.

2.1 DESCRIPTION DU MODELE ET DE SES DERNIERES EVOLUTIONS

2.1.1.1 CONCEPTION DU MODELE (ECHELLE, MATERIAUX...)

Pour mémoire et conformément à l'offre, la construction d'un modèle physique est réalisée avec les principaux matériaux suivants :

- des murs en agglos creux de 20 hourdés au mortier de ciment, pour les conditions amont,
- des pièces en polystyrène HD, assemblées par collage, jointées et résinées,
- des parties en plexiglas (bajoyers de l'EVC) pour faciliter les observations.

Le fond du modèle a été construit en remblais en respectant la topographie réelle. Avant chaque essai, le fond a été nettoyé pour garder un fond propre (Figure 4). La Figure 5 montre l'ensemble du modèle¹.



Figure 4 : Photo du fond et des berges du modèle V3 avant l'essai (photo prise en mars 2021)

¹ Les plantes n'existaient pas lors des essais réalisés en mars.



Figure 5 : Photo générale du modèle V3 (photo prise en été 2021)

2.1.1.2 ECHELLE

Conformément au cahier des charges, le modèle a été réalisé à l'échelle 1/40^e en respectant une similitude de Froude.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}}$$

Avec :

v : vitesse de l'écoulement

h : hauteur d'eau

g : accélération de la pesanteur

La conservation du nombre de Froude entre le modèle et le prototype permet de déduire les échelles pour les vitesses et les débits en fonction de l'échelle géométrique ($\lambda = 40$) :

$$\lambda_{vitesse} = \lambda^{1/2}$$

$$\lambda_{débit} = \lambda^{5/2}$$

L'écoulement diphasique sur les marches de l'évacuateur est plutôt caractérisé par le nombre de Weber qui fait intervenir la masse volumique et la tension superficielle.

$$We = \frac{\rho \cdot v^2 L_c}{\sigma}$$

En retenant une similitude de Froude, on doit donc être prudent sur l'interprétation de l'écoulement sur les marches d'escalier du coursier.

Pour valider la similitude sur l'entraînement d'air, le respect des deux conditions hydrauliques suivantes est requis :

- $Re > 10^5$
- $We > 100$

Ce point est traité dans le §9.3 « Représentativité du modèle ».

L'échelle au 1/40° retenue, conduit aux dimensions dont les ordres de grandeur sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1 : Principales grandeurs à l'échelle

Grandeurs	Réel	1/40
Longueur totale du barrage	150 m	3,75 m
Hauteur du barrage	42 m	1,05 m
Tulipe-grand axe	24 m	0,60 m
Diamètre galerie	6 m	0,15 m
Largeur évacuateur projeté	45 m	1,125 m
Longueur évacuateur	82 m	2 m
Hauteur marche	1,2 m	3 cm
Débit injecté crue T = 1 000 ans	1 080 m ³ /s	107 L/s
Débit injecté crue T = 10 000 ans	1 780 m ³ /s	176 L/s
Débit injecté crue T = 100 000 ans	2 290 m ³ /s	226 L/s
Strickler – K	60	110

2.1.1.3 MATERIAUX UTILISES

Pour ce type de modèle, le LMH utilise depuis plusieurs années, principalement de la maçonnerie traditionnelle, pour la caisse et/ou le socle du modèle (agglomération à bancher et briques pour le mur de tranquillisation).

Les pièces présentant un enjeu hydraulique et nécessitant des découpes fins sont réalisées en polystyrène HD, découpées en usine à partir de plans numériques.

L'utilisation de procédés par fusion laser (imprimante 3D), pour certaines pièces de ce modèle notamment la tulipe et la sortie des galeries qui présentent des formes plus complexes, est possible. Toutefois, la consultation des fournisseurs a mis en évidence des prix encore non compétitifs pour des exemplaires uniques.

L'utilisation du plexiglas est réservée aux parties droites présentant des phénomènes hydrauliques intéressants à observer, comme les bajoyers de l'évacuateur.

Le tableau ci-après récapitule les matériaux utilisés :

Tableau 2 : Matériaux utilisés pour construire le modèle

Ouvrage	Matériaux	Remarque
Caisse étanche	Mur agglo à bancher + briques	Etanchéité intérieure
Profil amont barrage	Contreplaqué sur équerres	Qualité marine avec peinture
Profil rives aval	Polystyrène HD	Découpage 3D
Barrage –noyau	Mur agglo à bancher	Etanchéité amont
Tour – sortie galeries	Polystyrène PSE qualité GM 29 kg/m ³ (finition intérieur résiné)	Section constante
Galeries évacuateur	Canalisation acier DN 200 mm	Vanne et débitmètre
Evacuateur projeté – Marches & seuil	Polystyrène HD	Collé sur support bois pour rattrapage niveau
Evacuateur projeté – bajoyers	Plexiglas	

2.1.2 TRAVAUX DE MODIFICATION DE LA CAISSE

2.1.2.1 ALLONGEMENT DE LA CAISSE

Lors de la réunion du 06/12/2019, le comité de pilotage a souhaité profiter de l'allongement du bassin de dissipation pour améliorer la représentativité du modèle de l'écoulement dans la retenue et de l'adapter au tracé de la vallée, en positionnant le mur de tranquillisation perpendiculairement au champ des vitesses.

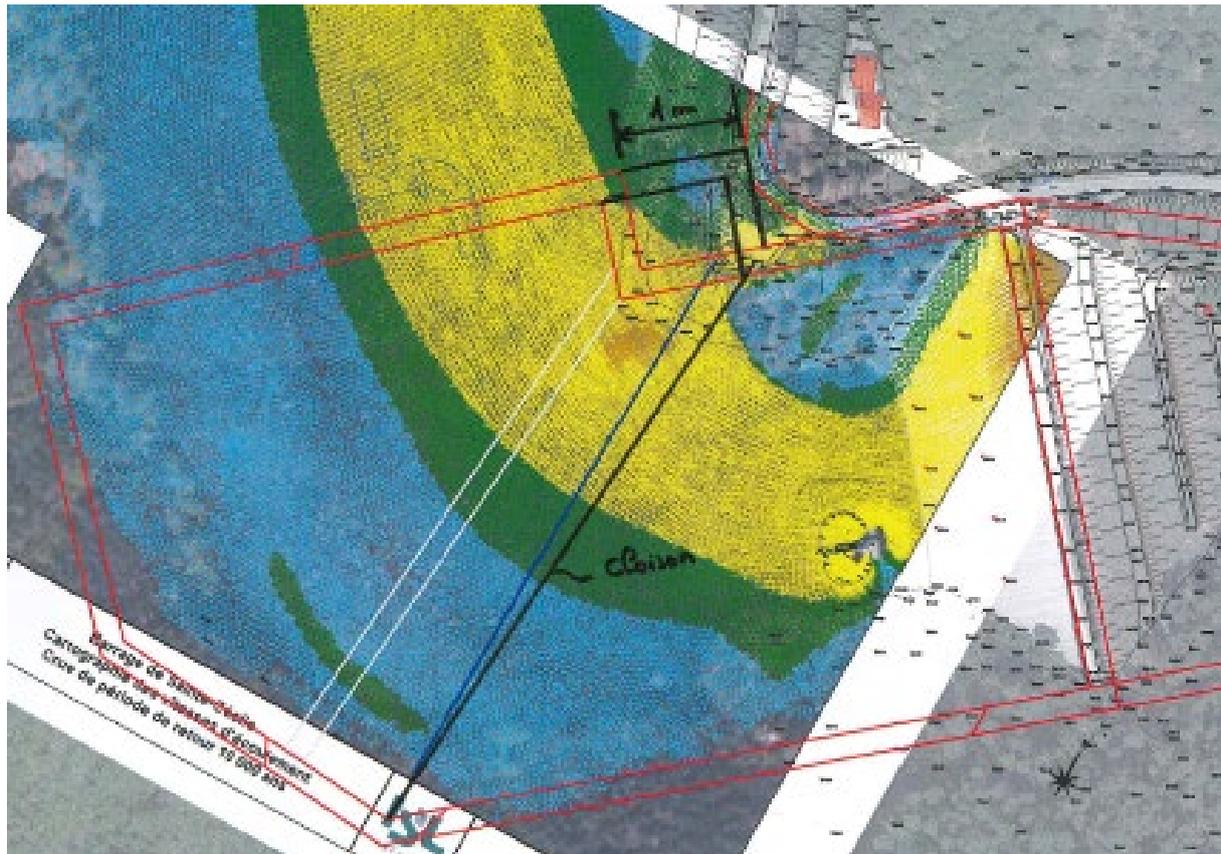


Figure 6: Positionnement du mur de tranquillisation du modèle par rapport à la retenue du barrage

Le plan validé pour l'exécution est en définitive le suivant :

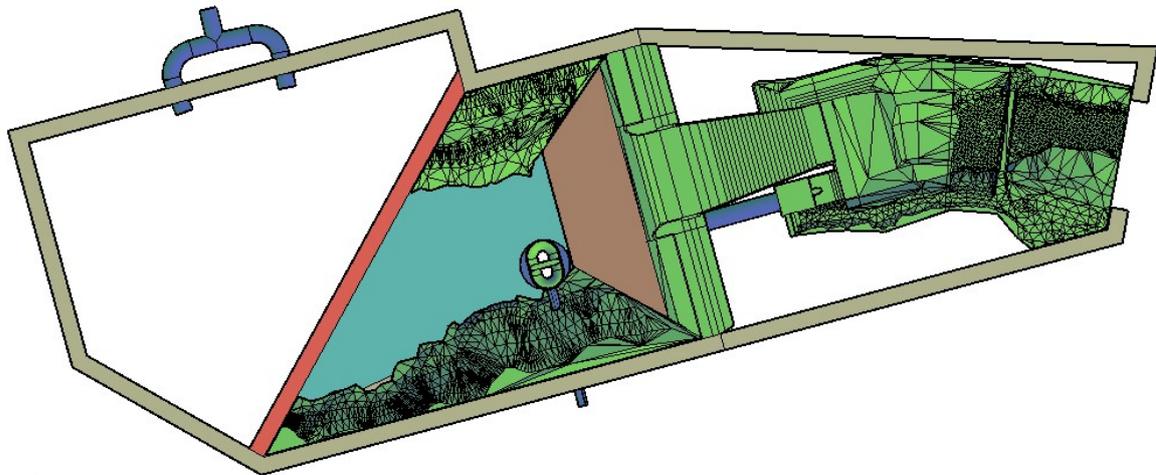


Figure 7 : Plan d'exécution du modèle V3

Légende de la Figure 7 :

- En gris : maçonnerie
- En rouge : mur en brique
- En vert : PHE
- En marron : planche en bois
- En bleu : Conduite métallique

Par rapport aux précédentes itérations, le volume de tranquillisation a été multiplié par 1,3, ce qui va dans le sens d'une amélioration de la stabilité du plan d'eau.

La réalisation a débuté le 09/01/2020 par la destruction de la partie à modifier de l'ancien modèle et la reconstruction s'est poursuivie jusqu'au 31/01/2020.

L'étanchéité a été finalisée le 12/02/2020.

2.1.2.2 DETAILS CONSTRUCTIFS :

L'alimentation est faite par deux arrivées en partie basse :



Figure 8 : Alimantation du modèle

Le mur de tranquillisation est réalisé avec des briques posées sur la tranche et permettant un passage de 51.3 %.



Figure 9 : Mur de tranquillisation

2.1.2.3 REPRESENTATION DES BERGES

Lors de la réunion du 06/12/2019, il a été décidé d'améliorer la représentativité des écoulements à l'intérieur de la retenue en engageant une modification majeure: représentation de la topographie des berges du fond à 232,10 NGF à la cote 268,80 NGF, soit sur 36,7 m de hauteur en réel et 0,9 m sur le modèle.

Dans le même objectif d'amélioration, le fond du modèle a été calé à la profondeur réelle, soit 232,10 NGF, par remplissage avec des matériaux (40 cm environ).



Figure 10 : Topographie des berges modélisée dans la caisse

La topographie des berges a été réalisée à partir des données topographiques disponibles en PHD. Quatre blocs ont été découpés en atelier par notre sous-traitant, puis positionnés par l'équipe topographique de la SCP. Pour éviter des déplacements dus à la poussée d'Archimède, les blocs ont été lestés (béton) et accrochés à la maçonnerie. (cf Figure 11). La pente moyenne des berges est comprise entre 70 et 200 %.

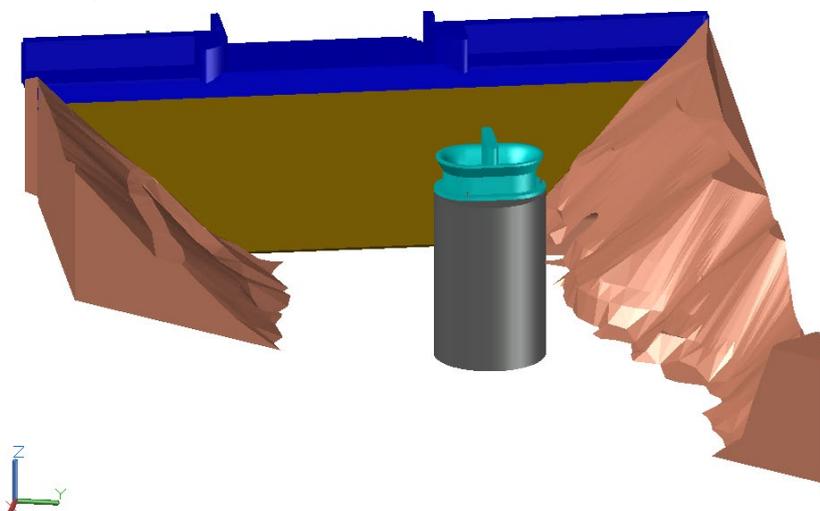


Figure 11 : Modélisation des berges amont

2.1.3 DESCRIPTION DE LA NOUVELLE MAQUETTE DE L'EVC ET DES RIVES.

Les pièces correspondantes ont été refaites. Seule la sortie galerie a été conservée et rénovée.

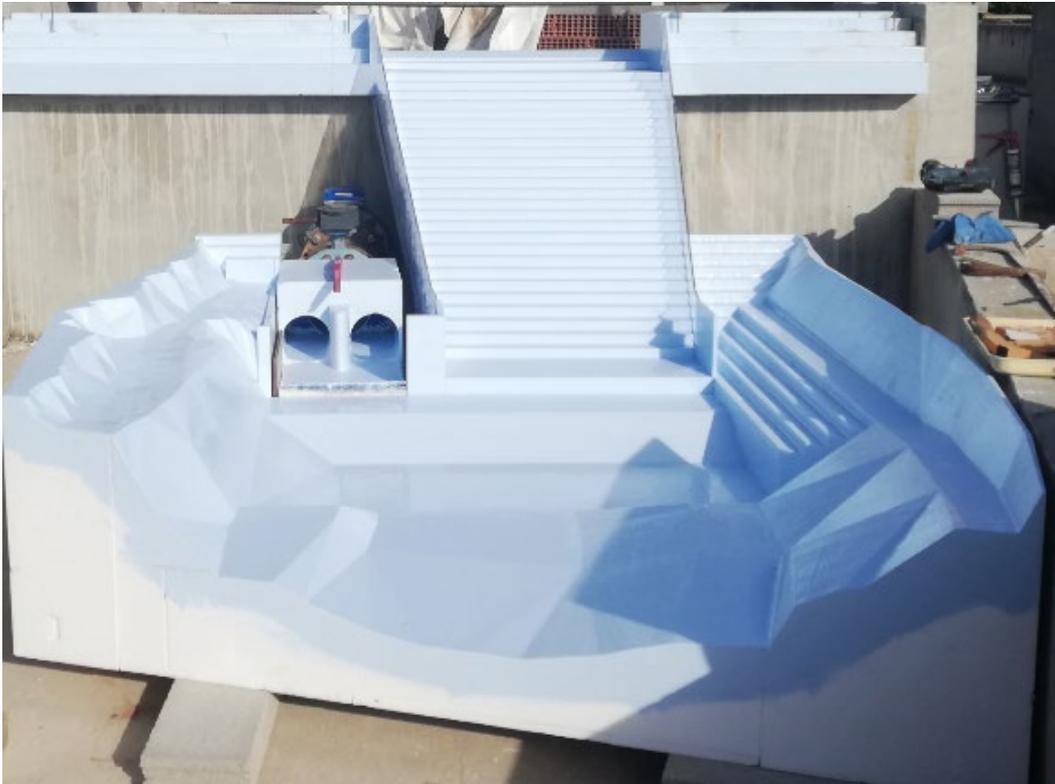


Figure 12 : Evacuateur / sortie galerie et fosse



Figure 13 : Aval et pont



Figure 14: Evacuateur et aval

2.1.4 DESCRIPTION DE LA TULIPE

La tulipe n'a pas été modifiée par rapport aux itérations précédentes.

Les études antérieures de 1961 et le modèle de 1962 (COYNE, et al., 1962) ont permis d'établir que la tulipe de la tour et les pertuis permettent d'évacuer des débits compris entre 800 et 950 m³/s.

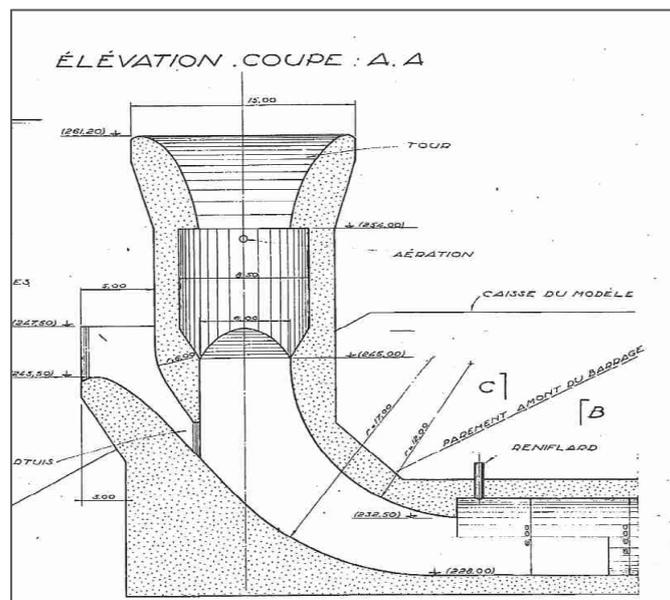


Figure 15 : coupe de la tulipe (1961)

Le tableau ci-dessous donne les cotes du plan d'eau et les différents débits (figure 14) :

Tableau 3 : Débits caractéristiques de la tulipe

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Événement	Cote atteinte (m NGF)	Débit pertuis (d'après la modélisation de 1962)	Débit pertuis retenu (modélisation de 2020)	Débit de l'ensemble tulipe+pertuis (d'après la modélisation de 1962)
T=1 000 ans	264,5 m	315 m ³ /s	300 m ³ /s	850 m ³ /s
T=10 000 ans	267,1 m	329 m ³ /s		920 m ³ /s
T=100 000 ans	268,8 m	338 m ³ /s		930 m ³ /s

L'hypothèse a été faite que le débit des pertuis est quasiment constant pour notre plage de débit. Il est proche de celui déterminé par la modélisation de 1962 (c'est-à-dire aux alentours de 300 m³/s). C'est cette valeur qui sera retenue pour la suite (colonne 4).

Pour la modélisation, les hypothèses suivantes ont été retenues :

- pour permettre l'observation des courants de surface et le fonctionnement hydraulique au niveau de l'aspiration de la tour, la partie déversant de la tulipe a été modélisée en forme et en similitude sur 12 mètres (soit 30 cm sur la maquette). On rappelle que le convergent de la corolle s'effectue sur 7.20 m (entre les côtes 261.20 et 254.00 m NGF).
- les débits entrants par les pertuis sont apportés par l'extérieur du modèle par une canalisation en DN 100 ($Q_2 = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ ou 30 L/s sur le modèle).
- Les galeries seront remplacées par un seul tuyau de diamètre équivalent 200 mm, dont le dimensionnement a été vérifié par la formule de COLLEBROOK au débit de $900 \text{ m}^3/\text{s}$. Une vanne et un débitmètre permettent de régler le débit sortant par le dispositif.



Figure 16 : Photo tulipe

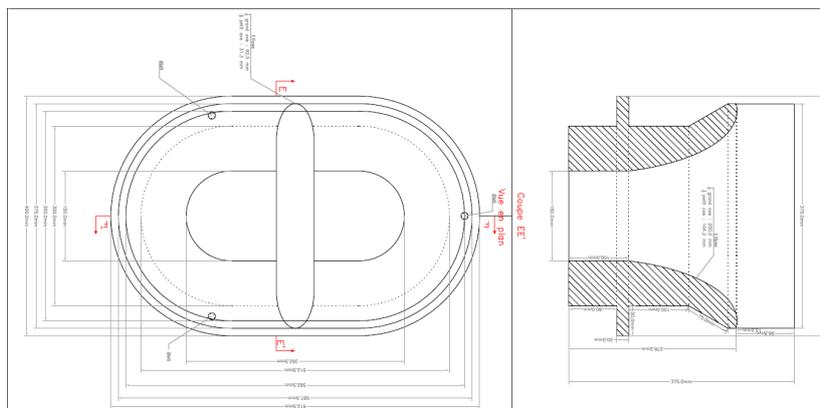


Figure 17 : Plans tulipe

2.2 ALIMENTATION ET EVACUATION DU MODELE

2.2.1 DESCRIPTION DE L'ALIMENTATION

L'alimentation du modèle se fait à 2 endroits (voir figure ci-dessous) :

- Débit Q1, variable en fonction des évènements hydrologiques modélisés au niveau de la caisse (2 arrivées en DN 200 en partie basse, reliées entre elles à l'extérieur de la caisse),
- Débit Q2, au niveau des pertuis (fixé à 30 L/s voir § 2.1.4).

La somme de ces 2 alimentations correspond aux débits injectés.

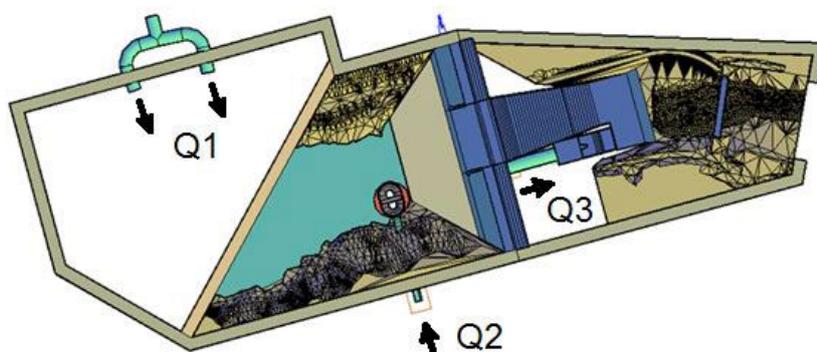


Figure 18 : Points alimentation / évacuation du modèle

2.2.2 DESCRIPTION DE L'EVACUATION

Les évacuations se font par :

- La sortie galerie (débit Q3 réglable), qui évacue la partie du débit passant par la tulipe (valeurs données par § 2.1.4).
- Le complément par l'évacuateur de crue soit $Q1+Q2-Q3$.

Le tableau ci-dessous, donne des débits injectés et sortants en L/s sur le modèle pour les périodes de retour $T= 1000, 10\ 000$ et $100\ 000$ ans.

Tableau 4 : Valeurs des débits injectés et évacués (modèle)

Evènement	Débit injecté caisse	Débit injecté à travers	Débit sortant galerie	Débit réglé débitmètre électromagnétique	Débit transitant par EVC
	Q1	Q2	Q3	Q1+Q2	$Q_{EVC}=Q1+Q2-Q3$
	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s
T=1 000 ans	76.7	30	84	106.7	22.7
T=10 000 ans	145.9	30	90.9	175.9	85
T=100 000 ans	196.7	30	91.9	226.7	134.8

3 RESENTATION DE L'INSTRUMENTATION ET DU PROTOCOLE DE MESURES

Pour chacune des grandeurs mesurées, le § 3.1 précise la méthode et la position de l'instrument de mesure. L'analyse des incertitudes et le passage au site NGF de Sainte Cécile sont donnés dans le § 3.2.

Le calcul des débits et la détermination de leurs incertitudes (intégration des vitesses, fuites, stabilité) est également abordé dans cette partie.

3.1 PROTOCOLE DE MESURE

3.1.1 NIVEAUX D'EAU DANS LA RETENUE

- La mesure du plan d'eau de la retenue s'effectue à l'aide d'une pointe limnimétrique qui coulisse sur un support fixe, rattaché dans le système altimétrique du modèle.
- Pour réaliser la mesure, l'extrémité de la pointe est descendue de manière à « tangenter » le plan d'eau (formation d'un ménisque au contact de la pointe à la surface de l'eau).
- La précision de la pointe est prise égale à l'échelon de lecture, soit 0,1 mm.
- A chaque mesure, les valeurs mini et maxi sont fournies ainsi que le calcul de l'écart-type et de la moyenne. De ce fait, on prendra une répétabilité σ répétabilité = 0.



Figure 19 : Mesure niveau plan d'eau

La vérification de l'horizontalité du plan d'eau a été faite à l'aide d'un dispositif qu'on a fait se déplacer entre les pointes limnimétriques en rive droite et gauche.



Figure 20 : Flotteur avec prisme utilisé pour vérifier l'horizontalité du plan d'eau

Les résultats sont donnés dans le chapitre § 5.1.2 avec une exactitude de ± 1 mm.

3.1.2 HAUTEURS D'EAU SUR LES OUVRAGES

➤ Position du réglet :

A l'entonnement : voir photo.

Sur le seuil : perpendiculaire à l'écoulement.

Dans le coursier : perpendiculaire à la marche (la hauteur de la marche a été soustraite).

Pour les 2 rives du coursier, le réglet est positionné à l'extérieur de la paroi en plexiglas.

Bassin et fosse : perpendiculaire au fond

➤ Lecture :

Directe par 2 opérateurs au plus, ce qui permet de faire des mesures en simultanée sur les 2 rives.

La valeur retenue est la plus fréquente mesurée pendant 30 s.



Figure 21 : Mesures sur seuil



Figure 22 : Mesure dans le coursier



Figure 23 : Mesure en aval

3.1.3 PROFILS DE VITESSE DANS LA RETENUE

Les profils de vitesse dans la retenue sont réalisés à partir d'un Doppler sur catamaran de marque OTT. Les positions des verticales sont repérées sur le plan d'implantation des mesures, une corde est tendue de part et d'autre de la caisse avec des repères permettant d'effectuer les différentes mesures toujours aux mêmes endroits.

L'appareil fournit par lecture directe une vitesse moyenne sur la verticale, ou après transfert des données, une moyenne sur des cellules de 10 cm de hauteur réparties sur cette même verticale.

- Les profils de vitesses sont réalisés sur une verticale, dans des cellules espacées de 0,1 m.

Les résultats de mesure sont donnés à 0,001 m/s.

- L'appareil est étalonné par le constructeur sur son banc d'essais, la précision annoncée par le constructeur est de 1 % de la pleine échelle $\pm 0,005$ m/s.



Figure 24 : Mesures catamaran

3.1.4 VITESSES PONCTUELLES AU MOULINET

L'écoulement sur le seuil et le coursier est caractérisé par une faible hauteur d'eau et une vitesse élevée.

Le courantomètre électromagnétique et le courantomètre doppler ont été testés, mais l'écoulement est trop perturbé pour assurer une bonne répétabilité des mesures.

Le micro-moulinet est bien adapté aux mesures ponctuelles en sélectionnant le bon type d'hélice (dimensions par rapport à la hauteur d'eau et gamme de vitesse étalonnée).

Les mesures ont été réalisées avec un moulinet à hélice de marque OTT (N° de série 168872) équipée de l'hélice N°3 (N° de série 169552 – diamètre 50 mm – pas 0,250 mm).

Le temps de mesure est fixé à 30 s, le nombre total de tour d'hélice comptabilisé durant cette période permet de calculer la vitesse moyenne en appliquant l'équation fournie par le constructeur et donné par le certificat d'étalonnage.

L'appareil a été étalonné sur le banc du constructeur, les résultats sont donnés avec une incertitude absolue de ± 3 mm/s.

- Position du point de mesure :
 - Le point de mesure correspond à l'extrémité amont de l'hélice.
 - Un mètre ruban a été positionné entre les 2 bajoyers pour repérer les points de mesure dans le coursier.
- Position du moulinet :
 - Sur le seuil : horizontal dans le sens de l'écoulement, à mi-hauteur.
 - Dans le coursier : le corps du moulinet est posé entre deux marches successives (cf. photo et remarque ci-après).
 - En aval : perpendiculaire au fond.
- Lecture :
 - Nombre total de tours en 30 s.
- Valeur de la vitesse:
 - Par calcul, suivant la formule du constructeur.

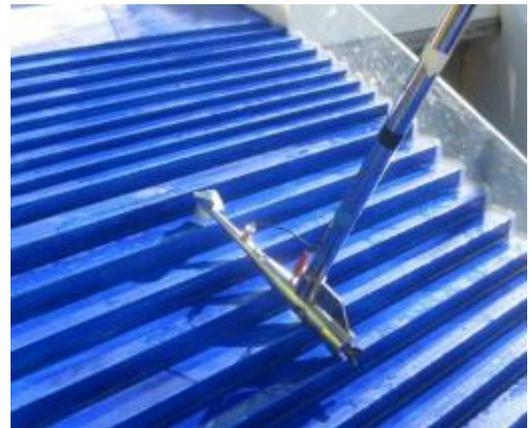


Figure 25 : Mesure vitesse dans EVC



Figure 26 : Mesure vitesse aval

3.1.5 MESURE DE PRESSION

Les mesures de pression sont réalisées à partir des capteurs de pression de marque HUBA CONTROL type 528, plage de mesure [500 mbars, + 500 mbars].

L'Ecart Maximal Toléré (EMT), donné par le constructeur est de $\pm 0,3$ % de la pleine échelle.

La résolution de la mesure est 0,1 mbar.

➤ **Position du point de mesure**

Les points de mesure retenus sont équipés de tubes RILSAN dimension 4/6 mm. Les capteurs sont reliés aux RILSAN par l'intermédiaire d'un TE et d'une vanne, ce qui permet de réaliser la purge d'air indispensable au bon fonctionnement de ces capteurs.

➤ **Acquisition des mesures**

Les capteurs sont reliés à la centrale d'acquisition de marque **SIRIUSi-8STGM**.

Le paramétrage de la centrale est le suivant :

- Fréquence d'échantillonnage = 5 kHz (capteur limité à 100 Hz),
- Enregistrement sur 1 minute = 60 s,
- Sans Filtre.

Après vérification du zéro à débit nul, l'acquisition des mesures est lancée.

A la fréquence 5 000 Hz, soit 5000 mesures / seconde pendant 60 secondes, on obtient 300 000 valeurs.

Pour chaque point de mesure, le traitement des valeurs acquises permet de définir, la moyenne, l'écart-type et mini/maxi, après élimination des valeurs aberrantes.

L'ensemble des valeurs mesurées est transmis dans un fichier Excel.

3.1.6 MESURE DE L'ENERGIE DISSIPÉE

Le dispositif permettant une mesure globale du taux de dissipation est constitué d'un cylindre de plexiglas vertical gradué, raccordé à un tuyau placé dans l'axe de l'écoulement.

Après stabilisation, il permet la mesure de la hauteur d'eau dans le pot (H1 = H aval) représentative de $h + V^2/2g$ que l'on vient comparer à la hauteur du plan d'eau (H2 = H amont).

La mesure du taux de dissipation s'obtient en calculant l'écart relatif (en %) :

$$\text{Taux (en \%)} = \frac{(H2 - Z \text{ référence}) - (H1 - Z \text{ référence})}{(H2 - Z \text{ référence})} \times 100$$

Avec Z référence = Z fond fosse = 223,00 en réel.

Il n'a pas été noté de variabilité de la mesure en déplaçant légèrement le dispositif.

- Position des points de mesure :
Dernière marche dénoyée (N°9)
sous le pont (N° 14)
- Lecture :
Hauteur d'eau dans le pot
= H1 = H aval
Hauteur du plan d'eau
amont = H2 = H amont

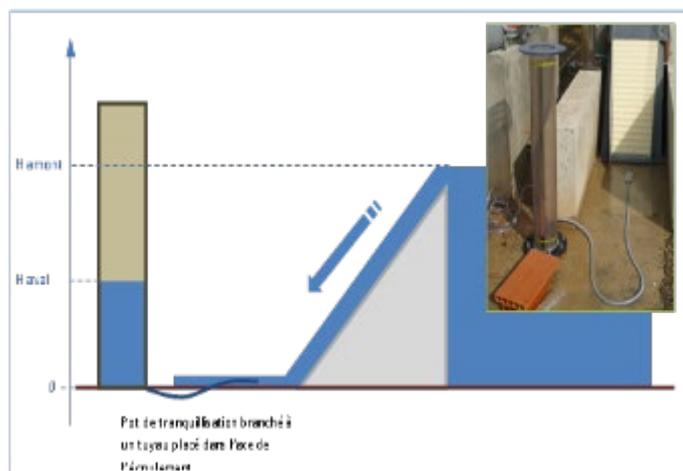


Figure 27 : Mesure de dissipation énergie

3.1.7 MESURE DE DEBIT

Les débits injectés et sortants sur le modèle sont mesurés par des débitmètres électromagnétiques de marque Krohne en DN 100 et DN 200 mm.

Ces appareils ont été étalonnés sur le banc du constructeur avant leur installation en 2020. L'incertitude du banc du constructeur est de $\pm 0,02$ %.

La connaissance du comportement des appareils permet de fixer une Erreur Maximale Tolérée (EMT) de 0,2 %, prise égale à 10 fois l'exactitude des débitmètres, ce qui permet de tenir compte de la dérive dans le temps notamment.

Le réglage du débit se fait par lecture directe, l'échelon de lecture est de 0,1 L/s.

Après la stabilisation initiale, la fluctuation maximale observée sur la mesure des débits pendant le temps d'essais sur 20 mesures minimum est de $\sigma = 0,5$.

3.2 DETERMINATION DES INCERTITUDES ASSOCIEES

3.2.1 METHODE D'ESTIMATION

3.2.1.1 EXACTITUDE / INCERTITUDE DE L'APPAREIL DE MESURE (U1)

Plusieurs cas se présentent :

- Si on dispose d'un certificat d'étalonnage en cours de validité, indiquant une incertitude élargie U (intervalle de confiance avec un niveau de confiance de 95 %) on peut écrire que l'incertitude de l'appareil de mesure (u_1) est :

$$u_1 = \text{incertitude élargie du banc} / 2 = U/2$$

C'est le cas des mesures de vitesse ponctuelles au moulinet.

- Si les documents constructeurs donnent une EMT (Erreur Maximale Tolérée), c'est-à-dire une incertitude élargie avec un niveau de confiance de 100 %, on utilise :

$$u_1 = \text{EMT} / \sqrt{3}$$

C'est le cas des capteurs de pression et des mesures de hauteur.

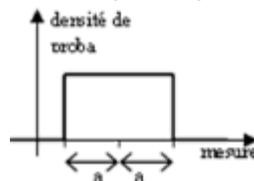
3.2.1.2 RESOLUTION DE L'APPAREIL (U2)

Pour l'incertitude sur la lecture, on considère une loi de distribution « rectangle » car la lecture peut prendre n'importe quelle valeur entre $[-\frac{1}{2}$ échelon et $+\frac{1}{2}$ échelon].

L'échelon étant la plus petite grandeur mesurable par l'instrument de mesure,

Cas 1 : échelon de lecture est exprimé par l'intervalle $[-a, +a]$ alors $u_2 = a / \sqrt{3}$

Cas 2 : échelon de lecture est exprimé par l'intervalle $[0, +A]$ alors $u_2 = A / 2 \sqrt{3}$



Avec $a = A / 2$

3.2.1.3 VARIABILITE DU PHENOMENE A MESURER (U3)

Cette incertitude permet de caractériser la **répétabilité** de la mesure.

On calculera un **écart type σ** sur N mesures mesurées dans les mêmes conditions.

L'écart-type sera divisé par \sqrt{N}

Dans les différents cas considérés, le calcul de l'écart type est obtenu de la façon suivante :

- **Débits** : la variabilité de l'affichage du débit est observée durant la durée d'un essai. L'écart-type est calculé entre le Q max et le Q min en divisant par $\sqrt{2}$. Les calculs ont été faits pour $Q_{\max} = 250$ L/s et ce résultat est appliqué à tous les débits.
- **Niveaux retenue** : l'incertitude de répétabilité n'a pas été estimée car toutes les valeurs mini et maxi sont fournies et qu'il n'est pas calculé de valeur moyenne.
- **Mesures de hauteur au réglet**. Pour déterminer un écart-type de répétabilité, la méthode suivante a été appliquée pour 3 cas :
 - Hauteur sur seuil,
 - Hauteur dans coursier en rive droite ou gauche,
 - Hauteur dans coursier à l'axe.Lors des précédents essais, l'écoulement stabilisé à $Q 10\ 000$ a été filmé pendant 10 secondes au niveau du réglet. Les images extraites du film ont permis de lire entre 22 et 30 mesures qui constituent l'échantillon de l'écart type.
- **Mesures des profils de vitesse dans la retenue** : Lors des précédents essais, la réalisation du même profil de vitesse a été refaite 8 fois pour déterminer l'écart type.
- **Mesures de vitesse ponctuelle** dans coursier et fosse aval : Lors des précédents essais, l'incertitude de type A pour la mesure ponctuelle au moulinet a été déterminée à partir de 5 répétitions à $Q 10\ 000$, pour les 3 cas suivants :
 - Coursier
 - Fosse aval
 - Au niveau du pont.
- **Mesures de pression**, les niveaux mini et maxi des pressions sont mesurés : $\sigma = 0$.

3.2.1.4 COMPOSITION DES INCERTITUDES ELEMENTAIRES

L'incertitude globale résulte de la composition en valeur quadratique des incertitudes élémentaires (u_1 : incertitude de l'appareil ; u_2 : résolution de lecture et u_3 : répétabilité de la mesure), exprimée en \pm de l'incertitude non élargie :

$$U_{globale} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}$$

➤ **Cas particulier du débit seuil :**

Il est obtenu par le calcul à partir de valeurs mesurées, en faisant la soustraction du débit entrant et de celui mesuré en sortie galerie, les incertitudes de chaque débitmètre se composent en valeur quadratique soit :

$$U_{Q_{seuil}} = \sqrt{U_{Q_{entrant}}^2 + U_{Q_{sortie\ galerie}}^2}$$

Les incertitudes sur Q entrant et Q sortant étant identiques, cela revient à multiplier par un coefficient $\sqrt{2}$. On retiendra cette incertitude sur la mesure des débits, car c'est la valeur la plus pénalisante, ce qui revient à multiplier par $\sqrt{2}$ pour tenir compte de la composition des 2 incertitudes.

➤ **Cas particulier de l'incertitude sur l'énergie :**

L'incertitude sur la ligne d'énergie est obtenue par le calcul à partir de la formule :

$$E_{totale} = Z_{radier} + h + \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

L'incertitude sur Z radier sera négligée car d'un ordre inférieur ($1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}$) par rapport aux 2 autres incertitudes. Dans le tableau suivant, on distingue les valeurs obtenues pour le seuil et le coursier.

Les incertitudes élémentaires $u(v)$ et $u(h)$ sont composées de la façon suivante :

$$u^2(\text{Energie}) = u^2(\text{hauteur}) + 2/2g u^2(\text{vitesse}) = u^2(\text{hauteur}) + 1/10 u^2(\text{vitesse})$$

Le calcul est fait par rapport aux valeurs réelles (voir tableau 7).

3.2.2 RESULTATS

3.2.2.1 TABLEAU DE SYNTHESE

On obtient les valeurs suivantes des incertitudes liées aux instruments de mesure sur le modèle :

Tableau 5 : incertitudes liées aux instruments de mesure

Mesures	Instrument	unité	valeur max	EMT ou étalonnage	résolution	u1 Précision	u2 Résolution
Débits	Débitmètres électromagnétiques	L/s	250	0,020%	0,1	$\pm 0,02 \% / 2 \times Q \text{ max}$ 2,5E-02	Division par $\sqrt{3}$ 0,06
Niveau retenue	Pointe limnimétrique	mm		0,1	0,05	0,10	0,03
Hauteur	Réglets	mm		1	0,5	EMT = 1 mm Division par $\sqrt{3}$ 0,58	$\pm 0,5 \text{ mm}$ Division par $\sqrt{3}$ 0,29
Vitesse moyenne profil vertical dans retenue	Doppler sur catamaran Marque OTT	m/s	0,1	1%	0,001	Données constructeur 5,77E-02	Division par $\sqrt{3}$ 5,77E-04
Vitesse ponctuelle	Moulinet à hélice Marque OTT	tours convertis en m/s	250	Incertitude $\pm 3 \text{ mm/s}$ soit 0,03 m/s	+ 1 tour /250 coefficient soit 0,01 m/s	certificat étalonnage étalonnage 3,00E-02	Division par $\sqrt{3}$ 5,77E-03
Pression	HUBA CONTROL [-500, +500 mbar]	mbar	500	0,30%	0,1	Données constructeur $\pm 0,3\% / \sqrt{3} \times 500$ 0,87	Division par $\sqrt{3}$ 2 $\sqrt{3}$ 0,03

Le tableau ci-après donne les incertitudes liées au phénomène et résultante ($\sigma = 2$).

Tableau 6 : Incertitudes liées au phénomène et globales élargies

Mesures	σ	n	u3 Variabilité du phénomène	U globale calculée	U Globale sur modèle
Débits	0,50000	20	σ / \sqrt{n} 0,11	1,28E-01	± 0,13 L/s
Niveau retenue	$\sigma = 0$	0	0,00	0,11	± 0,11 L/s
Hauteur sur seuil	6,4	22	σ / \sqrt{n} 1,36	1,509465087	± 1,51 L/s
Hauteur dans coursier RD	1,8	30	σ / \sqrt{n} 0,33	0,724338779	± 0,72 L/s
Hauteur dans coursier RG	1,42	27	σ / \sqrt{n} 0,27	0,700962302	± 0,70 L/s
Vitesse moyenne profil vertical dans retenue	0,02	8	σ / \sqrt{n} 7,07E-03	0,058169293	± 0,06 L/s
Vitesse ponctuelle seuil	0,041	5	σ / \sqrt{n} 1,83E-02	0,035630511	± 0,04 L/s
Vitesse ponctuelle coursier	0,014	5	σ / \sqrt{n} 6,26E-03	0,031185467	± 0,03 L/s
Vitesse ponctuelle Fosse aval	0,041	5	σ / \sqrt{n} 1,83E-02	0,035630511	± 0,04 L/s
Vitesse ponctuelle	0,013	5	σ / \sqrt{n} 5,81E-03	0,031098767	± 0,03 L/s
Pression			$\sigma = 0$ lecture valeurs min et max	0,866506395	± 0,87 mbar / cm d'eau

3.2.2.2 RESULTATS TRANSPPOSES AU MODELE REEL

En conclusion, on trouvera ci-après le tableau des incertitudes transposées pour les résultats réels, à partir des échelles de similitude, dans chacune des grandeurs :

- Géométrique : x 40
- Temps / vitesses : x 6,3
- Débits : x 10 119

Tableau 7 : Incertitudes échelle réelle avec k facteur d'élargissement égal à 2

Mesures		U Globale calculée	U globale élargie modèle	facteur échelle	Unités	U réelle élargie
			(k=2)			(k=2)
Débits		1,28E-01	± 0,26 L/s	10119	m ³ /s	2,60
Niveau retenue		1,10E-01	± 0,220 mm	40	m	0,009
Hauteur	sur seuil	1,50E+00	± 3,00 mm	40	m	0,120
	coursier RG	7,00E-01	± 1,40mm	40	m	0,056
	coursier RD	7,20E-01	± 1,44mm	40	m	0,058
Vitesse moy. profil vertical retenue		6,00E-02	± 0,120 m/s	6	m/s	0,76
Vitesse ponctuelle		3,60E-02	± 0,040 m/s	6	m/s	0,46
Energie	sur seuil	u (Energie) = √ (u (hauteur) ² + 1/10 u (vitesse) ²)			m	0,19
	coursier RG				m	0,15
	coursier RD				m	0,16

4 RECEPTION DU MODELE

4.1 CALAGE TOPOGRAPHIQUE DES OUVRAGES

Le calage général du modèle a été fait par rapport au point le plus bas :

Zfond égal à 223,00 NGF qui a été calé à 20 cm au-dessus de la plateforme.

Avec ce calage, **le fond de la plate-forme correspond à la cote 214,8 NGF.**

Le calage des différents points est donné dans le tableau récapitulatif suivant :

Tableau 8 : comparaison des altitudes réelles et théoriques sur modèle

	Altitude théorique	Altitude PMR (levé du 15/03/2021)	écarts (mm)
parapet RD	113,118	113,121	3
parapet RD EVC	113,118	113,119	1
parapet RG EVC	113,118	113,120	2
parapet RG	113,118	113,117	-1
seuil RD	112,961	112,962	1
seuil axe	112,961	112,962	1
seuil RG	112,961	112,962	1
bajoyer amont RD	113,118	113,118	0
bajoyer amont RG	113,118	113,120	2
bajoyer aval RD	112,291	112,290	-1
bajoyer aval RG	112,291	112,288	-3
dernière marche EVC RD	112,110	112,110	0
dernière marche EVC RG	112,110	112,108	-2
Sortie galerie saut de ski RD	112,090	112,089	-1
Sortie galerie saut de ski RD	112,090	112,091	1
fond fosse RD	111,973	111,975	2
fond fosse RG	111,973	111,973	0
Pont culée amont RD	112,331	112,331	0
Pont culée amont RG	112,328	112,328	0
rivière axe amont pont	111,996	111,994	-2
bordure pont amont RD	112,400	112,398	-2
bordure pont amont RG	112,400	112,399	-1
rivière point bas sortie modèle	112,009	112,012	3

Ramené en NGF, on obtient :

Tableau 9 : comparaison des altitudes réelles et théoriques en NGF

	Altitude théorique NGF	Altitude NGF	réelle	écarts (m)
parapet RD	268,800	268,920		0,12
parapet RD EVC	268,800	268,840		0,04
parapet RG EVC	268,800	268,880		0,08
parapet RG	268,800	268,760		-0,04
seuil RD	262,520	262,560		0,04
seuil axe	262,520	262,560		0,04
seuil RG	262,520	262,560		0,04
bajoyer amont RD	268,800	268,800		0,00
bajoyer amont RG	268,800	268,880		0,08
bajoyer aval RD	235,720	235,680		-0,04
bajoyer aval RG	235,720	235,600		-0,12
dernière marche EVC RD	228,480	228,480		0,00
dernière marche EVC RG	228,480	228,400		-0,08
Sortie galerie saut de ski RD	227,680	227,640		-0,04
Sortie galerie saut de ski RD	227,680	227,720		0,04
fond fosse RD	223,000	223,080		0,08
fond fosse RG	223,000	223,000		0,00
Pont culée amont RD	237,320	237,320		0,00
Pont culée amont RG	237,200	237,200		0,00
rivière axe amont pont	223,920	223,840		-0,08
bordure pont amont RD	240,080	240,000		-0,08
bordure pont amont RG	240,080	240,040		-0,04
rivière point bas sortie modèle	224,440	224,560		0,12

En conclusion, Les écarts entre les altitudes théoriques et relevées permettent de valider l'implantation du modèle, compte tenu des incertitudes sur les moyens de mesure, qui est donnée avec une incertitude globale élargie de $\pm 1,5$ mm.

4.2 ETANCHEITE

La vérification de l'étanchéité a été faite sur 24 heures en remplissant le modèle au niveau du seuil. Durant la vérification, il n'y a pas eu de pluie ni de vent.

Cette vérification est intervenue entre le 13/02 à 15h00 et le 14/02/2020 à 15h00.

Il a été observé un abaissement du plan d'eau de 5 cm, ce qui rapporté à la section du modèle conduit à :

$$(35,52 \text{ m}^2 \times 0,05 \text{ m}) / 24 \text{ h} = 0,074 \text{ m}^3/\text{h} = 0,02 \text{ L/s},$$

Ce débit de fuite est négligeable par rapport aux débits mesurés (entre 30 et 226 L/s).

4.3 STABILITE

La vérification de la stabilité du plan d'eau a été faite au débit de projet, Q10 000 soit en réel 1 780 m³/s le 04/03/2020.

Sur le modèle, ce débit se traduit par :

- Q1 bassin = 1 480 m³/s à l'échelle de similitude 1 / (10 119) soit 146 L/s
- Q2 pertuis tulipe = 300 m³/s à l'échelle de similitude 1/ (10 119) soit 29,6 L/s.

A ce débit, le dispositif de tranquillisation réalisé joue bien son rôle avec des oscillations du plan d'eau **inférieures à 1 mm** au niveau de la pointe limnimétrique rive droite.

5 PRESENTATION DES RESULTATS

5.1 CONDITION D'ÉCOULEMENT DANS LA CAISSE DU MODELE

5.1.1 DEBIT

Dans la présente étude, 4 crues ont été simulées avec le modèle réduit :

- Faible crue : Suite à la réunion du 09/03/2021, la faible crue retenue est une crue lors de laquelle la cote du plan d'eau est à 2 cm au-dessus de la cote du déversoir à l'échelle du modèle, soit 0,8 m à l'échelle réelle. Pour simuler la faible crue, la tulipe et la galerie sont fermées. Le débit injecté en amont du modèle est de 6,7 L/s à l'échelle du modèle, soit 67,8 m³/s à l'échelle réelle.
- Crue Q1000 : le débit injecté en amont du modèle est de 106,7 L/s à l'échelle du modèle, soit 1080 m³/s à l'échelle réelle.
- Crue Q10.000 : le débit injecté en amont du modèle est de 175,9 L/s à l'échelle du modèle, soit 1780 m³/s à l'échelle réelle.
- Crue Q100.000 : le débit injecté en amont du modèle est de 226,3 L/s à l'échelle du modèle, soit 2290 m³/s à l'échelle réelle.

La caisse du modèle V3 a été validée en juillet 2020. Elle comprend 2 points d'injections de débit (Figure 28). Une mesure sur le profil de vitesse avec Qliner a été réalisée pour valider la caisse en comparant les résultats du modèle réduit et celui du modèle numérique. La figure ci-après montre les conditions hydrauliques aux limites des 4 essais et la position des mesures de profils de vitesse dans la retenue.

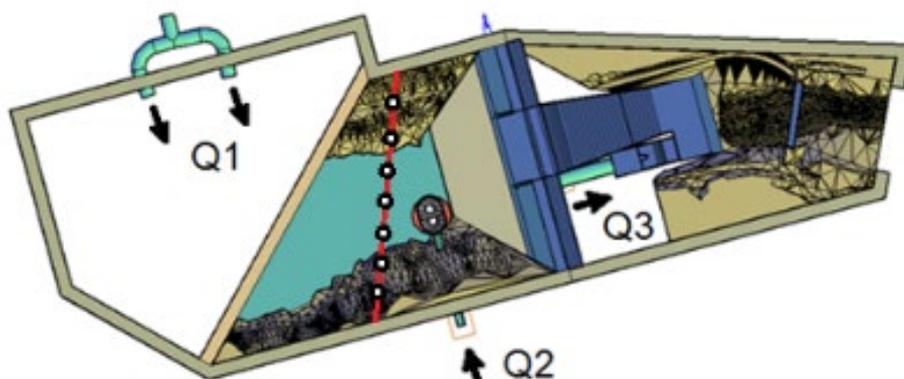


Figure 28 : Caisse du modèle V3 et le profil de vitesse mesuré avec Qliner

Tableau 10 : Synthèse de conditions hydrauliques des essais à l'échelle de modèle (L/s)

Crue	Total injecté	Q1 (amont)	Q2 (tulipe)	Q3 (galerie)	QEVC (évacuateur)
Q1000	106,7	76,7	30	84	22,7
Q10 000	175,9	145,9	30	90,9	85
Q100 000	226,3	196,3	30	91,9	134,4
Faible crue (charge de 2 cm sur le seuil du modèle)	6,7	6,7	0	0	6,7

Tableau 11 : Synthèse de conditions hydrauliques des essais à l'échelle réelle (m³/s)

Crue	Total injecté	Q1 (amont)	Q2 (Tulipe)	Q3 (galerie)	QEVC (évacuateur)
Q1000 (1080 m³/s)	1080	776	304	850	230
Q10 000 (1780 m³/s)	1780	1476	304	920	860
Q100 000 (2290 m³/s)	2290	1986	304	930	1360
Faible crue (charge de 2 cm sur le seuil du modèle)	68	68	0	0	68

5.1.2 COTE DU PLAN D'EAU

Au bord de la caisse du modèle, la mesure de la cote du plan d'eau a été effectuée avec 2 pointes limnimétriques « F1 et F2 ». Au milieu de la retenue, les cotes d'eau sur 3 points (F3 à F5) ont été mesurées à l'aide d'un flotteur équipé d'un prisme. Cette mesure permet de vérifier l'horizontalité du plan d'eau. La mesure de la cote d'eau au point entre la tulipe et l'évacuateur (F6) permet de vérifier l'horizontalité du plan d'eau proche de l'évacuateur.

La figure suivante illustre la localisation des points de mesure dans la retenue.

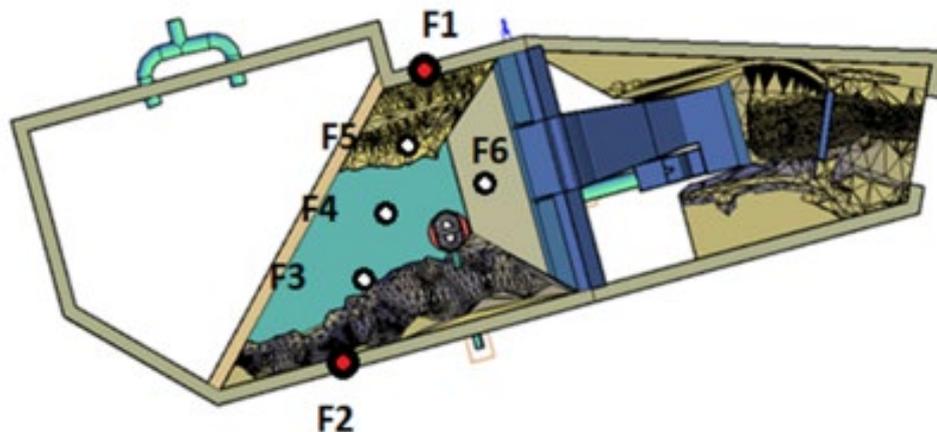


Figure 29 : Localisation des points de mesure de hauteur d'eau dans la caisse

Les récapitulatifs des résultats sont dans les tableaux 12 et 13. Les résultats bruts ont été joints dans l'Annexe 1.

A travers la comparaison entre la rive gauche et la rive droite, un écart d'altitude du plan d'eau de 6 à 12 cm (à l'échelle réelle) a été constaté entre les deux rives pour les 3 fortes crues. La cote du plan d'eau est plus élevée en rive droite qu'en rive gauche. Pour la faible crue, cet écart à l'échelle réelle est de 2 cm.

L'horizontalité du plan d'eau a été vérifiée à l'aide d'un flotteur en polystyrène équipé d'un prisme. Le flotteur est tout d'abord calé au niveau des pointes limnimétriques (F1 et F2). Puis les mesures ont été effectuées sur les points F3 à F6. Cette mesure n'a pas la même précision que celles des pointes limnimétriques. Cette mesure sert à justifier que la ligne d'eau est relativement plate sur ce profil en travers.

Les résultats montrent que l'écart maximal de la cote d'eau entre les différentes mesures est de 8 cm à l'échelle réelle (soit 2 mm mesuré à l'échelle du modèle). En conclusion, on considère que :

- la répartition de la cote d'eau entre les deux rives est linéaire,
- le fonctionnement de la tulipe n'a pas d'impact sur la cote d'eau,
- l'évacuateur n'a pas d'impact sur la cote d'eau.

Tableau 12 : Cote d'eau mesurée avec les pointes limnimétriques (valeurs converties à l'échelle réelle)

Points	Charge ² d'eau RG / seuil (m)	Charge d'eau RD / Seuil (m)	Charge moyenne / seuil (m)	Cote réelle RG (m NGF)	Cote réelle RD (m NGF)	Cote réelle moyenne (m NGF)
Cote du seuil	0	0	0	262,50	262,50	262,50
Faible crue ($\Delta H=2$ cm)	0,876	0,896	0,886	263,38	263,40	263,39
Q1000	1,868	1,93	1,899	264,37	264,43	264,40
Q10 000	4,498	4,622	4,56	267,00	267,12	267,06
Q100 000	6,05	6,168	6,109	268,55	268,67	268,61

Tableau 13 : Horizontalité du plan d'eau dans la retenue vérifiée avec le flotteur³ (valeurs converties à l'échelle réelle)

Points	Variation de la cote du plan d'eau entre F1 et F6 (m NGF)	Cote moyenne (m NGF)	Ecart type (m)
Cote Q1000	264,33 – 264,37	264,34	0,016
Cote Q10 000	267,01 – 267,09	267,05	0,025
Cote Q100 000	268,53 – 268,61	268,56	0,033

² La mesure de la hauteur d'eau est assimilée à la charge étant donné la faible vitesse dans la retenue.

³ La mesure avec le flotteur a été réalisée avec la station totale, les valeurs mesurées servent uniquement à vérifier l'horizontalité du plan d'eau. Les valeurs ne peuvent pas être comparées avec celles mesurées avec la pointe limnimétrique parce que les outils sont différents et ils ne sont pas calés de même façon.



Figure 30 : Revanche faible pour la crue Q100 000

Pour la crue Q100 000, la revanche au niveau du parapet est très faible (Figure 30). Il est constaté que la revanche est de 6 mm en rive droite et 5 mm en rive gauche à l'échelle du modèle, soit 0,24 m en rive droite et 0,2 m en rive gauche à l'échelle réelle.

Les cotes du plan d'eau au niveau du parapet sont respectivement de 268,66 m NGF en rive droite et 268,7 m NGF en rive gauche, ce qui est légèrement plus élevé par rapport à la cote du plan d'eau mesurée par les pointes limnimétrique. Cet écart s'explique par la diminution des vitesses d'écoulement au niveau du parapet et aussi par le vent soufflant le jour des essais.

5.1.3 PROFIL DE VITESSE DANS LA RETENUE

La répartition de vitesse a été levée avec Qliner sur un profil en travers entre les deux pointes limnimétriques. L'horizontalité de la ligne d'eau le long de ce profil a été justifiée avec le flotteur, ce qui correspond à l'hypothèse de la mesure avec Qliner.

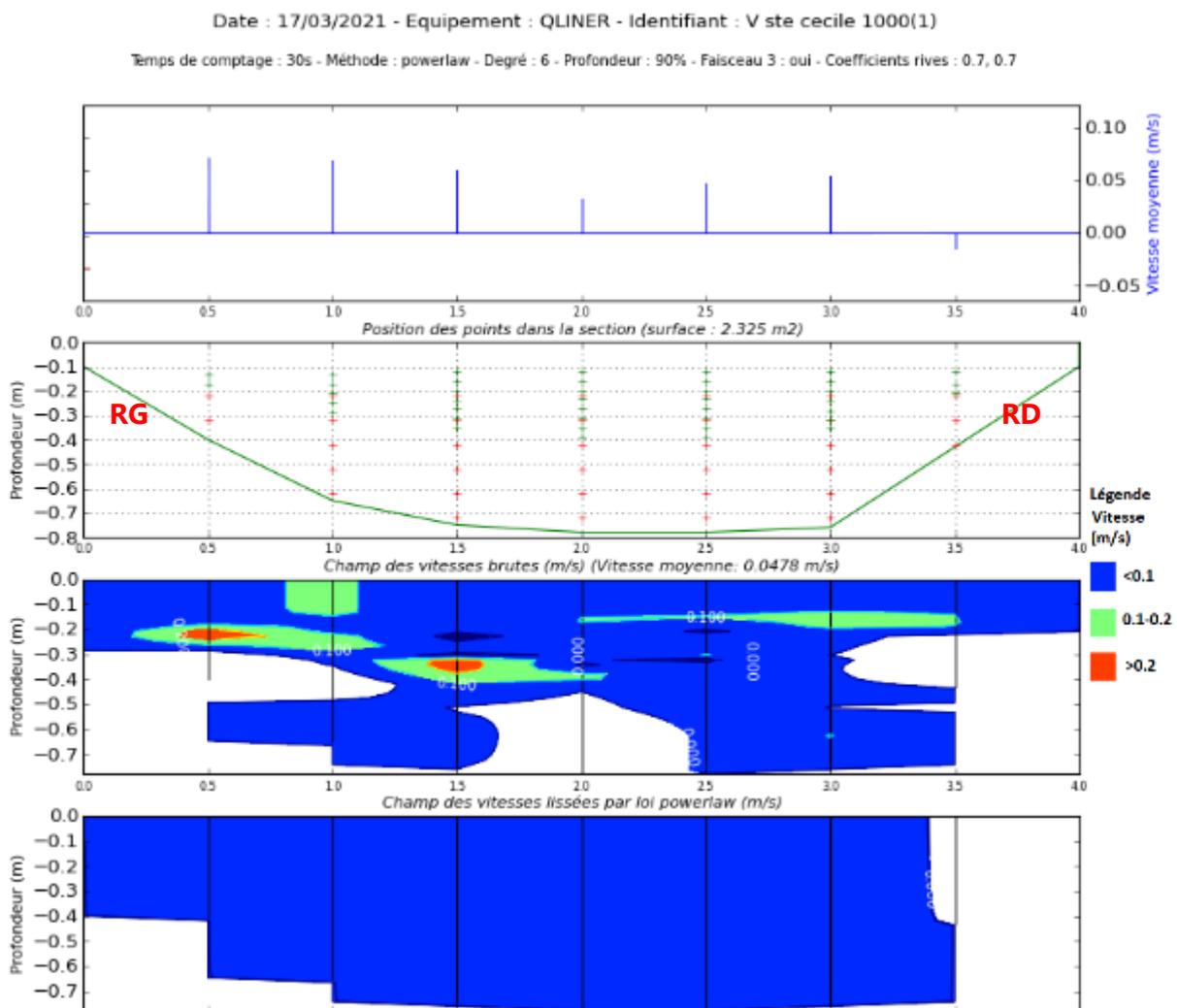
La longueur du profil est d'environ 4 m. La mesure au niveau des berges n'est pas réalisable à cause de la hauteur d'eau faible. Sur le profil en travers, 7 points ont été levés avec Qliner. Le premier point de mesure commence à X=0,5 m par rapport à la rive gauche. L'intervalle entre deux points de mesure est de 0,5 m (Figure 25).

5.1.3.1 Q1000

La répartition de vitesse de la crue milléniale (Figure 31) montre que la vitesse la plus élevée se trouve en rive gauche de la tulipe. Une diminution est constatée devant la tulipe (entre X=2,0 m et X=2,5 m). Une vitesse négative mais très faible est constatée en rive droite.

La Figure 32 montre la répartition verticale des vitesses sur les points de mesure. La ligne bleue est une approximation de la répartition de vitesse en fonction de la profondeur avec une loi de puissance.

Dans la retenue, la vitesse en rive gauche est inférieure à 0,08 m/s à l'échelle du modèle, qui correspond à 0,5 m/s à l'échelle réelle. La vitesse calculée par le lissage des mesures moyenne derrière la tulipe est de 0,05 m/s, ce qui correspond à 0,3 m/s en réalité.



Date : 17/03/2021 - Equipement : QLINER - Identifiant : V ste cecile 1000(1)

Temps de comptage : 30s - Méthode : powerlaw - Degré : 6 - Profondeur : 90% - Faisceau 3 : oui - Coefficients rives : 0.7, 0.7

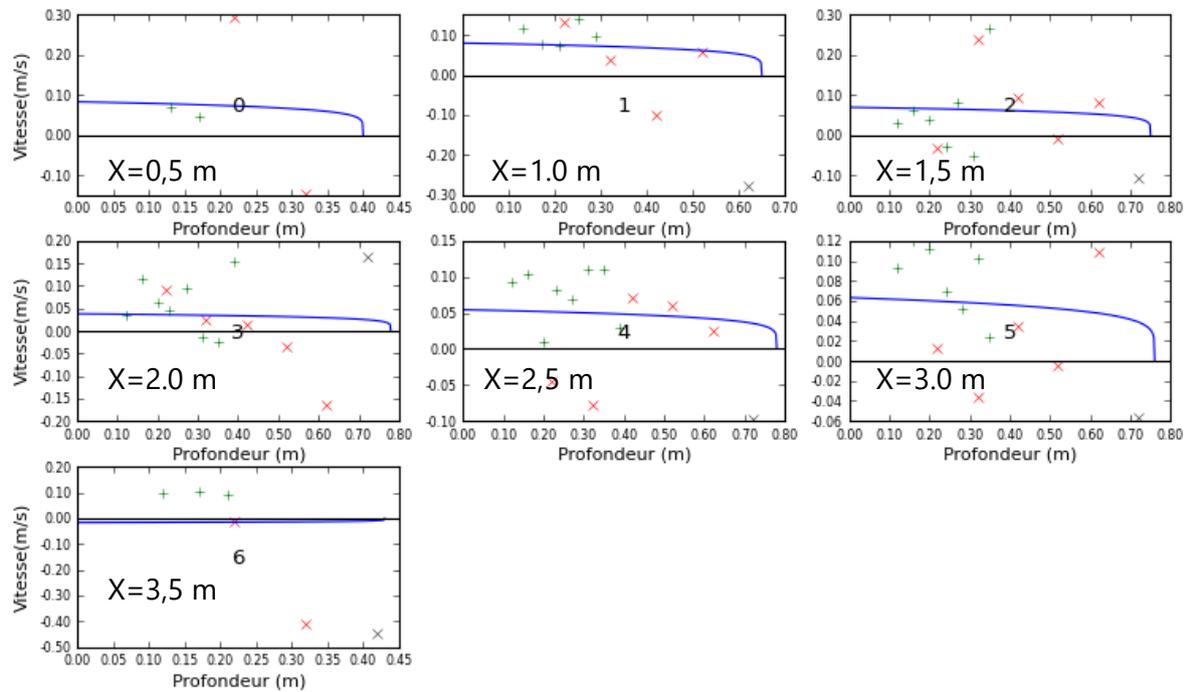


Figure 32 : Répartition verticale de vitesse sur les points de mesures (Q1000)

5.1.3.2 Q10 000

Pour la crue de 10 000 ans, la répartition de vitesse sur le profil est plus homogène par rapport à celle de la crue de 1000 ans. La vitesse maximale se trouve toujours en rive gauche de la tulipe (Figure 33). La vitesse en rive droite augmente jusqu'au même ordre de grandeur que la rive gauche.

La vitesse maximale après lissage est de 0,15 m/s à l'échelle du modèle, qui correspond à 0,95 m/s à l'échelle réelle (Figure 34).

Une comparaison sur ce point a été faite avec le modèle numérique, elle est présentée en Annexe 6.

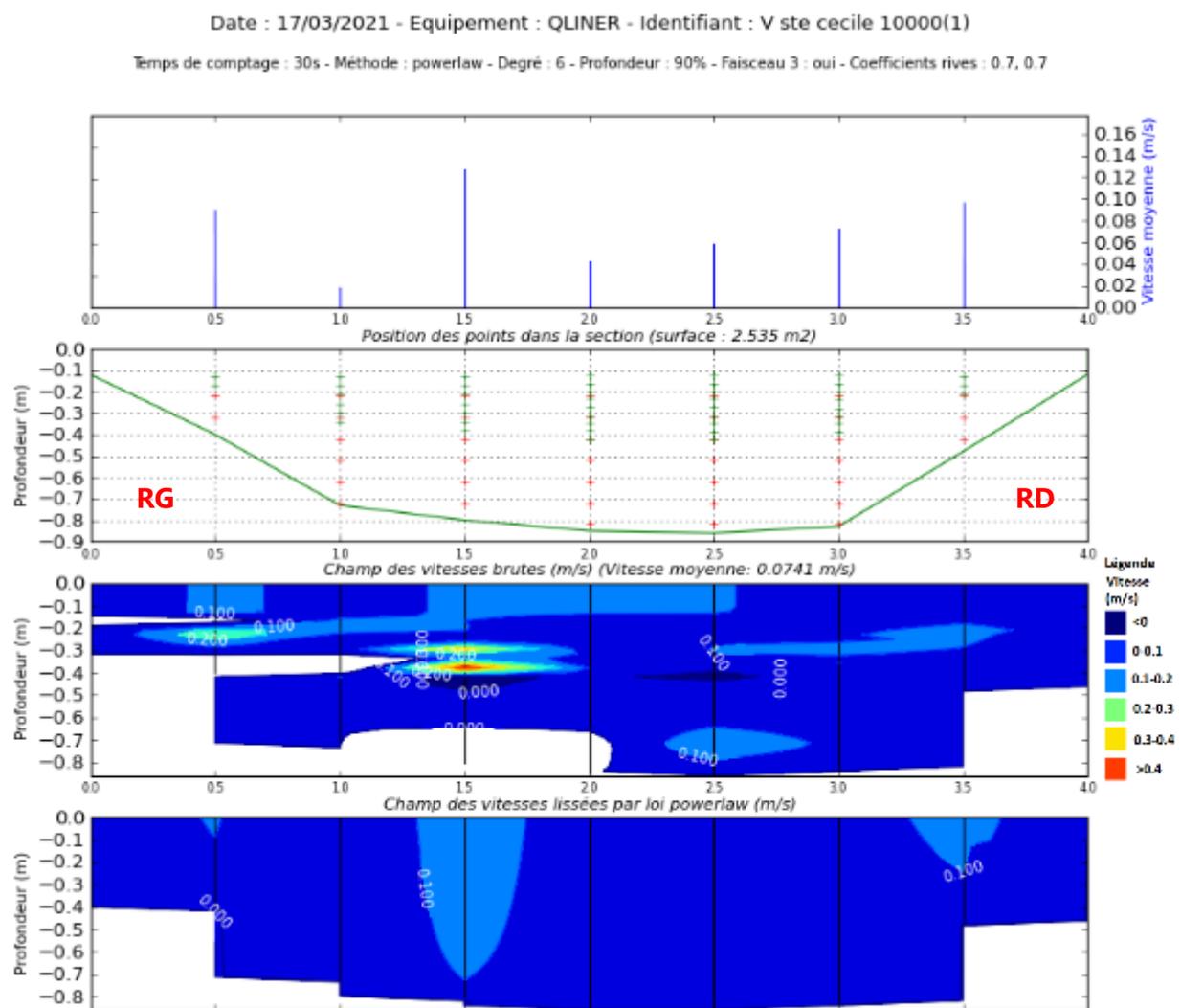


Figure 33 : Répartition de vitesse sur le profil en travers (Q10 000)

Date : 17/03/2021 - Equipement : QLINER - Identifiant : V ste cecile 10000(1)

Temps de comptage : 30s - Méthode : powerlaw - Degré : 6 - Profondeur : 90% - Faisceau 3 : oui - Coefficients rives : 0.7, 0.7

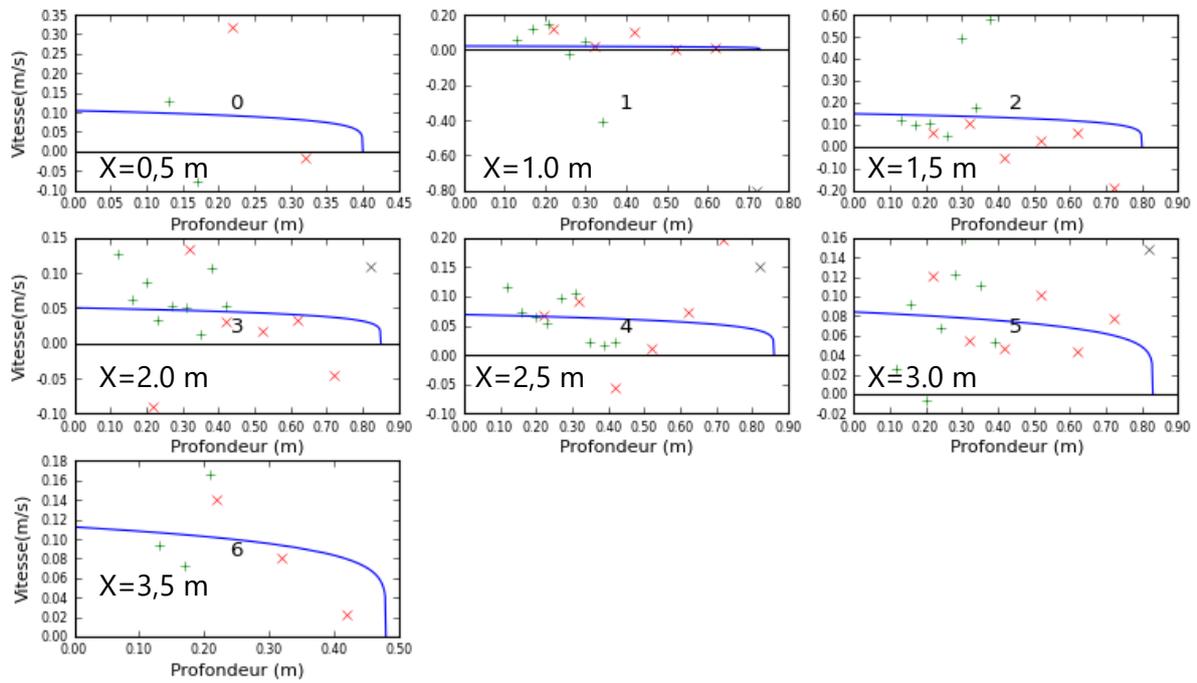


Figure 34 : Répartition verticale de vitesse sur les points de mesures (Q10 000)

5.1.3.3 Q100 000

Pour la crue de Q100 000 ans, étant donnée le débit élevé, la répartition de vitesse devient différente par rapport aux autres crues. La vitesse en rive droite augmente et devient plus élevée que celle de la rive gauche (Figure 35).

La vitesse maximale après lissage mesurée en rive gauche est de 0,12 m/s à l'échelle du modèle (Figure 36), ce qui correspond à 0,8 m/s à l'échelle réelle, tandis que celle en rive droite est de 1,0 m/s (0,16 m/s à l'échelle de modèle).

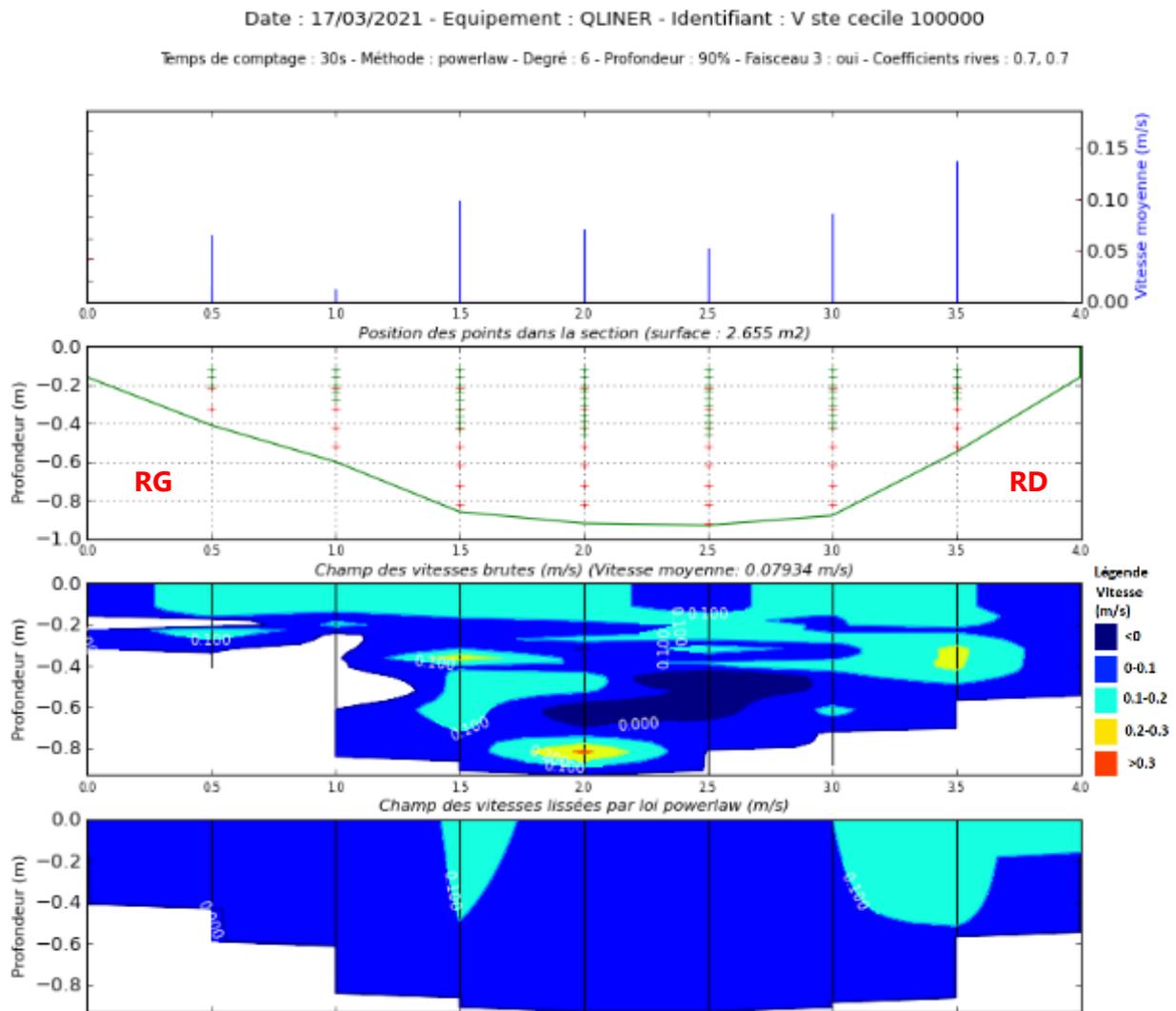


Figure 35 : Répartition de vitesse sur le profil en travers (Q100 000)

Date : 17/03/2021 - Equipement : QLINER - Identifiant : V ste cecile 100000

Temps de comptage : 30s - Méthode : powerlaw - Degré : 6 - Profondeur : 90% - Faisceau 3 : oui - Coefficients rives : 0.7, 0.7

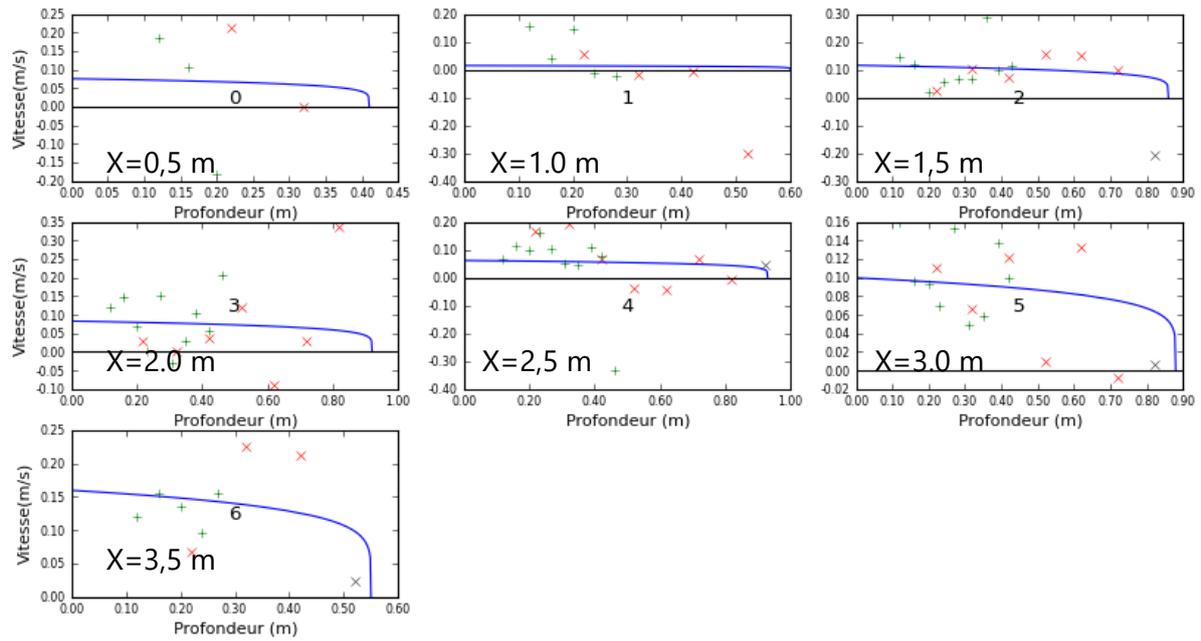


Figure 36 : Répartition verticale de vitesse sur les points de mesures (Q100 000)

5.2 CONDITIONS D'ÉCOULEMENT A L'ENTONNEMENT DE L'ÉVC A SURFACE LIBRE

5.2.1 HAUTEUR D'EAU

Trois profils en travers ont été levés dans l'entonnement. Sur chaque profil, les hauteurs d'eau ont été mesurées sur 7 points, y compris deux points au niveau des bajoyers. La localisation des points de mesure des hauteurs d'eau et les valeurs mesurées sont dans l'Annexe 3.

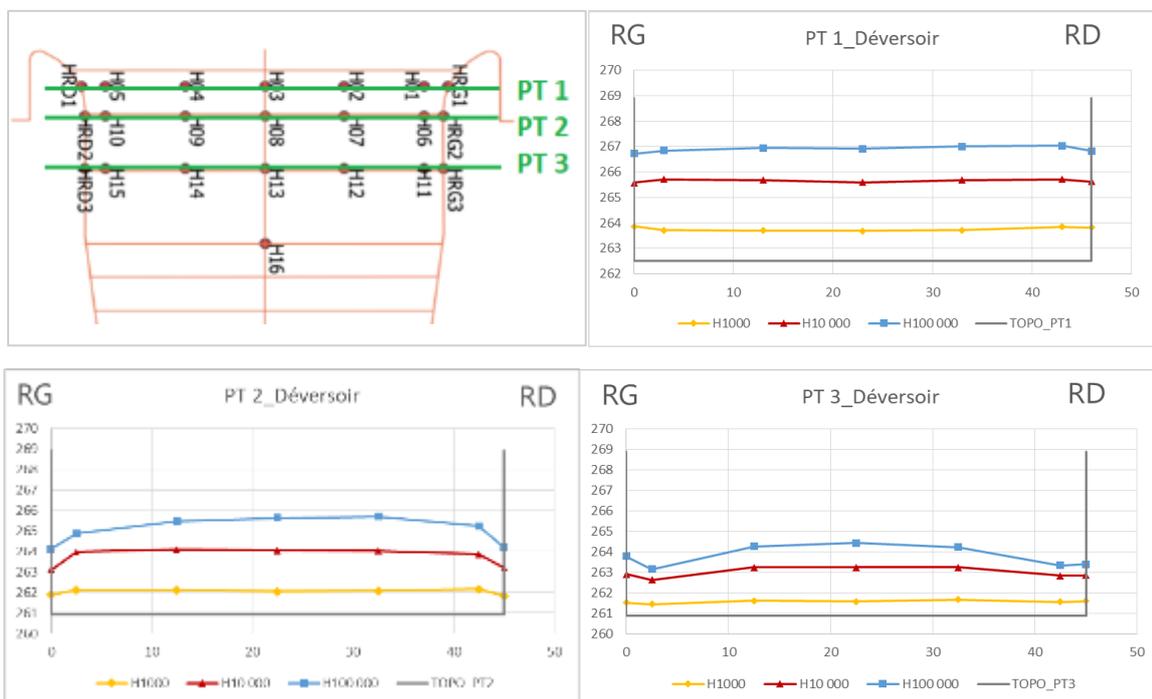


Figure 37 : Synthèse des résultats des hauteurs d'eau dans l'entonnement

La Figure 37 montre les lignes d'eau sur les profils en travers dans l'entonnement. Les cotes ont été converties à l'échelle réelle. Sur le profil PT 1, le plus à l'amont, on constate une répartition dissymétrique de la ligne d'eau. La cote d'eau est plus élevée en rive droite. Pour la crue Q1000, la hauteur d'eau est plus élevée le long des bajoyers. Pour les crues plus fortes, la hauteur d'eau est plus élevée au centre du coursier.

Sur le PT 2, le profil intermédiaire, la largeur diminue et une diminution de la cote d'eau à cause de la mise en vitesse est constatée le long des bajoyers. La répartition de la ligne d'eau est plus équilibrée pour les crues Q1000 et Q10 000, tandis que pour la crue Q100 000, la cote d'eau est plus élevée en rive droite.

Une forte mise en vitesse se trouve sur le profil le plus à l'aval, le PT 3. La répartition de la ligne d'eau est dissymétrique. Pourtant, on observe une augmentation de la hauteur d'eau le long des bajoyers. Cette augmentation est plus importante pour les fortes crues.

Les photos dans la Figure 38 montrent les écoulements dans l'entonnement et les hauteurs d'eau au niveau d'eau des bajoyers.



Figure 38 : Photos de l'écoulement dans l'entonnement

5.2.2 VITESSE D'ÉCOULEMENT

Les vitesses ont été mesurées avec le moulinet sur 7 points dans la zone de l'entonnement, y compris 2 points à l'entrée et 5 points sur le PT 2. La localisation des points de mesure des vitesses d'écoulement et les valeurs mesurées sont dans l'Annexe 4.

La Figure 39 montre la répartition dissymétrique de vitesse sur le PT 2, avec une vitesse plus élevée en rive droite, quelle que soit la crue. La différence de vitesse entre rives est maximale pour la crue Q1000 : la vitesse en rive droite est de 7 m/s et celle en rive gauche est de 5 m/s.

Cette dissymétrie devient moins marquée pour les crues fortes, avec l'écart de vitesse entre la rive gauche et la rive droite qui est inférieur à 1 m/s.

Le Tableau 14 montre les valeurs de vitesses mesurées à l'entrée de l'entonnement pour les trois crues étudiées. Les vitesses mesurées varient entre 0,9 m/s et 3 m/s, soit 20% à 40% de la vitesse mesurée sur le PT 2. Cela indique une accélération importante de l'écoulement dans l'entonnement.

La dissymétrie de la vitesse constatée sur le PT2 et cohérente avec les vitesses mesurées au point V16 (rive droite) et V17 (rive gauche).

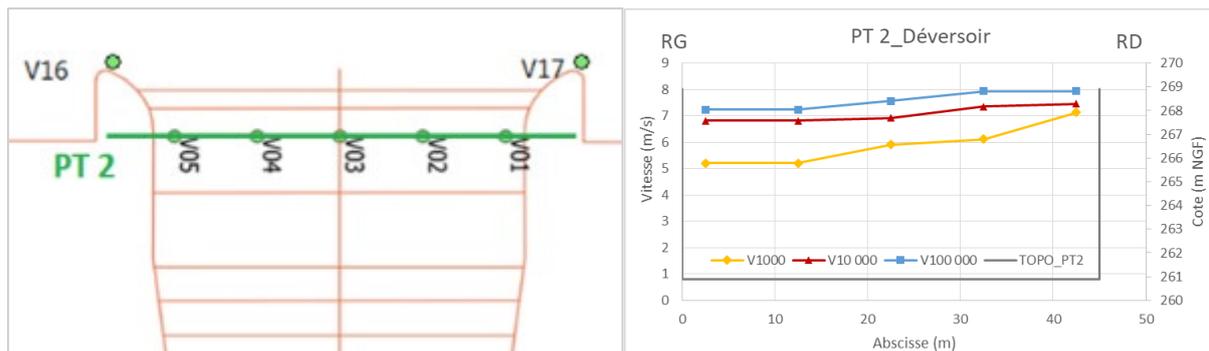


Figure 39 : Répartition de vitesse sur le profil en travers dans l'entonnement (échelle réelle)

Tableau 14 : Vitesse d'écoulement à l'entrée de l'écoulement (échelle réelle en m/s)

Point	Q1000	Q10 000	Q100 000
V16 (Rive droite)	0,94	2,22	2,88
V17 (Rive gauche)	0,94	1,74	2,68

5.2.3 COEFFICIENT DE DEBIT DU DEVERSOIR

Le coefficient de débit du déversoir a été calculé à l'aide de la formule suivante :

$$Q = \mu L h^{3/2} \sqrt{2g}$$

Où Q [m³/s] est le débit transité par le déversoir :

- μ [-] le coefficient de débit,
- L [m] la longueur du déversoir, qui est égale à 46,1 m pour le barrage de Sainte Cécile,
- h [m] la charge sur la crête du déversoir, qui est égale à la différence entre la cote du plan d'eau dans la retenue et la cote de la crête du déversoir,
- g [m/s²] l'accélération de la pesanteur.

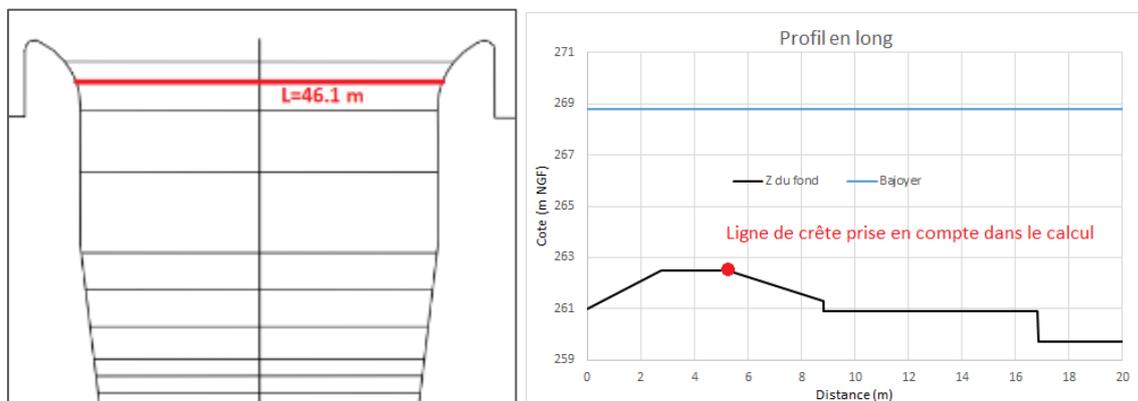


Figure 40 : Vue en plan et vue en coupe du déversoir

Le Tableau 15 montre le calcul du coefficient de débit pour les différents essais. La faible crue correspond à la cote d'eau de 263,39 m NGF dans la retenue, soit une charge de 0,89 m par rapport à la cote de la crête du déversoir (262,5 m NGF).

Le coefficient de débit calculé avec les données mesurées varie entre 0,398 et 0,441. D'un point de vue hydraulique, le fonctionnement du déversoir est différent en fonction du débit. Pour un fort débit, la mise en vitesse de l'entonnement est plus efficace, ce qui résulte en une efficacité du déversoir plus importante. La charge en augmentant, fait passer l'écoulement d'une configuration « seuil épais » à « seuil mince » avec une augmentation du coefficient de débit.

Tableau 15 : Calcul du coefficient de débit du déversoir

Crue	Q _{modèle} passé par l'évacuateur (L/s)	Q _{réel} passé par l'évacuateur (m ³ /s)	Coefficient de débit	Niveau d'eau dans la retenue (m NGF)
Faible crue	6,7	67,8	0,398	263.39
1000	22,7	229,7	0,430	264.40
10000	85	860,1	0,433	267.06
100000	134,4	1360,0	0,441	268.61

Pour les trois fortes crues, on compare les coefficients de débit du modèle physique et la formule de la SIA (Société suisse des Ingénieurs et Architectes) et la formule Rehbock, qui s'écrivent sous la forme suivante :

A) La formule de la SIA

$$\mu = 0,41 \left(1 + \frac{1}{1000h_1 + 1,6} \right) \left[1 + 0,5 \left(\frac{h_1}{h_1 + p} \right)^2 \right]$$

Limites d'application : $0,025 < h_1 < 0,8$ m

B) La formule Rehbock

$$\mu = \frac{2}{3} \left(0,605 + \frac{1}{1050h_1 - 3} + 0,08 \frac{h_1}{p} \right)$$

Limites d'application : $0,03 < h_1 < 0,75$ m

Où h_1 [m] est la charge de la cote du plan d'eau par rapport à la crête du seuil,

p [m] est la hauteur de la crête du seuil par rapport au fond.

Avec la formule de la SIA, les coefficients pour la faible crue, Q1000, Q10000 et Q100 000 sont respectivement 0,411, 0,412, 0,419, 0,424.

Avec la formule de Rehbock, les coefficients pour la faible crue, Q1000, Q10000 et Q100 000 sont respectivement 0,407, 0,409, 0,417, 0,422.

Les deux formules empiriques ne sont pas applicables dans le cas du barrage de Sainte Cécile pour les fortes crues (Q1000, Q10 000 et Q100 000), car la charge observée est trop importante. Les coefficients de débit obtenus sont plus élevés par rapport à ceux calculés avec les formules empiriques.

La charge mesurée pour la faible crue (0,89 m) est proche à la limite d'application des formules empiriques (0,8 m pour SIA et 0,75 m pour Rehbock). Le coefficient de débit calculé avec les formules empiriques est plus élevé par rapport à celui calculé avec des données mesurées.

C) Pour les seuils à crête épaisse, la Formule de Fritz & Hager (Fritz, et al., 1998) conclut que le coefficient de débit varie en fonction de la longueur relative de la crête $\xi = h_1 / (h_1 + L_{\text{crête}})$. Si la longueur relative est inférieure à 1, le coefficient de débit peut être calculé avec la formule suivante :

$$\mu = 0,43 + 0,06 \sin[\pi(\xi - 0,55)]$$

Limites d'application : $0 < \xi < 1$

Dans le cas d'étude de Sainte-Cécile, la largeur relative pour la faible crue, Q1000, Q10000 et Q100 000 sont respectivement de 0,26, 0,43, 0,65, 0,71 et les coefficients de débit calculés sont respectivement de 0,383, 0,408, 0,448, 0,459.

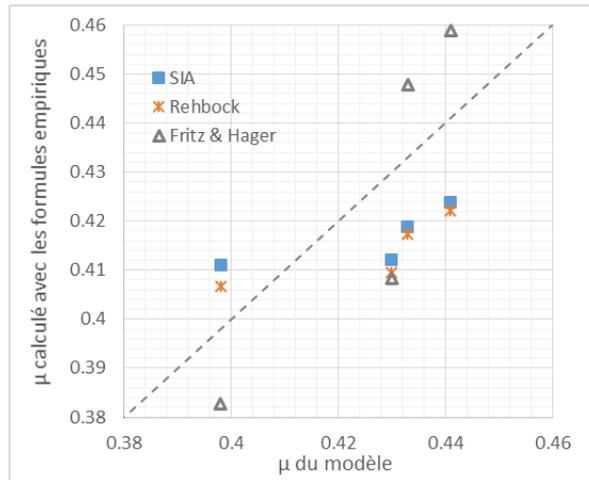


Figure 41 : Comparaison entre les μ du modèle et les valeurs calculées avec les formules

Le Figure 41 montre la comparaison entre les coefficients de débit calculés avec les données mesurées et ceux calculés avec les 3 formules empiriques pour les différentes crues (chaque verticale correspond à une crue par valeurs croissantes).

Les formules SIA et Rehbock donnent des résultats proches, tandis que la formule de Fritz & Hager donne des résultats très différents par rapport aux autres formules.

Pour les crues Q10 000 et Q100 000, la formule de Fritz & Hager donne des résultats supérieurs au résultat du modèle. Les résultats des formules SIA et Rehbock sont supérieurs à celui du modèle uniquement pour la faible crue. Le résultat du modèle est supérieur à ceux qui ont été calculés avec les 3 formules pour Q1000.

En conclusion, les résultats du modèle restent dans la fourchette des calculs empiriques.

5.2.4 MESURE DE PRESSION

Dans l'entonnement, 3 points ont été levés dans l'entonnement, y compris 2 points en rive droite (B01 et R03) et 1 point au centre du déversoir (R02). B01 mesure la pression sur le bajoyer et R02, R03 mesurent la pression sur le radier. La localisation des points de mesure de la pression et les courbes de mesure de pression en fonction du temps sont dans l'Annexe 5.

Les enregistrements de pression sont souvent très bruités, et montrent des variations souvent plus importantes que les variations de hauteur d'eau mesurées aux mêmes points.

Ce phénomène est plus important sur les mesures faites au centre du déversoir que sur celles réalisées en rive droite.

Au niveau des points R02 et R03, l'écoulement est plus dynamique suite à la mise en vitesse dans l'entonnement. La variation de pression mesurée aux points R02 et R03 est plus forte que celle mesurée au point B01. Les hauteurs d'eau n'ont pas été mesurées aux points R02 et R03 pour ne pas perturber l'écoulement. La corrélation entre charge piézométrique et hauteur d'eau n'est donc pas possible sur ce modèle.

On observe les variations suivantes (l'écart type est dans l'Annexe 5) :

- Pour la crue Q1000, la pression moyenne mesurée dans l'entonnement varie entre 0,7 et 1,6 mCE,
- Pour la crue Q10 000, la pression moyenne varie entre 1,9 et 3,9 mCE,
- Pour la crue Q100 000, la pression moyenne varie entre 2,1 et 4,6 mCE.

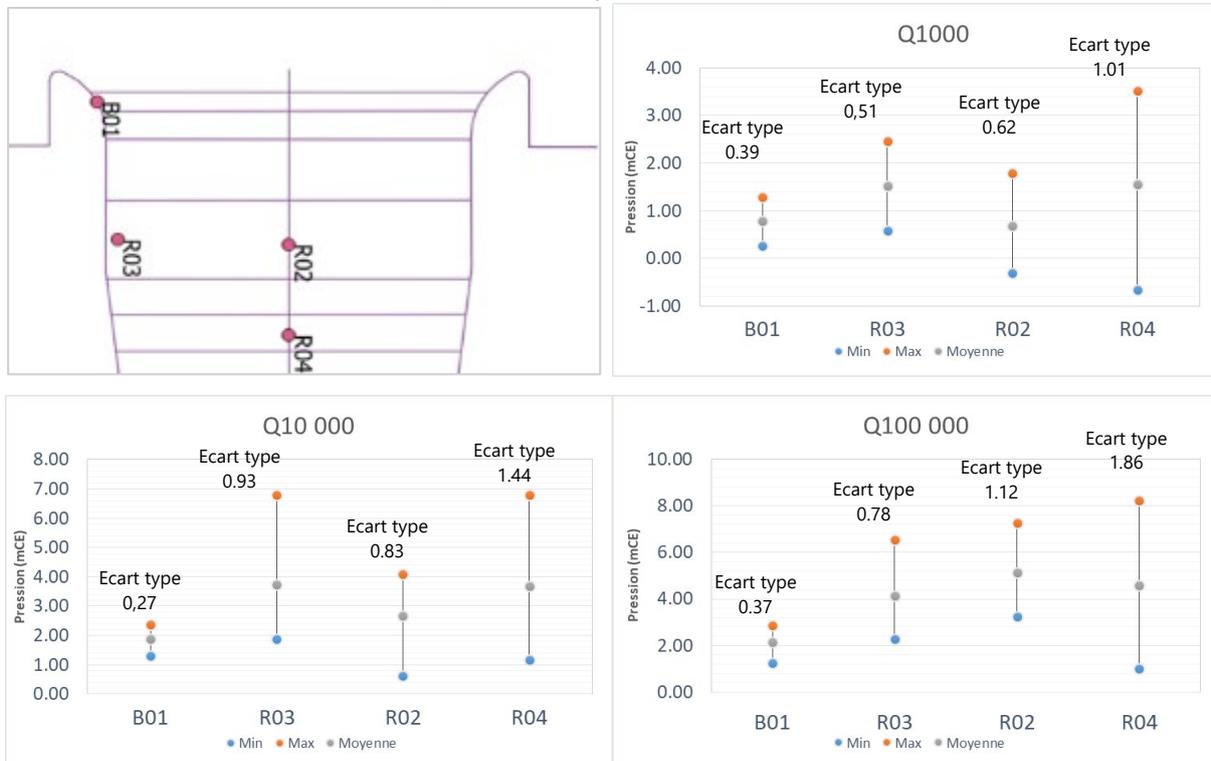


Figure 42 : Mesure de pression dans l'entonnement (échelle réelle)

5.3 CONDITIONS D'ÉCOULEMENT SUR LE COURSIER

5.3.1 HAUTEUR D'EAU

La Figure 50 montre les trois types d'écoulement dans un coursier à marche d'escalier. L'écoulement observé dans le modèle correspond à l'écoulement en mousse (skimming flow).

La mesure de la hauteur d'eau a été effectuée sur 3 profils en travers. La Figure 44 montre les lignes d'eau dans le coursier. L'altitude des profils en travers est illustrée dans la Figure 46.

Il a été constaté que, sur le profil PT 4, la cote d'eau pour la crue Q1000 est plus élevée que celle de la crue Q10 000 au milieu du coursier. Cela est dû à l'aération du coursier pour la crue Q1000 (voir Figure 43). L'eau blanche dans le coursier perturbe la mesure de la hauteur d'eau. La hauteur d'eau mesurée sur le PT 4 est donc la hauteur maximale de la lame d'eau (water splash). C'est la raison pour laquelle la lame d'eau (water splash) mesurée sur plusieurs points du PT4 pour Q1000 est plus élevée par rapport à la lame d'eau aux mêmes points pour Q10000.



Figure 43 : Mesure de la hauteur d'eau sur le PT 4 pour Q1000

Dans le coursier, les hauteurs d'eau sont plus importantes au centre du coursier que le long des bajoyers. Mais le frottement des bajoyers entraîne une seconde augmentation de la hauteur d'eau. Cet effet est notamment remarqué pour les fortes crues.

Pour la crue Q100 000, la revanche dans le coursier est d'environ 1 m. Aucun débordement n'a été observé lors des essais. La Figure 45 est une photo prise pendant l'essai de la crue Q100 000. La revanche la plus faible se trouve au PT 4, où l'écoulement est assez stable et la revanche est suffisante.

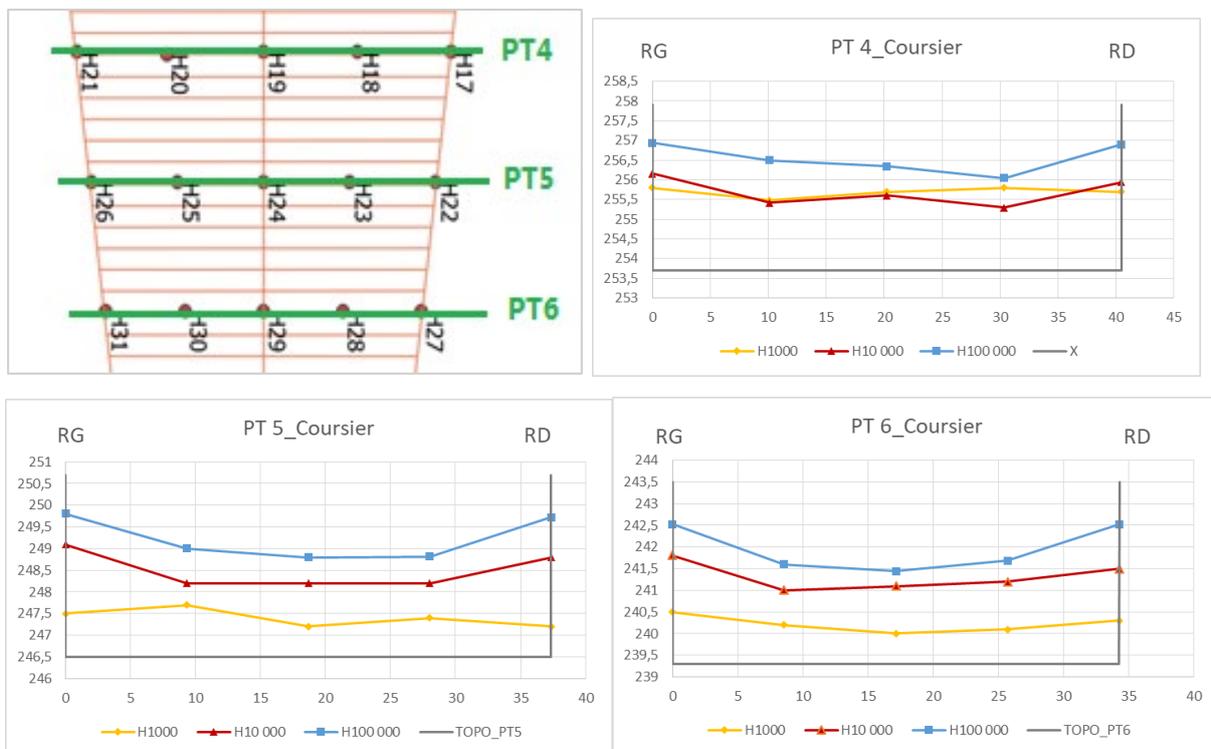


Figure 44 : Synthèse des résultats des hauteurs d'eau dans le coursier



Figure 45 : Revanche suffisante dans le coursier pour la crue Q100 000

La Figure 46 montre le profil en long de la ligne d'eau.

Pour la crue Q1000, il est constaté que le ressaut commence au niveau de la dernière marche étroite dans le coursier (229,7 m NGF). Pour la crue Q10 000, le ressaut commence au niveau de la marche large (228,5 m NGF).

Pour la crue Q100 000, le ressaut commence dans le bassin de dissipation. A la sortie de la galerie, l'écoulement a une vitesse assez forte pour qu'il n'y ait pas de risque de turbulence dans la galerie (voir les vidéos).

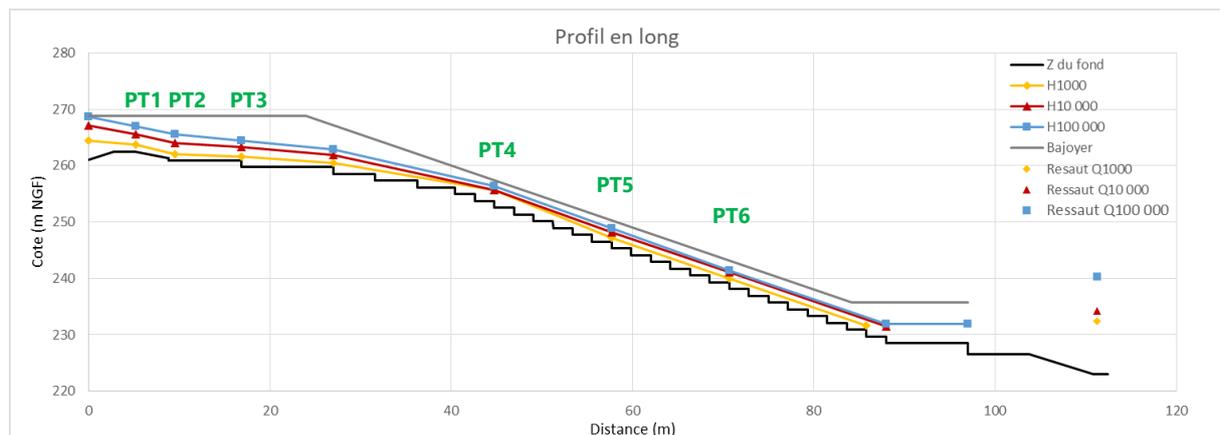


Figure 46 : Profil en long de la ligne d'eau pour les 3 crues

5.3.2 VITESSE D'ÉCOULEMENT

Dans le coursier, les vitesses ont été mesurées uniquement au centre du coursier. La vitesse maximale n'augmente pas de la crue Q10 000 à la crue Q100 000 : elle est d'environ 20 m/s, en pied du coursier. Pour la crue Q1000, l'augmentation de la vitesse d'écoulement le long du coursier est très faible grâce à l'aération. Pour la crue Q10 000, il est constaté une augmentation de +7 m/s entre le point V09 et V06. Pour la crue Q100 000, cet incrément devient +5 m/s. Les marches dans le coursier permettent de limiter la vitesse maximale d'écoulement à 20 m/s. Si on considère un écoulement sans perte de charge et sans les marches d'escalier, la vitesse théorique au point V9 est de 26 m/s pour la crue Q100 000 (estimée avec l'équation Bernoulli).

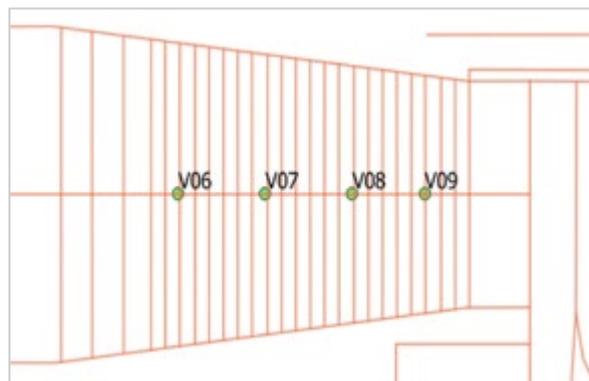


Figure 47 : Point de mesure des vitesses d'écoulement dans le coursier

Tableau 16: Vitesses d'écoulements mesurés dans le coursier

Point	Q1000	Q10 000	Q100 000
V6	9,97	13,34	14,94
V7	10,08	16,33	18,85
V8	11,15	19,46	19,51
V9	10,56	19,85	19,68

5.3.3 MESURE DE PRESSION

Les points de mesures de la pression se situent au centre du coursier, au pied du bajoyer en rive droite et dans le bajoyer en rive droite.

Les variations les plus importantes sont constatées sur les points R12 (dans l'axe du coursier) et R13 (en pied du coursier).

Pour la crue Q10 000 et Q100 000, la pression négative au niveau du point R13 dépasse -10 mCE, ce qui indique un risque de cavitation.

La comparaison entre B05 et R06, B09 et R10 montre que la pression sur le bajoyer varie plus fortement mais reste toujours dans le même ordre de grandeur que celle sur le radier à la même abscisse.

La comparaison entre R06 et R07, R10 et R11 montre que la pression au centre du coursier varie plus fortement que celle au pied du bajoyer à la même abscisse.

Il est à signaler que la pression est maximale en R13.

La localisation des points de mesure de pression et l'enregistrement des valeurs de pression sont dans l'annexe 5.

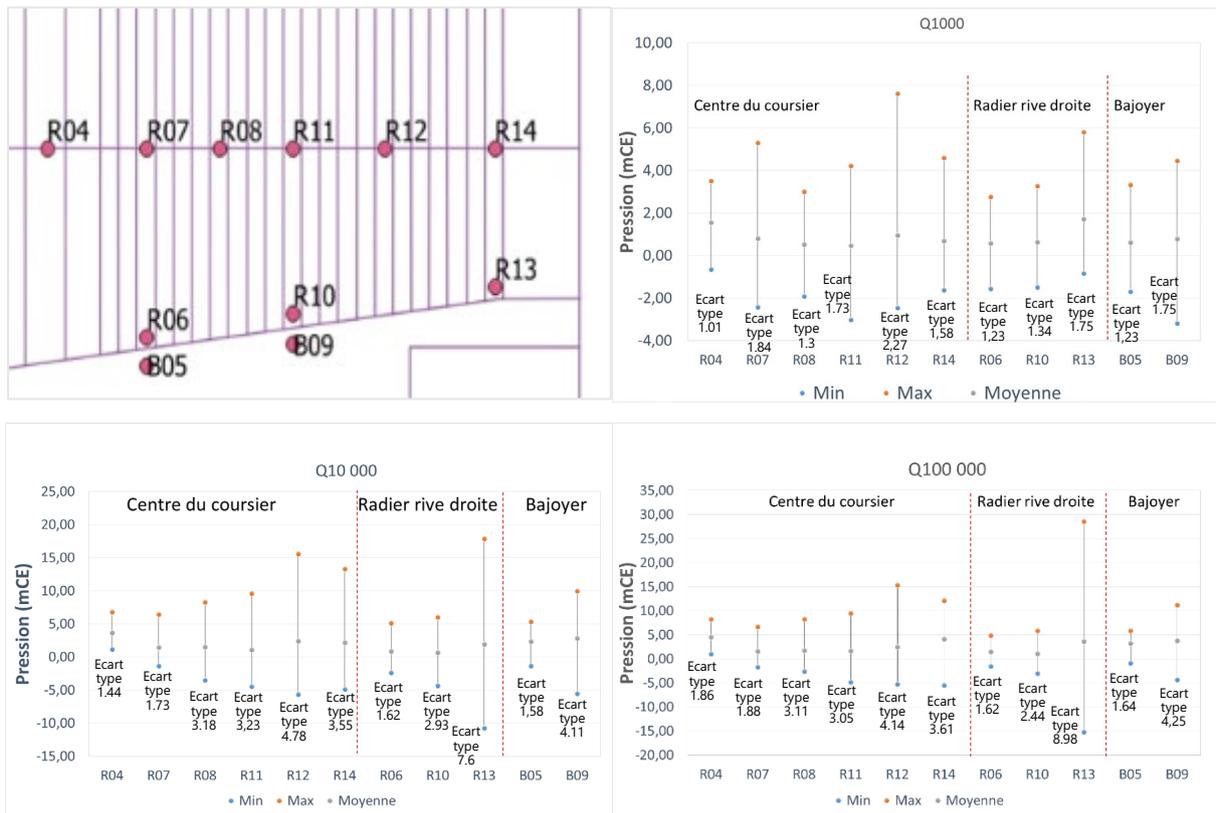


Figure 48 : Mesure de pression dans le coursier (échelle réelle)

Les pressions mesurées ont permis de tracer les graphiques de la Figure 49. En valeur moyenne et en tenant compte des incertitudes associées, les mesures des pressions converties en cote piézométrique sur le seuil et le coursier permettent de retrouver la ligne d'eau mesurée sur la plus grande partie du coursier et la dissipation de charge le long du coursier.

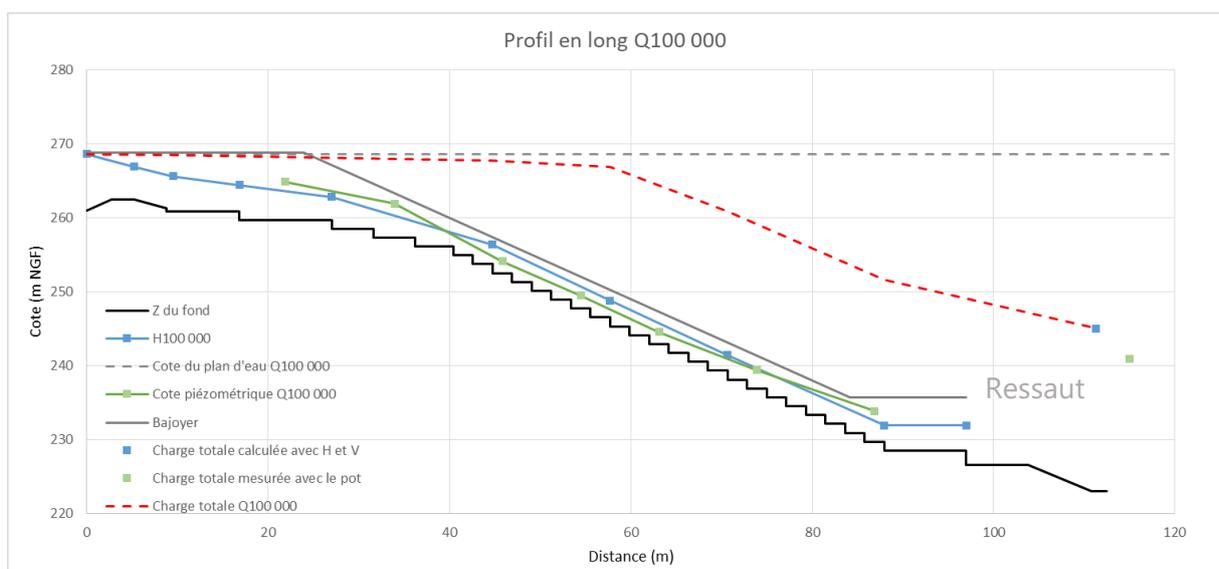
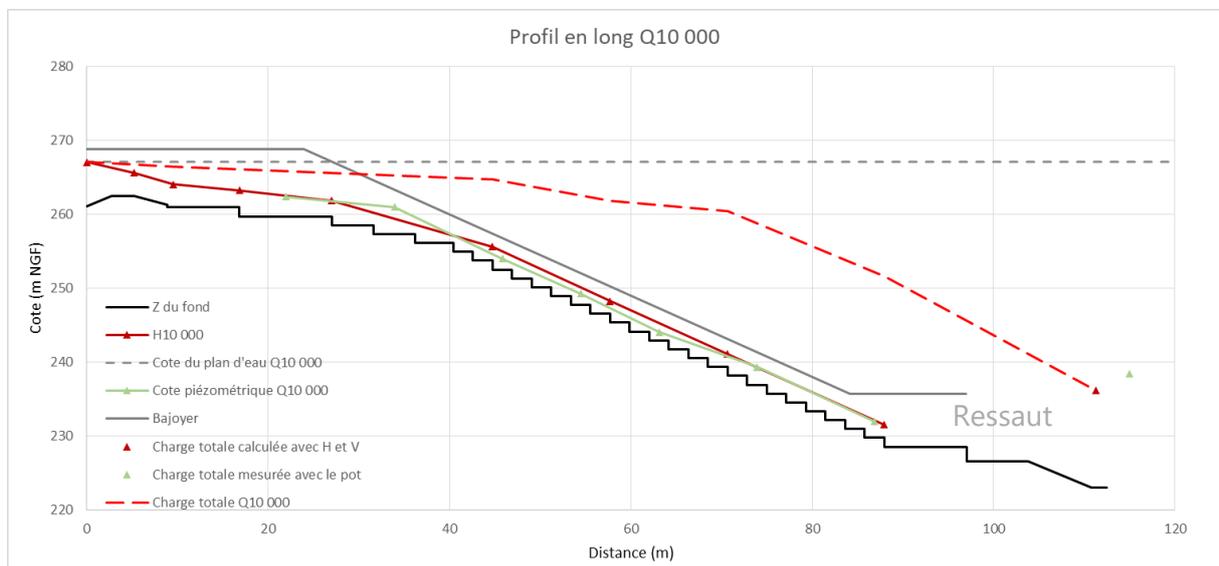
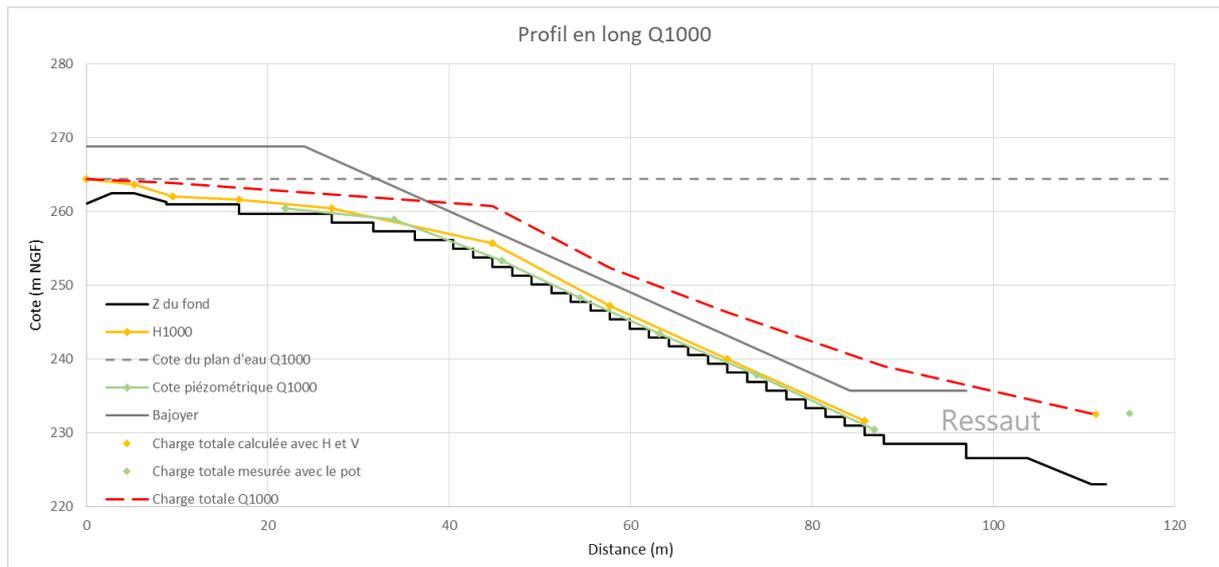


Figure 49 : Profils en long de la ligne d'eau et de la cote piézométrique et la charge hydraulique

La cote piézométrique a été mesurée par les capteurs de pression en mBar. Les valeurs brutes mesurées ont été tout d'abord converties en mCE, puis converties à l'échelle réelle. La ligne piézométrique est égale à la charge totale moins le terme d'énergie cinétique ($V^2/2g$).

Pour l'écoulement à surface libre stable, la ligne piézométrique est égale à la ligne d'eau.

La hauteur d'eau a été mesurée avec réglés puis convertie à l'échelle réelle.

Dans les figures, deux points singuliers de la charge totale sont affichées. Le point le plus en aval est la charge totale mesurée avec le pot (Cote du fond + valeur mesurée avec le pot, voir le Tableau 20).

Le premier point singulier est la charge totale calculée avec H mesurée au point H32 et V mesurée au point V10 (Cote du fond + $H + V^2/2g$).

Pour les crues Q10 000 et Q100 000, on constate un écart important car les mesures de la H et V dans le ressaut pour un courant fort, présentent une forte dispersion, et de ce fait une incertitude sur le résultat plus importante.

5.4 ETUDE DE LA DISSIPATION SUR LE COURSIER

On distingue trois types d'écoulement sur un coursier en marche (Hager, et al., 2009) en fonction surtout de la charge relative h_c/s (où h_c est la hauteur critique et s est la hauteur de la marche) et l'angle du fond virtuel (qui se définit par la droite qui touche toutes les arêtes des marches) :

- écoulement en nappe (nappe flow),
- écoulement en transition et
- écoulement en mousse (skimming flow).

L'écoulement en nappe correspond à une succession de nappes plongeantes sur la partie horizontale de la marche aval, cet écoulement se forme si le débit est petit et la hauteur de marche est grande. Le rapport $h_c/s < 0,60$ à $0,80$ génère ce type d'écoulement.

L'écoulement en mousse correspond à un écoulement cohérent le long du coursier, sans poche d'air dans les niches des marches. Ce type d'écoulement est trouvé pour des faibles valeurs de h_c/s , typiquement au-dessous de $h_c/s = 1$.

Entre ces deux principaux écoulements, une zone de transition se forme.

Pour les trois débits les plus importants étudiés, le rapport h_c/s est supérieur à 1, ce qui signifie que l'on observera un écoulement en mousse sur le coursier (skimming flow). Un écoulement en mousse est caractérisé par deux régions : une région non aérée et une région aérée (eau blanche).

L'aération naturelle est initiée à la surface de l'écoulement lorsque la couche limite turbulente atteint la surface libre, au point dit de début d'entraînement d'air. Avant ce point, l'écoulement est non aéré et présente donc un risque de cavitation

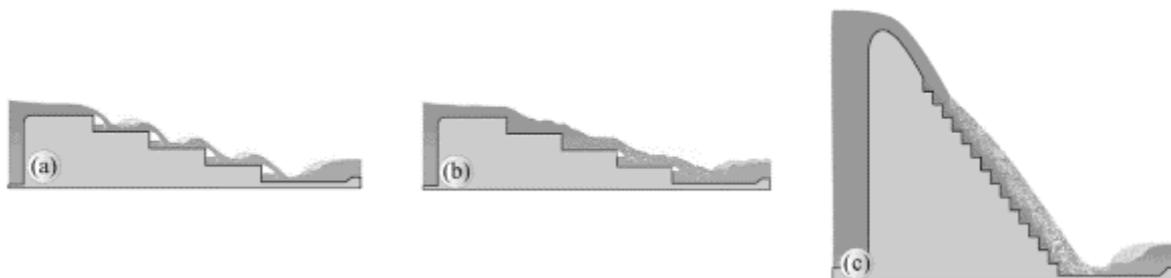


Figure 50 : Illustration des trois types d'écoulement sur un coursier en marche : a) écoulement en nappe ; b) écoulement en transition ; c) écoulement en mousse (skimming flow)

La cote d'apparition de l'écoulement aéré (Z_i) correspond à la cote du point de début d'entraînement d'air où la turbulence est suffisamment grande pour que des bulles d'air puissent être entraînées dans l'écoulement et empêchent donc le risque de cavitation.

$$Z_i = Z_{seuil} - s * 5,9 * F^{*0,8}$$

Avec :

s [m] la hauteur de la marche,

F* le Froude de rugosité

$$F^* = \frac{Q_{spec}}{\sqrt{g * \sin(\varphi) * s^3}}$$

Où, Qspec [m³/s/m] le débit spécifique,

g [m/s²] l'accélération de la pesanteur,

φ [°] la pente du coursier, dans la présente étude, la pente du coursier ouvrage est de 30°.

Les cotes d'apparition de l'écoulement aéré ont été calculées à l'aide des débits spécifiques. Le tableau suivant montre la comparaison entre les valeurs théoriques et les valeurs observées lors des essais.

Tableau 17 : Comparaison de la cote d'apparition de l'écoulement aéré

Crues	Q1000	Q10 000	Q100 000
Débit spécifique (m ³ /s /m) calculé avec L=46,1 m	5,0	18,7	29,5
Cote d'apparition d'aération théorique (m NGF) calculée avec L=46,1 m	251,60	231,20	217,34 (cote irréaliste puisque cette cote est plus basse que le bassin de dissipation)
Débit spécifique (m ³ /s /m) calculé avec largeur du coursier où l'aération est observée	5,5 (L=42 m)	26,7 (L=32,3 m)	Non constaté
Cote d'apparition d'aération théorique (m NGF) calculé avec largeur du coursier où l'aération est observée	250,7	220,8	Non constaté
Cote d'apparition d'aération observée (m NGF)	256,10	238,10	Non constaté



Figure 51 : Zone aérée dans le coursier

Les cotes d'apparition de l'écoulement aéré dans le modèle réduit sont plus élevées que celles des valeurs théoriques calculées.

Dans ce calcul, la longueur prise en compte pour calculer le débit spécifique est de 46,1 m.

Il a été constaté que l'aération se trouve dans le coursier. Ce qui veut dire que la longueur réelle doit être plus courte puisque où la largeur est inférieure à 46,1 m.

Cet écart est certainement dû aux imprécisions de la modélisation ainsi qu'à l'utilisation d'une formule empirique. Les cotes d'apparition de l'aération doivent se trouver dans la fourchette donnée par le calcul théorique et l'observation :

- entre 251,6 et 256,10 pour Q 1 000
- entre 231,2 et 238,10 pour Q 10 000

5.5 CONDITIONS D'ÉCOULEMENT ET DE DISSIPATION DANS LE BASSIN AVAL

5.5.1 HAUTEUR D'EAU

La hauteur d'eau dans le bassin de dissipation et celle sous le pont ont été levées. La Figure 52 et le Tableau 18 montrent la localisation des points et les hauteurs d'eau.

Pour la crue Q100 000, le pont est en charge et la cote d'eau moyenne est de 239,22 m.

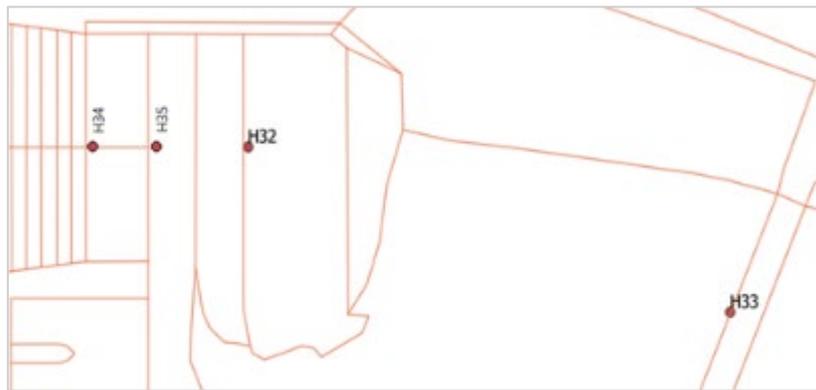


Figure 52 : Points de mesure de la hauteur d'eau dans la partie aval du modèle

Tableau 18 : Hauteurs d'eau mesurées dans la partie aval (échelle réelle)

Point	Q1000	Q10 000	Q100 000
H32 (m)	9,4	11,2	13
H33 (m)	9,4	12,8	15,4 (ouvrage en charge)

5.5.2 VITESSE D'ÉCOULEMENT

Dans la partie aval du modèle, les vitesses ont été mesurées sur 5 points (Figure 34). La vitesse maximale se trouve en aval de la galerie (V11). En rive gauche, les vitesses à la surface et au fond ont des sens différents (V15_SURF et V15_FOND). L'écoulement s'écoule vers l'aval au fond, tandis que l'écoulement à la surface remonte vers l'amont.

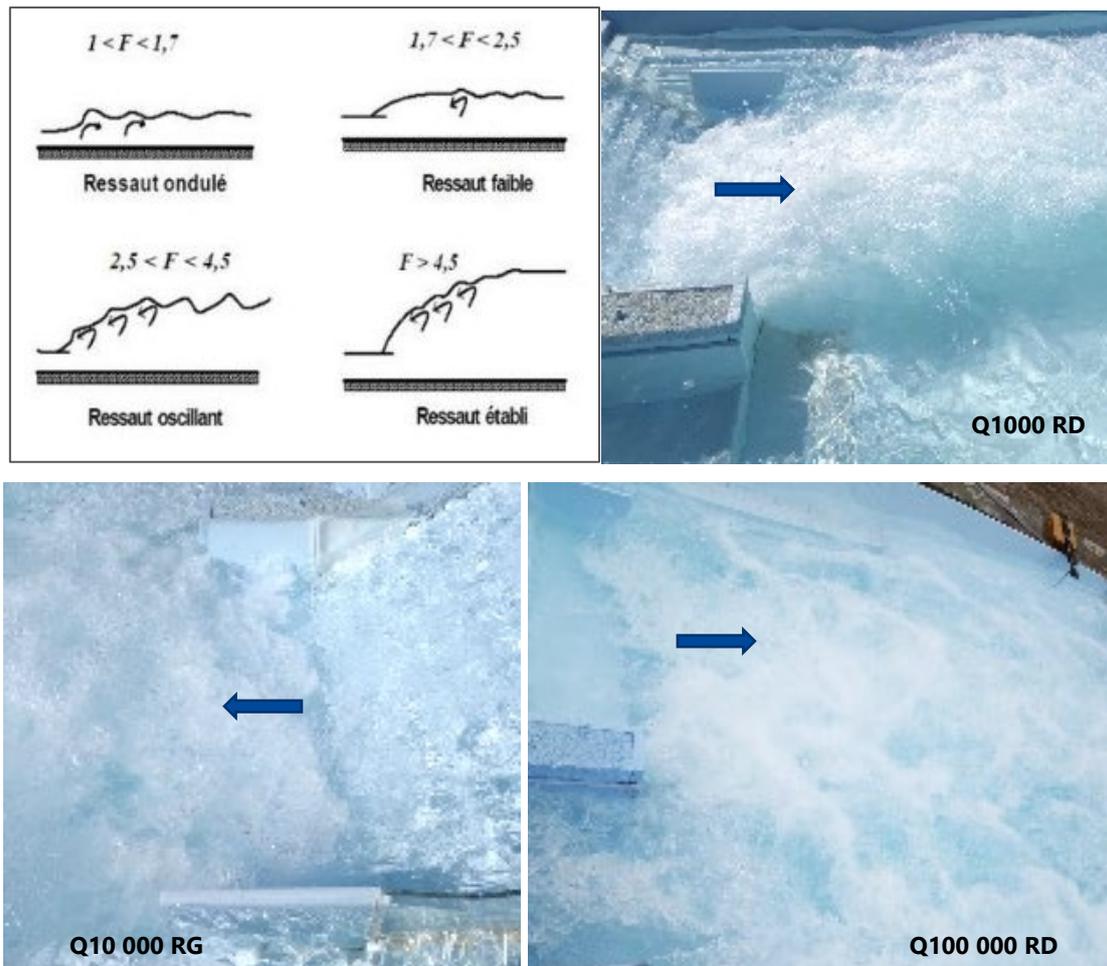


Figure 53 : Types de ressaut en fonction du nombre de Froude et les ressauts observés

D'après Lencastre, la forme de ressaut est déterminée par le nombre de Froude au front du ressaut.

En aval du coursier, les ressauts hydrauliques constatés lors des crues Q1000 et Q10 000 correspondent aux ressauts oscillants. Celui constaté pour Q100 000 est un ressaut ondulé.

La longueur du ressaut ondulé est généralement plus longue par rapport aux autres types de ressaut, ce qui indique que l'écoulement nécessite une distance plus longue pour qu'il devienne en régime fluvial.

Pour la crue Q100 000, le nombre de Froude aux points H32 (fosse) et H33 (pont) sont respectivement de 1,18 et 0,35. Cela indique que le régime fluvial pour Q100 000 est bien établi entre les deux points. Cependant, pour les autres crues, le nombre de Froude au point H32 est déjà inférieur à 1.

La vitesse mesurée au V12, située entre l'axe du coursier et l'axe de la galerie, est relativement plus faible par rapport aux autres points.

Il est constaté que la vitesse de Q1000 au point V14 (sous le pont) est plus élevée par rapport à celles des autres crues. Pour la crue Q1000, le courant de retour (s'étend jusqu'au pont en rive gauche. Le débit est transité vers l'aval uniquement par la rive droite. Pour les crues les

plus fortes, la longueur du tourbillon est plus courte donc un débit plus important est transité sur la section totale sous le pont, ce qui diminue la vitesse d'écoulement.

Les Figure 55, Figure 56 et Figure 57 montrent les caractéristiques d'écoulement dans la partie aval du modèle. Les vitesses sont représentées par des flèches. Pour les 3 crues, un tourbillon se forme juste en aval du bassin de dissipation.

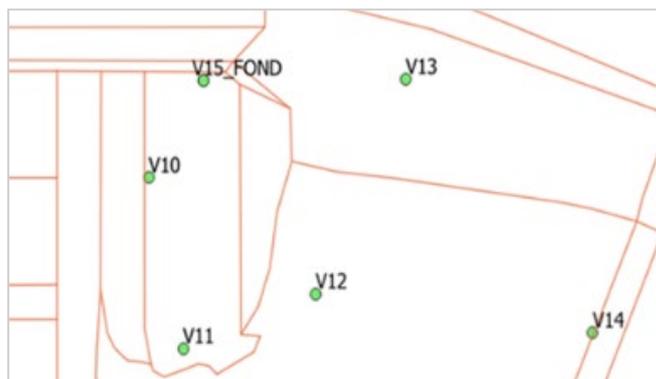


Figure 54 : Points de mesure des vitesses d'écoulement dans la partie aval du modèle

Tableau 19 : Vitesses d'écoulement (m/s) mesurées dans la partie aval (échelle réelle)

Point	Q1000	Q10 000	Q100 000
V10	1,26	6,12	13,29
V11	10,13	5,21	14,94
V12	2,38	4,36	1,95
V13	-0,67	1,26	5,59
V14	8,37	4,52	4,36
V15_SURF	-0,28	-2,59	-3,49
V15_FOND	0,79	2,91	5,07



Figure 55 : Caractéristiques d'écoulement dans la partie aval pour Q1000

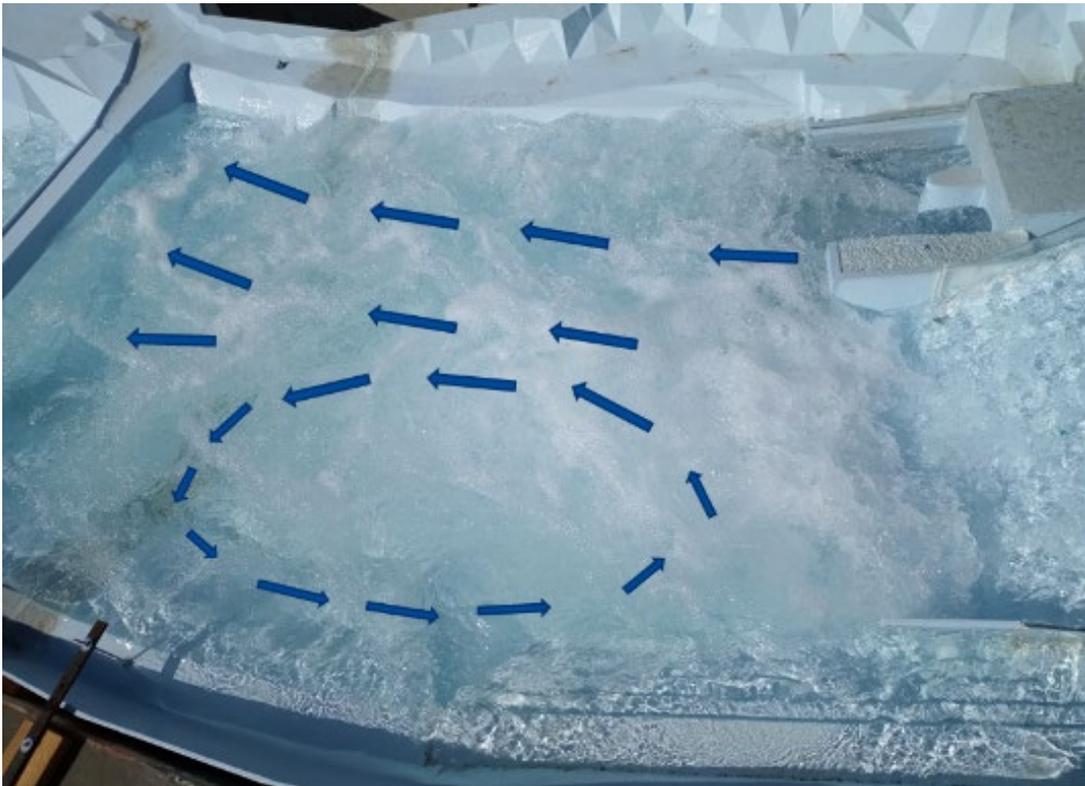


Figure 56 : Caractéristiques d'écoulement dans la partie aval pour Q10 000



Figure 57 : Mise en charge du pont pour la crue Q100 000

5.5.3 SUBMERSION DE LA GALERIE DE DRAINAGE

Il existe deux galeries de drainage :

- Galerie de drainage supérieure Z=235,7 m NGF
- Galerie de drainage inférieure Z=229,7 m NGF

La galerie supérieure est toujours hors d'eau, même pour la crue Q100 000. La galerie inférieure est hors d'eau uniquement pour la crue Q1000. Elle est submergée lors des crues Q10 000 et Q100 000 car elles se retrouvent dans la zone de ressaut.

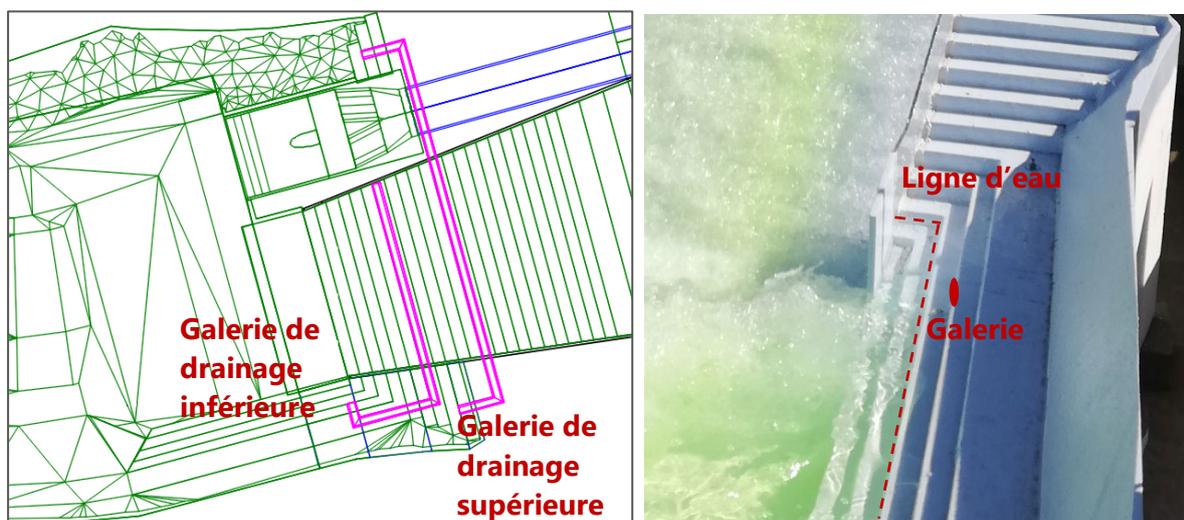


Figure 58 : Localisation des galeries de drainage et la mise hors d'eau de la galerie inférieure pour Q1000

5.5.4 DISSIPATION DE L'ENERGIE

Dans la présente étude, on utilise une méthode simplifiée pour quantifier la charge initiale et la charge résiduelle. On considère que la cote de référence est la cote du radier de la fosse. La charge résiduelle s'écrit sous la forme suivante :

$$H_{res} = h + V^2/2g$$

La charge résiduelle est mesurée directement par le pot (Tableau 20).

Pour calculer la charge initiale, on considère que la vitesse est négligeable :

$$H_{ini} = Z_{eau} - Z_{fosse}$$

Le taux de dissipation de l'énergie est calculé ainsi :

$$Taux = (H_{ini} - H_{res})/H_{ini}$$

Le Tableau 20 montre les charges résiduelles dans le bassin de dissipation mesurées avec le pot. La charge de base est calée à 23,2 cm dans le pot. Cette lecture est considérée comme la cote du fond du bassin. La charge mesurée avec le pot ($h+V^2/2g$) a été convertie à l'échelle réelle. La charge totale résiduelle est égale à la charge mesurée ($h+V^2/2g$) + la cote du fond (Z).

Tableau 20 : Charge résiduelle après le bassin de dissipation mesurée dans le bassin de dissipation

Essai	Lecture 22/03/21 (cm)	Charge $h+V^2/2g$ (échelle de modèle, cm)	Charge $h+V^2/2g$ (échelle réelle, m)	Charge totale (Z+h+V ² /2g)
Q1000	47,2	24	9,6	232,6
Q10 000	61,6	38,4	15,36	238,36
Q100 000	68	44,8	17,92	240,92
Charge 0 au point de mesure (cm)	23,2			
Localisation du point de mesure				

Les taux de dissipation de l'énergie sont donnés dans le tableau suivant.

Les taux de dissipation à la fin du coursier ont été calculés sur la côté aval de la dernière petite marche (cf. Figure 49) avec les valeurs mesurées sur H34 et V09.

Les taux de dissipation dans la fosse ont été mesurés avec le pot.

Pour les crues Q1000 et Q10 000, le point de mesure à la fin du coursier correspond à la dernière marche dénoyée (Figure 53). Par conséquent, les taux de dissipation du ressaut pour les deux crues sont respectivement 9% et 12%.

Pour la crue Q10 000, la dernière marche dénoyée se trouve plus en aval. La soustraction entre les deux valeurs (12%) ne correspond plus au taux de dissipation du ressaut. La vraie valeur doit être inférieure à 12%.

Tableau 21 : Taux de dissipation de l'énergie

Crues	Q1000	Q10 000	Q100 000
Cote du plan d'eau (m NGF)	264,40	267,06	268,61
Taux de dissipation à la fin du coursier	67%	49%	43%
Taux de dissipation au point de mesure avec le pot	76%	61%	55%

Dans l'étude de 2015, la puissance volumique dans le bassin de dissipation a été calculée pour Q10 000. Avec l'ancien dimensionnement, l'énergie à dissiper est de 9,8 kW/m³. Dans le rapport de l'étude de 2015, une préconisation a été donnée suite au calcul de la puissance volumique :

« Une optimisation possible du projet pourrait consister à réduire le volume de cette fosse de dissipation pour le porter à 8 000 m³ de manière à atteindre un taux de dissipation proche de 15 kW/m³ ».

Dans la présente étude, la puissance volumique a été calculée avec la même méthode puis comparée avec celle de l'étude de 2015 :

$$P = Ro \times g \times h_{résiduelle} \times Q$$

Avec P la puissance [kW] ;

- Ro la masse volumique d'eau [kg/m³] ;
- h_{résiduelle} la charge mesurée avec le pot (h+V²/2g) ;
- Q le débit passé par l'évacuateur à surface libre [m³/s].

Le volume du bassin de dissipation a été calculé à l'aide du plan topographique et la hauteur d'eau mesurée au point H32 (voir figure 59).

Les résultats dans le tableau suivant montrent que, pour la crue Q10 000, la puissance volumique atteint 15,3 kW/m³, ce qui est cohérent avec la préconisation dans le rapport de 2015.

Tableau 22 : Puissance volumique du bassin de dissipation

h+V ² /2g résiduelle mesurée avec le pot (m)	Q (m ³ /s)	Volume du bassin (m ³)	P mesurée avec le pot (kW)	Energie à dissiper (kW/m ³)
9,6	230	7037	21 660	3,1
15,4	860	8495	129 586	15,3
17,9	1360	9953	239 081	24,0

6 ETUDE DU RISQUE DE CAVITATION

La cavitation est un phénomène bien connu et redouté sur les ouvrages hydrauliques à haute vitesse, tel le coursier en marche d'escalier. Son impact sur les structures peut être dévastateur : qu'ils s'agissent de béton, d'acier ou de tout autre matériau, ils sont agressés dynamiquement par les ondes de pressions dues à l'implosion des bulles de vapeur.

L'onde de compression libère des quantités d'énergie considérables et entraîne une érosion de la surface rigide si l'endroit, où se produit la cavitation, se trouve assez près de la paroi qui limite l'écoulement.

En effet, il est reconnu dans la littérature (Boes, 2012) que, du fait de la présence d'arêtes vives sur les marches, ce type de coursier voit apparaître des phénomènes de cavitation de manière plus précoce que ce qui pourrait être observé sur un coursier lisse. Pour une température constante, l'indice de cavitation s'écrit sous la forme suivante :

$$\sigma = \frac{P_l - P_v}{\frac{\rho V^2}{2}}$$

Où p_l [Pa] est la pression locale de liquide,

- p_v [Pa] est la pression de vapeur saturante de l'eau,
- ρ [kg/m³] la masse volumique du liquide,
- V [m/s] la vitesse d'écoulement.

De ce fait, il est admis que l'indice local de cavitation à la face inférieure de la nappe d'eau doit rester supérieur à une valeur seuil de 0,5 (critère pris en compte dans le rapport de juillet 2015).

La figure (Boes, 2012) ci-dessous montre l'évolution de l'indice de cavitation en fonction du débit spécifique pour plusieurs configurations de coursier (angle de coursier et hauteur de marche).

Les indices de cavitation pour la crue Q10 000 et Q100 000 sont respectivement 0,8 et 0,42.

Pour la crue Q100 000, il existe un risque de cavitation au pied du coursier (indice inférieur à 0,5 pour une largeur de 30 m), ce qui est cohérent avec la mesure de pression.

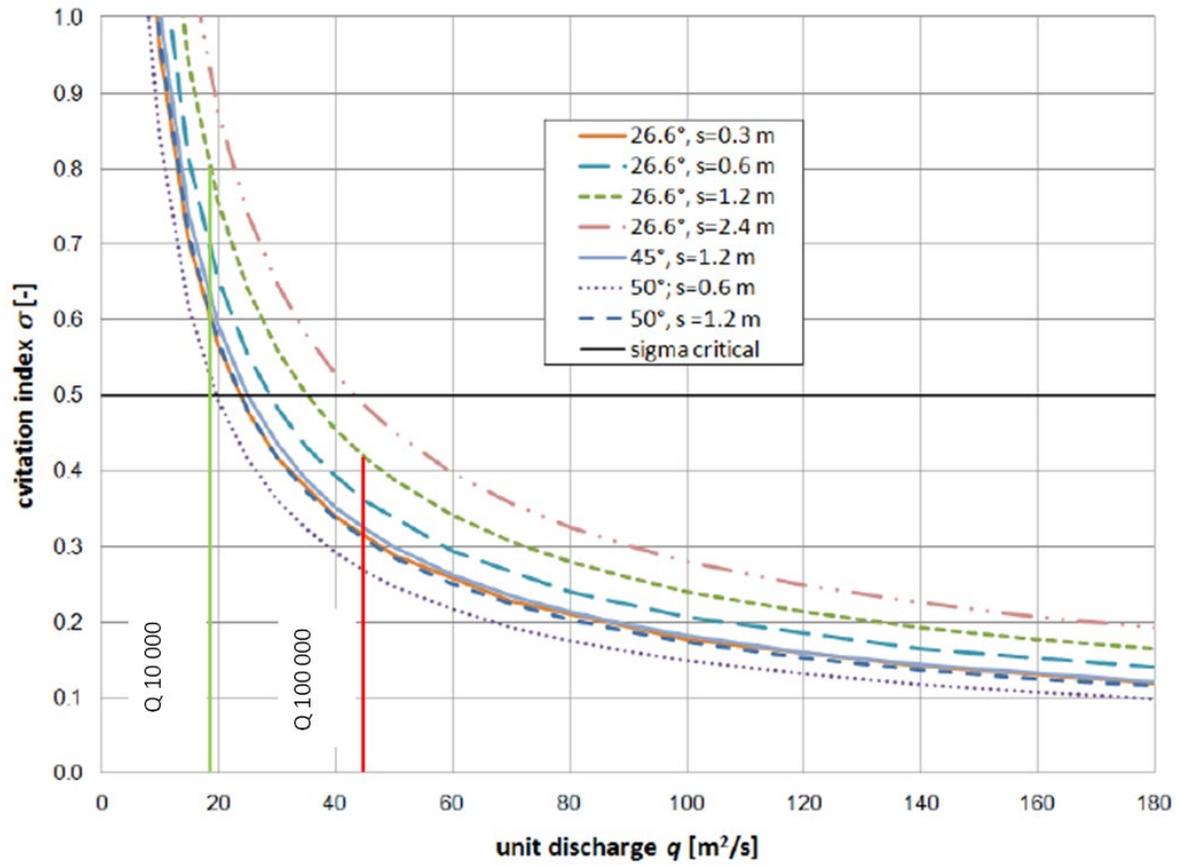


Figure 60 : Indice de cavitation pour $Q_{10\ 000}$ et $Q_{100\ 000}$

7 ETUDE DE L'INTERACTION DES EVACUATEURS

Deux essais ont été réalisés avec la tulipe fermée en gardant les mêmes débits dans l'évacuateur. Le Tableau 23 montre que, sans la tulipe, la cote d'eau dans la retenue est plus basse. L'écart entre les deux configurations est de 2 cm pour Q1000 et 16 cm pour Q10 000.

La Figure 61 montre l'impact de la tulipe sur la hauteur d'eau dans l'entonnement. Pour la crue Q1000 ($Q_{evc}=230 \text{ m}^3/\text{s}$) et Q10 000 ($Q_{evc}=860 \text{ m}^3/\text{s}$), la hauteur d'eau est plus basse lorsque la tulipe est fermée.

Tableau 23 : Impact de la tulipe sur le plan d'eau

Crue	Cote RG (m NGF)	Cote RD (m NGF)	Cote moyenne (m NGF)
Q1000	264,37	264,43	264,40
Q1000 sans tulipe	264,35	264,42	264,38
Q10 000	267,00	267,12	267,06
Q10 000 sans tulipe	266,85	266,95	266,90

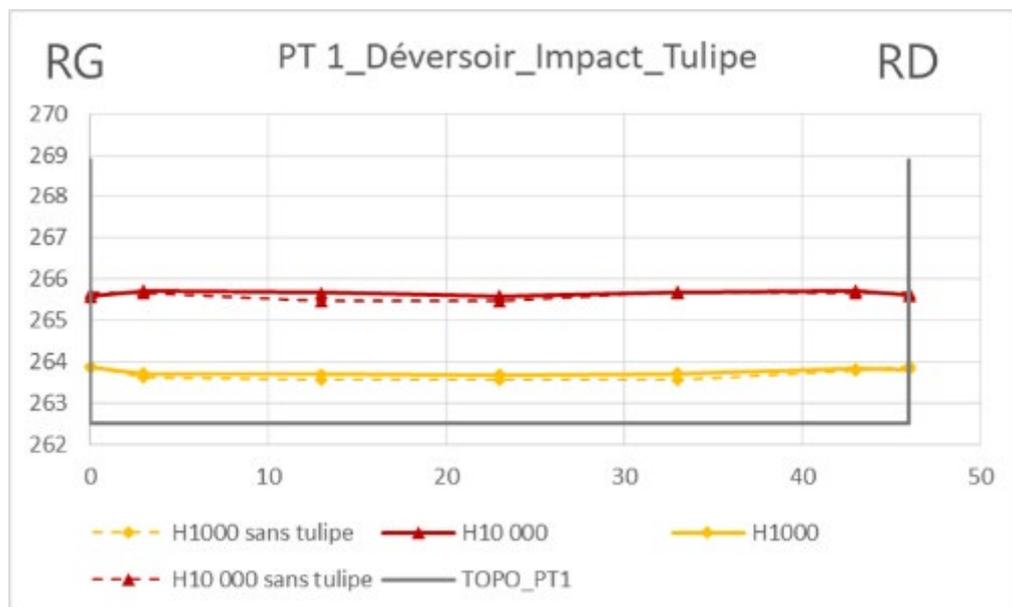


Figure 61 : Impact de la tulipe sur la hauteur d'eau dans l'entonnement

Lors de ces deux essais le débit dans l'évacuateur est constant. Une différence de la hauteur d'eau est observée.

Pour mieux comprendre la différence de la performance de l'évacuateur entre les essais, il est possible de calculer tout d'abord le coefficient de débit puis de calculer la différence de débit en pourcentage sous la même condition de la hauteur d'eau.

La cote d'eau utilisée pour effectuer ce calcul est la cote d'eau moyenne mesurée lors des essais de Q1000 et Q10 000 avec la tulipe.

Les résultats montrent que, pour la même cote d'eau, le débit qui passe par l'évacuateur à surface libre sans la tulipe est plus élevé.

Les écarts par rapport au débit passé par l'évacuateur avec la tulipe sont respectivement de :

- 1,4% pour Q1000
- 3,5% pour Q10 000.

Tableau 24 : Impact de la tulipe sur le plan d'eau

Crue	Coefficient de débit	Cote d'eau moyenne (m NGF)	Hauteur d'eau moyenne (m)	Débit (m ³ /s)
Q1000	0,430	264.40	1,90	229,7
Q1000 sans tulipe	0,435			232,8
Q10 000	0,433	267.06	4,50	860,1
Q10 000 sans tulipe	0,457			890,2

8 ETUDE DU RISQUE D'EMBACLE

Le scénario à reproduire est celui d'une rupture d'un point d'attache de la drome en rive et libération massive d'un tapis d'embâcle probable de la drome suite à un épisode pluvieux.

Comme convenu avec le client et AMO, les essais avec des embâcles ont été réalisés pour la crue Q10 000.

Suite à la recherche bibliographique, il a été décidé d'effectuer les essais avec des embâcles de :

- 12 cm de longueur
- 1 cm de diamètre,

Ce qui correspond à des troncs flottants de 5 m de longueur et 40 cm de diamètre dans la réalité.

Les embâcles utilisés pour effectuer les essais sont principalement les branches de tilleul découpées à 12 cm et trempées dans l'eau pendant 12 heures (voir figure 62).



Figure 62 : Photo des Embâcles

Le volume des embâcles jointifs et étalés correspond à une surface 1 m². Dans la pratique, les embâcles ont été étalés sur une planche de cette surface avant d'être relâchés devant le mur en brique dans le modèle. Le poids sec de ces embâcles est de 1.9 kg. Cela correspond à 122 tonnes d'embâcles réparties sur 1600 m² à l'échelle réelle.

Trois essais ont été effectués pour le débit de Q10 000. Les branches ont été relâchées respectivement en rive gauche, au milieu et en rive droite de la retenue. Les figures suivantes sont des captures d'écran des vidéos prises lors des essais avec les embâcles. La durée de chaque essai est de 5 minutes, ce qui est suffisamment long pour évacuer toutes les branches.

En fonction du lieu du lâché, les observations sont les suivantes :

- Depuis la rive gauche, les embâcles sont tous évacués par l'évacuateur à surface libre. Dans la partie aval, les embâcles suivent le sens d'écoulement. Une partie des branches a été évacuée tout de suite vers l'exutoire du modèle, les autres branches restent dans le tourbillon pendant 1 minute avant d'être évacuées vers l'exutoire.
- Depuis le milieu de la retenue, environ 50% sont évacués par la tulipe. Pour ceux évacués par l'évacuateur à surface libre, la majorité sont évacués tout de suite vers l'aval. Quelques branches restent dans le tourbillon avant d'être évacuées vers l'aval.
- Depuis la rive droite, environ 50% sont évacués par la tulipe. Le reste est évacué en rive droite par l'évacuateur de surface, puis évacués directement vers l'exutoire du modèle.

En conclusions, pour les 3 essais, les embâcles ont tous été évacués par l'évacuateur et par la tulipe (un coincement a été constaté dans la tulipe puis la conduite s'est débouchée). Aucune branche n'est restée dans la retenue à la fin des essais (voir les vidéos).

Il faut également prendre en compte l'hypothèse que les premiers troncs puissent être broyés par la chute d'environ 30 mètres dans la tulipe et qu'il se produise un bouchon à la base de la tulipe.





Figure 63 : Essais avec des embâcles venant de la rive gauche (Q10 000)





Figure 64 : Essais avec des embâcles venant du milieu de la retenue (Q10 000)





Figure 65 : Essais avec des embâcles venant de la rive droite (Q10 000)

9 CONCLUSIONS

9.1 AMELIORATION DU MODELE V3

Dans la version 3 du modèle, le bassin de tranquillisation a été aménagé pour améliorer la condition amont de l'écoulement et surtout la stabilisation du plan d'eau. L'aménagement du bassin de tranquillisation a permis d'entraîner un champ de vitesse en amont du barrage favorable pour la comparaison avec le modèle numérique.

La condition amont a été validée suite à la visite du modèle en juillet 2020. L'évacuateur à surface libre ainsi que la partie aval ont été reconstruits en respectant le dimensionnement du projet.

9.2 REPRESENTATIVITE DU MODELE

Avec une échelle 1/40, le modèle permet de représenter les ouvrages et la topographie de manière précise. La simulation respecte les critères du nombre de Froude et de Reynolds, ce qui permet d'avoir une bonne représentativité pour les hauteurs et les vitesses.

Concernant l'entraînement d'air, le nombre de Weber est de l'ordre de 1 à 10 en fonction de vitesse locale. Selon la littérature scientifique, le nombre de Weber doit $W > 100$ pour avoir une bonne similitude d'aération. Dans le modèle V3, l'aération de l'écoulement aura tendance à être sous-estimée. Les conditions pour l'apparition de cavitation ainsi déterminées sont plus favorables qu'en réalité (déjà vu dans le rapport juillet 2015).

9.3 SYNTHESSES DES RESULTATS

Le coefficient de débit du déversoir varie entre 0,430 (Q1000) et 0,441 (Q100 000). Le fort débit permet d'augmenter la performance du déversoir.

L'évacuateur à surface libre a une capacité suffisante pour passer la crue Q100 000. Lors de la crue Q100 000, la revanche dans le coursier est faible mais aucun débordement n'a été constaté dans le modèle.

La vitesse maximale observée dans le coursier est d'environ 20 m/s (à l'échelle réelle). Le taux de dissipation de l'énergie varie entre 55% (Q100 000) et 76% (Q1000).

Pour la crue Q100 000, il y a un risque de cavitation à la fin du coursier à cause de la forte vitesse. Cependant, la similitude d'entraînement d'air n'est pas idéale dans ce modèle. Il se peut que l'aération apparaisse dans la réalité, ce qui tendra à diminuer le risque de cavitation.

Sans écoulement par la tulipe, la cote d'eau dans la retenue est plus basse pour passer la totalité du débit par l'évacuateur à surface libre. L'écart de la cote du plan d'eau entre les deux configurations est de 2 cm pour Q1000 et 16 cm pour Q10 000 (à l'échelle réelle).

L'évacuation d'embâcles dans la retenue été simulée qualitativement à l'aide de branchettes à l'échelle formant un amas d'environ 1 m². Lâchés successivement en rive gauche, au centre et en rive droite, il n'a été constaté aucun blocage, toutes les branchettes ont été évacuées par la tulipe ou le seuil.

ANNEXE 1 : MESURE DE LA COTE D'EAU

Débit simulés

Crue	Débit			
	Q1	Q2	Q3	QEVC
Q1000 (1080 m3/s)	76,7	30	84	22,7
Q10 000 (1780 m3/s)	145,9	30	90,9	85
Q100 000 (2290 m3/s)	196,3	30	91,9	134,4
Faible crue (ΔH pointe et plan d'eau=2 cm)	6,7	0	0	6,7

Variation de débit

Crue	Variation de débit injecté à l'échelle du modèle				
	Q injecté (L/s)	min (L/s)	max (L/s)	Delta (L/s)	Delta (%)
Q1000	106,7	106,5	107,4	0,2	0,2
Q10 000	175,9	175,08	176,5	0,82	0,5
Q100 000	226,3	224,9	226,8	1,4	0,6

Cote d'eau mesurée avec la pointe limnimétrique

Essai	Pointe mesurée				Conversion des données					
	Pointe RG		Pointe RD		h RG (m)	h RD (m)	h_{moyen} (m)	Cote réelle RG (m NGF)	Cote réelle RD (m NGF)	Cote réelle moyenne (m NGF)
Cote du seuil	31,95	32	29,78	29,8	0	0	0	262,50	262,50	262,5
Cote Q1000	36,65	36,64	34,59	34,64	1,87	1,93	1,899	264,37	264,43	264,399
Cote Q10 000	43,2	43,24	41,3	41,39	4,50	4,62	4,56	267,00	267,12	267,06
Cote Q100 000	46,9	47,3	45,1	45,32	6,05	6,17	6,109	268,55	268,67	268,609
Faible crue (ΔH pointe et plan d'eau=2 cm)	34,15	34,18	32,04	32,02	0,88	0,90	0,886	263,38	263,40	263,386

Cote d'eau mesurée avec le flotteur

Essai	Flotteur (Cote Modèle), H_flotteur = 13,68 cm par rapport à la surface d'eau ⁴						Flotteur (Cote réelle)					
	F1 (RG)	F2 (RD)	F3	F4	F5	F6	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Cote Q1000	113,14 4	113,14 3	113,14 3	113,14 3	113,14 3	113,14 3	264,37	264,33	264,33	264,33	264,33	264,33
Cote Q10 000	113,21	113,21 1	113,21 1	113,21 2	113,21 1	113,21 1	267,01	267,05	267,05	267,09	267,05	267,05
Cote Q100 000	113,24 8	113,24 8	113,25	113,24 9	113,24 9	113,24 8	268,53	268,53	268,61	268,57	268,57	268,53

⁴ La mesure avec le flotteur a été réalisée avec la station totale, les valeurs mesurées servent uniquement à vérifier l'horizontalité du plan d'eau. Les valeurs ne peuvent pas être comparées avec celles mesurées avec la pointe limnimétrique parce que les outils sont différents et ils ne sont pas calés de même façon.

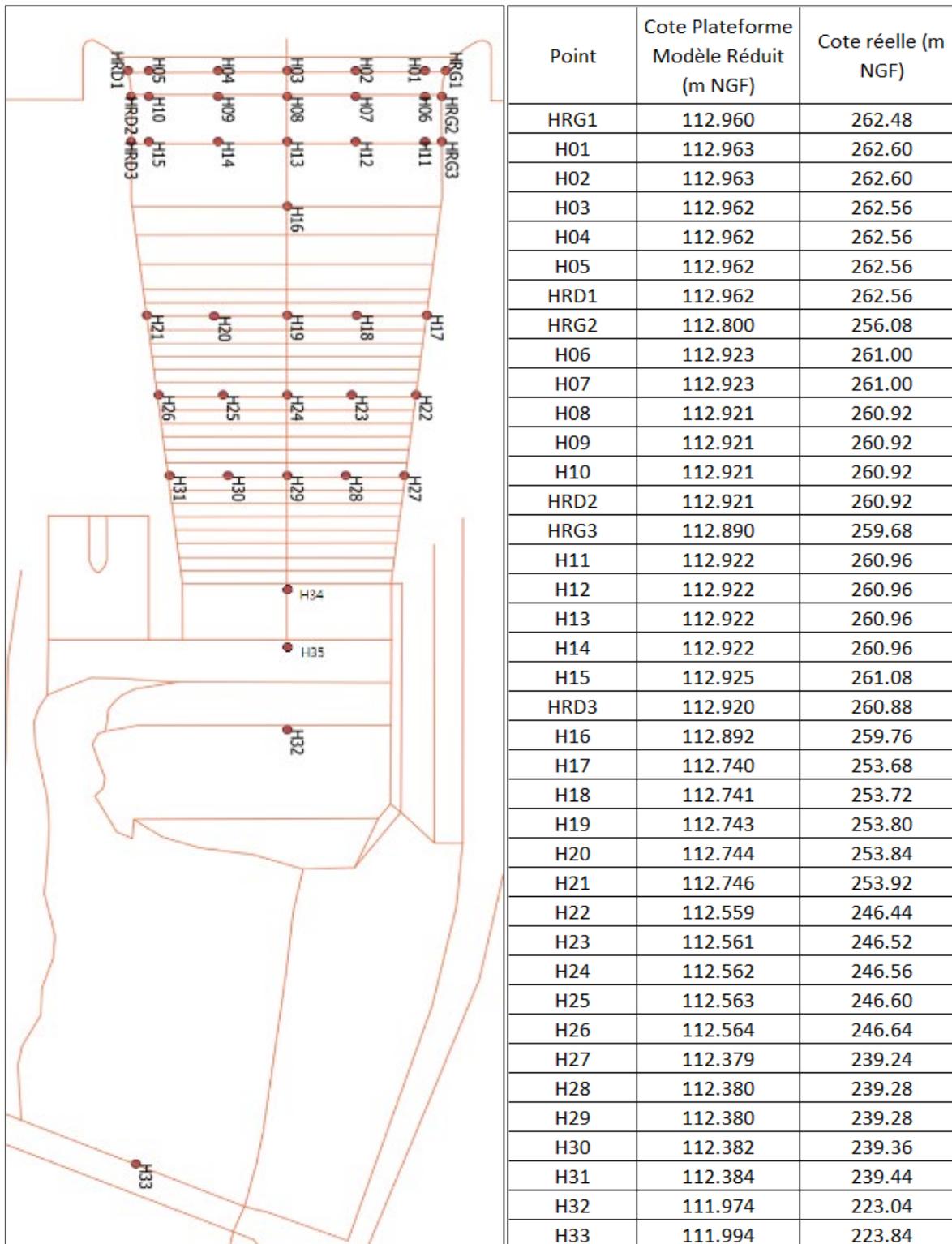
ANNEXE 2 : OBSERVATION DU RESSAUT HYDRAULIQUE ET DE L'AERATION

Essai	Observation		
	Début ressaut	Longueur ressaut ⁵	Début aération coursier
Faible crue	La tulipe est fermée donc la condition aval n'est pas comparable		En aval de la première marche (259,7 m NGF)
Q1000	En aval de la dernière marche (229,7 m NGF)	0,5 m	En aval de la 5e marche (256,1 m NGF)
Q10 000	En aval de la dernière marche (228,5 m NGF)	Environ 1 m	En aval de la 20e marche (238,1 m NGF)
Q100 000	En aval de la dernière marche (228,5 m NGF)	Environ 1 m	Pas de zone aérée dans le coursier

⁵ La longueur du ressaut a été estimée approximativement avec un mètre

ANNEXE 3 : MESURE DE LA HAUTEUR D'EAU

Localisation des points de mesure



Localisation	Point	Q1000		h réelle (m)	Δh réelle (m)
Seuil rang 1	HRG1	3,4	3,4	1,36	0
	H1	3	3,1	1,22	0,04
	H2	2,9	3,1	1,2	0,08
	H3	2,9	3	1,18	0,04
	H4	3	3,1	1,22	0,04
	H5	3,3	3,4	1,34	0,04
	HRD1	3,3	3,3	1,32	0
Seuil rang 2	HRG2	2,4	2,5	0,98	0,04
	H6	3	3,1	1,22	0,04
	H7	3	3,1	1,22	0,04
	H8	2,8	2,9	1,14	0,04
	H9	2,9	3	1,18	0,04
	H10	3,1	3,2	1,26	0,04
	HRD2	2,2	2,4	0,92	0,08
Seuil rang 3 Mesurée sur la marche aval	HRG3	4,5	4,6	1,82	0,04
	H11	4,3	4,4	1,74	0,04
	H12	4,8	4,8	1,92	0
	H13	4,7	4,7	1,88	0
	H14	4,9	5	1,98	0,04
	H15	4,6	4,7	1,86	0,04
	HRD3	4,7	4,8	1,9	0,04
	H16	4,8	4,9	1,94	0,04
Coursier rang 1 Mesurée sur la marche aval	H17	7,5	9	3,3	0,6
	H18	7	7,9	2,98	0,36
	H19	7	9	3,2	0,8
	H20	7	9,5	3,3	1
	H21	7	9	3,2	0,8
Coursier rang 2 Mesurée sur la marche aval	H22	5	6	2,2	0,4
	H23	5	7	2,4	0,8
	H24	4,5	5	1,9	0,2
	H25	4,5	6	2,1	0,6
	H26	4	5,5	1,9	0,6
Coursier rang 3 Mesurée sur la marche aval	H27	5,5	6,5	2,4	0,4
	H28	4,5	6	2,1	0,6
	H29	4	5,5	1,9	0,6
	H30	4,5	5,5	2	0,4
	H31	5	6	2,2	0,4
Bassin de dissipation	H32	21	26	9,4	2
Aval (tirant d'air)	H33	15	19	6,8	1,6
Dernière marche	H34	8	12	4	1,6
Fin coursier	H35	9	15	4,8	2,4

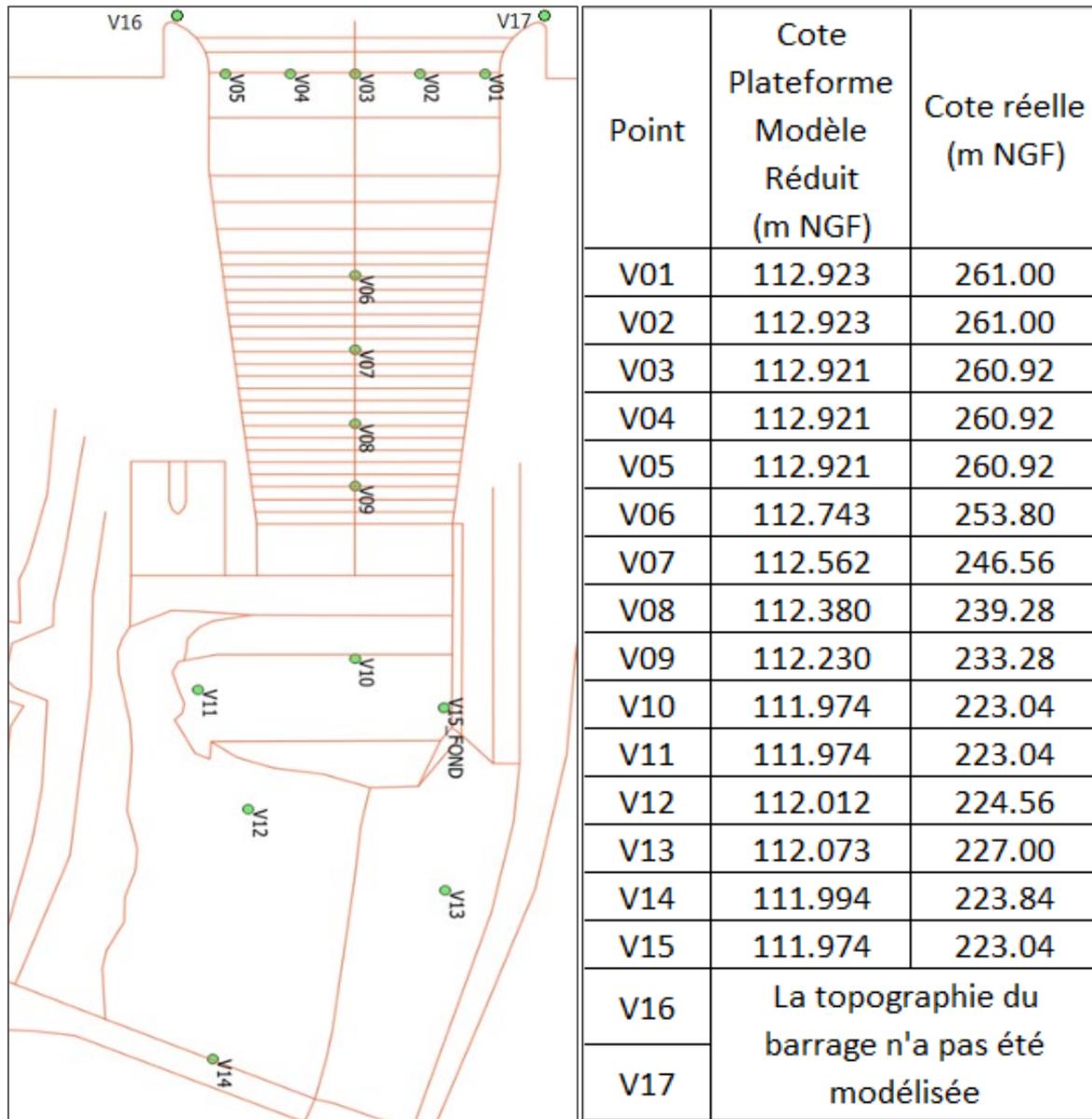
Localisation	Point	Q10 000		h réelle (m)	Δh réelle (m)
Seuil rang 1	HRG1	7,6	7,8	3,08	0,08
	H1	8	8,1	3,22	0,04
	H2	7,9	8	3,18	0,04
	H3	7,7	7,8	3,1	0,04
	H4	7,9	8	3,18	0,04
	H5	8	8,1	3,22	0,04
	HRD1	7,7	7,9	3,12	0,08
Seuil rang 2	HRG2	5,4	5,6	2,2	0,08
	H6	7,6	7,8	3,08	0,08
	H7	7,9	8	3,18	0,04
	H8	7,8	7,9	3,14	0,04
	H9	7,7	7,9	3,12	0,08
	H10	7,3	7,5	2,96	0,08
	HRD2	5,7	5,8	2,3	0,04
Seuil rang 3 Mesurée sur la marche aval	HRG3	7,9	8,2	3,22	0,12
	H11	7,4	7,3	2,94	0,04
	H12	8,8	8,9	3,54	0,04
	H13	8,8	8,9	3,54	0,04
	H14	8,8	8,9	3,54	0,04
	H15	7,8	7,9	3,14	0,04
	HRD3	7,8	8	3,16	0,08
Coursier rang 1 Mesurée sur la marche aval	H16	8,3	8,5	3,36	0,08
	H17	8,8	9,5	3,66	0,28
	H18	7,1	7,5	2,92	0,16
	H19	7,5	8	3,1	0,2
	H20	6,5	7,5	2,8	0,4
Coursier rang 2 Mesurée sur la marche aval	H21	8,4	8,8	3,44	0,16
	H22	9,2	9,8	3,8	0,24
	H23	7	7,5	2,9	0,2
	H24	7	7,5	2,9	0,2
	H25	7	7,5	2,9	0,2
Coursier rang 3 Mesurée sur la marche aval	H26	8,5	9	3,5	0,2
	H27	9	9,5	3,7	0,2
	H28	7	7,5	2,9	0,2
	H29	7	8	3	0,4
	H30	7,5	8	3,1	0,2
Bassin de dissipation	H31	8	9	3,4	0,4
Aval (tirant d'air)	H32	26	30	11,2	1,6
Dernière marche	H33	7	10	3,4	1,2
Fin coursier	H34	7	8	3	0,4
	H35	10	15	5	2

Localisation	Point	Q100 000		h réelle (m)	Δh réelle (m)
Seuil rang 1	HRG1	10,5	10,6	4,22	0,04
	H1	10,8	10,9	4,34	0,04
	H2	11,1	11,1	4,44	0
	H3	11	11,1	4,42	0,04
	H4	11,2	11,3	4,5	0,04
	H5	11,2	11,5	4,54	0,12
	HRD1	10,7	10,9	4,32	0,08
Seuil rang 2	HRG2	7,9	8,2	3,22	0,12
	H6	9,8	10	3,96	0,08
	H7	11,4	11,5	4,58	0,04
	H8	11,7	11,9	4,72	0,08
	H9	11,9	12,1	4,8	0,08
	H10	10,7	11	4,34	0,12
	HRD2	8	8,5	3,3	0,2
Seuil rang 3 Mesurée sur la marche aval	HRG3	9,9	10,5	4,08	0,24
	H11	8,5	8,8	3,46	0,12
	H12	11,3	11,5	4,56	0,08
	H13	11,8	11,9	4,74	0,04
	H14	11,1	11,5	4,52	0,16
	H15	9	9,2	3,64	0,08
	HRD3	9	9,5	3,7	0,2
	H16	10,7	10,8	4,3	0,04
Coursier rang 1 Mesurée sur la marche aval	H17	10,8	11,4	4,44	0,24
	H18	9,8	10,2	4	0,16
	H19	9,5	9,7	3,84	0,08
	H20	8,5	9,2	3,54	0,28
	H21	10,8	11,2	4,4	0,16
Coursier rang 2 Mesurée sur la marche aval	H22	11	11,5	4,5	0,2
	H23	9	9,5	3,7	0,2
	H24	8,5	9	3,5	0,2
	H25	8,5	9,1	3,52	0,24
	H26	10,9	11,2	4,42	0,12
Coursier rang 3 Mesurée sur la marche aval	H27	10,8	11,3	4,42	0,2
	H28	8,5	9	3,5	0,2
	H29	8,2	8,5	3,34	0,12
	H30	8,8	9,1	3,58	0,12
	H31	10,9	11,2	4,42	0,12
Bassin de dissipation	H32	30	35	13	2
Aval (tirant d'air)	H33	8	-4	0,8	4,8
Dernière marche	H34	8	9	3,4	0,4
Fin coursier	H35	11	15	5,2	1,6

		Faible crue		h réelle (m)	Δh réelle (m)
Seuil rang 1	HRG1	1,4	1,4	0,56	0
	H1				
	H2				
	H3	1,4	1,4	0,56	0
	H4				
	H5				
	HRD1				
Seuil rang 2	HRG2				
	H6				
	H7				
	H8	0,7	0,8	0,3	0,04
	H9				
	H10				
	HRD2				
Seuil rang 3 Mesurée sur la marche aval	HRG3				
	H11				
	H12				
	H13	0,8	0,9	0,34	0,04
	H14				
	H15				
	HRD3				
	H16	3,5	4,5	1,6	0,4
Coursier rang 1 Mesurée sur la marche aval	H17				
	H18				
	H19	3,5	4,5	1,6	0,4
	H20				
	H21				
Coursier rang 2 Mesurée sur la marche aval	H22				
	H23				
	H24	3	4,5	1,5	0,6
	H25				
	H26				
Coursier rang 3 Mesurée sur la marche aval	H27				
	H28				
	H29	10	11,5	4,3	0,6
	H30				
	H31				
Bassin de dissipation	H32	33	32,5	13,1	0,2

ANNEXE 4 : MESURE DE LA VITESSE D'ÉCOULEMENT

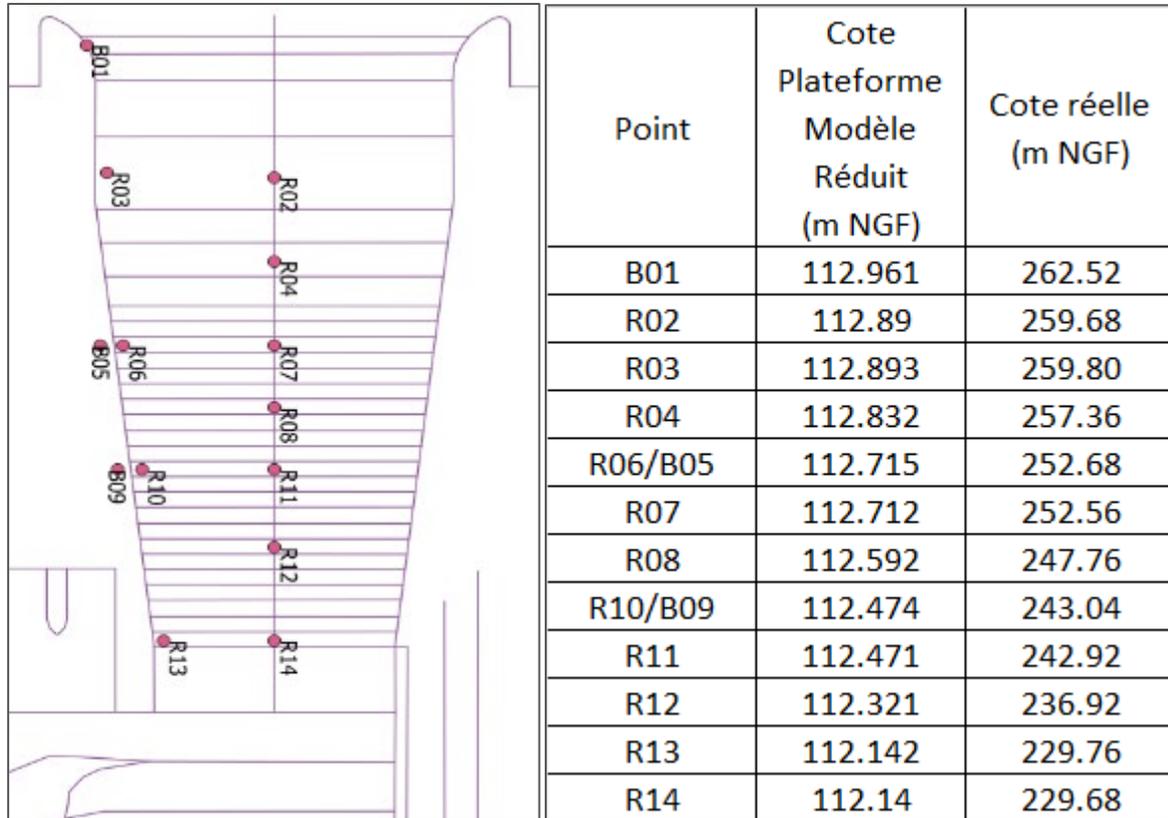
Localisation des points de mesure



		Q1000 (Nombre de tour pendant 30 s)	V _{modèle} (m/s)	V _{réelle} (m/s)	Q10 000 (Nombre de tour pendant 30 s)	V _{modèle} (m/s)	V _{réelle} (m/s)	Q100 000 (Nombre de tour pendant 30 s)	V _{modèle} (m/s)	V _{réelle} (m/s)
Seuil	V1	97	0,82	5,21	127	1,08	6,82	135	1,15	7,24
	V2	97	0,82	5,21	127	1,08	6,82	135	1,15	7,24
	V3	110	0,93	5,91	129	1,10	6,92	141	1,20	7,56
	V4	114	0,97	6,12	137	1,16	7,35	148	1,26	7,94
	V5	133	1,13	7,14	139	1,18	7,46	148	1,26	7,94
Coursier	V6	186	1,58	9,97	249	2,11	13,34	279	2,36	14,94
	V7	188	1,59	10,08	305	2,58	16,33	352	2,98	18,85
	V8	208	1,76	11,15	363	3,08	19,46	364	3,09	19,51
	V9	197	1,67	10,56	370	3,14	19,85	367	3,11	19,68
Aval	V10	23	0,20	1,26	114	0,97	6,12	248	2,10	13,29
	V11	189	1,60	10,13	97	0,82	5,21	279	2,36	14,94
	V12	44	0,38	2,38	81	0,69	4,36	36	0,31	1,95
	V13	-13	-0,11	-0,67	23	0,20	1,26	104 (96 sans pont)	0,88	5,59
	V14	156	1,32	8,37	84	0,71	4,52	81	0,69	4,36
	V15_S URF	-7	-0,04	-0,28	-49	-0,41	-2,59	-70	-0,55	-3,49
	V15_F OND	14	0,12	0,79	54	0,46	2,91	98	0,80	5,07
Entonnement	V16	17	0,15	0,94	41	0,35	2,22	55	0,46	2,88
	V17	17	0,15	0,94	32	0,27	1,74	51	0,42	2,68

ANNEXE 5 : MESURE DE LA PRESSION

Localisation des points de pression



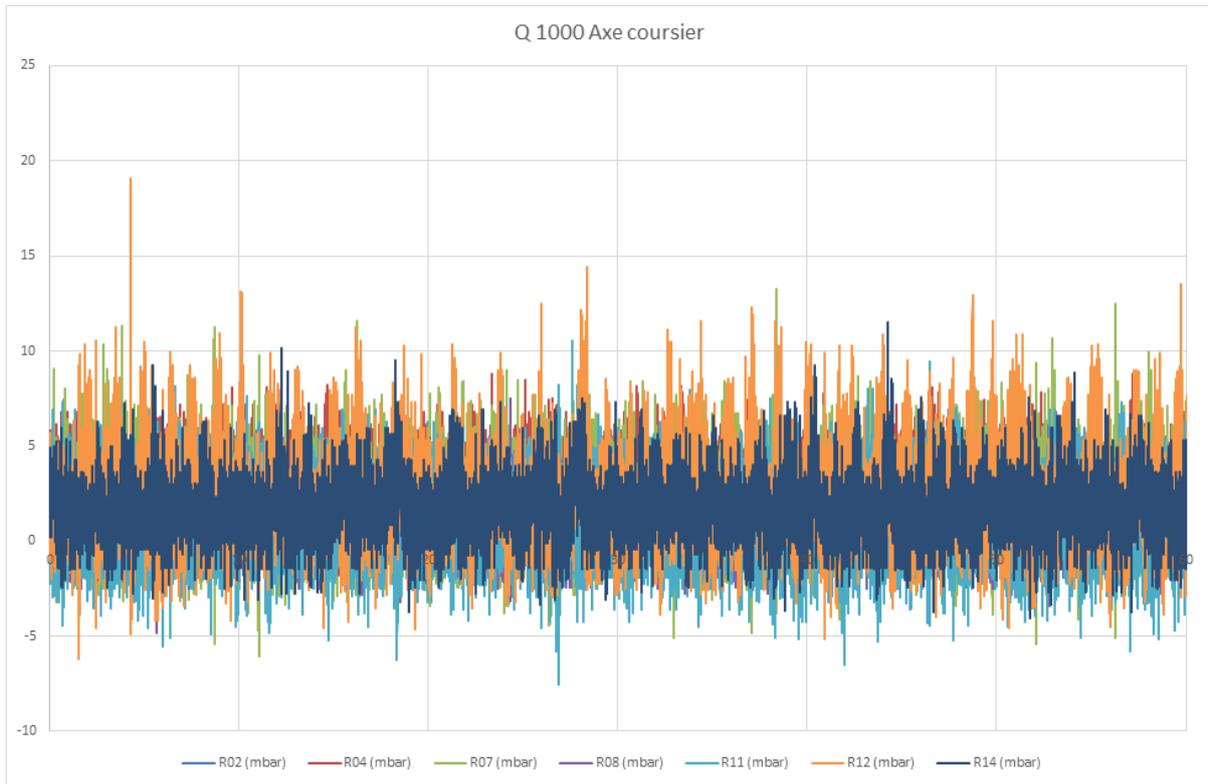
Synthèse de mesure en mBar à l'échelle de modèle

Mesure	X	Q1000 (mBar)			Q10 000 (mBar)			Q100 000 (mBar)			
		Min	Max	Moyenne	Min	Max	Moyenne	Min	Max	Moyenne	
Rive droite	B01	3,9875	0,67	3,24	1,97	3,27	5,90	4,70	3,13	7,21	5,39
	R03	21,9395	1,44	6,16	3,80	4,69	17,01	9,35	5,71	16,35	10,37
	B05	45,8395	-4,26	8,32	1,55	-3,37	13,37	5,95	-2,29	14,66	8,02
	R06	45,8395	-3,91	6,93	1,44	-5,95	12,75	2,23	-3,86	12,15	3,75
	B09	63,1195	-7,98	11,15	1,96	-13,84	24,86	7,16	-10,73	28,08	9,48
	R10	63,1195	-3,71	8,15	1,61	-10,92	15,04	1,69	-7,59	14,74	2,74
	R13	86,8795	-2,11	14,54	4,32	-26,82	44,61	4,93	-37,94	71,48	9,08
Axe	R02	21,9395	-0,78	4,46	1,70	1,57	10,22	6,68	8,13	18,14	12,86
	R04	33,9395	-1,62	8,79	3,89	2,90	16,99	9,20	2,56	20,57	11,44
	R07	45,8395	-6,08	13,27	2,01	-3,30	16,08	3,69	-4,30	16,72	4,01
	R08	54,4795	-4,81	7,53	1,30	-8,77	20,73	3,83	-6,48	20,60	4,49
	R11	63,1195	-7,53	10,54	1,17	-11,09	23,96	2,77	-12,08	23,72	4,13
	R12	73,9195	-6,17	19,05	2,41	-14,16	39,05	6,02	-13,13	38,38	6,18
	R14	86,8795	-4,07	11,51	1,74	-12,15	33,30	5,53	-13,62	30,24	10,31

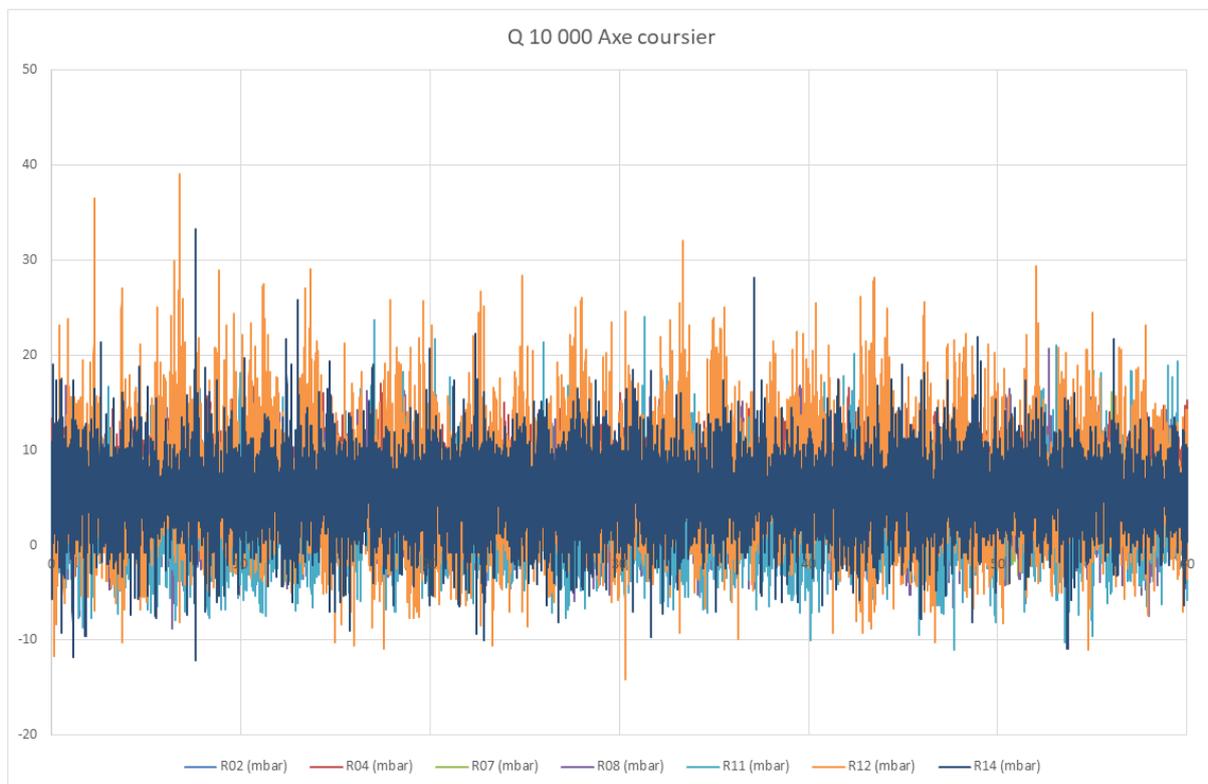
Synthèse de mesure en mCE à l'échelle réelle

Point	Q1000 (mCE)				Q10 000 (mCE)				Q100 000 (mCE)			
	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Min	Max	Moyenne	Ecart type
B01	0,27	1,29	0,79	0,39	1,31	2,36	1,88	0,27	1,25	2,88	2,16	0,37
R03	0,57	2,46	1,52	0,51	1,88	6,80	3,74	0,93	2,29	6,54	4,15	0,78
B05	-1,70	3,33	0,62	1,23	-1,35	5,35	2,38	1,58	-0,92	5,87	3,21	1,64
R06	-1,56	2,77	0,58	1,23	-2,38	5,10	0,89	1,62	-1,54	4,86	1,50	1,62
B09	-3,19	4,46	0,78	1,75	-5,54	9,94	2,87	4,11	-4,29	11,23	3,79	4,25
R10	-1,48	3,26	0,65	1,34	-4,37	6,02	0,67	2,93	-3,04	5,89	1,10	2,44
R13	-0,85	5,81	1,73	1,75	-10,73	17,84	1,97	7,60	-15,18	28,59	3,63	8,98
R02	-0,31	1,78	0,68	0,62	0,63	4,09	2,67	0,83	3,25	7,25	5,14	1,12
R04	-0,65	3,52	1,56	1,01	1,16	6,80	3,68	1,44	1,02	8,23	4,58	1,86
R07	-2,43	5,31	0,80	1,84	-1,32	6,43	1,48	1,73	-1,72	6,69	1,60	1,88
R08	-1,92	3,01	0,52	1,30	-3,51	8,29	1,53	3,18	-2,59	8,24	1,80	3,11
R11	-3,01	4,22	0,47	1,73	-4,44	9,58	1,11	3,23	-4,83	9,49	1,65	3,05
R12	-2,47	7,62	0,96	2,27	-5,66	15,62	2,41	4,78	-5,25	15,35	2,47	4,14
R14	-1,63	4,60	0,70	1,58	-4,86	13,32	2,21	3,55	-5,45	12,10	4,12	3,61

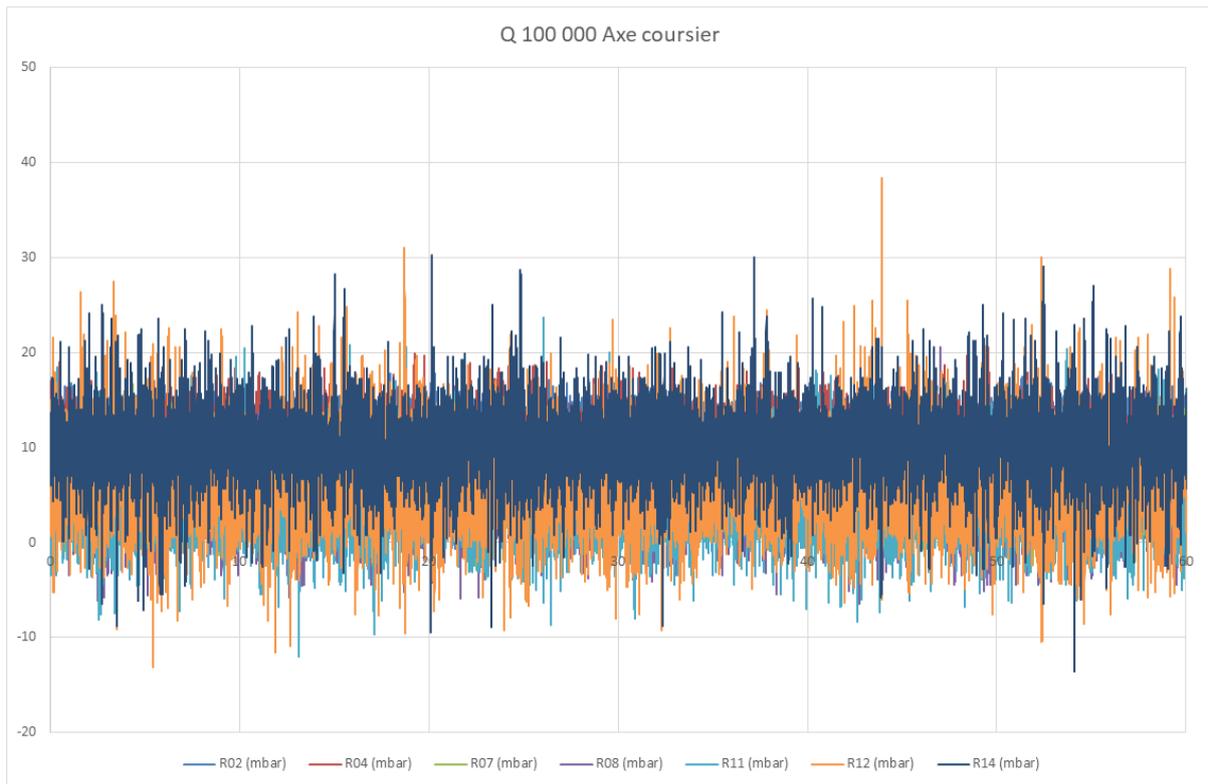
Mesure de pression sur l'axe (Q1000) pendant 60 s



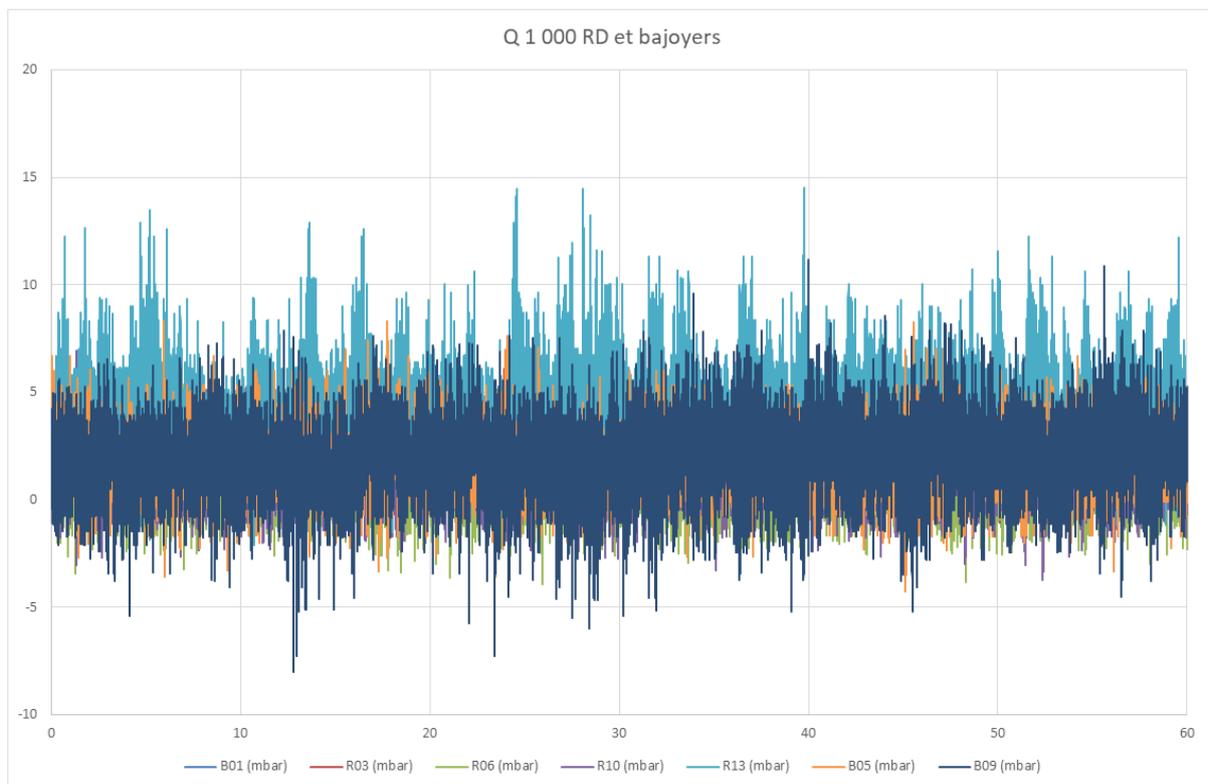
Mesure de pression sur l'axe (Q10 000) pendant 60 s



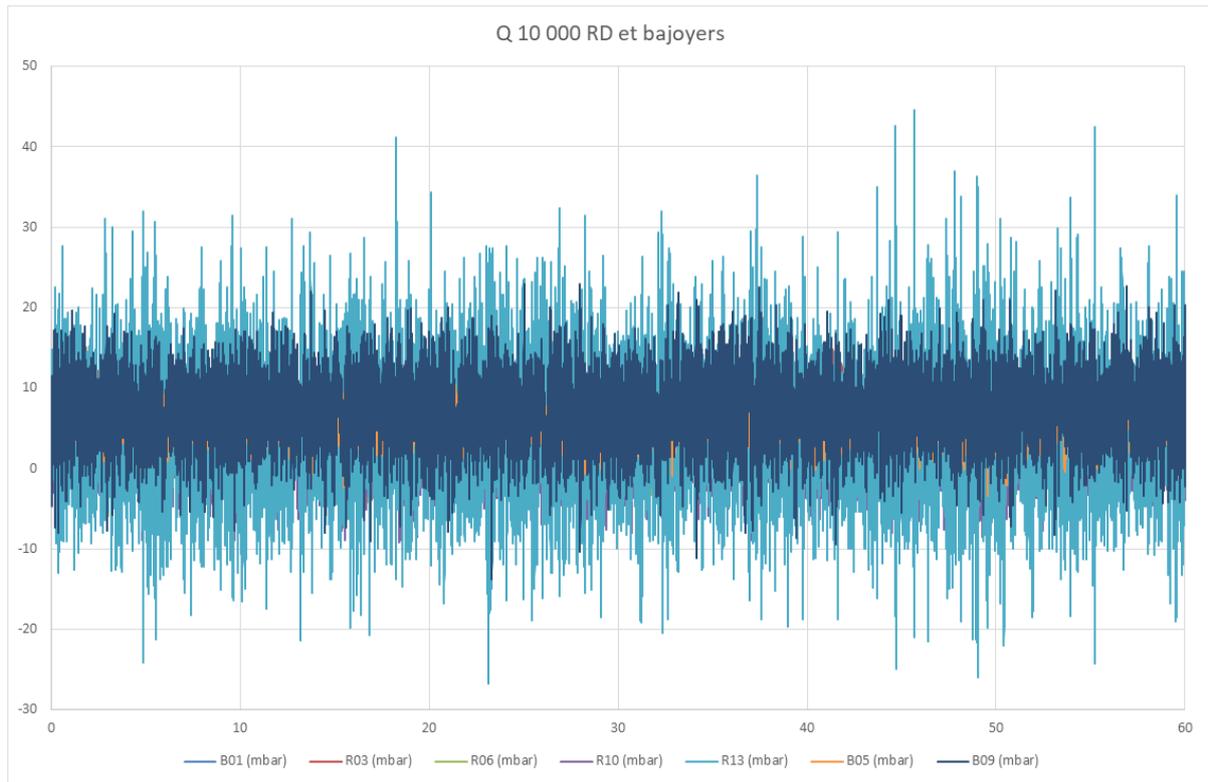
Mesure de pression sur l'axe (Q100 000) pendant 60 s



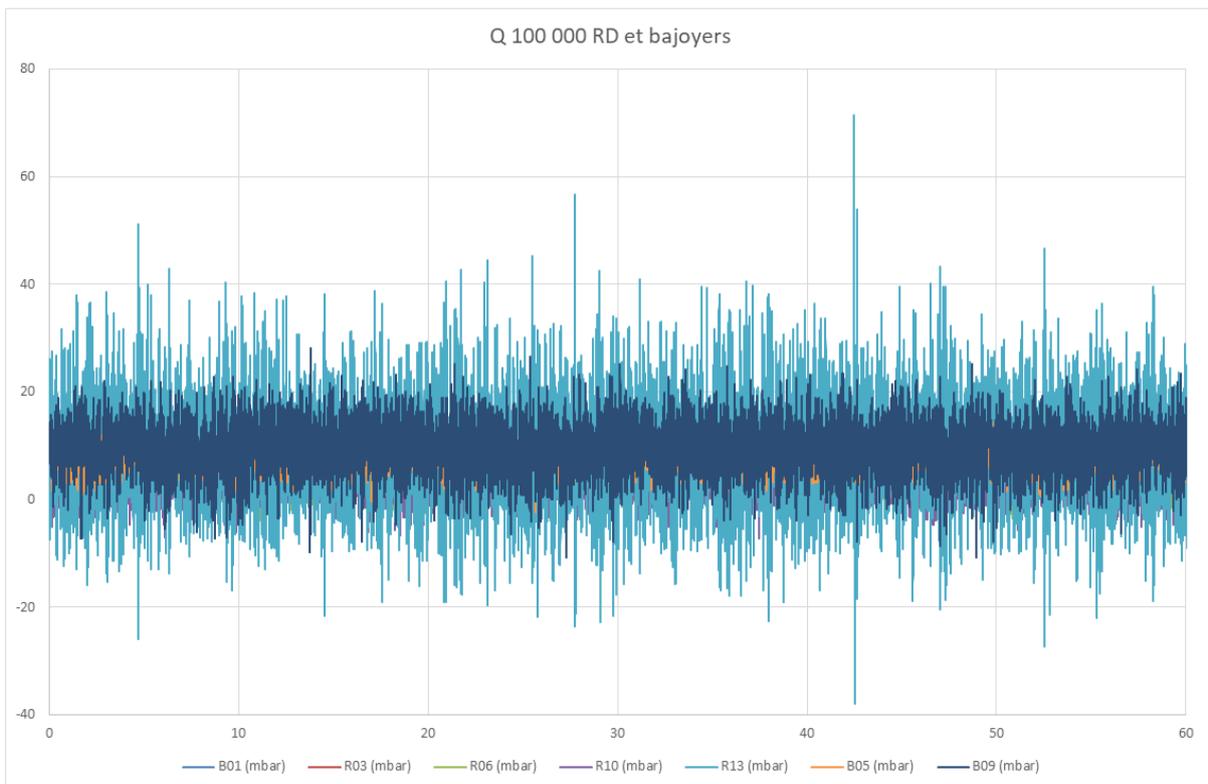
Mesure de pression en rive droite (Q1000) pendant 60 s



Mesure de pression en rive droite (Q10 000) pendant 60 s



Mesure de pression en rive droite (Q100 000) pendant 60 s



ANNEXE 6 : COMPARAISON DES 2 MODELES

Une comparaison de la répartition de la vitesse sur le profil (voir la Figure 28 dans § 5.1) entre le modèle réduit et le modèle numérique a été réalisée, suite à la fourniture par ISL des résultats de la simulation de la crue de 10 000 ans par modélisation numérique.

Dans le modèle réduit, la vitesse maximale se trouve toujours en rive gauche de la tulipe (voir ci-dessous). La vitesse en rive droite augmente jusqu'à atteindre l'ordre de grandeur que la rive gauche. Cette répartition est cohérente avec le résultat simulé par le modèle numérique 3D.

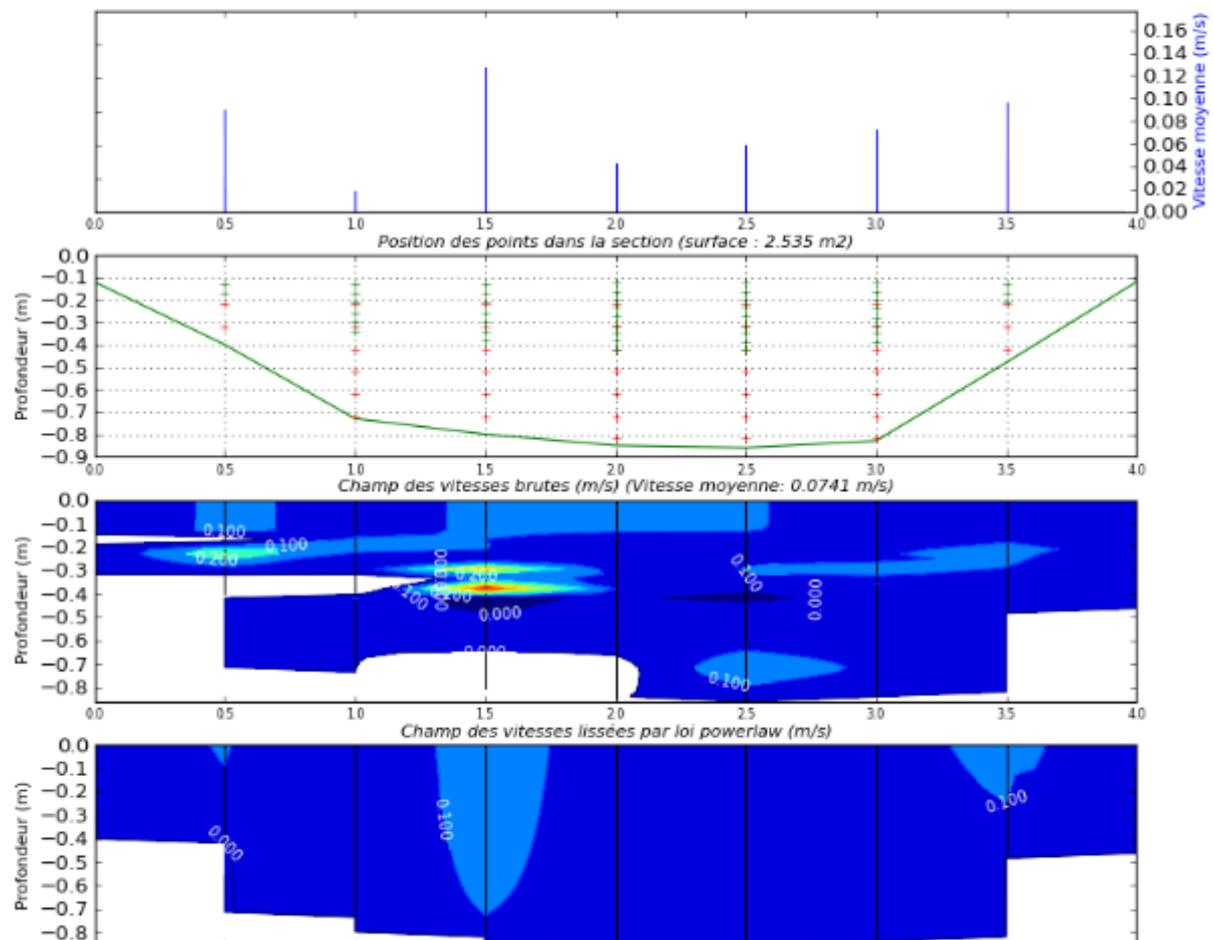
La vitesse maximale est de 0,15 m/s à l'échelle du modèle réduit, qui correspond à 0,95 m/s à l'échelle réelle (Figure 18). La disparité des vitesses entre profils laisse cependant un doute sur la réalité de cette valeur. Ainsi cette valeur est plus élevée que celle simulée par le modèle numérique 3D (environ 0,7 m/s à l'échelle réelle).

L'écart de vitesse entre les deux modèles à cet endroit est de 26%.

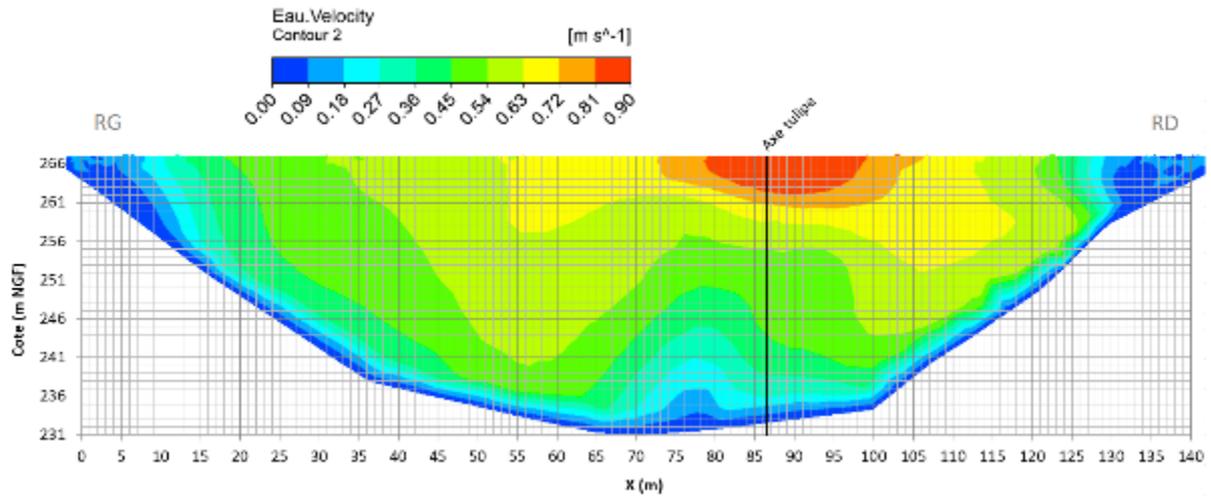
Vitesse mesurée sur le modèle réduit (Q10 000)

Date : 17/03/2021 - Equipement : QLINER - Identifiant : V ste cecile 10000(1)

Temps de comptage : 30s - Méthode : powerlaw - Degré : 6 - Profondeur : 90% - Faisceau 3 : oui - Coefficients rives : 0.7, 0.7



Vitesse mesurée dans le modèle numérique (Q10 000)



ANNEXE 8 RAPPORT DE MODELISATION HYDRAULIQUE 3D



Barrages



Energie



Eau
Environnement



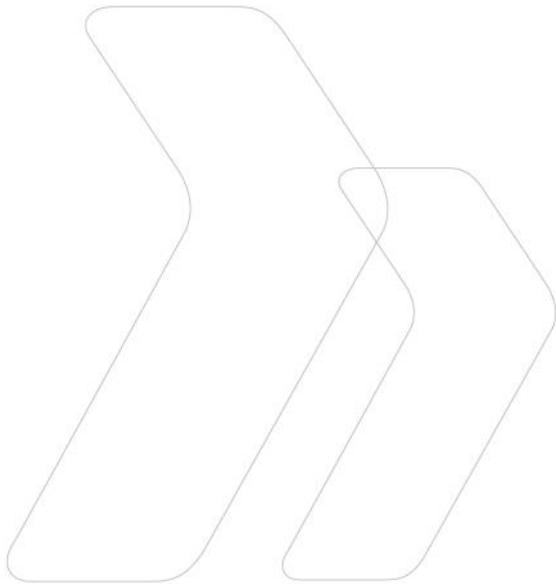
Infrastructures
Aménagements
hydrauliques



Mer et côtes



Calcul
scientifique



SECURISATION DES BARRAGES DE SAINTE CECILE D'ANDORGE ET DES CAMBOUS

Modélisation hydraulique 3D de l'évacuateur du
barrage de Sainte Cécile d'Andorge



Rapport n° : 19F-148-RM-4
Révision n° : E
Date : 25/06/2021

Votre contact :
[Olivier MUNOZ](mailto:munoz@isl.fr)
munoz@isl.fr

Rapport



ISL Ingénierie SAS – MONTPELLIER
65 rue Clément Ader
34170 – Castelnau-le-Lez
France
Tel : +33.4.67.54.51.88
Fax : +33.4.67.54.52.05

www.isl.fr



MEDiterranée, Infrastructure, Aménagement, et Eau Ingénierie



Visa

Document verrouillé du 25/06/2021.

Révision	Date	Auteur	Chef de Projet	Superviseur	Commentaire
A	22/10/2020	SSH	SSH	ASA	Première édition
B	22/10/2020	SSH	ASA	ASA	Calculs complémentaires et laminage des crues exceptionnelle et extrême - calage de la RN106
C	12/11/2020	SSH	OMU	ASA	Compléments suite à la réunion du 23 octobre 2020
D	11/05/2021	SSH	OMU	ASA	Intégration des commentaires du MOA et de l'AMO
E	25/06/2021	SSH	OMU	ASA	Intégration des commentaires de l'AMO

ASA : SALMI Akim

OMU : MUNOZ Olivier

SSH : SHAIEK Salah

Rapport ISL
19F-148-RM-4
Revision E

<http://www.isl.fr/r.php?c=187590>



Ingénierie



SOMMAIRE

1	PREAMBULE	1
2	DOCUMENTS DE REFERENCE	1
3	DESCRIPTION DU MODELE HYDRAULIQUE 3D.....	2
3.1	DOMAINE MODELISE	2
3.2	MODIFICATIONS PAR RAPPORT A L'AVP	2
3.3	MAILLAGE DU MODELE.....	5
3.4	CONDITIONS AUX LIMITES DU MODELE	7
3.5	METHODES NUMERIQUES	8
3.6	SCENARIOS SIMULES	8
3.7	CONVERGENCE DES SIMULATIONS	9
3.8	INCERTITUDES DU MODELE 3D.....	11
3.8.1	Incertitudes sur la hauteur d'eau	11
3.8.2	Incertitude liée au modèle de turbulence	12
3.8.3	Comparaison avec d'autres logiciels.....	13
4	RISQUE DE CAVITATION	15
5	RESULTATS DU MODELE HYDRAULIQUE 3D.....	16
5.1	DEBITANCE DE L'EVACUATEUR DE CRUES.....	16
5.2	CRUE 1 – NIVEAU DE RETENUE A 264,50 MNGF	19
5.2.1	Écoulement dans la retenue.....	19
5.2.1.1	Surface libre	19
5.2.1.2	Vitesses d'écoulement	19
5.2.2	Écoulement à l'entonnement.....	20
5.2.2.1	Surface libre	20
5.2.2.2	Vitesse d'écoulement	21
5.2.3	Écoulement sur les marches	22
5.2.3.1	Surface libre	22
5.2.3.2	Vitesses d'écoulement	23
5.2.4	Écoulement dans le bassin	24
5.2.4.1	Surface libre et vitesses	24
5.3	CRUE 2 – NIVEAU DE RETENUE A 267,20 MNGF.....	26

5.3.1	Écoulement dans la retenue.....	26
5.3.1.1	Surface libre	26
5.3.1.2	Vitesses d'écoulement	27
5.3.2	Écoulement à l'entonnement.....	30
5.3.2.1	Surface libre	30
5.3.2.2	Vitesses d'écoulement	31
5.3.3	Écoulement sur les marches	32
5.3.3.1	Surface libre	32
5.3.3.2	Vitesses d'écoulement	34
5.3.3.3	Calcul du taux de dissipation sur les marches.....	35
5.3.4	Écoulement dans le bassin	36
5.3.4.1	Surface libre et vitesses	36
5.3.4.2	Calcul de la longueur de bassin de dissipation.....	38
5.3.5	Risque d'érosion par cavitation	39
5.4	CRUE 3 – NIVEAU DE RETENUE A 268,80 MNGF.....	41
5.4.1	Écoulement dans la retenue.....	41
5.4.1.1	Surface libre	41
5.4.1.2	Vitesses d'écoulement	41
5.4.2	Écoulement à l'entonnement.....	44
5.4.2.1	Vitesses d'écoulement	45
5.4.3	Écoulement sur les marches	46
5.4.3.1	Surface libre	46
5.4.3.2	Vitesses d'écoulement	47
5.4.3.3	Calcul du taux de dissipation sur les marches.....	49
5.4.4	Écoulement dans le bassin	50
5.4.5	Risque d'érosion par cavitation	52
6	LAMINAGE DES CRUES AVEC LA NOUVELLE LOI D'EVACUATION	54

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 1 PLANS	1
-----------------------------	----------

TABLE DES FIGURES

Figure 1 – Emprise du modèle hydraulique 3D	2
Figure 2 – Modifications apportées depuis l'AVP	3
Figure 3 – Géométrie du modèle hydraulique 3D	3
Figure 4 – Fond de la fosse en aval des galeries	4
Figure 5 – Configuration fosse retenue dans le modèle	4
Figure 6 – Fosse en aval du barrage.....	5
Figure 7 – Maillage du modèle hydraulique 3D	6
Figure 8 – Maillage du modèles hydraulique 3D au niveau des marches	6
Figure 9 – Limites du modèle hydraulique 3D	7
Figure 10 – Courbe de tarage aval.....	8
Figure 11 – Suivi de la convergence – Bilan des débits – Exemple.....	10
Figure 12 – Suivi de la convergence – Résidus de la quantité de masse et quantité de mouvement – Exemple.....	10
Figure 13 – Suivi de la convergence – Résidus de K et ϵ – Exemple	11
Figure 14 – Position des abscisses présentées dans le tableau.....	13
Figure 15 – Position des abscisses présentées dans le tableau.....	14
Figure 16 – Loi de débitance de l'évacuateur de crues	17
Figure 17 – Iso-valeurs de la cote Z dans la retenue – Crue 1	19
Figure 18 – Vecteurs de vitesse dans la retenue – Crue 1	20
Figure 19 – Iso-valeurs de la cote Z à l'entonnement – Crue 1	20
Figure 20 – Niveau d'eau sur les bajoyers à l'entonnement – Crue 1	21
Figure 21 – Vecteurs de vitesse au niveau de l'entonnement – Crue 1	21
Figure 22 – Iso-valeurs de vitesse en surface au niveau de l'entonnement – Crue 1	22
Figure 23 – Iso-valeurs de la cote Z dans le coursier – Crue 1.....	22
Figure 24 – Lignes d'eau le long des bajoyers et dans l'axe de l'EVC – Crue 1	23
Figure 25 – Iso-valeurs de la vitesse en surface dans le coursier – Crue 1	23
Figure 26 – Iso-valeurs de la vitesse dans le coursier – coupe dans l'axe de l'EVC – Crue 1	24
Figure 27 – Vecteurs de vitesse – Zoom au niveau des marches 4 à 8 – Crue 1	24
Figure 28 – Iso-valeurs de la cote Z dans le bassin – Fosse excavée – Crue 1	25
Figure 29 – Lignes de courant et vitesses dans le bassin – Fosse excavée – Crue 1	25
Figure 30 – Contrainte de cisaillement dans le bassin – Crue 1	26
Figure 31 – Iso-valeurs de la cote Z dans la retenue – Crue 2	27
Figure 32 – Vecteurs de vitesse dans la retenue – Crue 2	27

Figure 33 – Iso-valeurs de l'intensité de la vitesse dans le plan médian de la courbure – Crue 2..	28
Figure 34 – Intensité de la vitesse en surface dans le plan médian de courbure – Crue 2	28
Figure 35 – Vecteurs de vitesse dans le plan horizontale à la cote Z = 250 m NGF – Crue 2	29
Figure 36 – Iso-valeurs de pression dans le plan horizontal à la cote Z = 250 m NGF – Crue 2....	29
Figure 37 – Iso-valeurs de la cote Z à l'entonnement – Crue 2	30
Figure 38 – Niveau d'eau sur les bajoyers à l'entonnement – Crue 2.....	31
Figure 39 – Vecteurs de vitesse au niveau de l'entonnement – Crue 2.....	32
Figure 40 – Iso-valeurs de vitesse en surface au niveau de l'entonnement – Crue 2	32
Figure 41 – Iso-valeurs de la cote Z dans le coursier – Crue 2.....	33
Figure 42 – Lignes d'eau le long des bajoyers et dans l'axe de l'EVC – Crue 2	34
Figure 43 – Iso-valeurs de la vitesse en surface dans le coursier – Crue 2.....	34
Figure 44 – Iso-valeurs de la vitesse dans le coursier – coupe dans l'axe de l'EVC – Crue 2	35
Figure 45 – Vecteurs de vitesse – Zoom au niveau des marches 4 à 8 – Crue 2	35
Figure 46 – Charges considérées pour le calcul du taux de dissipation	36
Figure 47 – Iso-valeurs de la cote Z dans le bassin – Fosse excavée – Crue 2	36
Figure 48 – Lignes de courant et vitesses dans le bassin – Fosse excavée – Crue 2	37
Figure 49 – Contrainte de cisaillement dans le bassin – Crue 2	37
Figure 50 – Détail du calcul de la hauteur conjuguée.....	38
Figure 51 – Dimensions du ressaut.....	39
Figure 52 – Pression sur les parois du coursier – Crue 2.....	39
Figure 53 – Indice de cavitation sur le coursier – Crue 2.....	40
Figure 54 – Iso-valeurs de la cote Z dans la retenue – Crue 3	41
Figure 55 – Vecteurs de vitesse dans la retenue – Crue 3.....	42
Figure 56 – Iso-valeurs de l'intensité de la vitesse dans le plan médian de la courbure – Crue 3..	42
Figure 57 – Vecteurs de vitesse dans le plan horizontal à la cote Z = 250 m NGF – Crue 3	43
Figure 58 – Iso-valeurs de pression dans le plan horizontal à la cote Z = 250 m NGF – Crue 3....	43
Figure 59 – Iso-valeurs de la cote Z à l'entonnement – Crue 3	44
Figure 60 – Niveau d'eau sur les bajoyers à l'entonnement – Crue 3.....	45
Figure 61 – Vecteurs de vitesse au niveau de l'entonnement – Crue 3.....	45
Figure 62 – Iso-valeurs de vitesse en surface au niveau de l'entonnement – Crue 3	46
Figure 63 – Iso-valeurs de la cote Z dans le coursier – Crue 3.....	47
Figure 64 – Lignes d'eau le long des bajoyers et dans l'axe de l'EVC – Crue 3	47
Figure 65 – Iso-valeurs de la vitesse en surface dans le coursier – Crue 3.....	48
Figure 66 – Iso-valeurs de la vitesse dans le coursier – coupe dans l'axe de l'EVC – Crue 3	48
Figure 67 – Vecteurs de vitesse – Zoom au niveau des marches 4 à 8 – Crue 3.....	49
Figure 68 – Charges considérées pour le calcul du taux de dissipation	50

Figure 69 – Iso-valeurs de la cote Z dans le bassin – Fosse excavée – Crue 3	50
Figure 70 – Lignes de courant et vitesses dans le bassin – Fosse excavée– Crue 3	51
Figure 71 – Contrainte de cisaillement dans le bassin – Crue 3	51
Figure 72 – Pression sur les parois du coursier – Crue 3	52
Figure 73 – Indice de cavitation sur le coursier – Crue 3	53
Figure 74 – Laminage Q10 000 avec loi HQ du modèle 3D	54
Figure 75 – Laminage 1,3 x Q10 000 avec loi HQ du modèle 3D	54

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Scénarios de crues simulés.....	9
Tableau 2 – Analyse de la sensibilité au maillage selon la finesse	12
Tableau 3 – Analyse de l'influence du modèle de turbulence sur la hauteur d'eau	13
Tableau 4 – Comparaison des hauteurs d'eau entre le modèle physique et le modèle hydraulique 3D	14
Tableau 5 – Débit transitant par l'EVC – Modèle hydraulique 3D	16
Tableau 6 – Ecart en débit entre AVP et PRO	17
Tableau 7 – Ecart en niveau entre AVP et PRO.....	18
Tableau 8 – Laminage avec loi HQ du modèle 3D	55

1 PREAMBULE

Le présent rapport s'inscrit dans le cadre du marché de la maîtrise d'œuvre de la sécurisation du complexe hydraulique formé par les barrages départementaux de Sainte-Cécile d'Andorge et des Cambous.

Il constitue la note des calculs de la modélisation hydraulique tridimensionnelle du fonctionnement de l'évacuateur de crues du barrage de Sainte Cécile d'Andorge.

Les objectifs de la modélisation sont multiples :

- Apprécier les conditions d'écoulement au niveau de l'entonnement et du coursier,
- Définir les caractéristiques hydrauliques principales de l'évacuateur en vue des études sur le modèle physique,
- Permettre une comparaison des résultats avec ceux issus de la modélisation physique.

Les conditions de dissipation en pied de coursier ne font pas l'objet d'étude dans le cadre de ce rapport. En effet, pour des raisons liées à la sécurité du barrage et à la complexité de mise en œuvre de batardeau permettant une mise hors d'eau du chantier, il a été décidé de mettre en œuvre un rideau de pieux sécants en pied de coursier.

Ce rideau, prolongé en rive gauche, garantit la sécurité du barrage contre l'érosion externe et permet de s'affranchir de la construction d'un bassin de dissipation. Son dimensionnement sera justifié dans le cadre du projet.

2 DOCUMENTS DE REFERENCE

1. Cavitation in chutes and spillways, Engineering Monograph No. 42, US Bureau of Reclamation, Avril 1990

3 DESCRIPTION DU MODELE HYDRAULIQUE 3D

3.1 DOMAINE MODELISE

Le domaine du modèle hydraulique numérique est basé sur la géométrie présentée au paragraphe suivant. L'emprise du modèle est indiquée dans la figure suivante. Par rapport à l'usage courant et pour répondre à une demande de l'AMO, il a été étendu assez largement vers l'amont afin de prendre en compte le coude marqué de la vallée.



Figure 1 – Emprise du modèle hydraulique 3D

La tulipe (section d'entrée simplifiée), l'évacuateur de crues et les galeries de restitution sont intégrés au modèle (cf. figure ci-dessous). La topographie de la retenue a été représentée à partir d'une campagne bathymétrique de 2016.

Les écoulements sur la route nationale 106 ne sont pas représentés. Ayant lieu pour la crue de période de retour de 100 000 ans et représentant l'ordre du pourcent du débit total, ils sont négligés.

3.2 MODIFICATIONS PAR RAPPORT A L'AVP

L'évacuateur comprend les modifications suivantes par rapport à l'AVP qui ont été présentées lors du Comité Technique n°5 :

- Modification de l'entonnement et du seuil : les bajoyers ont été profilés pour éviter le décollement des veines de fluide des bajoyers,
- Déplacement du seuil vers l'amont pour mieux définir la section de contrôle des écoulements,
- Modification du profil des marches en parties haute et basse en lien avec le déplacement du seuil et l'écran en pieux sécants parafouille en pied,
- Modification du tracé des bajoyers en partie basse,
- Modification de la fosse de dissipation en pied suite à la mise en œuvre d'un rideau de pieux sécants.

Ces modifications sont illustrées par la figure suivante et le plan inséré en ANNEXE 1.

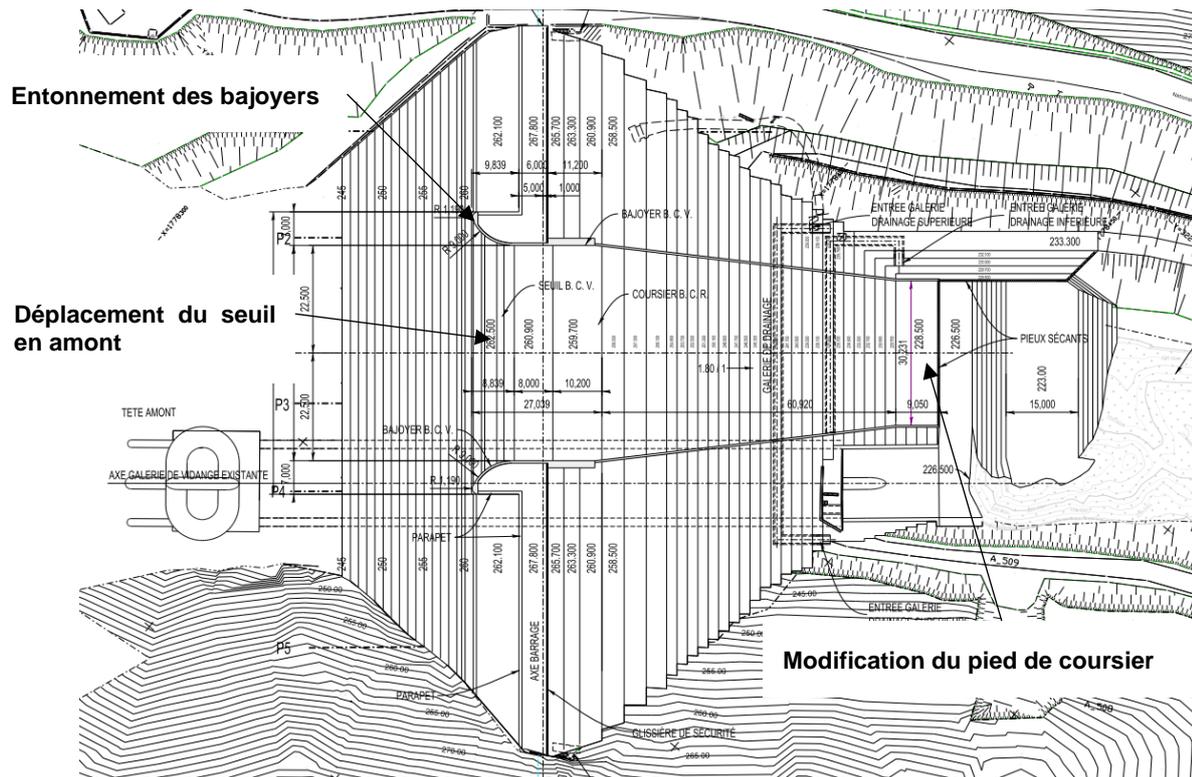


Figure 2 – Modifications apportées depuis l'AVP

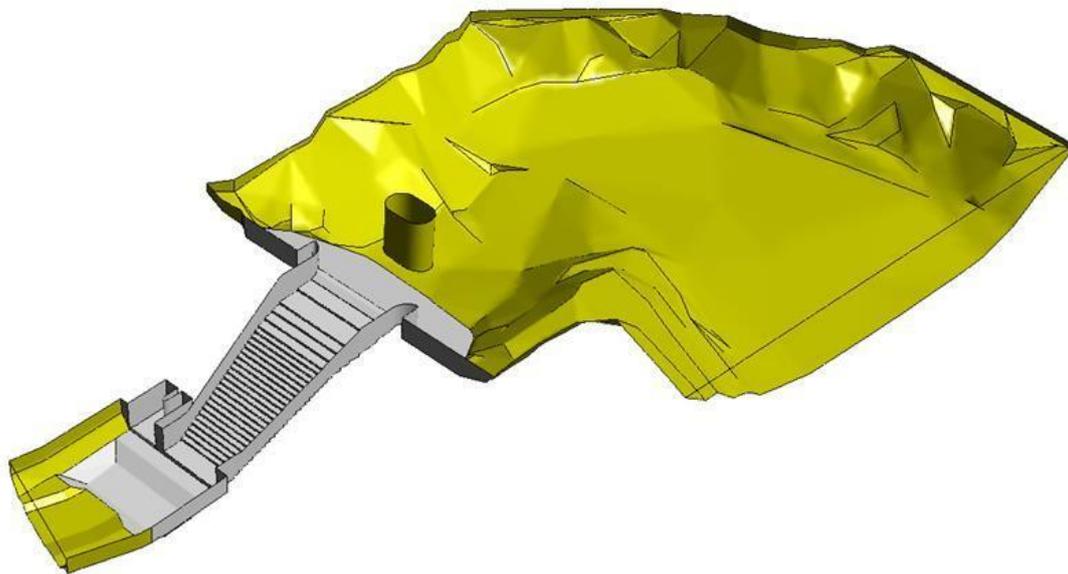


Figure 3 – Géométrie du modèle hydraulique 3D

Comme expliqué en préambule, les conditions de dissipation en pied de coursier ne font pas l'objet d'étude dans le cadre de ce rapport. Le rideau de pieux sécants préviendra tout phénomène d'érosion externe. Le dimensionnement du rideau (profondeur, diamètre des pieux,...) sera effectué au stade du PROJET sur la base des résultats des modélisations hydraulique et physique des écoulements.

Le rideau de pieux sécants se poursuit le long de la recharge en BCR en rive gauche validant ainsi le principe de l'absence de revêtement en fond de fosse.

A ce stade des études, il n'est donc pas prévu de terrasser le bassin de dissipation. L'érosion se fera naturellement au gré des déversements.

Pour les besoins de la modélisation, la géométrie de la fosse a été calquée sur celle s'étant formée en 50 ans en sortie des galeries de la tulipe (cf. figures suivantes).

Ce niveau représente une situation intermédiaire entre la situation actuelle avec un terrain naturel entre 223 et 228 NGF composé d'alluvions et de rocher altéré et la situation après déversement pour la crue exceptionnelle dont le niveau sera approché par les formules de la littérature au regard des résultats des investigations géotechniques réalisées.

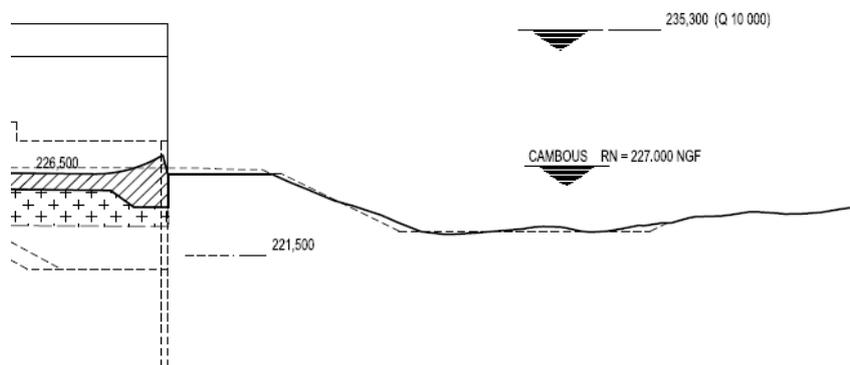


Figure 4 – Fond de la fosse en aval des galeries

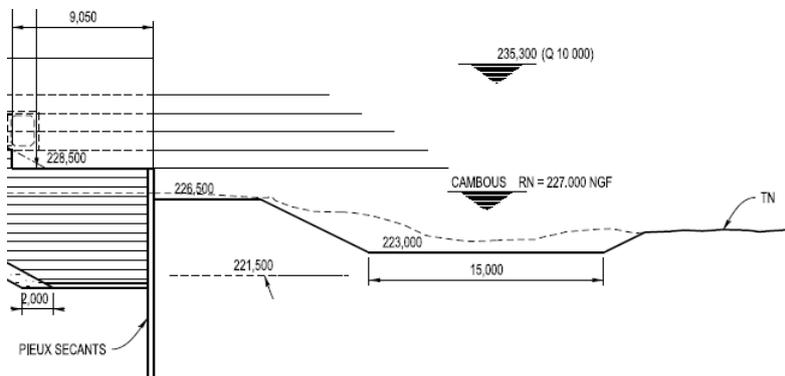


Figure 5 – Configuration fosse retenue dans le modèle

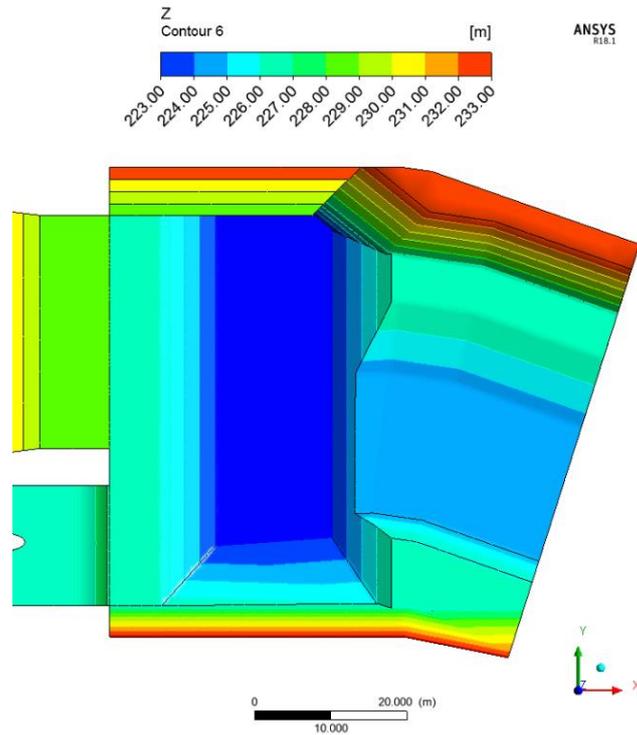


Figure 6 – Fosse en aval du barrage

3.3 MAILLAGE DU MODELE

Le maillage du domaine, présenté dans la figure ci-dessous, est composé de 6 millions d'éléments tétraédriques.

La plus petite taille de maille est de 0,1 m et concerne les premiers éléments en parois du seuil de l'évacuateur de crues.

Au minimum 5 mailles couvrent la hauteur des marches avec une taille des premiers éléments inférieure à 10 % de la hauteur d'eau.

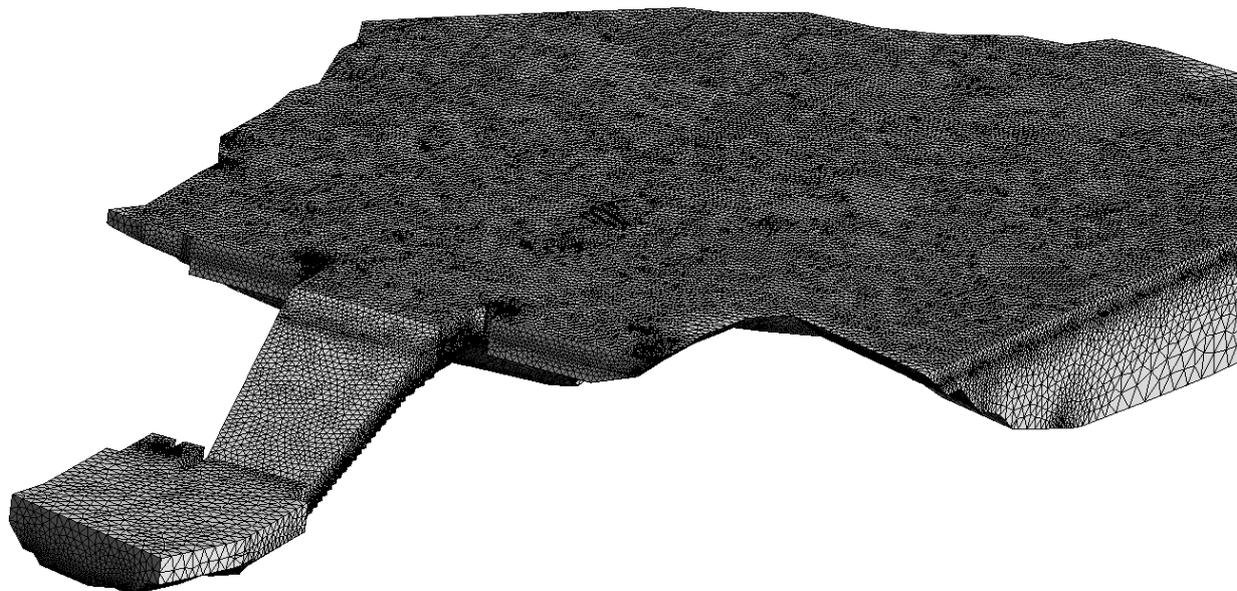


Figure 7 – Maillage du modèle hydraulique 3D

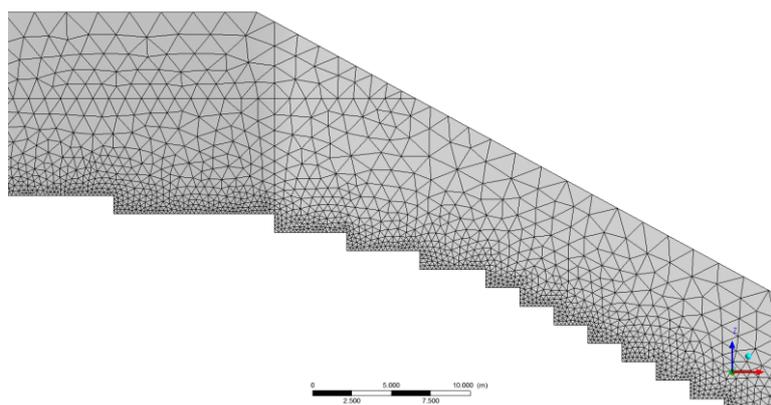


Figure 8 – Maillage du modèles hydraulique 3D au niveau des marches

3.4 CONDITIONS AUX LIMITES DU MODELE

Les conditions imposées aux limites du domaine sont comme suit :

- Entrée : pression correspondant au niveau de la retenue ;
- Sortie : pression correspondant au niveau d'eau aval calculé à partir d'une modélisation hydraulique 1D depuis le pied du barrage de Sainte-Cécile d'Andorge jusqu'au barrage des Cambous (graphique ci-dessous);
- Entrée tulipe : débit aspiré par la tulipe dans la section modélisée (en bleu dans la figure ci-dessous) ; la répartition des vecteurs de vitesse est calculée par le modèle et dépend des conditions en amont de la tulipe. Le débit aspiré est de 335 m³/s pour Q1000 puis constant à 600 m³/s pour Q10 000 et Q100 000 (saturation de la débitance de la tulipe) ;
- Sortie galeries : débit restitué par les galeries de 660 m³/s pour Q1000 et constant à 920 m³/s pour Q10 000 et Q100 000 ;
- Rugosité correspondant à des aspérités de 5 mm pour le béton ;
- Rugosité correspondant à des aspérités de 30 cm pour la retenue.

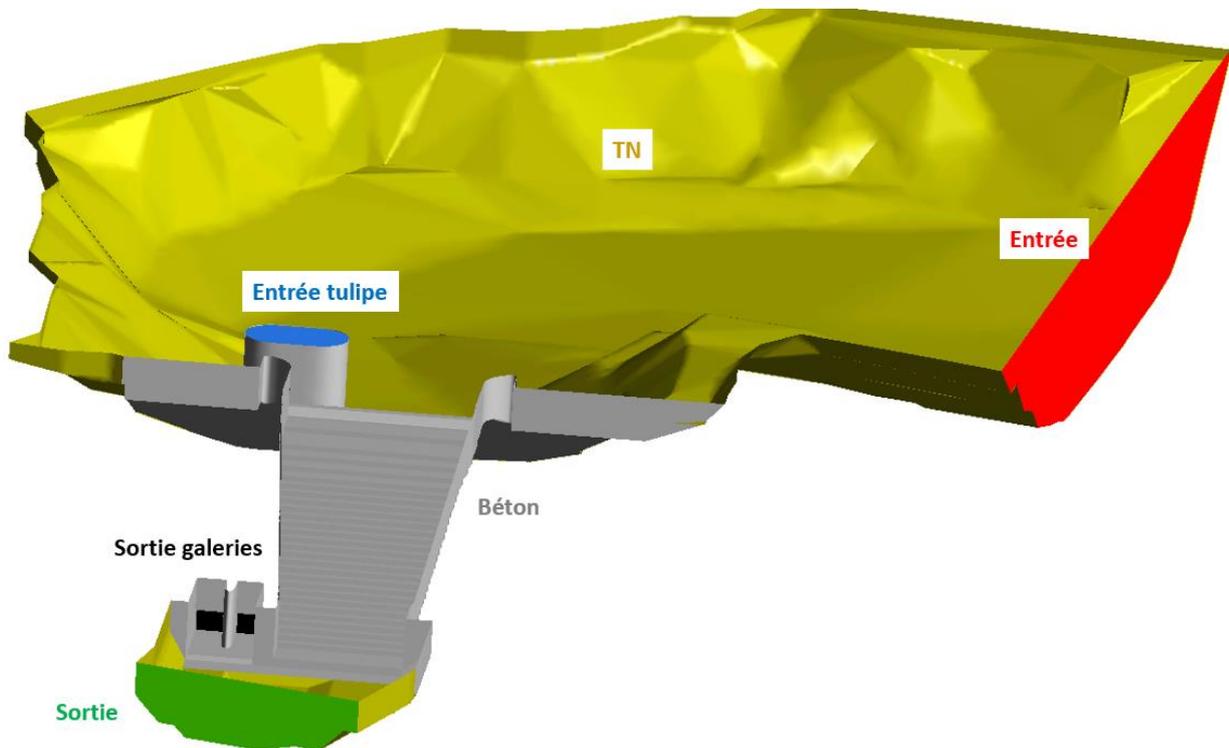


Figure 9 – Limites du modèle hydraulique 3D

A noter, la courbe de tarage aval réalisée à partir d'un modèle 1D (HEC-RAS) a fait l'objet d'une révision en 2019 avec un raffinement du modèle 1D réalisé dans le cadre de l'AVP. Ce raffinement avait pour objectif principal de mieux appréhender les conditions d'inondation des parcelles sises en rive droite aval du barrage. Un Ks de 15 a été considéré sur les rives (présence de végétation) et de 30 en lit mineur (rocher)

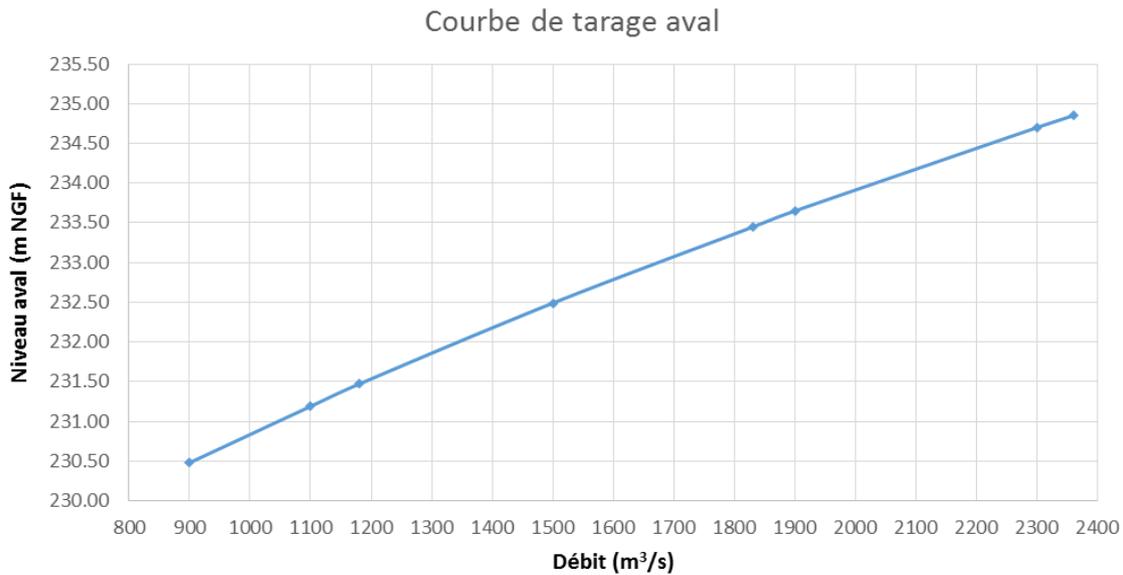


Figure 10 – Courbe de tarage aval

3.5 METHODES NUMERIQUES

L'écoulement dans le domaine modélisé est diphasique : l'eau et l'air, deux fluides de phases différentes subsistent dans le domaine. Le traitement de l'interface entre ces deux fluides est assuré par la méthode VOF (Volume Of fluid). Cette technique est standard en CFD (Computational Fluid Dynamics) dans la modélisation des écoulements à surface libre.

Le modèle de turbulence choisi pour la simulation est le modèle κ - ϵ . La couche limite est modélisée par une loi de paroi de type « scalable ».

3.6 SCENARIOS SIMULES

Les scénarios de fonctionnement simulés dans le cadre de cette étude sont détaillés dans le tableau suivant.

Tableau 1 – Scénarios de crues simulés

	Situation	Niveau retenue (m NGF)	Niveau aval (m NGF)	Débit tulipe (m ³ /s)	Débit en sortie de pertuis (m ³ /s)
Crue 1	2 m de charge sur l'évacuateur	264,50	232,79	335	660
Crue 2	Niveau prévisionnel des PHE	267,20	236,60	600	920
Crue 3	Niveau prévisionnel du mur pare-vague	268,80	238,43	600	920
Crue 4	0,8 m de charge sur l'évacuateur	263,40	230,83	176	490

3.7 CONVERGENCE DES SIMULATIONS

Dans le cas des simulations d'écoulements stationnaires la convergence des calculs est jugée selon deux critères :

- Le bilan des débits : la somme des débits entrants doit être égale à la somme des débits sortants du domaine.
- Suivi des résidus : suivi de la valeur de *RMS Res (Root Mean Square Résidu)* pour chacune des équations résolues par le code.

La convergence est atteinte quand la condition du bilan des débits est satisfaite et la valeur de *RMS Res* est inférieure à une limite définie par l'utilisateur. Une valeur de 10^{-4} de ce critère est suffisante pour des écoulements hydrauliques à géométrie simple.

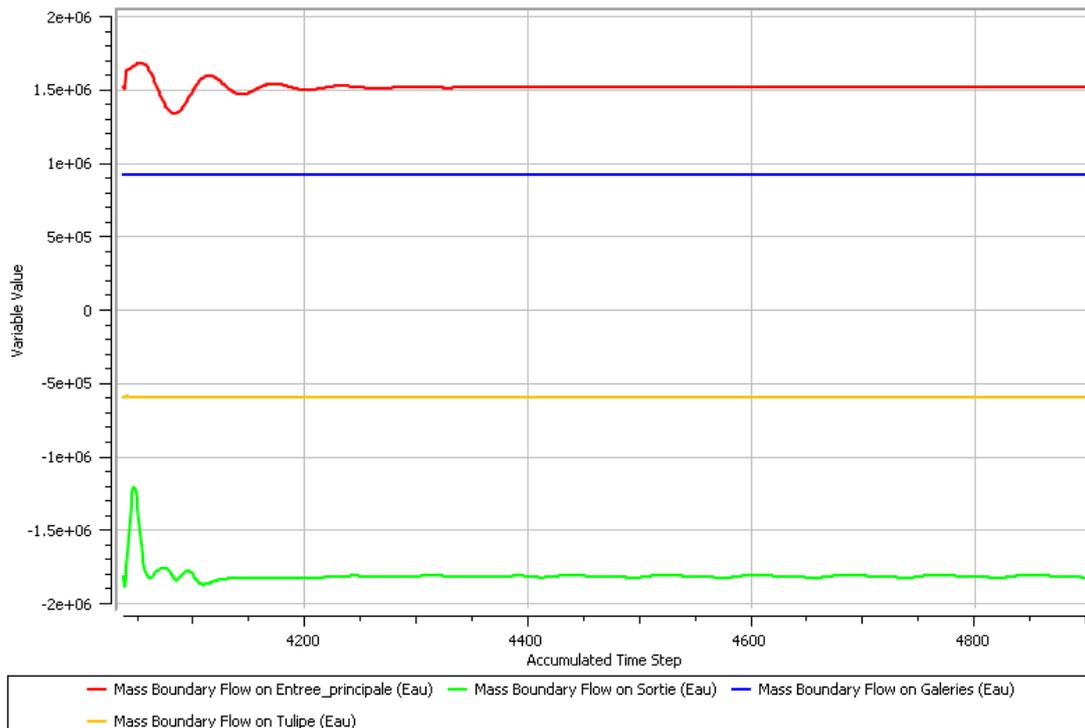


Figure 11 – Suivi de la convergence – Bilan des débits – Exemple

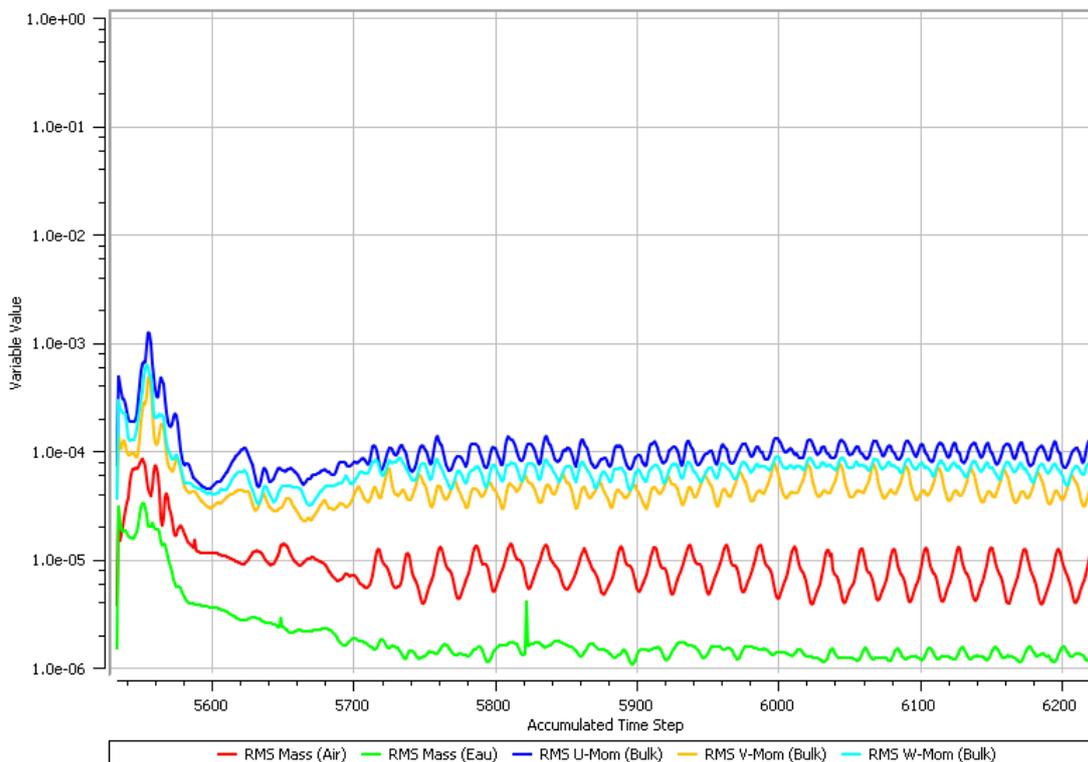
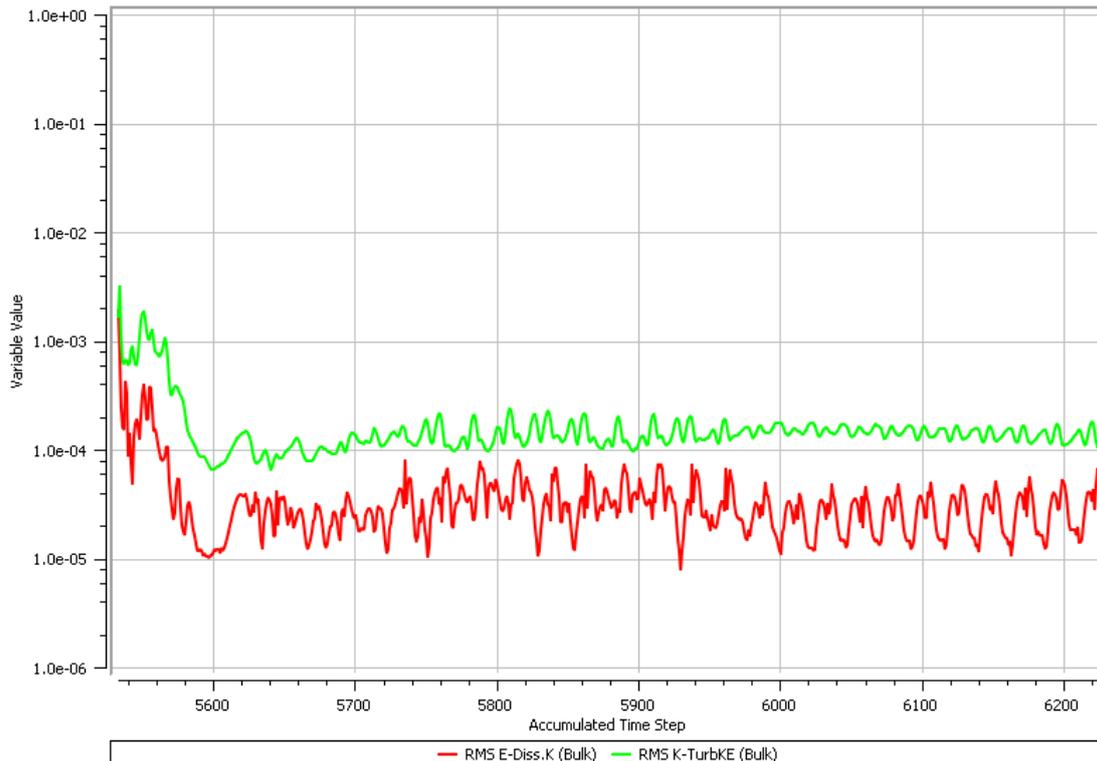


Figure 12 – Suivi de la convergence – Résidus de la quantité de masse et quantité de mouvement – Exemple



3.8 INCERTITUDES DU MODELE 3D

3.8.1 INCERTITUDES SUR LA HAUTEUR D'EAU

L'incertitude sur la hauteur d'eau est associée à :

- la précision du modèle, principalement liée au maillage : plus le maillage est fin plus sa participation aux incertitudes du modèle diminue,
- le caractère instationnaire de l'écoulement dans certaines zones : les simulations sont réalisées en stationnaire.

En ce qui concerne la précision du modèle, plus le maillage est fin plus les temps de calcul sont importants. Il est par conséquent nécessaire de trouver un bon compromis entre précision et temps de calculs.

De notre expérience, une précision inférieure à 5% sur la hauteur d'eau est assurée si les 3 conditions suivantes sont respectées:

- Taille de première maille d'environ 10% de la hauteur d'eau.
- 5 mailles minimum sur la hauteur d'eau.
- Contrôle de la taille des éléments à l'interface eau/air.

La sensibilité au maillage de la ligne d'eau est donnée dans le tableau ci-dessous. 3 finesses de maillage ont été étudiées : grossier, moyen et fin (utilisé dans les simulations).

L'écart entre les hauteurs d'eau du maillage moyen et celles du maillage fin est inférieur à 5%.

Tableau 2 – Analyse de la sensibilité au maillage selon la finesse

X (m)	Hauteur d'eau (m)			Ecart	
	Grossier (0,8 M d'éléments)	Moyen (2,4 M d'éléments)	Fin (6 M d'éléments)	Moyen/Grossier	Fin/moyen
-5.21	4.92	4.92	4.98	0%	1%
10.02	4.45	4.43	4.53	0%	2%
20.45	3.61	3.76	3.84	4%	2%
30.08	2.83	2.94	3.01	4%	2%
40.04	2.53	2.37	2.44	-6%	3%
50.35	2.44	2.30	2.40	-6%	4%
70.03	2.14	2.25	2.17	5%	-4%

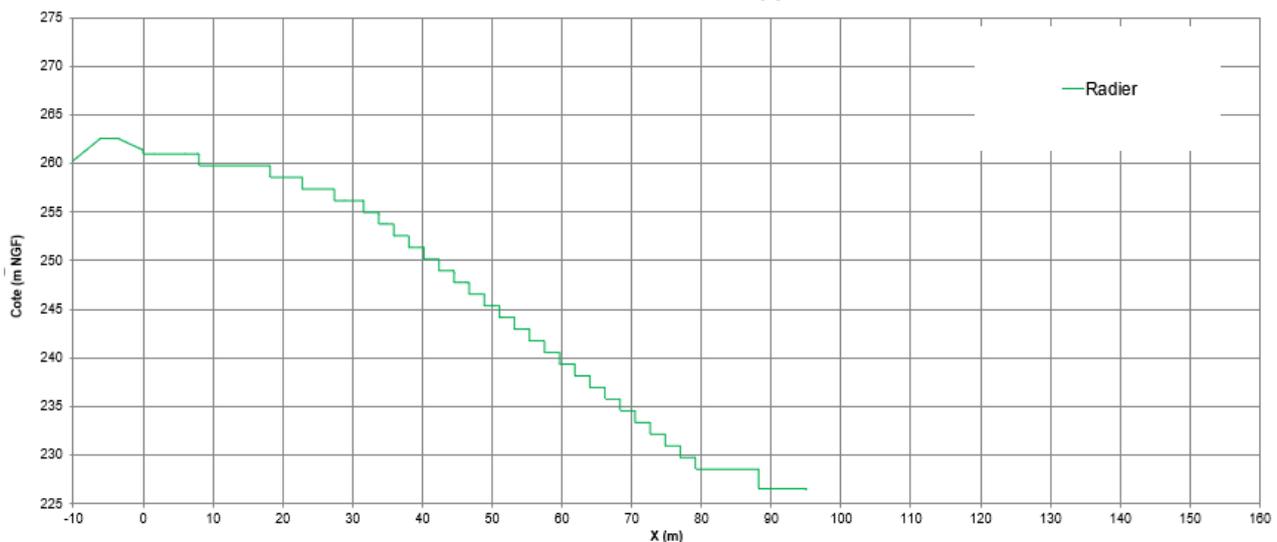
3.8.2 INCERTITUDE LIEE AU MODELE DE TURBULENCE

Le modèle de turbulence utilisé est le modèle $k-\epsilon$. Ce modèle a été privilégié au modèle $k-\omega$ SST car ce dernier nécessite un maillage plus fin proche des parois et il est plus adapté pour des simulations très précises de couches limites. Dans le calcul de débits et de hauteurs d'eau, l'influence du modèle de turbulence est faible.

Ci-dessous la comparaison des hauteurs d'eau entre les deux modèles de turbulence ($k-\epsilon$ et $k-\omega$ SST). L'écart sur la hauteur d'eau liée au modèle de turbulence est inférieur à 4%.

Tableau 3 – Analyse de l'influence du modèle de turbulence sur la hauteur d'eau

X (m)	Hauteur d'eau (m)		
	k-ε	SST	Ecart
-5.03	4.98	4.92	-1%
9.99	4.53	4.42	-3%
20.52	3.84	3.82	0%
30.11	3.01	3.03	1%
40.10	2.44	2.52	3%
50.23	2.40	2.44	2%
69.98	2.17	2.26	4%

**Figure 14 – Position des abscisses présentées dans le tableau**

3.8.3 COMPARAISON AVEC D'AUTRES LOGICIELS

Des logiciels CFD permettant des modélisations hydrauliques 3D, autres que Ansys CFX, existent : Flow3D, OpenFOAM, Ansys Fluent.

Nous n'avons pas réalisé de comparaison avec ces logiciels sur un modèle en particulier.

En revanche, la comparaison entre modèles physiques et modèles numériques (différents logiciels) est une pratique courante. Selon l'expérience d'ISL, les écarts mis en évidence sur les débits et les hauteurs d'eau sont en général compris entre 2 et 15%.

Par ailleurs, une comparaison a été réalisée en 2018 par ISL entre le modèle de SCA précédent (avec sensibilité au modèle de turbulence $k-\epsilon$ et $k-\omega$ SST) et le modèle physique (tableau ci-dessous).

L'écart sur la hauteur d'eau entre les deux modèles est compris entre 1 et 14%.

Tableau 4 – Comparaison des hauteurs d'eau entre le modèle physique et le modèle hydraulique 3D

X (m)	Hauteur d'eau (m)			Ecart	
	Modèle Physique	SST	$k-\epsilon$	SST	$k-\epsilon$
43,76	6,72	6,84	6,89	2%	3%
51,96	6,08	5,95	6,03	2%	1%
62,40	4,04	4,18	4,12	4%	2%
72,81	4,28	3,81	3,94	11%	8%
85,18	3,65	3,43	3,59	6%	2%
94,65	3,72	3,20	3,32	14%	11%
103,05	3,50	3,11	3,27	11%	7%
111,65	3,44	3,10	3,25	10%	6%
120,45	3,49	3,10	3,29	11%	6%

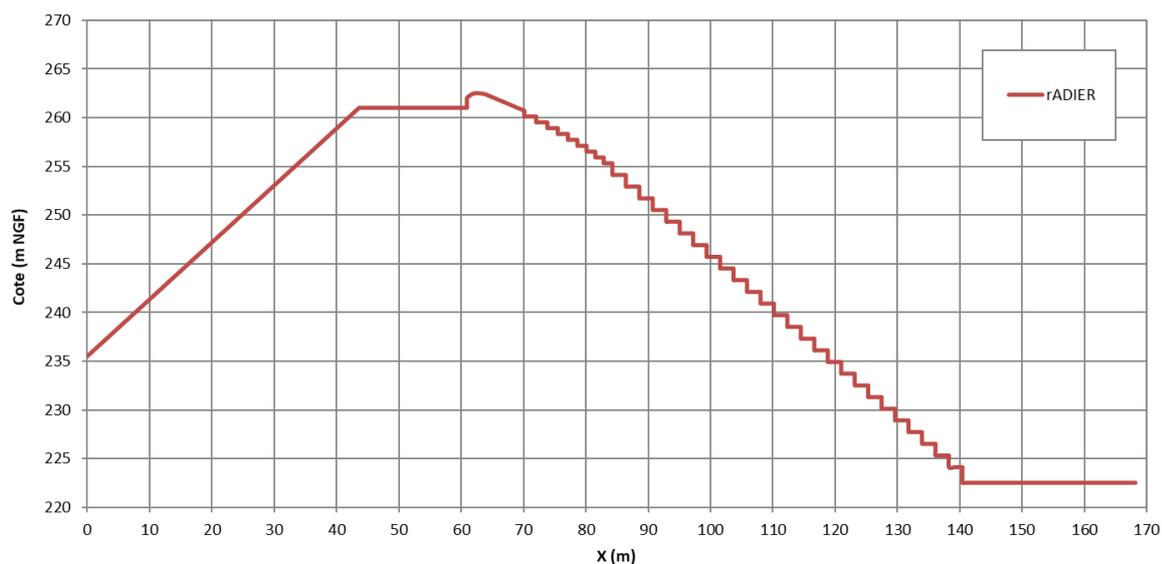


Figure 15 – Position des abscisses présentées dans le tableau

4 RISQUE DE CAVITATION

La cavitation en hydrodynamique est l'apparition de bulles de vapeur dans l'eau (changement de phase) induite par une baisse de la pression sous la pression de vapeur saturante. L'implosion de ces bulles, induite par leur déplacement vers des régions de pression plus élevée, peut être à l'origine de l'érosion des parois proches de ces zones.

La méthode empirique permettant d'apprécier le risque d'érosion par cavitation consiste à évaluer le paramètre adimensionnel appelé indice de cavitation, donné en chaque point par :

$$\sigma = \frac{P - P_v}{\frac{\rho V^2}{2}}$$

Avec :

- P la pression absolue proche des parois,
- P_v la pression de vapeur saturante de l'eau,
- V la vitesse moyenne de l'écoulement.

Plus ce nombre est faible plus l'intensité de la cavitation est élevée. Pour chaque système d'écoulement ; dépendant de la géométrie des parois et du matériau, il est possible de définir un indice de cavitation limite en dessous duquel le risque d'érosion par cavitation devient critique. Cette valeur ne peut cependant être approchée que par l'observation en conditions réelles.

On propose pour notre étude d'utiliser la classification de l'*USBR 1*, issue de retours d'expérience sur plusieurs ouvrages. En considérant les spécifications usuelles du béton, le potentiel d'endommagement par cavitation peut être classé en trois niveaux:

- Indice de cavitation supérieur à 0,3 : pas d'endommagement,
- Indice de cavitation compris entre 0,2 et 0,3 : endommagement limité,
- Indice de cavitation inférieur à 0,2 : endommagement important et des dispositions sont à prendre pour réduire le phénomène.

Le risque d'endommagement par cavitation sera évalué dans le coursier en considérant la vitesse moyenne maximale sur les dernières marches du coursier. Ce choix permet d'adopter une approche conservatrice dans le calcul de l'indice de cavitation.

5 RESULTATS DU MODELE HYDRAULIQUE 3D

5.1 DEBITANCE DE L'EVACUATEUR DE CRUES

Les débits de l'évacuateur de crues estimés par le modèle hydraulique 3D pour les 3 niveaux sont figurés dans le tableau suivant. Le débit qui transite dans l'EVC est la soustraction du débit en entrée du modèle (calculé automatiquement par le logiciel) moins le débit qui sort via la tulipe.

Tableau 5 – Débit transitant par l'EVC – Modèle hydraulique 3D

	Niveau retenue (m NGF)	Niveau aval (m NGF)	Débit EVC (m ³ /s)
Crue 1	264,50	232,79	261
Crue 2	267,20	236,60	920
Crue 3	268,80	238,43	1440
Crue 4	263,40	230,83	80

Les résultats du modèle ont été comparés à une loi de seuil en considérant un coefficient de débit de 0,455 (contre 0,440 en phase AVP).

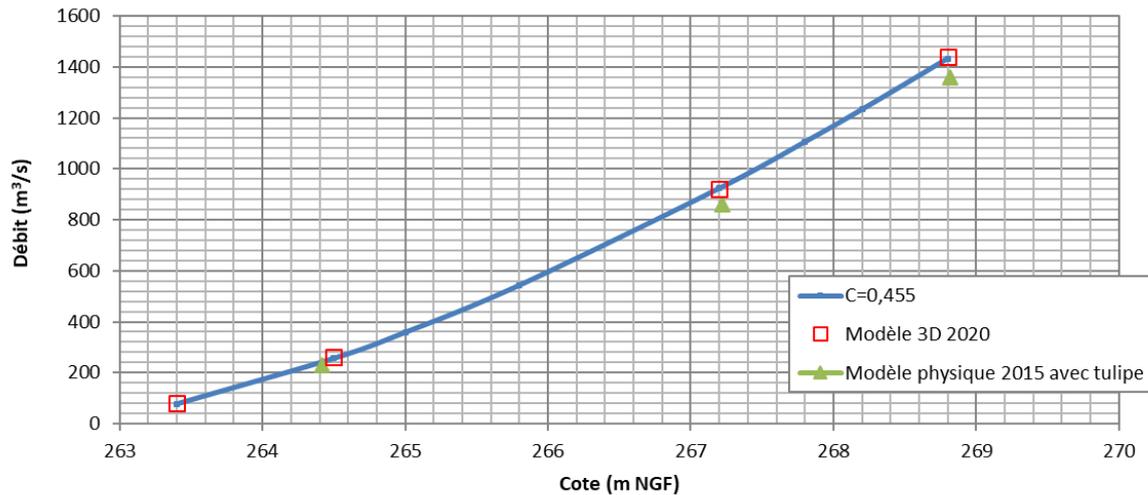
$$Q = \alpha \times \sqrt{(2 \times g \times H^3)} \times L$$

Avec :

- Q : débit en m³/s,
- α : coefficient de débit pris égal à 0,455
- g : accélération de la pesanteur,
- L : longueur déversante,
- H : lame d'eau en mètre sur l'organe d'évacuation ($Z_{\text{retenue}} - Z_{\text{seuil}}$).

La comparaison entre les résultats du modèle hydraulique et le débit issu de la formule du seuil (figure ci-dessous) montre un écart inférieur à 1%.

Sur ce graphique ont également été positionnés les résultats des mesures réalisées sur la dernière configuration du modèle physique en 2015 (configuration 2.2) avec la tulipe en fonctionnement.

Loi hauteur-débit**Figure 16 – Loi de débitance de l'évacuateur de crues**

Le tableau suivant présente les gains principalement imputables à l'amélioration de l'entonnement par rapport à la configuration de l'AVP :

- à niveau constant (gain en débit),
- à débit constant (gain en niveau).

Tableau 6 – Ecart en débit entre AVP et PRO

Niveau dans la retenue	Débit dans la configuration de l'AVP	Débit dans la configuration du PROJET	Ecart (m³/s)	Ecart (%)
263,4 m NGF	78 m³/s	80 m³/s	2 m³/s	3%
264,5 m NGF	243 m³/s	261 m³/s	18 m³/s	7%
267,2 m NGF	854 m³/s	920 m³/s	66 m³/s	8%
268,8 m NGF	1360 m³/s	1440 m³/s	87 m³/s	6%

Pour les 3 niveaux, le modèle 3D de la nouvelle configuration conduit à une débitance augmentée de +3 à +8% par rapport à la configuration 2.2. Le gain relatif maximal (+8%) correspond à un niveau proche des PHE (crue de projet).

Tableau 7 – Ecart en niveau entre AVP et PRO

Débit sur l'évacuateur	Cotes dans la configuration de l'AVP	Cotes dans la configuration du PROJET	Ecart (m)
80 m ³ /s	263,62 m NGF	263,40 m NGF	-0,22 m
265 m ³ /s	264,57 m NGF	264,50 m NGF	-0,07 m
919 m ³ /s	267,49 m NGF	267,20 m NGF	-0,29 m
1442 m ³ /s	269,17 m NGF	268,80 m NGF	-0,375 m

Dans la gamme des crues exceptionnelles à extrêmes (10 000 à 100 000 ans), le gain est de l'ordre de 0,29 et 0,37m.

5.2 CRUE 1 – NIVEAU DE RETENUE A 264,50 MNGF

Pour un niveau d'eau dans la retenue de 264,50 m NGF, le débit transitant par l'évacuateur de crues est de 261 m³/s.

5.2.1 ECOULEMENT DANS LA RETENUE

5.2.1.1 Surface libre

Le niveau dans la retenue est stabilisé à la cote 264,50 m NGF conformément aux hypothèses de modélisation.

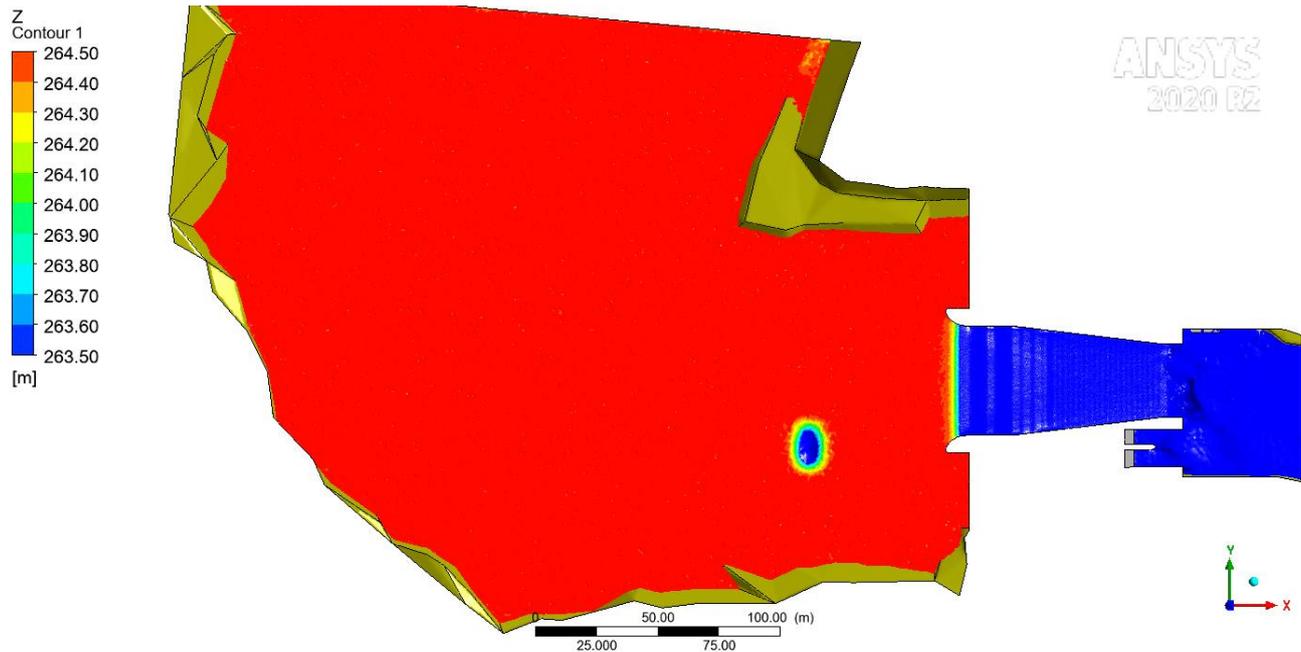


Figure 17 – Iso-valeurs de la cote Z dans la retenue – Crue 1

5.2.1.2 Vitesses d'écoulement

Dans la retenue, en amont de la tulipe, les vecteurs de vitesse, présentés dans la figure ci-dessous, montrent un début d'accélération de l'écoulement dès la courbure.

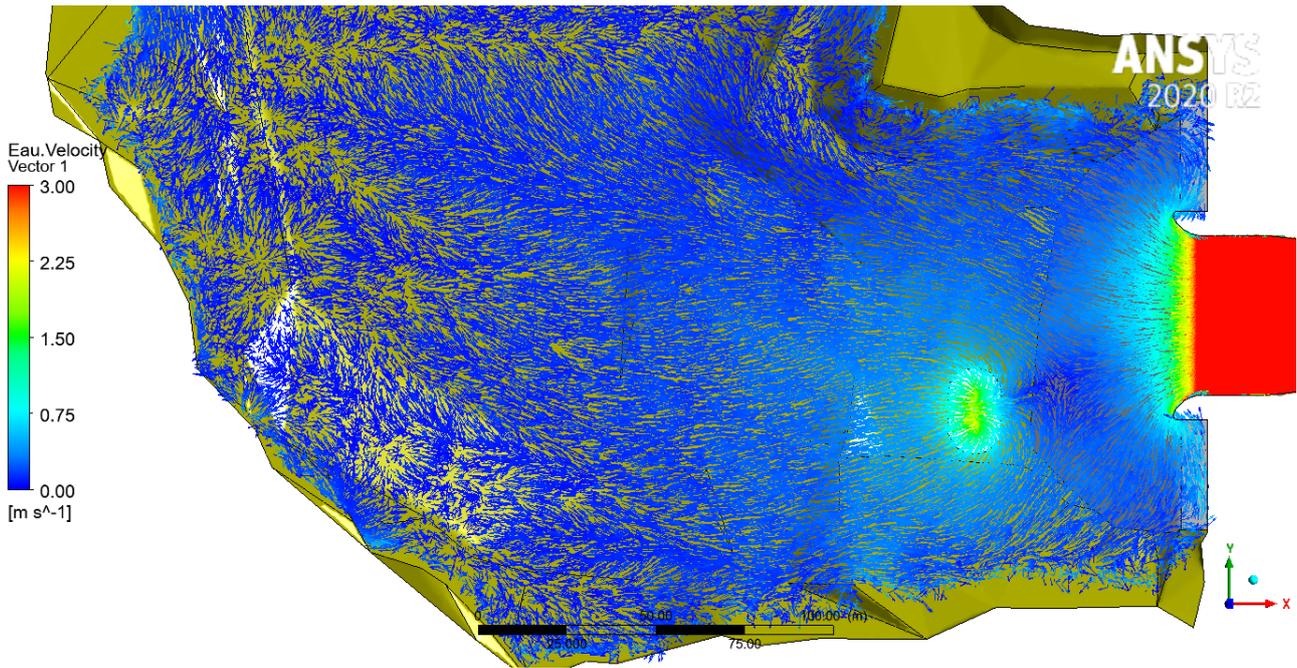


Figure 18 – Vecteurs de vitesse dans la retenue – Crue 1

5.2.2 ECOULEMENT A L'ENTONNEMENT

5.2.2.1 Surface libre

La figure suivante présente la cote de la surface libre dans la zone de l'entonnement. La présence de la tulipe n'engendre pas de dissymétrie notable du plan d'eau dans la zone d'approche de l'entonnement.

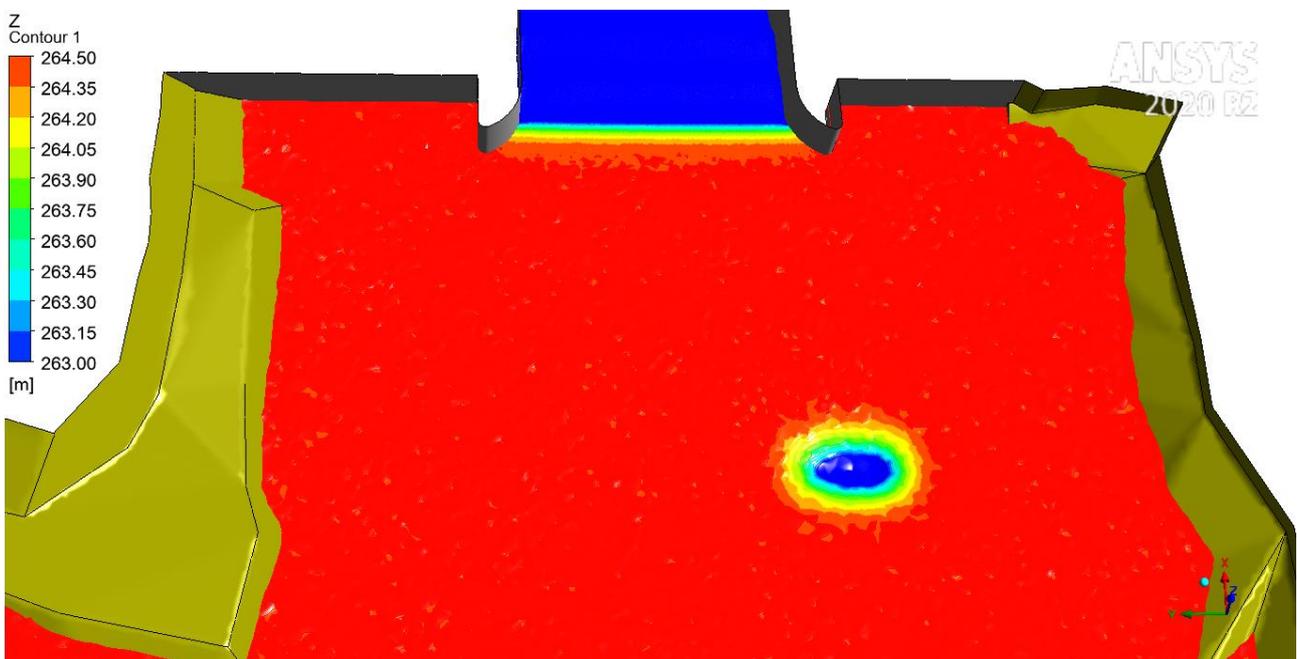


Figure 19 – Iso-valeurs de la cote Z à l'entonnement – Crue 1

Le graphique ci-dessous présente le niveau d'eau le long des bajoyers au droit de l'entonnement. Les niveaux d'eau des deux rives se superposent confirmant une symétrie de la surface libre sur la largeur de l'EVC.

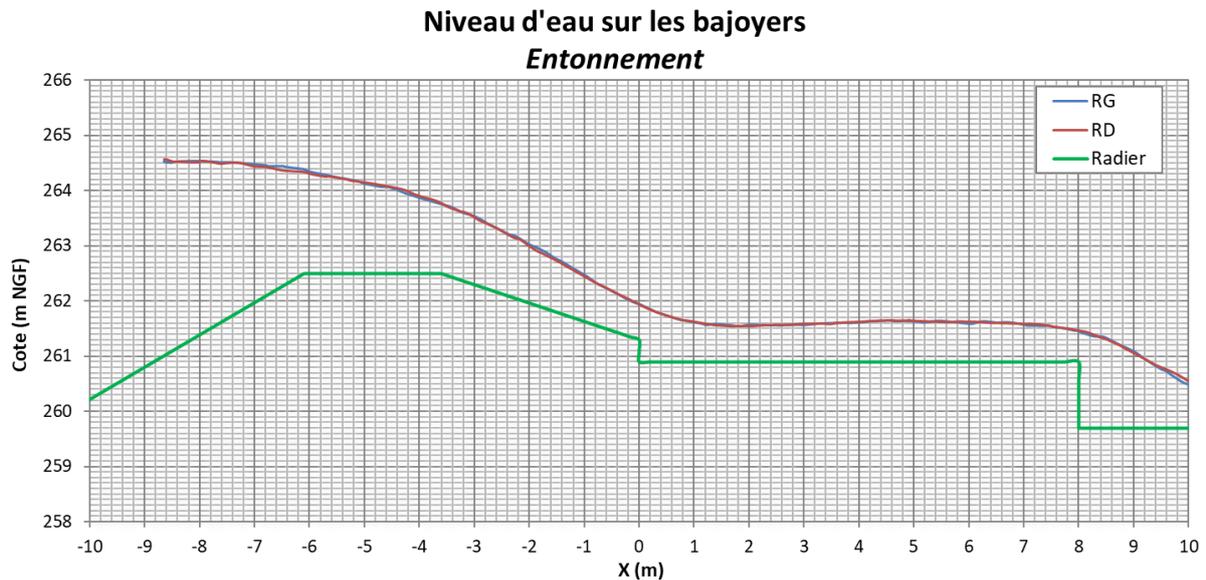


Figure 20 – Niveau d'eau sur les bajoyers à l'entonnement – Crue 1

5.2.2.2 Vitesse d'écoulement

Les figures ci-dessous affichent la vitesse en surface de l'écoulement au niveau de l'entonnement. Ces figures montrent une légère dissymétrie des vitesses entre la tulipe et l'EVC. A l'entonnement de l'EVC, les vitesses retrouvent une répartition symétrique sur toute la largeur du seuil.

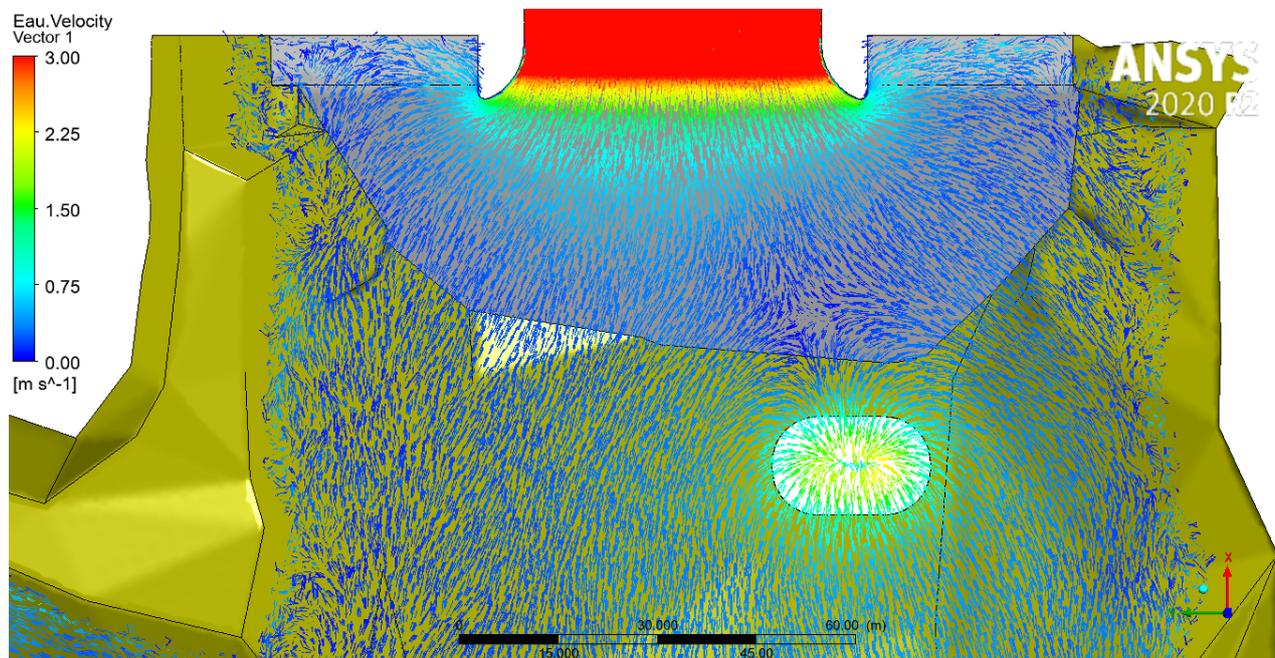


Figure 21 – Vecteurs de vitesse au niveau de l'entonnement – Crue 1

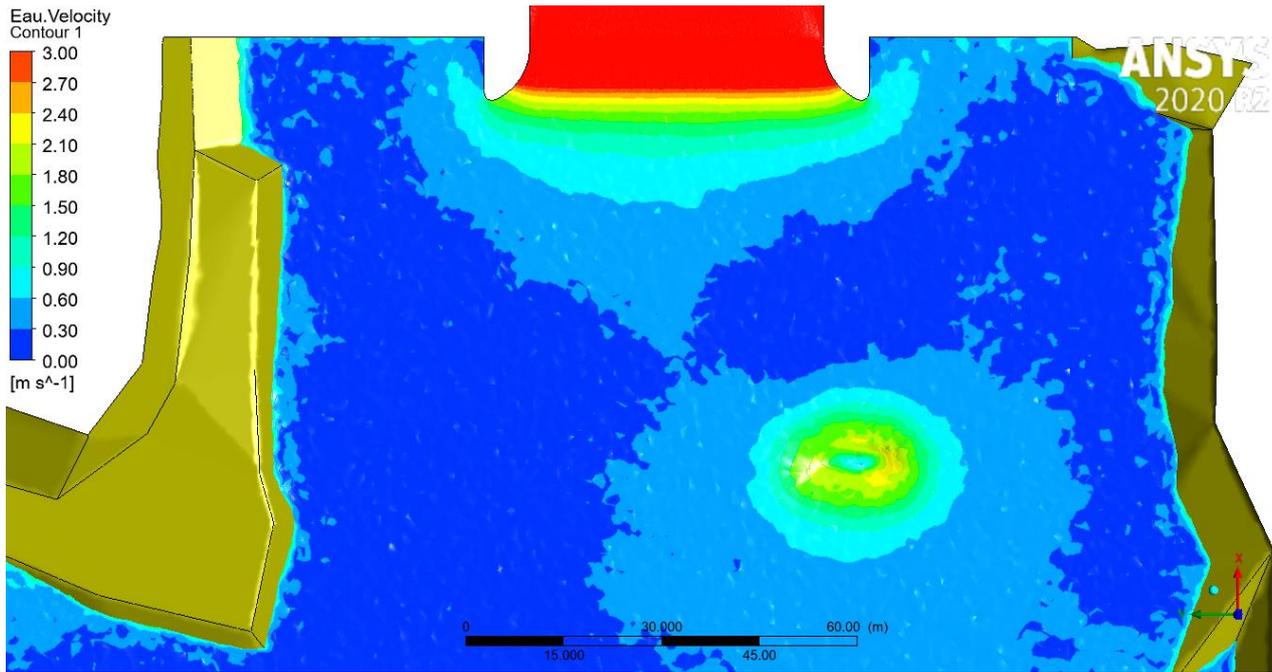


Figure 22 – Iso-valeurs de vitesse en surface au niveau de l'entonnement – Crue 1

5.2.3 ECOULEMENT SUR LES MARCHES

5.2.3.1 Surface libre

La figure et le graphique ci-dessous montrent le niveau d'eau dans le coursier à marches d'escalier.

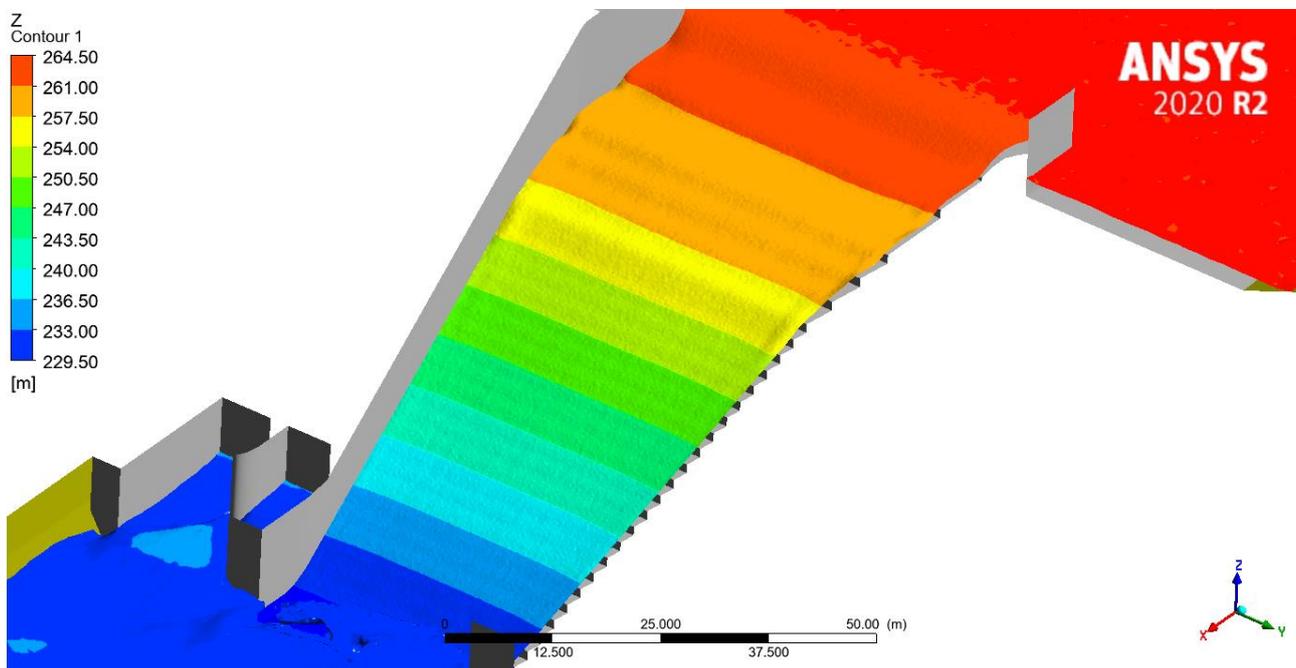


Figure 23 – Iso-valeurs de la cote Z dans le coursier – Crue 1

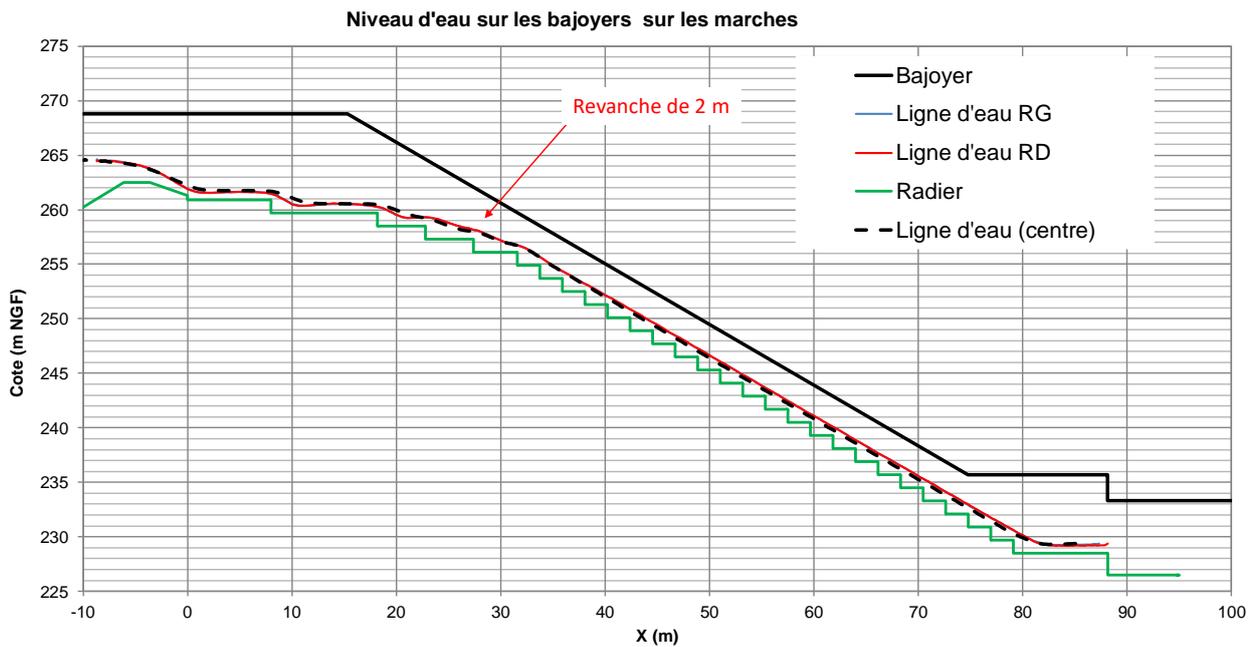


Figure 24 – Lignes d'eau le long des bajoyers et dans l'axe de l'EVC – Crue 1

5.2.3.2 Vitesses d'écoulement

Les figures suivantes montrent les valeurs de la vitesse en surface et suivant une coupe dans l'axe de l'EVC. La vitesse maximale de 22 m/s est observée en pied de coursier à la surface de l'écoulement proche des bajoyers. Dans le plan médian de l'EVC, la vitesse maximale est de 17,5 m/s.

Un phénomène de recirculation de l'écoulement est observé sur chaque marche (Figure 27).

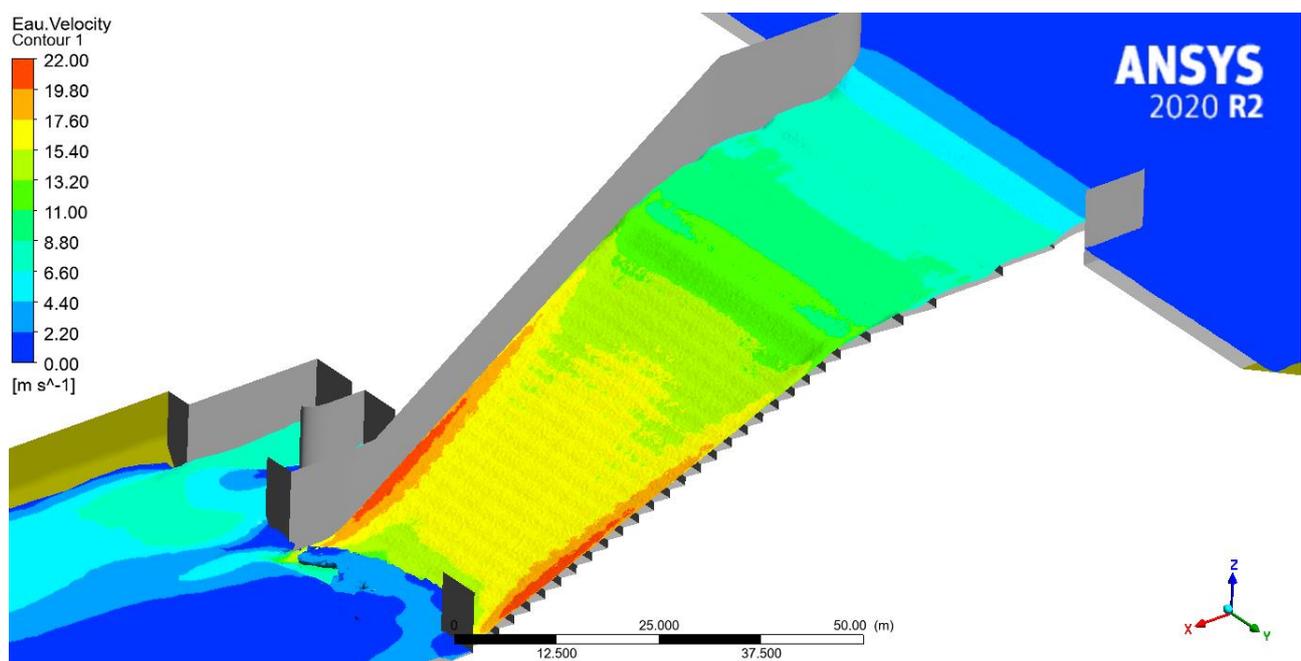


Figure 25 – Iso-valeurs de la vitesse en surface dans le coursier – Crue 1