

Figure 26 – Iso-valeurs de la vitesse dans le coursier – coupe dans l'axe de l'EVC – Crue 1

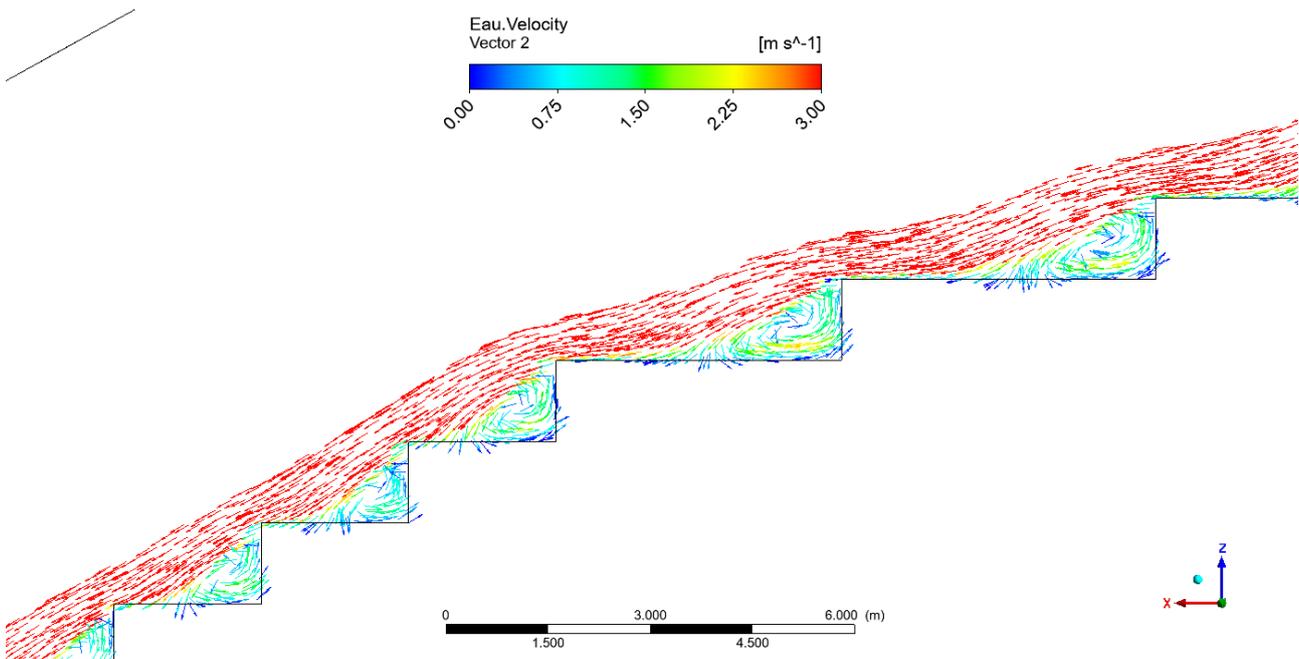


Figure 27 – Vecteurs de vitesse – Zoom au niveau des marches 4 à 8 – Crue 1

5.2.4 ECOULEMENT DANS LE BASSIN

5.2.4.1 Surface libre et vitesses

Les figures ci-dessous présentent les hauteurs d'eau, les vitesses et le ressaut.

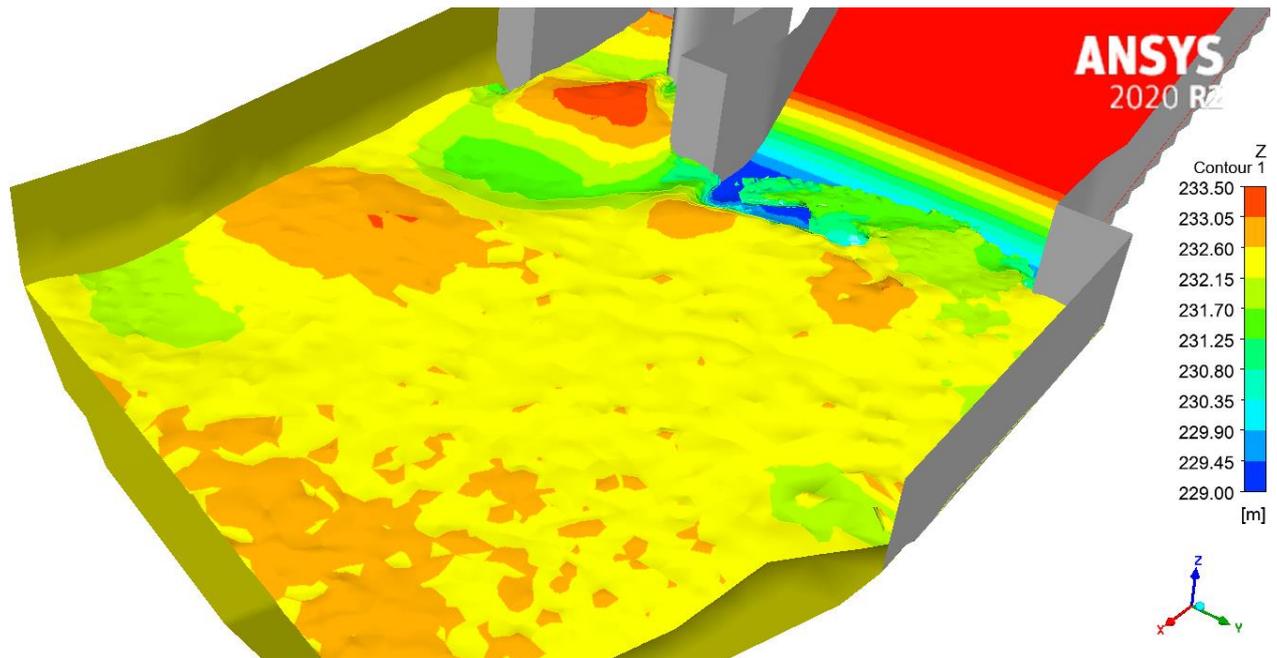


Figure 28 – Iso-valeurs de la cote Z dans le bassin – Fosse excavée – Crue 1

La figure ci-dessous présente les lignes de courant et les vitesses.

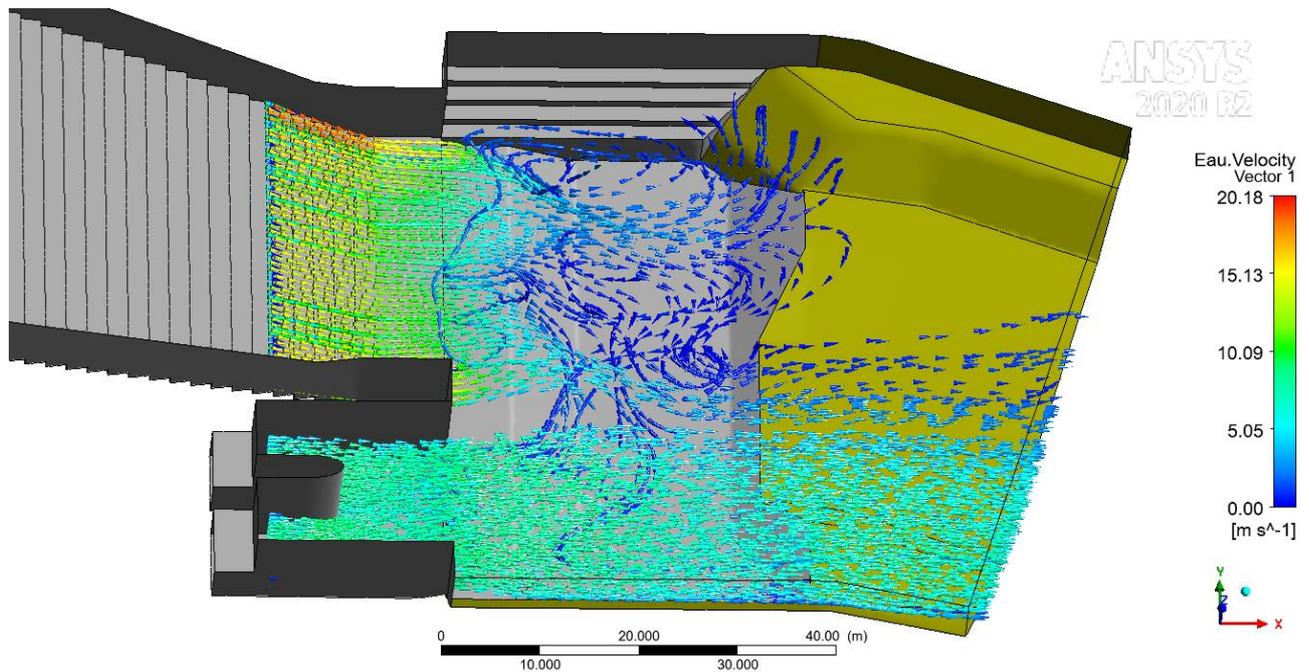


Figure 29 – Lignes de courant et vitesses dans le bassin – Fosse excavée – Crue 1

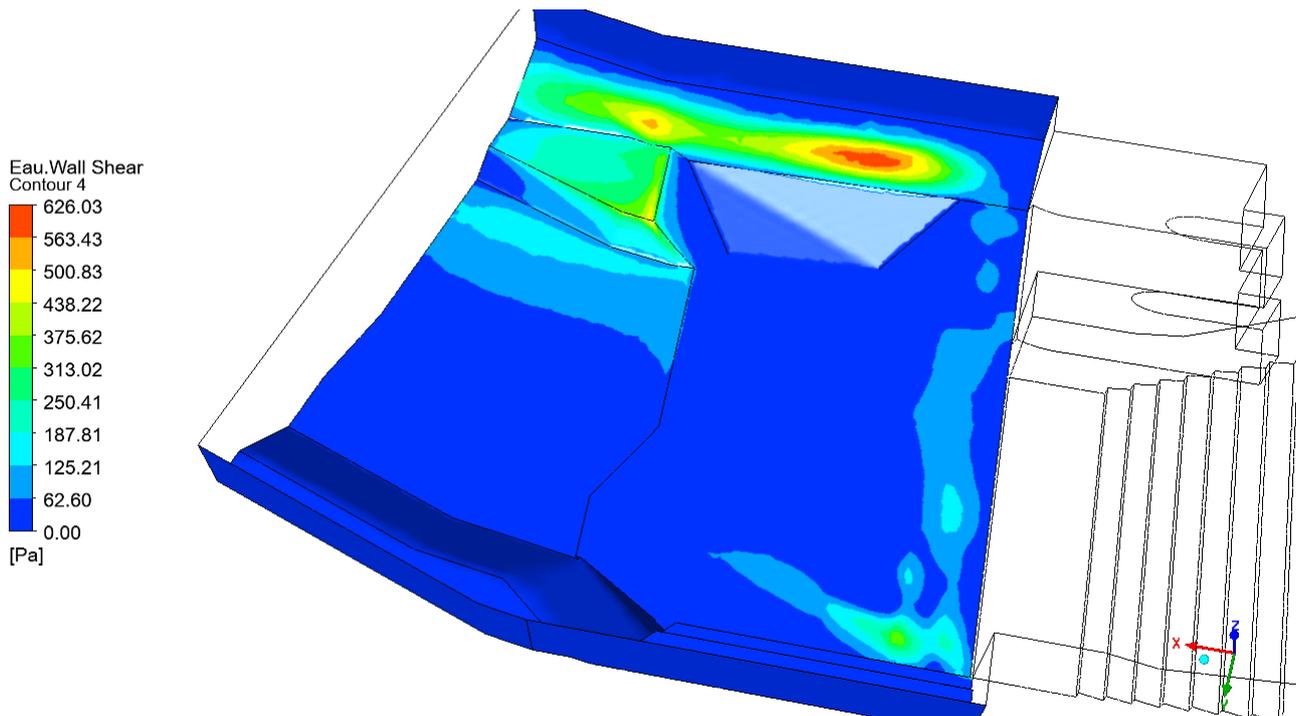


Figure 30 – Contrainte de cisaillement dans le bassin – Crue 1

Ces résultats montrent que :

- Le ressaut en pied de coursier est partiellement noyé en raison d'un niveau d'eau aval haut.
- L'écoulement issu de l'EVC est fortement ralenti dans le bassin.
- L'écoulement issu des galeries n'est pas ralenti
- Le cisaillement au fond du bassin est maximal en RD

5.3 CRUE 2 – NIVEAU DE RETENUE A 267,20 MNGF

Pour un niveau d'eau de retenue de 267,20 m NGF, le débit transitant par l'évacuateur de crues est de 920 m³/s.

5.3.1 ECOULEMENT DANS LA RETENUE

5.3.1.1 Surface libre

Le niveau dans la retenue est stabilisé à la cote 267,20 m NGF conformément aux hypothèses de modélisation.

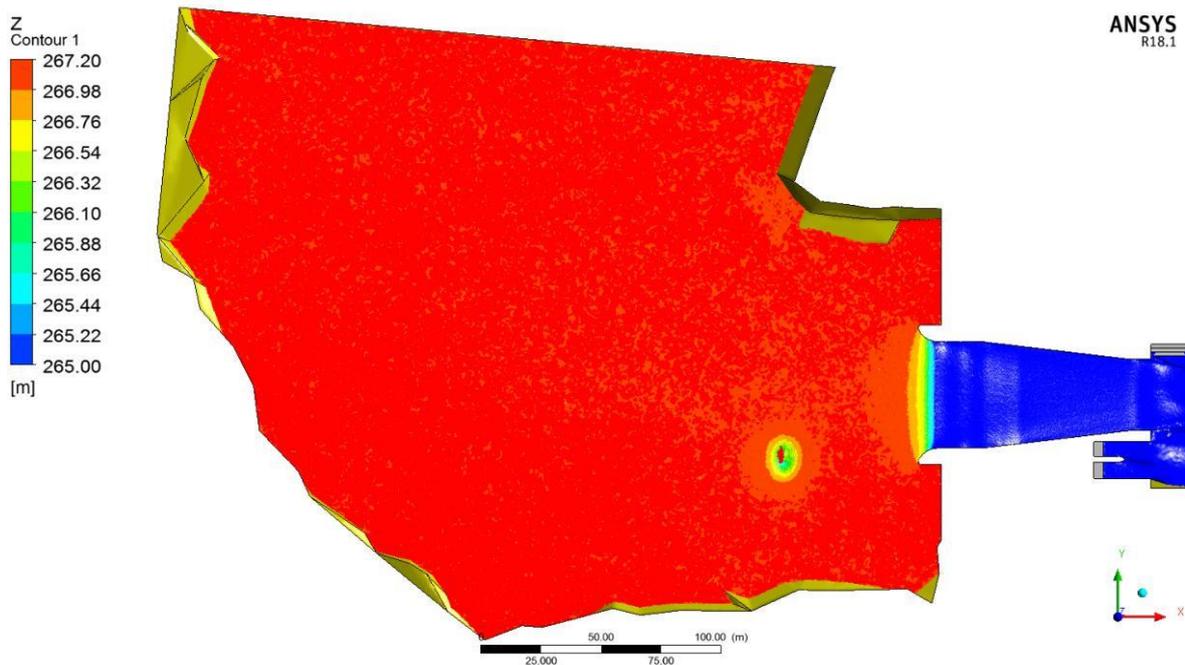


Figure 31 – Iso-valeurs de la cote Z dans la retenue – Crue 2

5.3.1.2 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.

L'intensité de la vitesse dans le plan médian de la courbure, présentée sur la Figure 33, montre des valeurs pouvant atteindre localement 0,70 m/s. L'écoulement est plus rapide à proximité de la rive gauche qu'en rive droite. Ceci s'explique par la présence de la surpression à la limite extérieure de la courbure. Cette surpression est mise en évidence sur la Figure 36 (avec les vitesses induites sur la Figure 35).

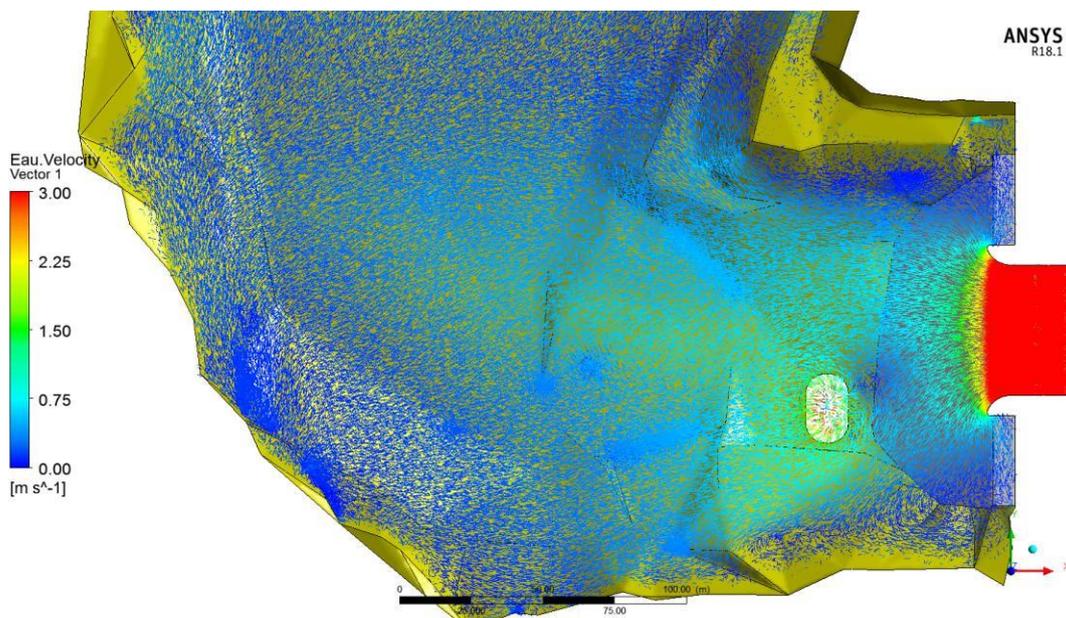


Figure 32 – Vecteurs de vitesse dans la retenue – Crue 2

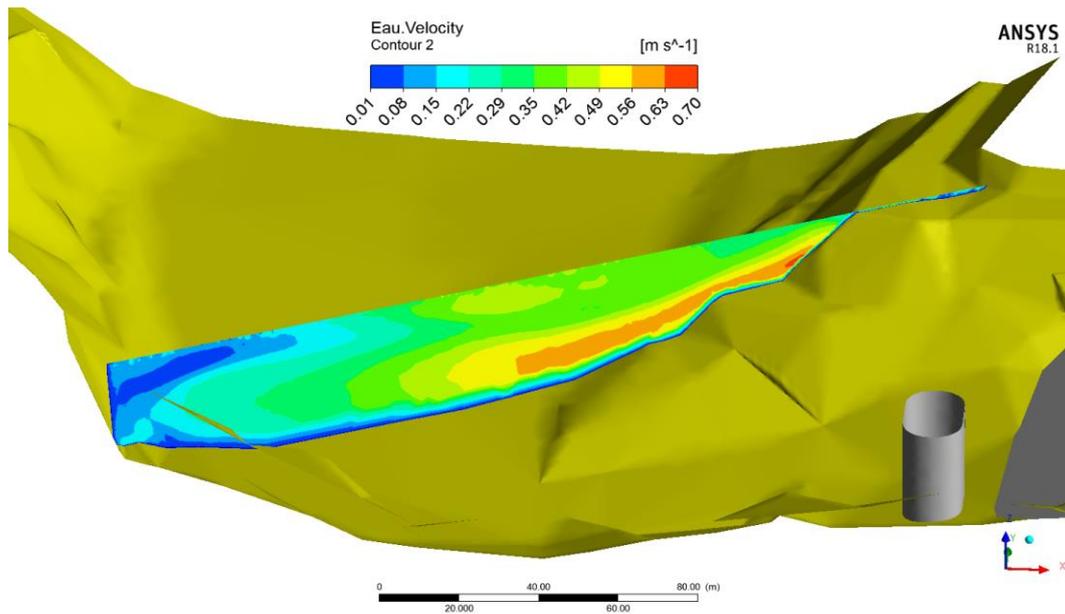


Figure 33 – Iso-valeurs de l'intensité de la vitesse dans le plan médian de la courbure – Crue 2

Dans le même plan médian de la courbure, la figure suivante présente la vitesse en surface où la valeur maximale est de 0,40 m/s.

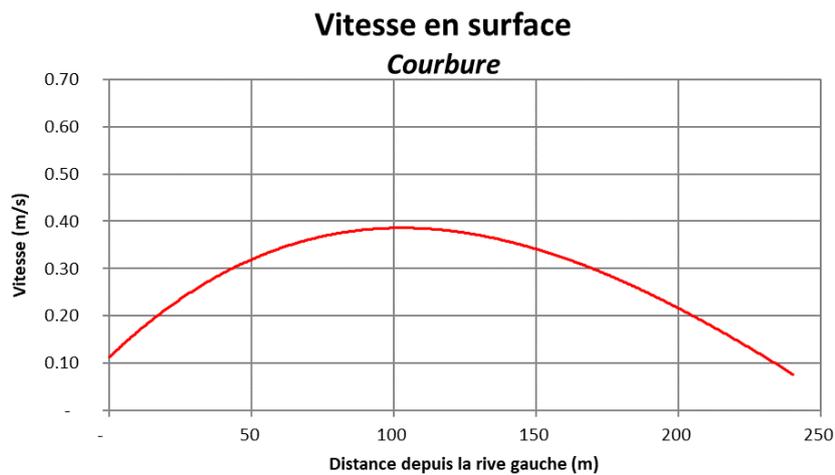


Figure 34 – Intensité de la vitesse en surface dans le plan médian de courbure – Crue 2

La figure suivante présente les vitesses dans un plan à la cote 250 m NGF (soit environ 8 m au-dessus des pertuis et 11 m sous la cote de déversement de la tulipe).

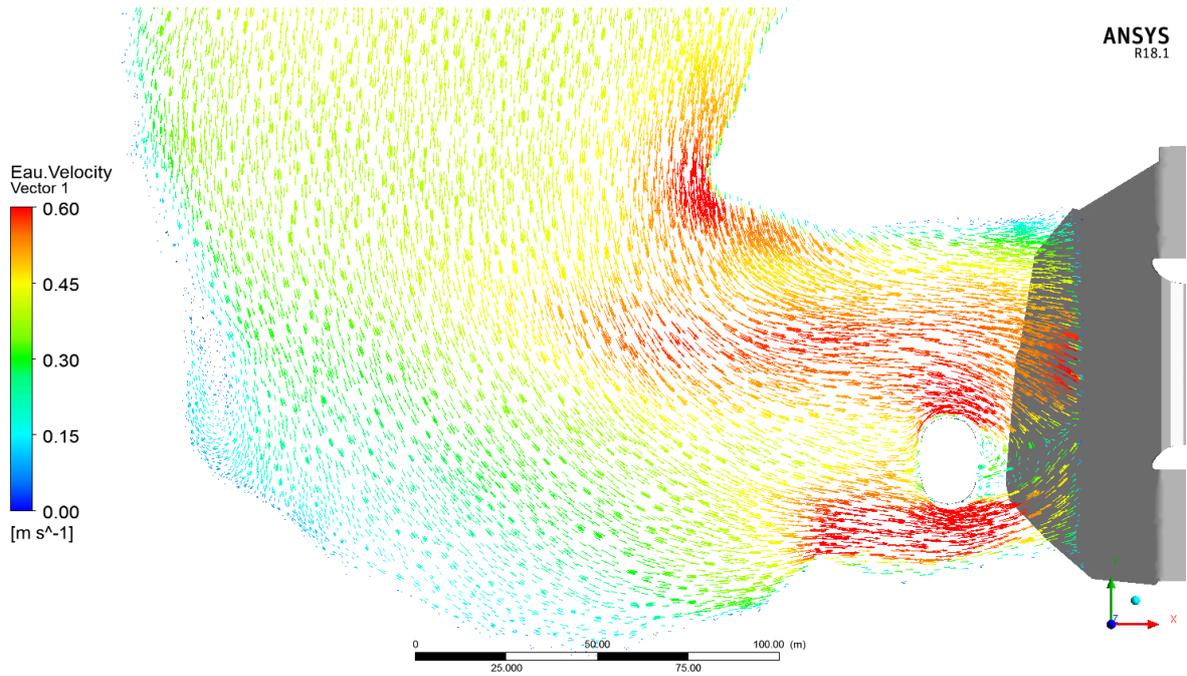


Figure 35 – Vecteurs de vitesse dans le plan horizontale à la cote Z = 250 m NGF – Crue 2

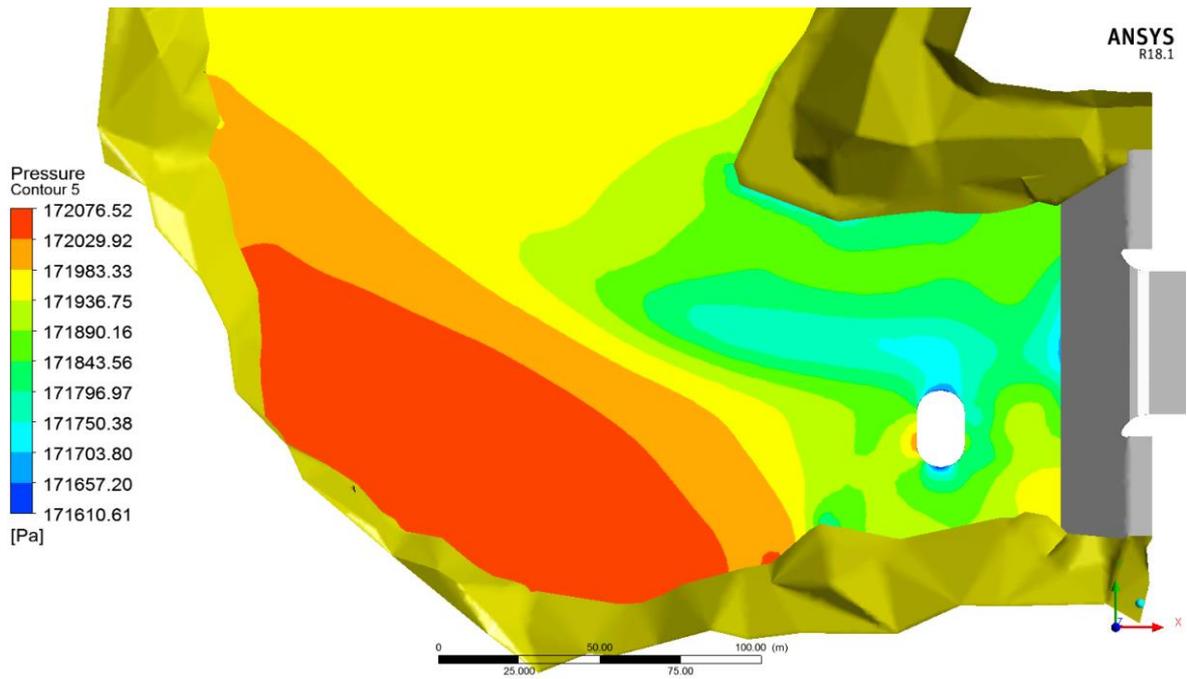


Figure 36 – Iso-valeurs de pression dans le plan horizontal à la cote Z = 250 m NGF – Crue 2

5.3.2 ECOULEMENT A L'ENTONNEMENT

5.3.2.1 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.

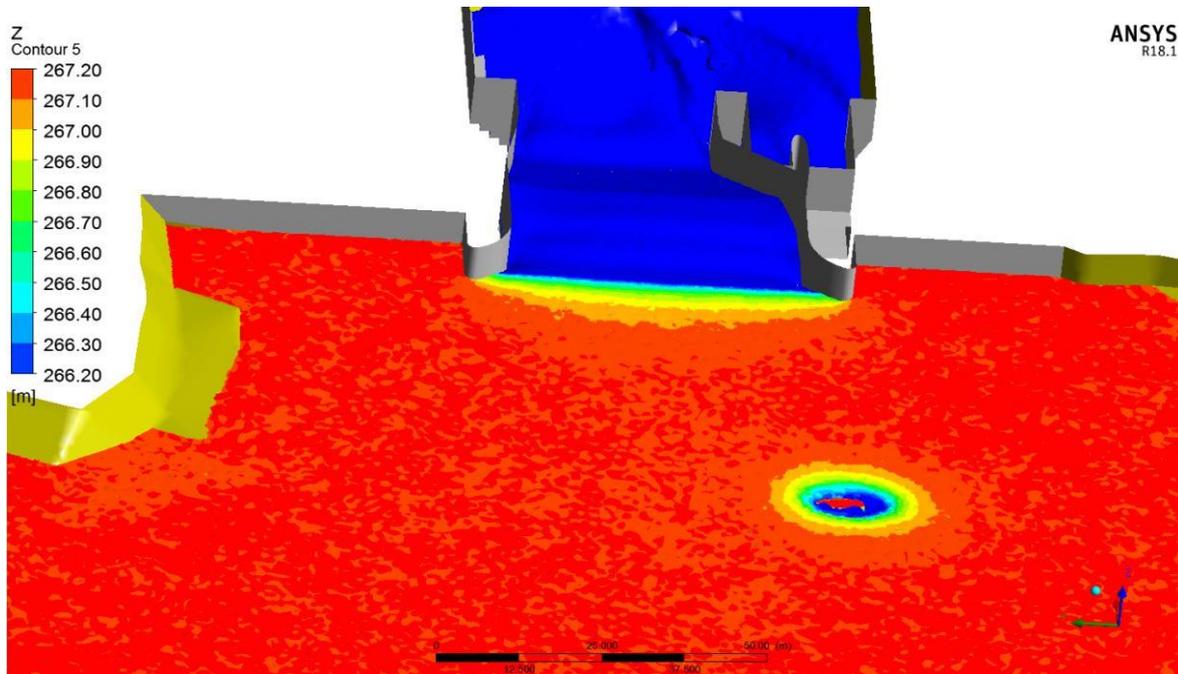


Figure 37 – Iso-valeurs de la cote Z à l'entonnement – Crue 2

Le graphique ci-dessous présente le niveau d'eau sur les murs au droit de l'entonnement. Un léger écart, inférieur à 20 cm, est observable entre les deux rives : la ligne d'eau en rive droite est en dessous de la ligne d'eau en rive gauche (traduisant une moins bonne alimentation vers la tulipe).

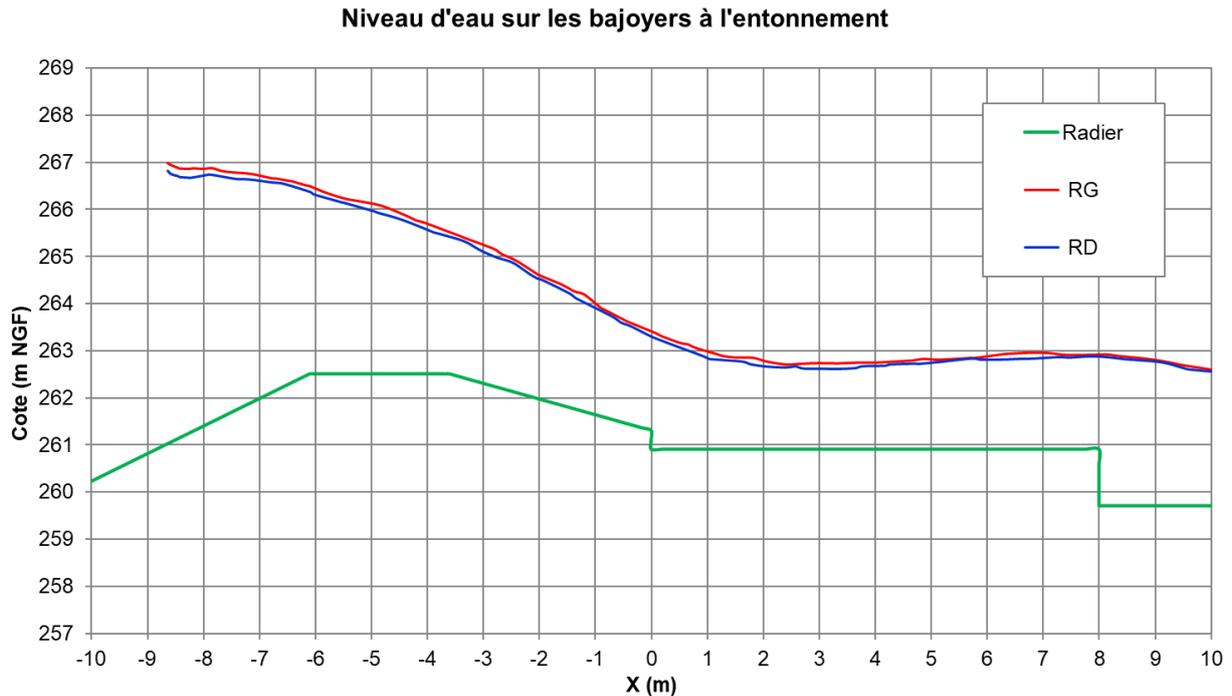


Figure 38 – Niveau d'eau sur les bajoyers à l'entonnement – Crue 2

5.3.2.2 Vitesses d'écoulement

Les figures ci-dessous affichent la vitesse de l'écoulement au niveau de l'entonnement. Ces figures montrent l'existence d'une zone tampon entre la tulipe et l'évacuateur de crues où la vitesse de l'écoulement est nulle. La présence de la tulipe empêche l'alimentation de l'évacuateur de manière homogène dans la direction rive-à-rive, d'où la légère dissymétrie affichée dans les iso-valeurs de vitesse de la Figure 40.

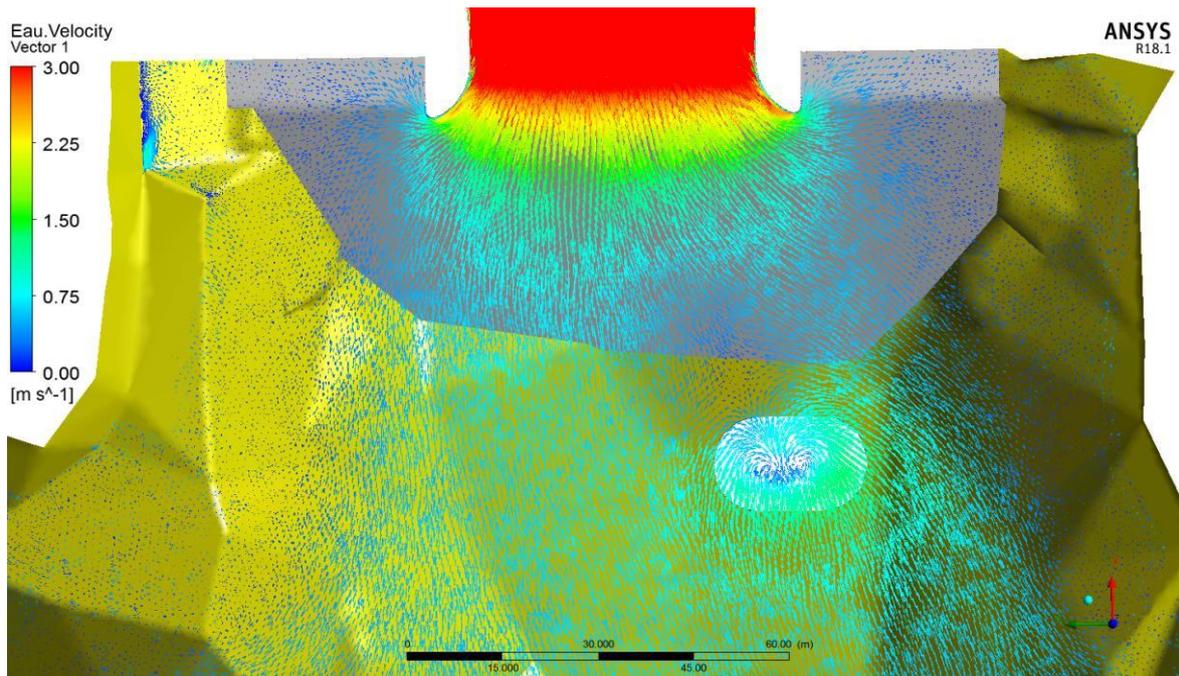


Figure 39 – Vecteurs de vitesse au niveau de l'entonnement – Crue 2

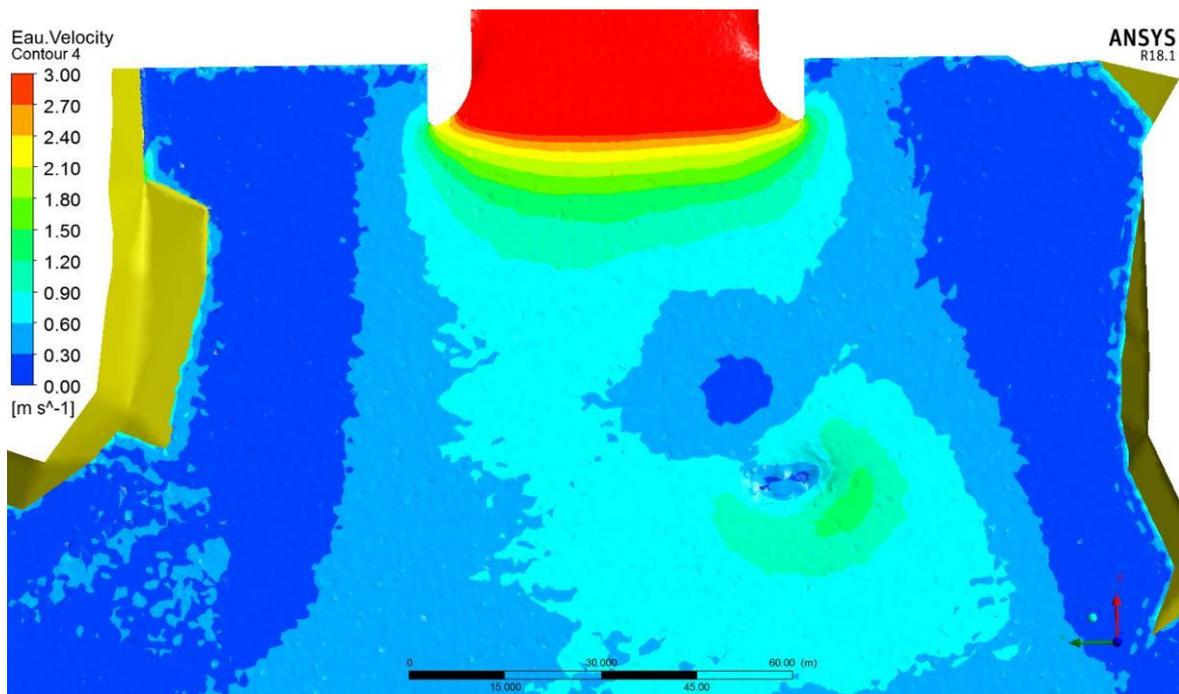


Figure 40 – Iso-valeurs de vitesse en surface au niveau de l'entonnement – Crue 2

5.3.3 ECOULEMENT SUR LES MARCHES

5.3.3.1 Surface libre

La figure et le graphique ci-dessous montrent le niveau d'eau dans le coursier à marches d'escalier. En crête, la hauteur d'eau est de 3,5 m sur toute la largeur du seuil. A l'aval immédiat de la crête, la surface de l'écoulement subit une contraction au niveau des bajoyers d'environ 1 m. Le décalage entre les niveaux d'eau sur les bajoyers RD et RG s'estompe à l'aval du seuil.

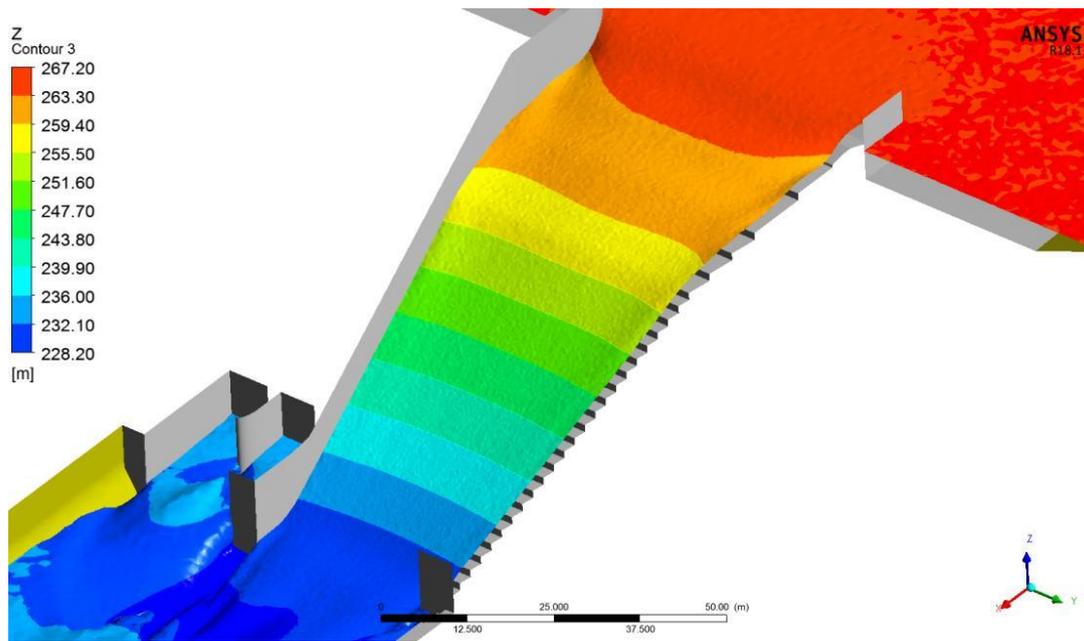


Figure 41 – Iso-valeurs de la cote Z dans le coursier – Crue 2

La revanche minimale par rapport au débordement est de 1 m. La revanche fera l'objet d'une vérification suivant les critères de l'USBR dans le cadre du PROJET.

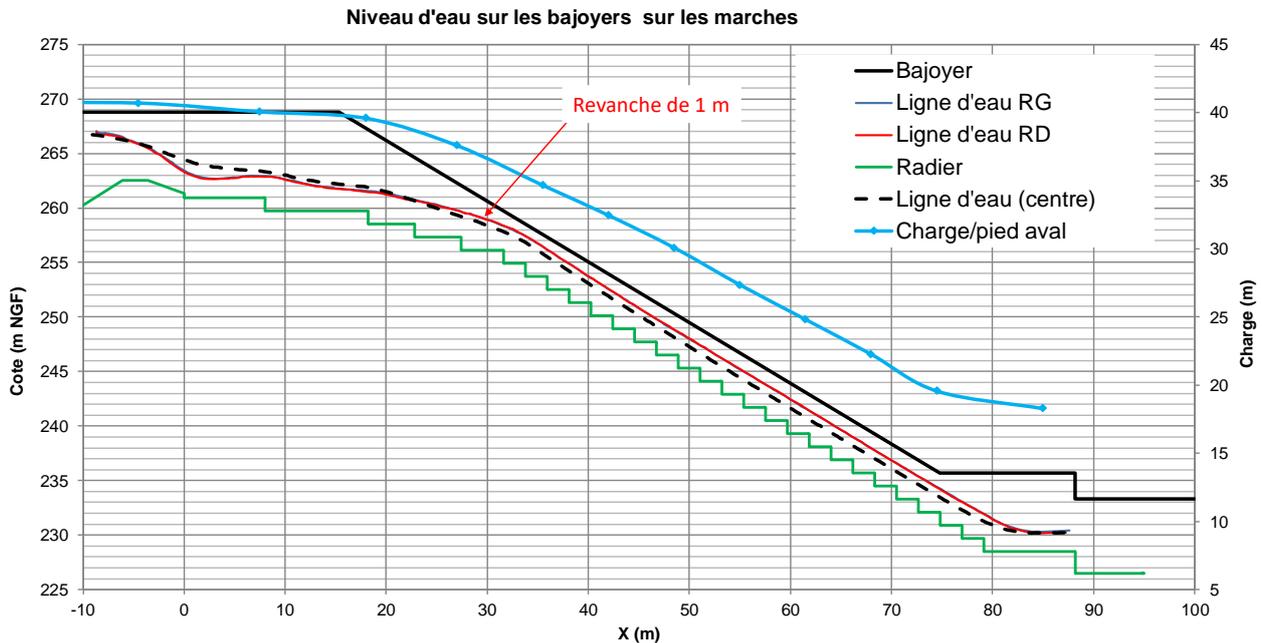


Figure 42 – Lignes d'eau le long des bajoyers et dans l'axe de l'EVC – Crue 2

5.3.3.2 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 28 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 25 m/s.

Un phénomène de recirculation de l'écoulement est observé sur chaque marche (Figure 45).

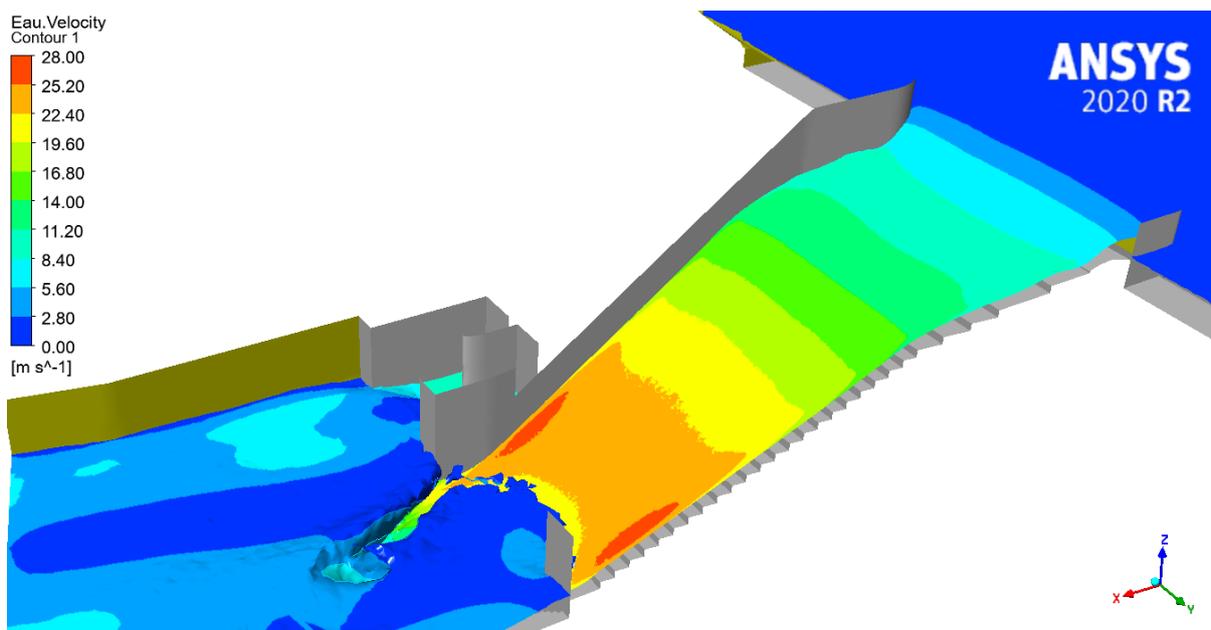


Figure 43 – Iso-valeurs de la vitesse en surface dans le coursier – Crue 2

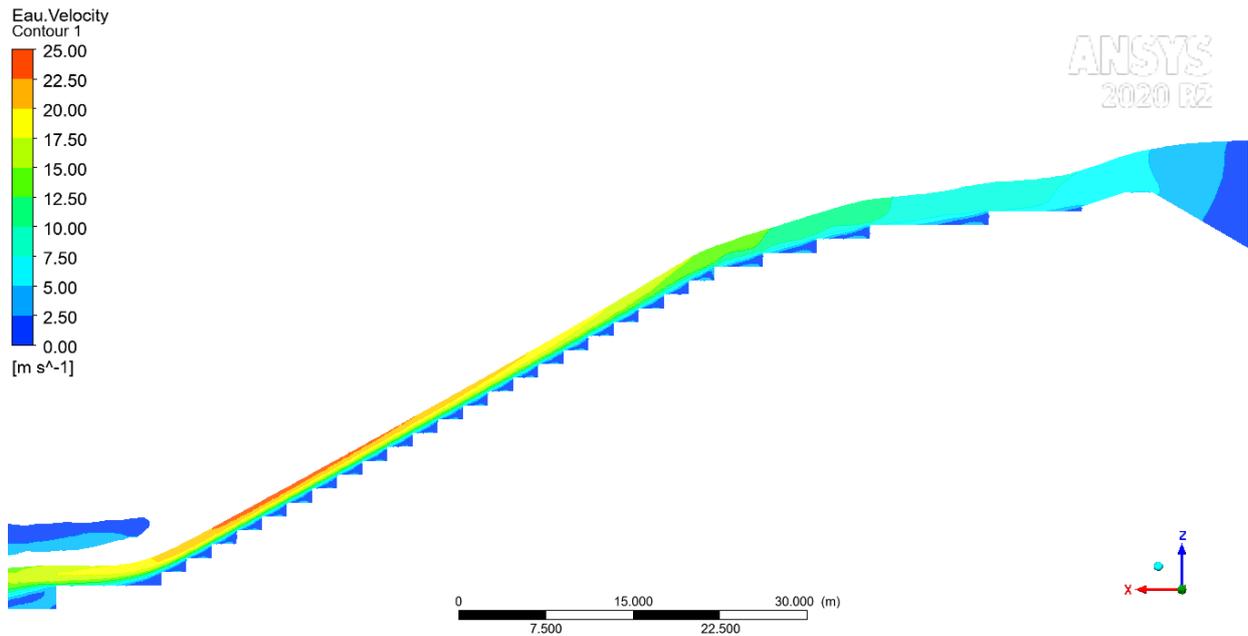


Figure 44 – Iso-valeurs de la vitesse dans le coursier – coupe dans l’axe de l’EVC – Crue 2

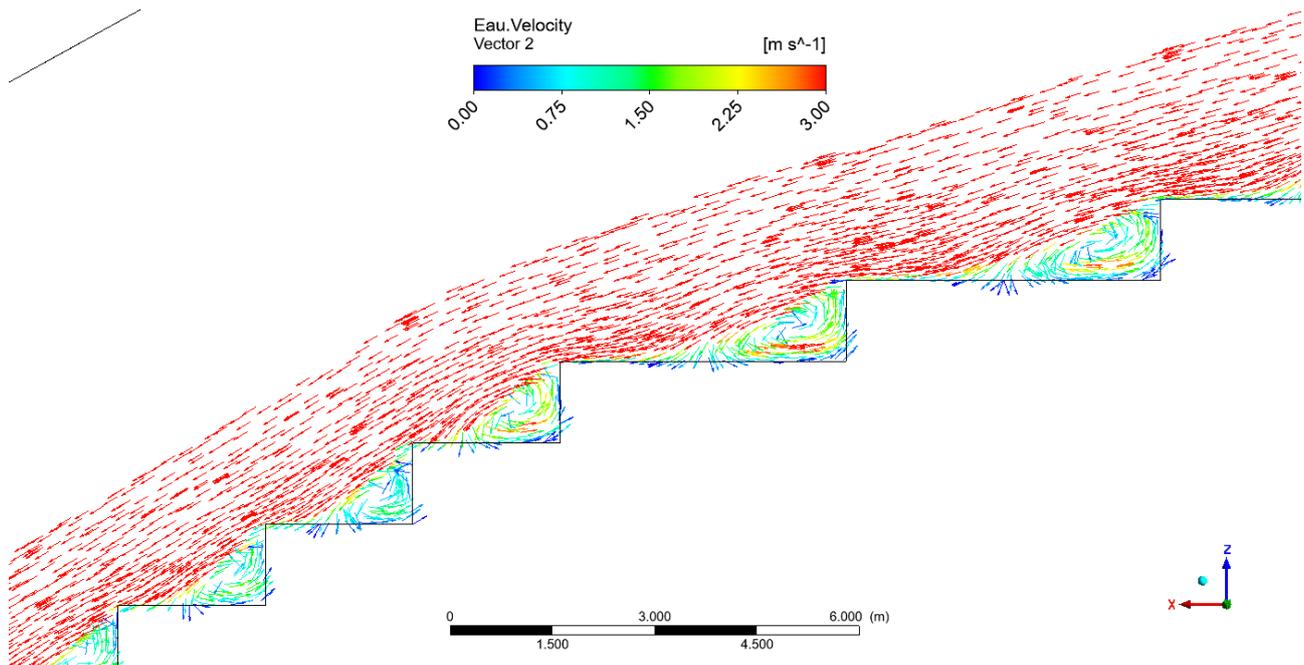


Figure 45 – Vecteurs de vitesse – Zoom au niveau des marches 4 à 8 – Crue 2

5.3.3.3 Calcul du taux de dissipation sur les marches

La dissipation apportée par les marches du coursier a été évaluée à 57,9% pour la crue n°2. Elle est calculée de la manière suivante :

- H_{init} = charge initiale dans la retenue – Z_{pied} du coursier
 $= 267,2 - 228,5 = 38,7 \text{ m}$
- $H_{rés}$ = charge résiduelle sur le coursier avant le bassin de dissipation - Z_{pied} du coursier

$$= 244,8 \text{ NGF} - 228,5 \text{ NGF} = 16,3 \text{ m,}$$

- Taux de dissipation apportée par les marches :
 - ◆ $T (\%) = (H_{init} - H_{res}) / H_{init} * 100$
 - ◆ Soit $T = (38,7 - 16,3) / 38,7 * 100 = 57,9\%$

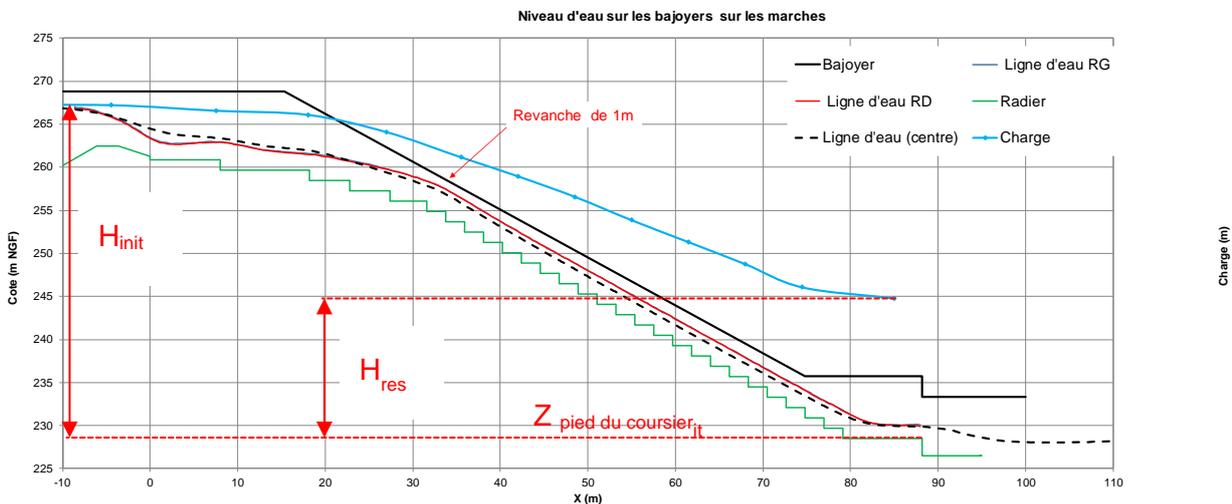


Figure 46 – Charges considérées pour le calcul du taux de dissipation

5.3.4 ECOULEMENT DANS LE BASSIN

5.3.4.1 Surface libre et vitesses

Les figures ci-dessous présentent les hauteurs d'eau, les vitesses et le ressaut.

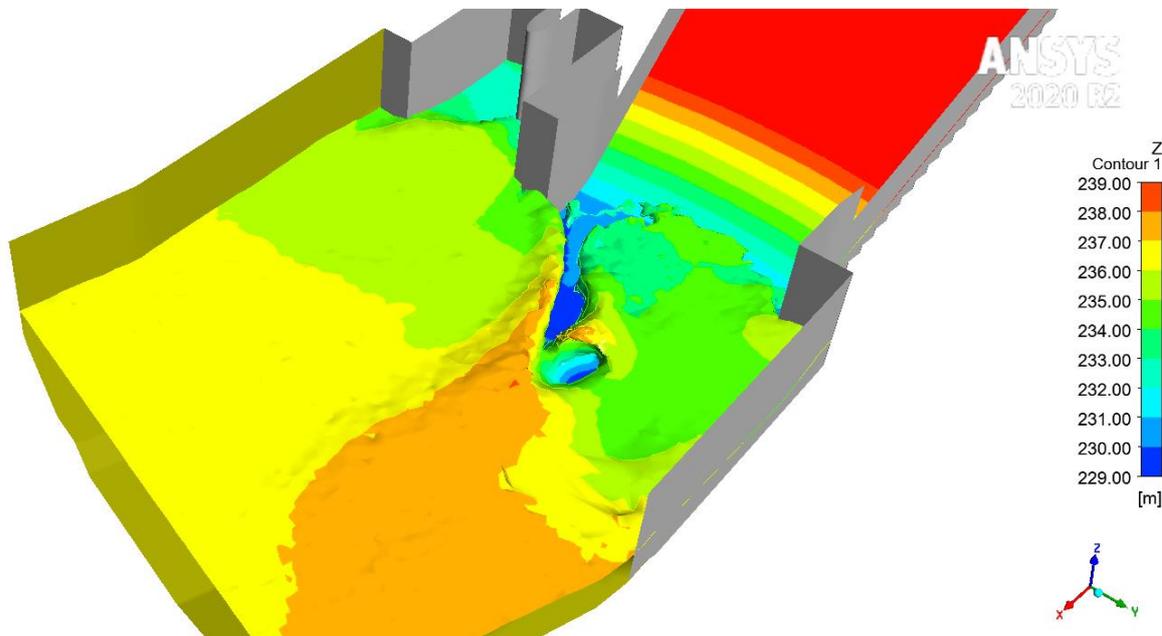


Figure 47 – Iso-valeurs de la cote Z dans le bassin – Fosse excavée – Crue 2

La figure ci-dessous présente les lignes de courant et les vitesses.

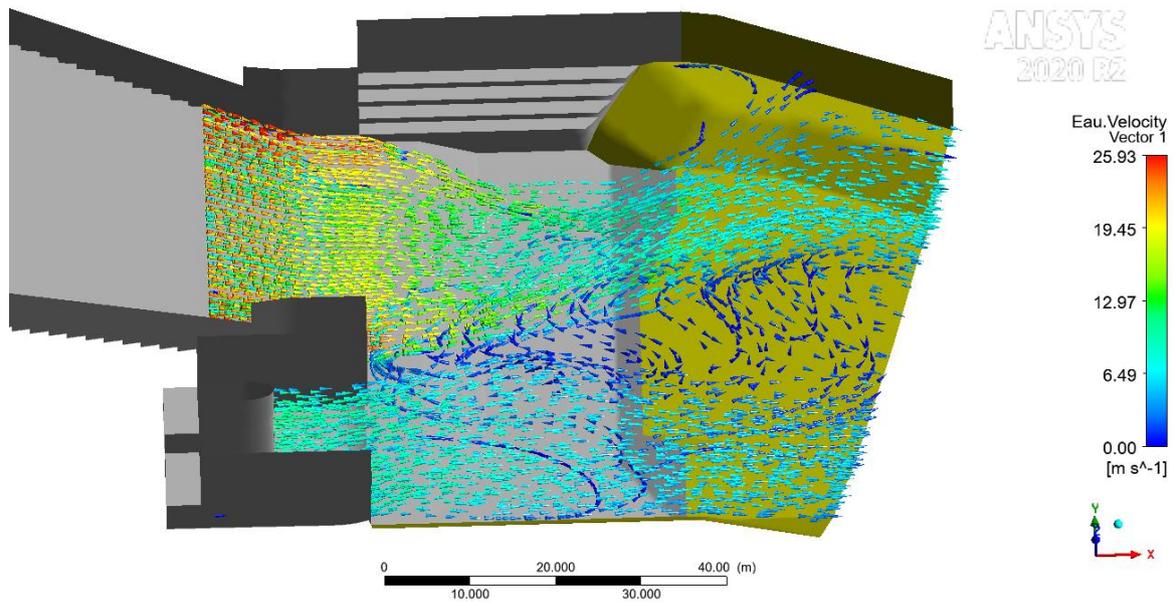


Figure 48 – Lignes de courant et vitesses dans le bassin – Fosse excavée – Crue 2

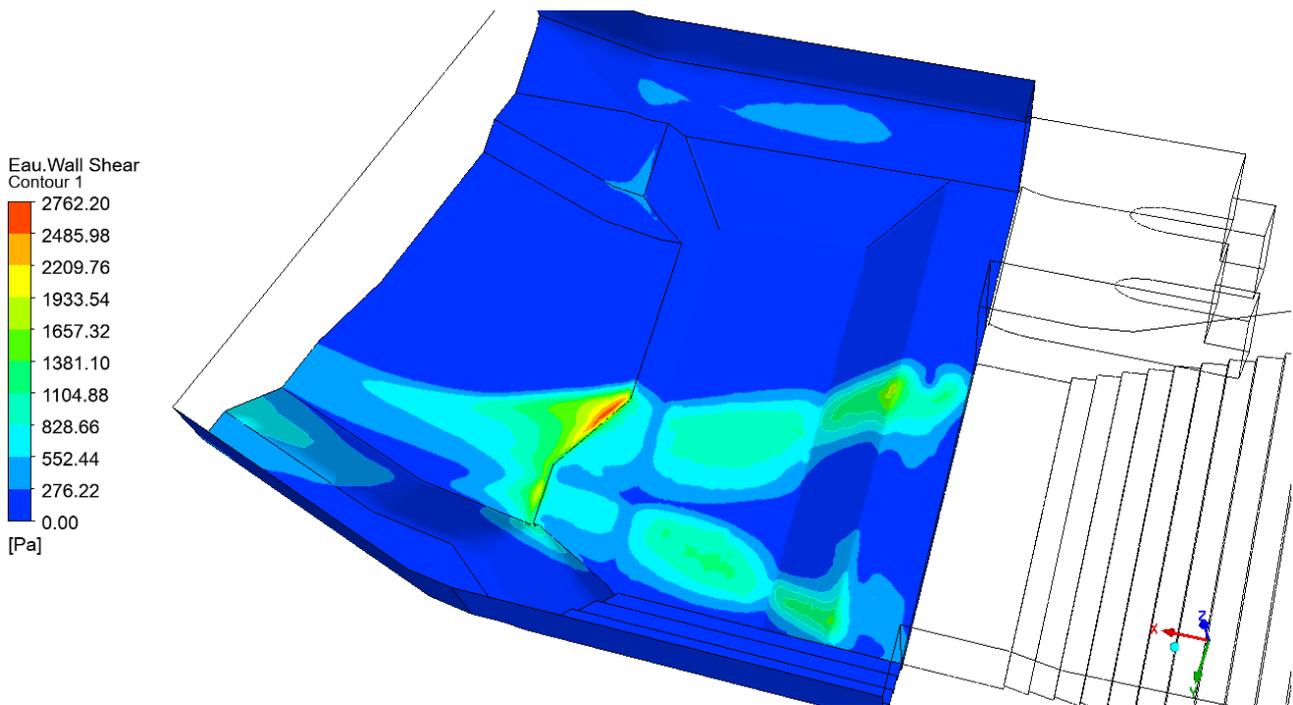


Figure 49 – Contrainte de cisaillement dans le bassin – Crue 2

Ces résultats montrent que :

- Les écoulements en provenance des galeries et de l'EVC sont bien dissociés ;
- Des recirculations importantes entre les deux sorties des évacuateurs.
- L'écoulement issu des galeries est fortement ralenti en raison d'un niveau aval haut.

- Le cisaillement au fond du bassin est maximal en sorte de la fosse

5.3.4.2 Calcul de la longueur de bassin de dissipation

Un calcul de prédimensionnement de bassin de dissipation a été réalisé. Ce calcul se base sur les paramètres suivants.

Paramètres	Crue n°2
Débit de l'évacuateur de surface	920 m³/s
Hauteur d'eau h1 <ul style="list-style-type: none"> hauteur d'eau mesurée en pied de coursier sur la marche à la cote 228,50 m NGF hypothèse : la hauteur d'eau h1 est identique à la hauteur mesurée sur la dernière marche. 	1,40 m
Vitesse d'eau v1 (vitesse d'eau moyenne en pied de coursier sur la marche à la cote 228,50 m NGF)	26 m/s
Froude Fr1 calculé - $Fr=V1/\sqrt{(g.h1)}$	7.0
Niveau aval issue du modèle 2D Hec-Ras (PK 1676,7)	233,5 m NGF

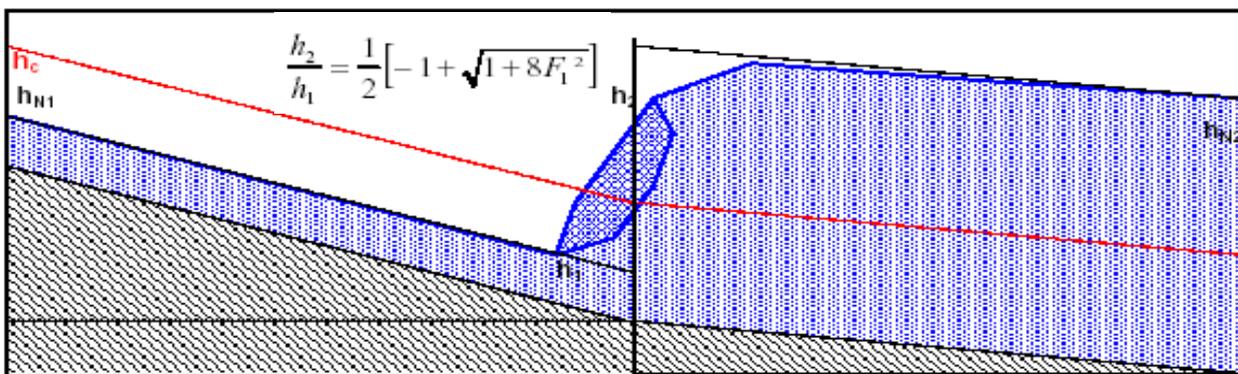


Figure 50 – Détail du calcul de la hauteur conjuguée

Les calculs indiquent :

- une hauteur conjuguée h2 de 13,2 m
- un niveau aval Z2 (considérant le fond de bassin à la côte de la fosse excavée 223,0 m NGF) de 236,2 m NGF
- une longueur de ressaut (6 x h2) de 79,2m

Compte-tenu des résultats, il apparaît que le ressaut sera probablement chassé lors de la crue n°2. Les résultats sont illustrés sur la figure ci-dessous.

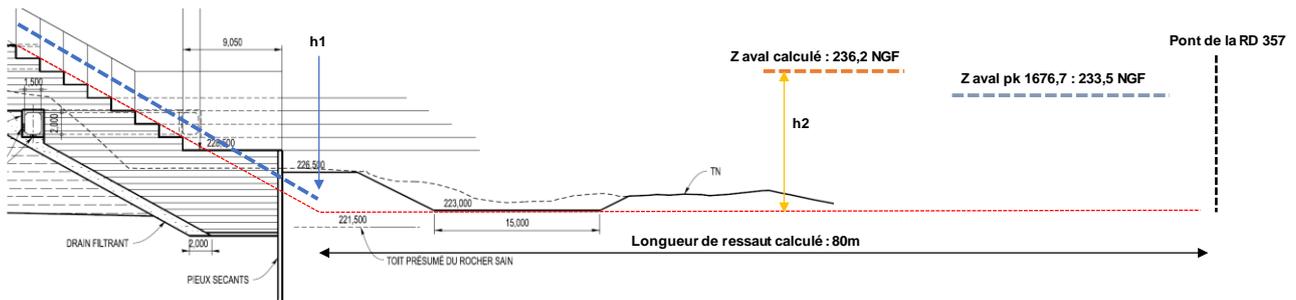


Figure 51 – Dimensions du ressaut

5.3.5 RISQUE D'ÉROSION PAR CAVITATION

La figure ci-dessous présente la répartition de la pression sur les marches. L'unique zone concernée par une pression négative est située entre les marches 5 et 6 à l'aval du seuil de l'évacuateur : la pression minimale y est de -30 kPa. Cette dépression est due au décollement de la lame d'eau induite par le changement de pente du coursier à cet endroit.

La répartition de l'indice de cavitation donnée dans la figure suivante montre des valeurs supérieures à 0,5 dans le coursier sauf dans la zone située entre les marches 5 et 6. Le phénomène de cavitation ne pourrait concerner que cette région. L'indice de cavitation y est cependant supérieur à 0,3. Le risque d'endommagement par cavitation est donc écarté selon les critères considérés (cf. §4).

La vitesse moyenne considérée dans le calcul de l'indice de cavitation est obtenue au droit de la marche n°23 du coursier où la vitesse de l'écoulement est la plus élevée : $V_{moy} = 19,60$ m/s

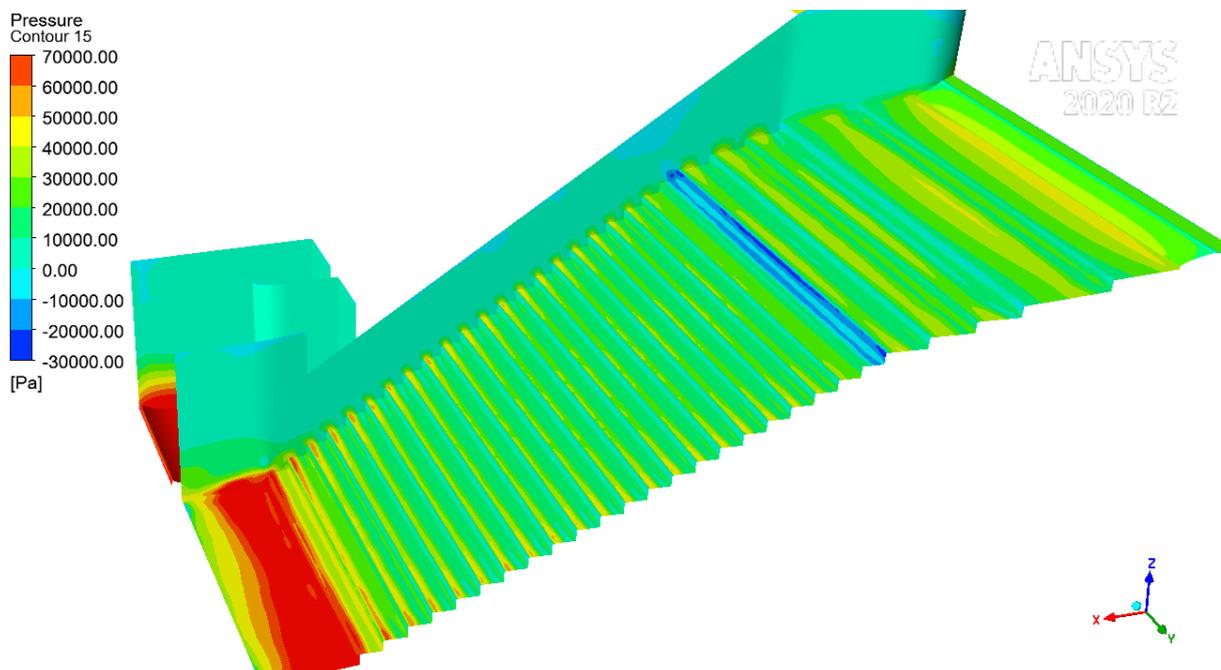


Figure 52 – Pression sur les parois du coursier – Crue 2

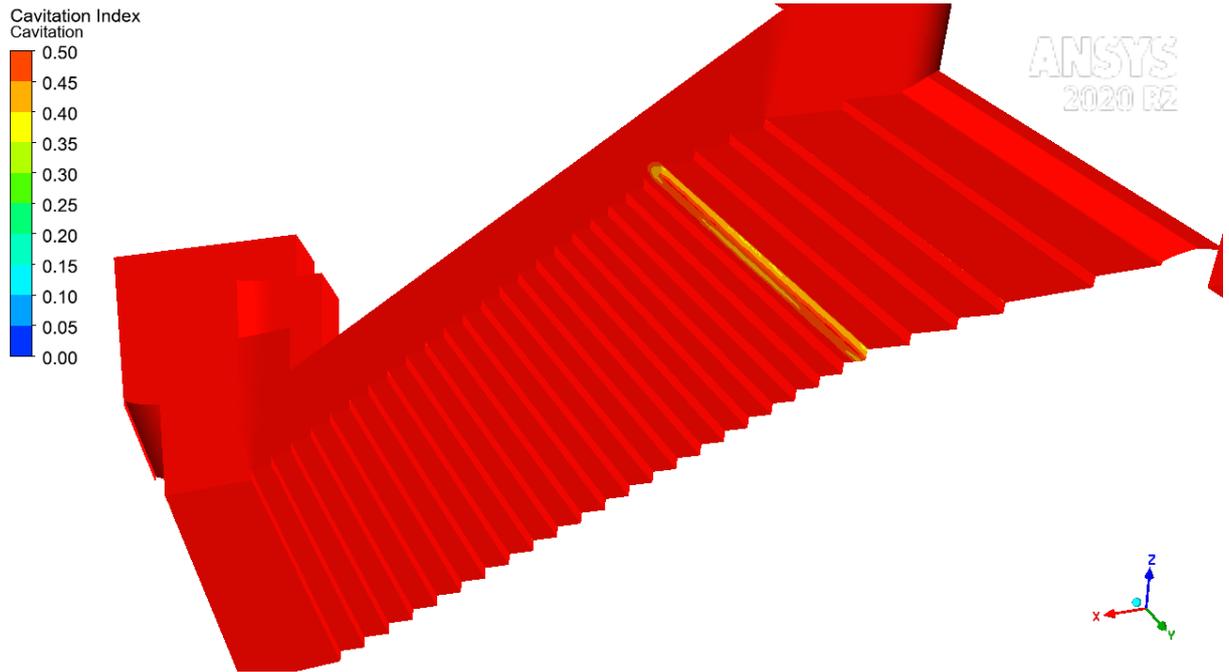


Figure 53 – Indice de cavitation sur le coursier – Crue 2

5.4 CRUE 3 – NIVEAU DE RETENUE A 268,80 MNGF

Pour un niveau d'eau dans la retenue de 268,80 m NGF, le débit transitant par l'évacuateur de crues est de 1 440 m³/s

5.4.1 ECOULEMENT DANS LA RETENUE

5.4.1.1 Surface libre

Le niveau dans la retenue est stabilisé à la cote 268,80 m NGF conformément aux hypothèses de modélisation.

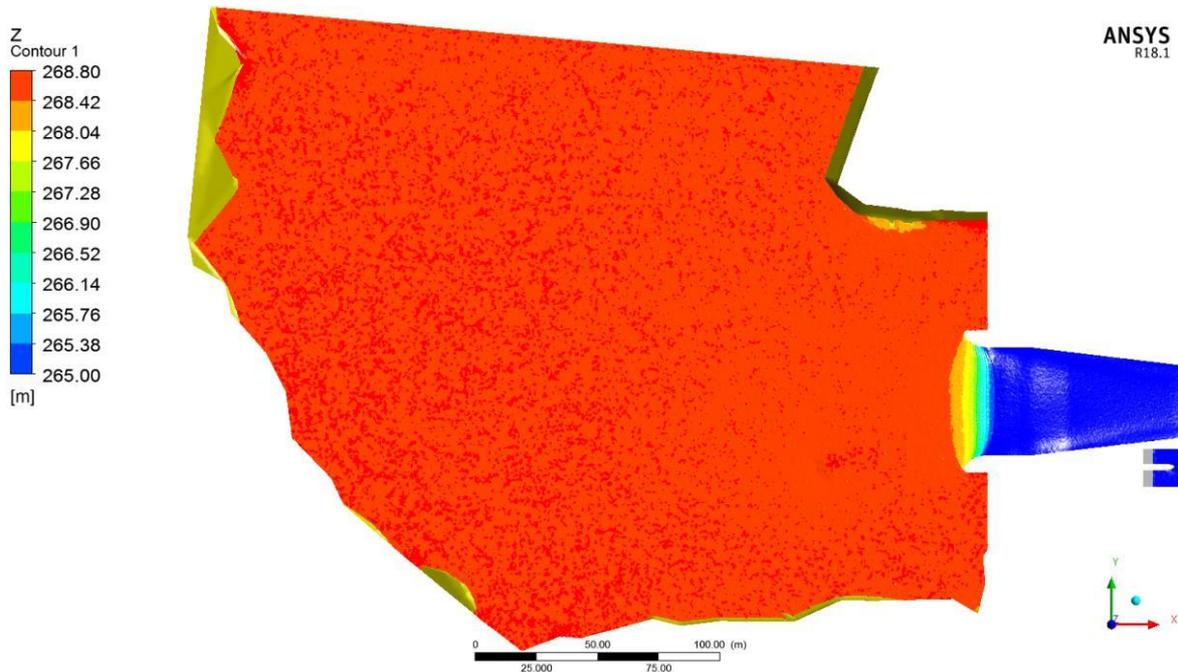


Figure 54 – Iso-valeurs de la cote Z dans la retenue – Crue 3

5.4.1.2 Vitesses d'écoulement

Les figures ci-dessous montrent que le comportement de l'écoulement dans la retenue ne varie pas entre les différents scénarios de crue : vitesse plus élevée en rive gauche avec un maximum de 1 m/s dans le plan médian de la courbure.

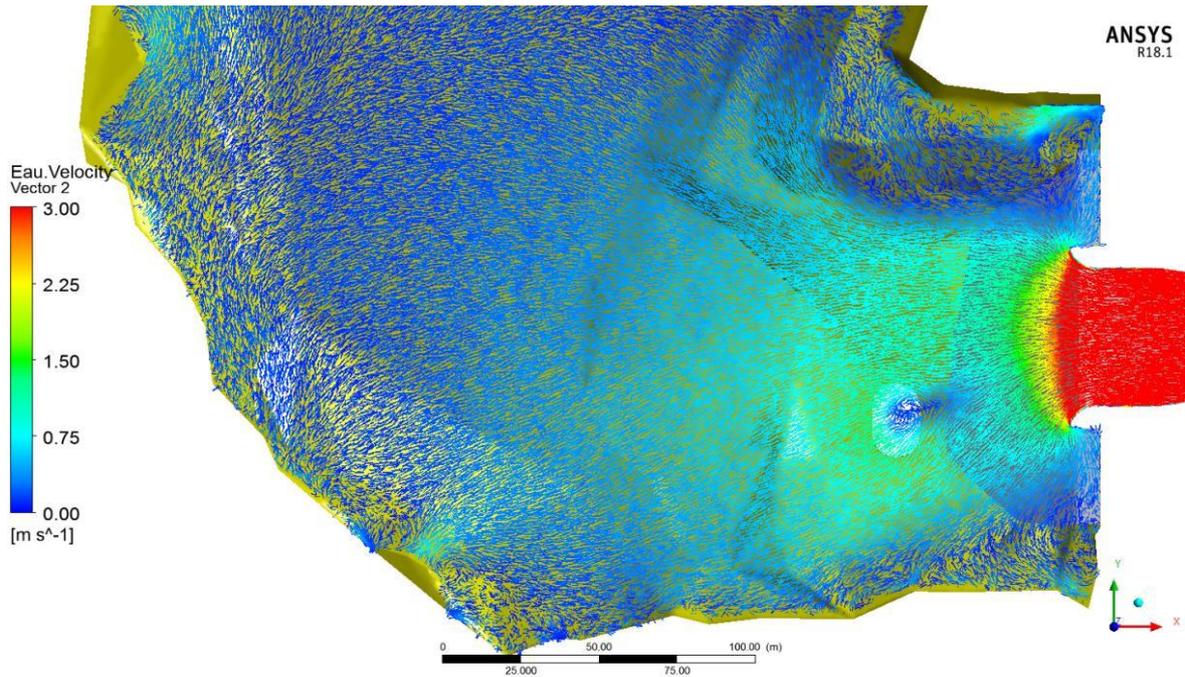


Figure 55 – Vecteurs de vitesse dans la retenue – Crue 3

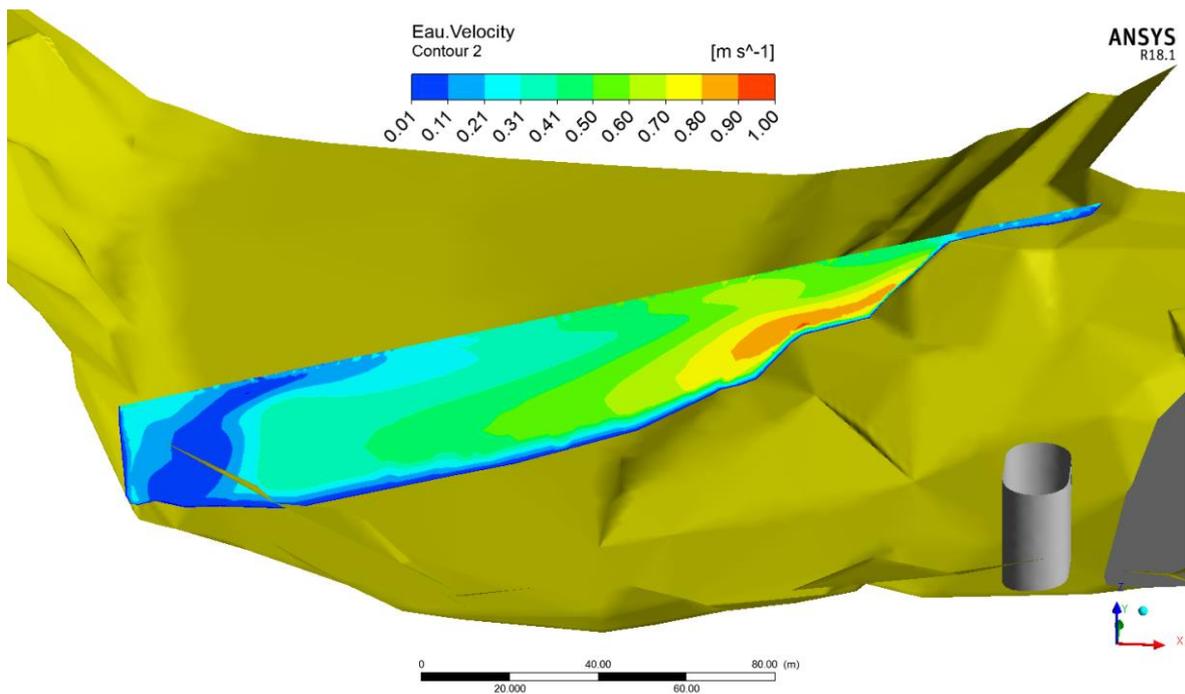


Figure 56 – Iso-valeurs de l'intensité de la vitesse dans le plan médian de la courbure – Crue 3

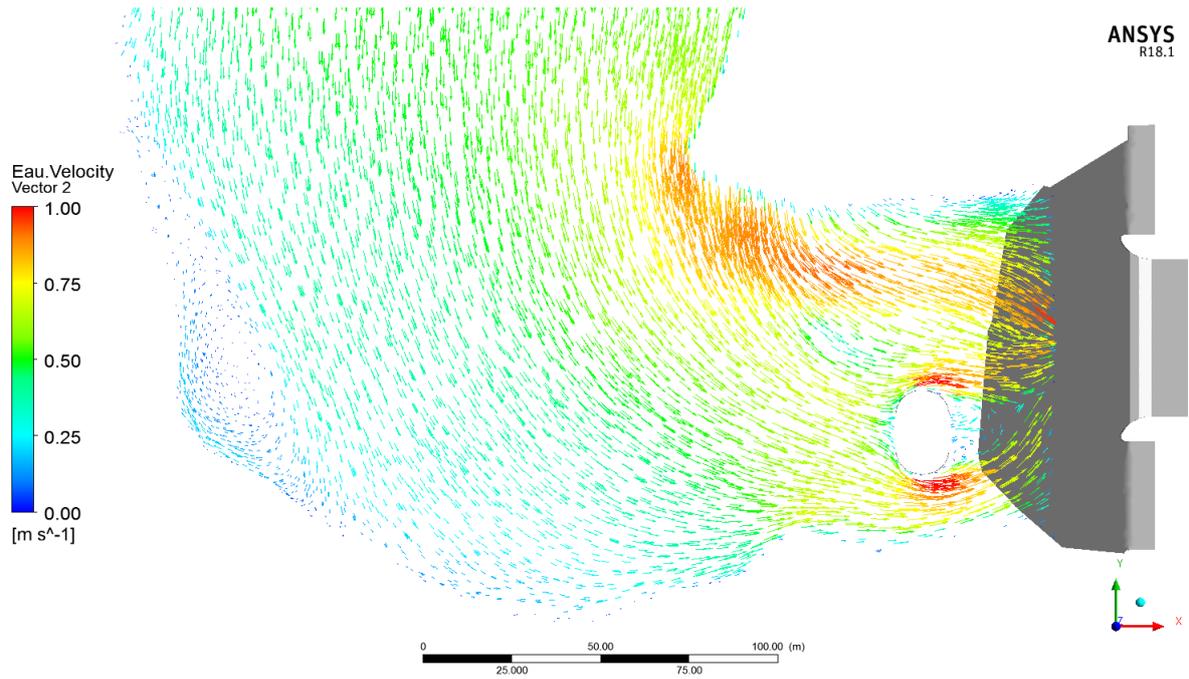


Figure 57 – Vecteurs de vitesse dans le plan horizontal à la cote Z = 250 m NGF – Crue 3

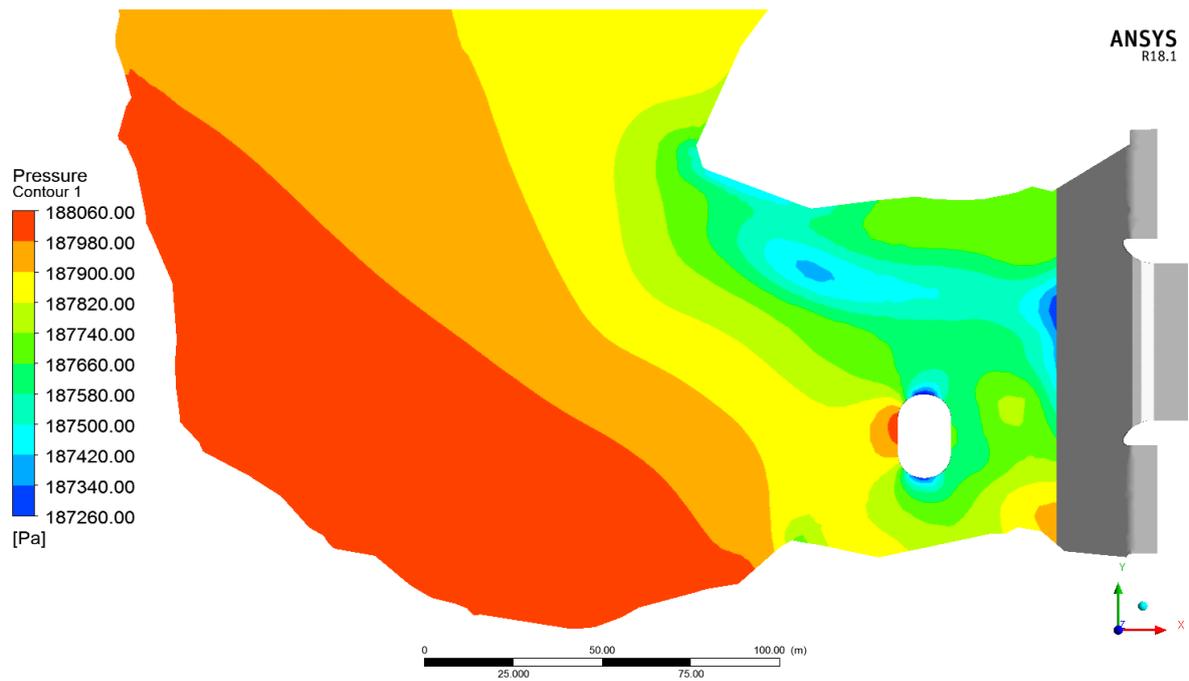
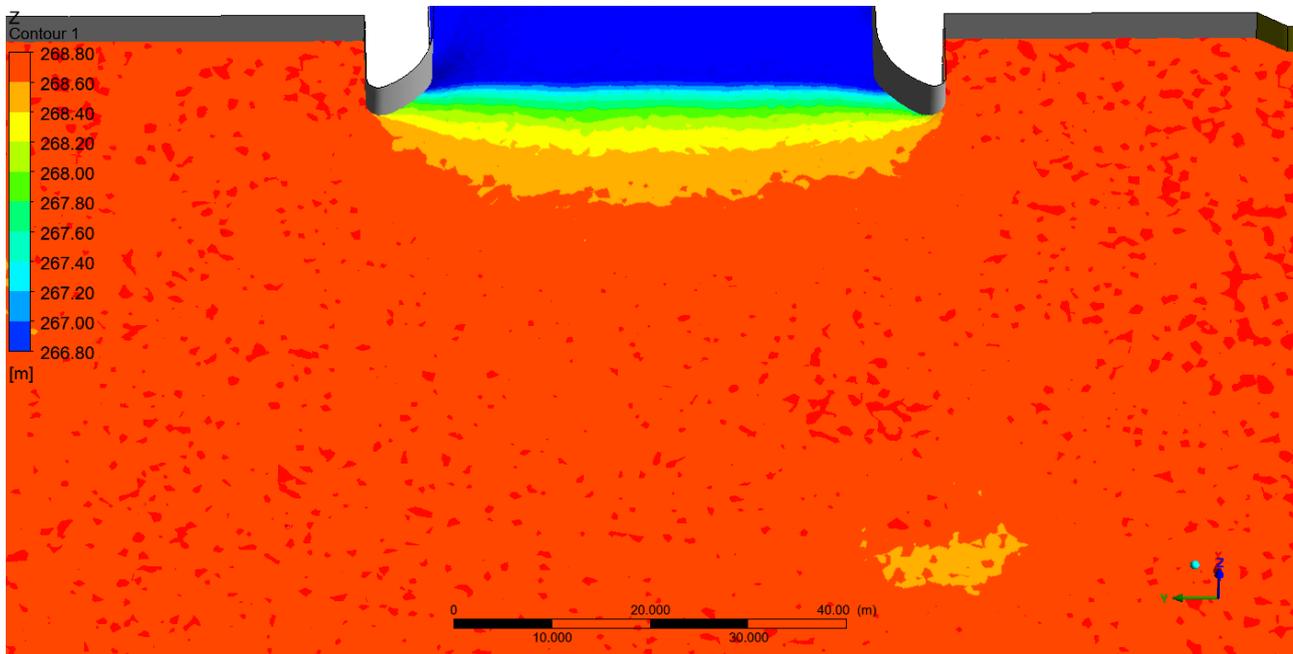


Figure 58 – Iso-valeurs de pression dans le plan horizontal à la cote Z = 250 m NGF – Crue 3

5.4.2 ECOULEMENT A L'ENTONNEMENT

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.



Le graphique ci-dessous présente le niveau d'eau sur les murs au droit de l'entonnement. Un léger écart, d'environ 0,2 à 0,4 m, est observable entre les deux rives : la ligne en rive droite est en dessous de la ligne rive gauche.

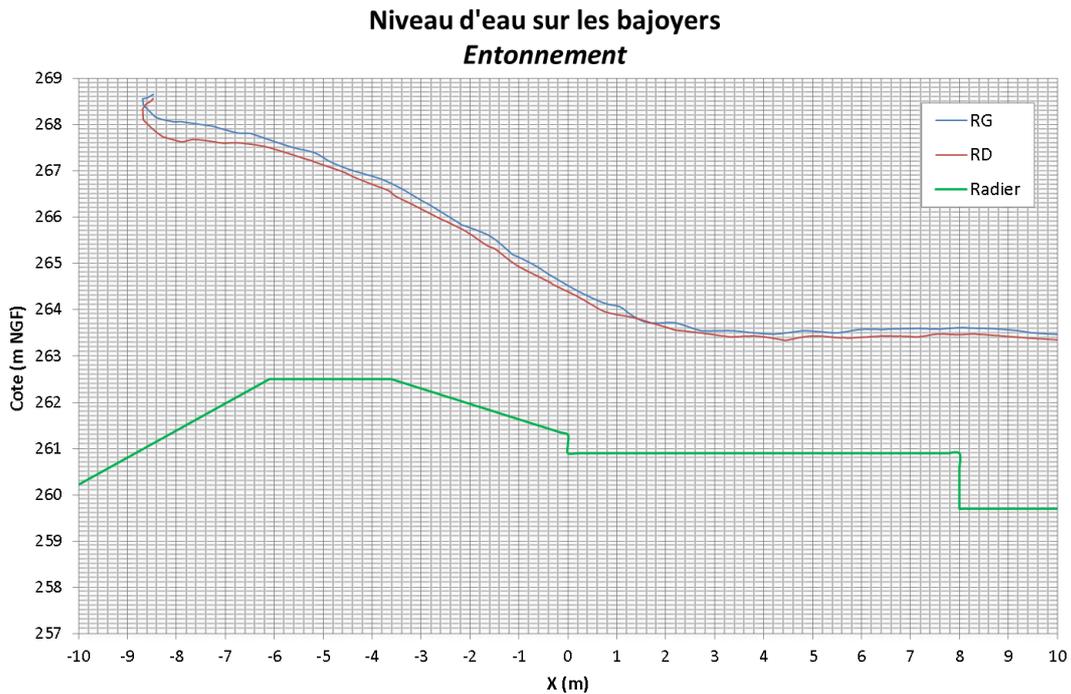


Figure 60 – Niveau d'eau sur les bajoyers à l'entonnement – Crue 3

5.4.2.1 Vitesses d'écoulement

Les figures ci-dessous affichent la vitesse de l'écoulement au niveau de l'entonnement. Ces figures montrent l'existence d'une zone tampon entre la tulipe et l'évacuateur de crues où la vitesse de l'écoulement est nulle. La présence de la tulipe empêche l'alimentation de l'évacuateur de manière homogène dans la direction rive-à-rive, d'où la légère dissymétrie affichée dans les iso-valeurs de vitesse de la Figure 62.

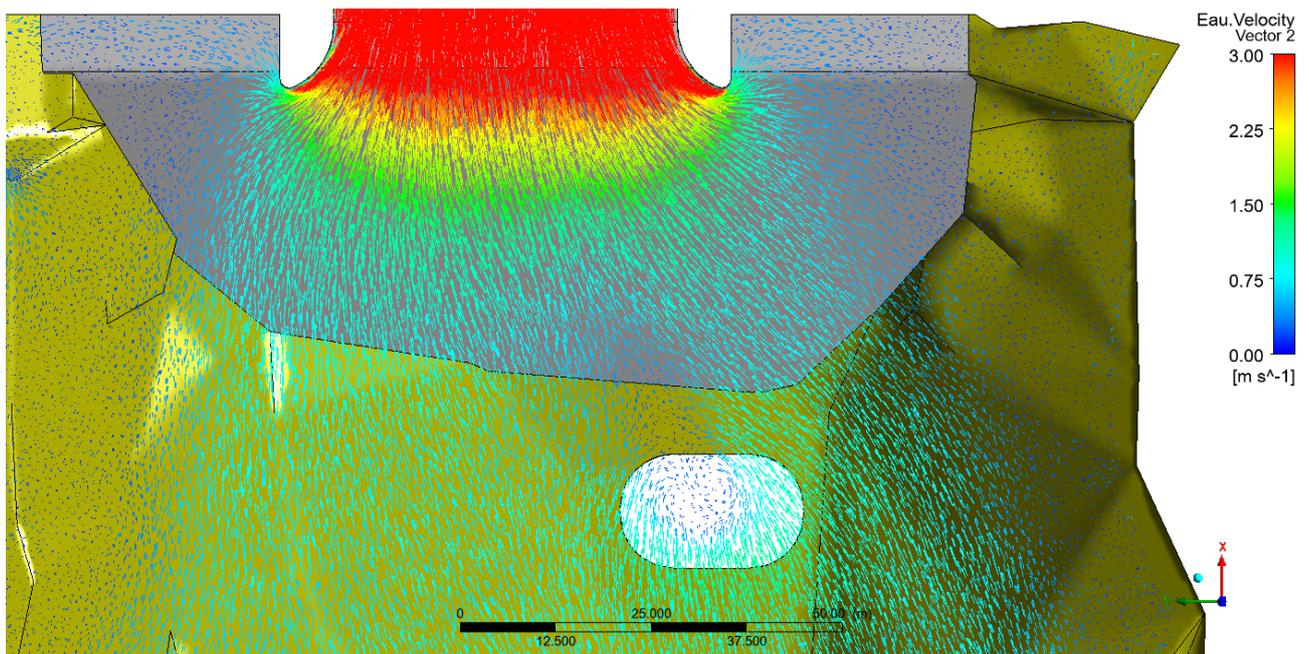


Figure 61 – Vecteurs de vitesse au niveau de l'entonnement – Crue 3

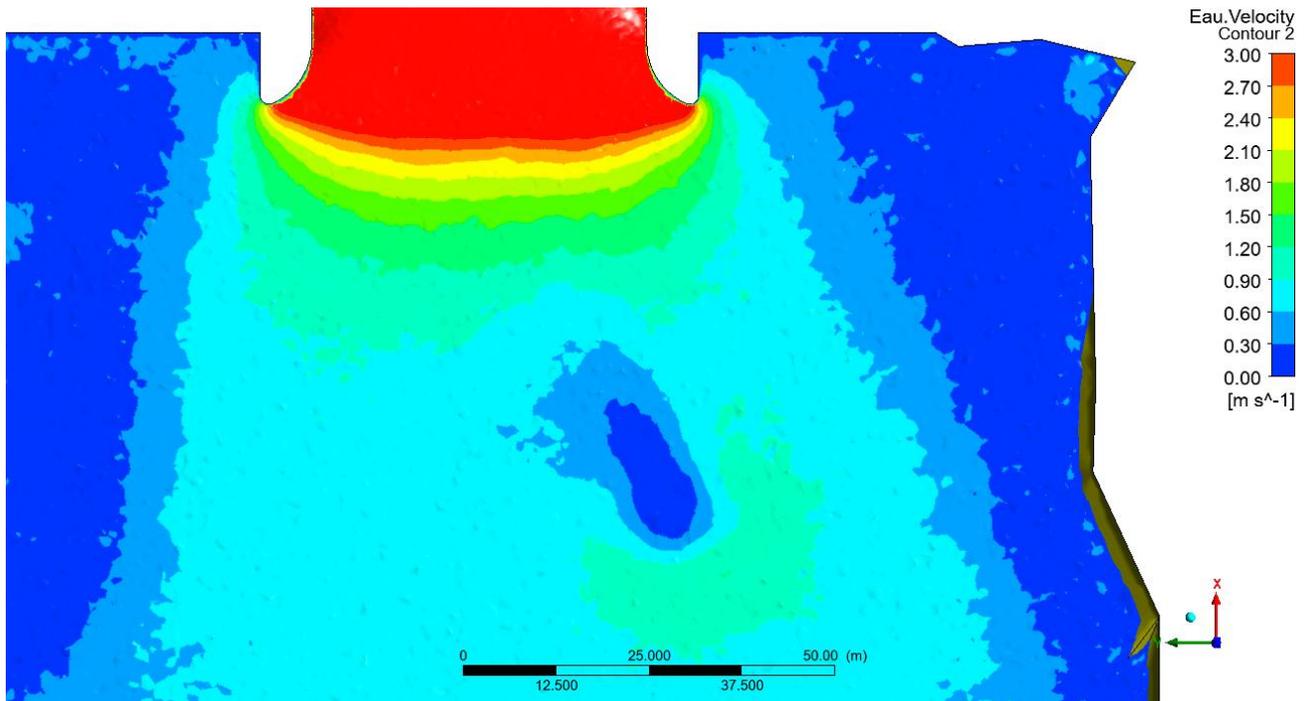


Figure 62 – Iso-valeurs de vitesse en surface au niveau de l'entonnement – Crue 3

5.4.3 ECOULEMENT SUR LES MARCHES

5.4.3.1 Surface libre

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

A l'aval immédiat de la crête, la surface de l'écoulement subit une contraction au niveau des bajoyers d'environ 2 m. Le décalage entre les niveaux d'eau sur les bajoyers RD et RG s'estompe à l'aval du seuil. A partir de la troisième marche, une montée de la surface libre est observée au niveau des bajoyers en raison de la convergence de ces derniers. La surface libre atteint ainsi la hauteur des bajoyers (revanche nulle).

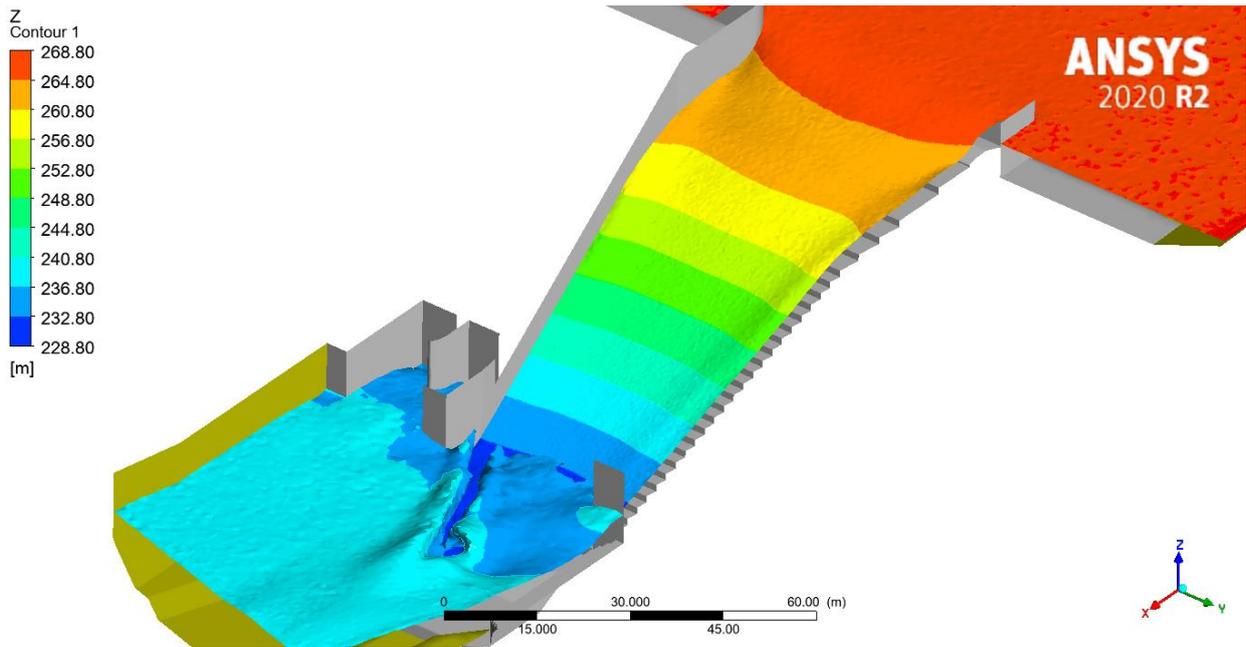


Figure 63 – Iso-valeurs de la cote Z dans le coursier – Crue 3

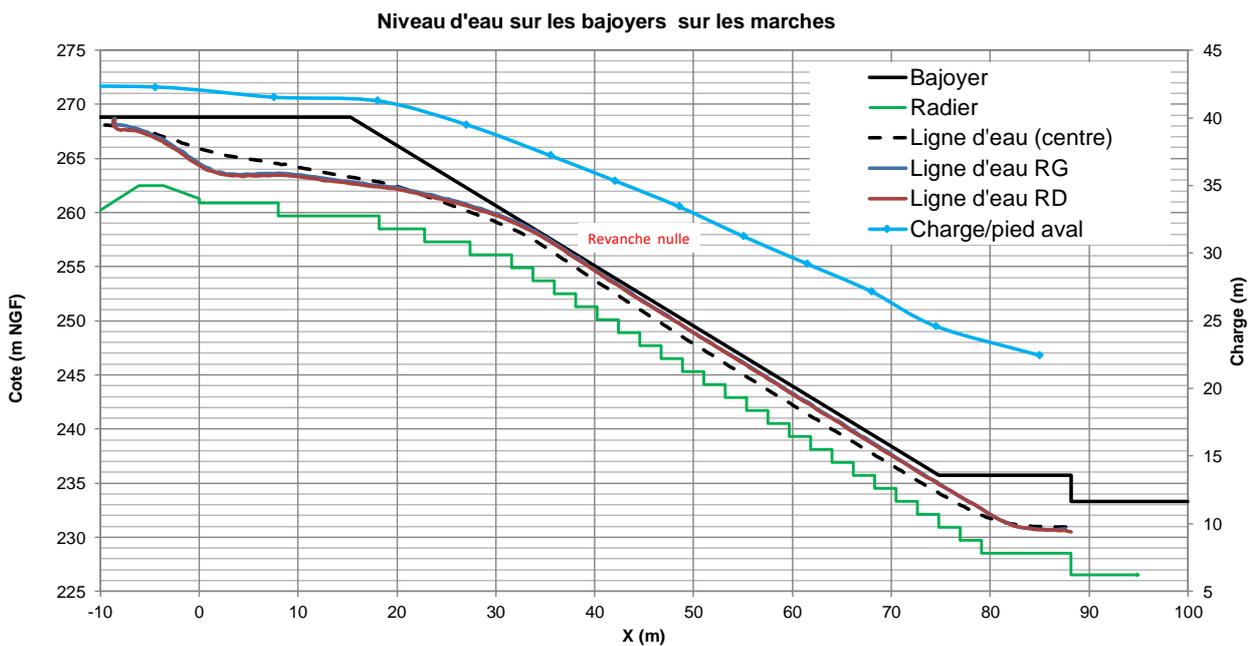


Figure 64 – Lignes d'eau le long des bajoyers et dans l'axe de l'EVC – Crue 3

5.4.3.2 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 29 m/s est observée en pied de coursier à la surface de l'écoulement. Dans le plan médian de l'EVC la vitesse maximale est de 27 m/s.

Un phénomène de recirculation de l'écoulement est observé sur chaque marche (Figure 67).

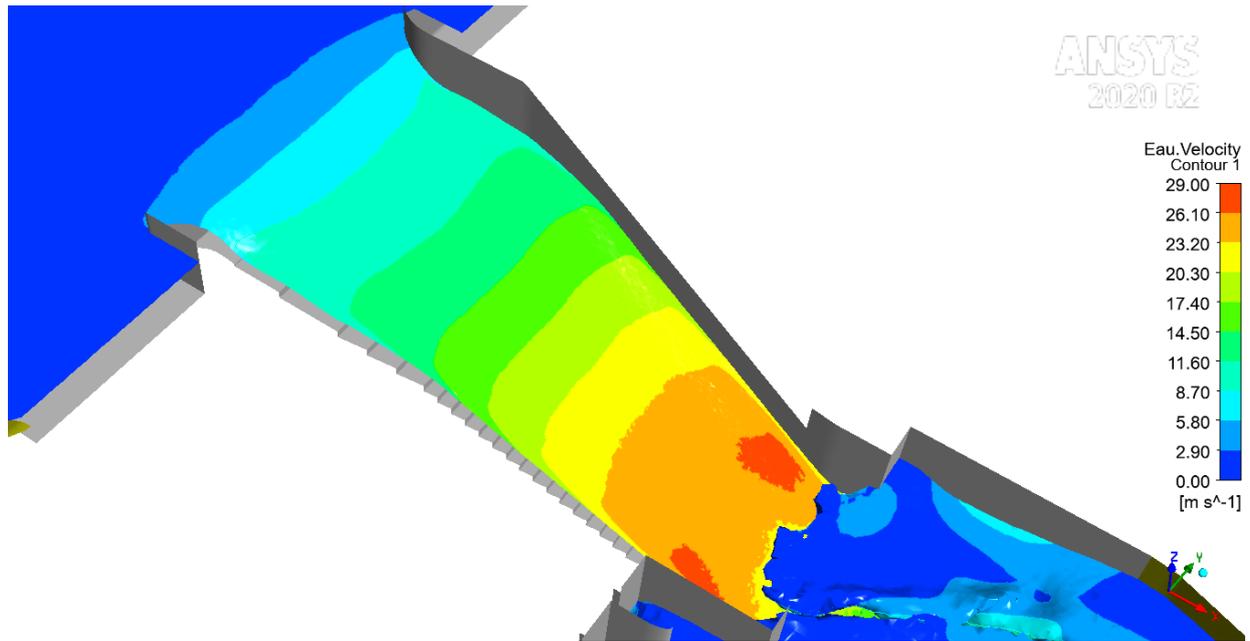


Figure 65 – Iso-valeurs de la vitesse en surface dans le coursier – Crué 3

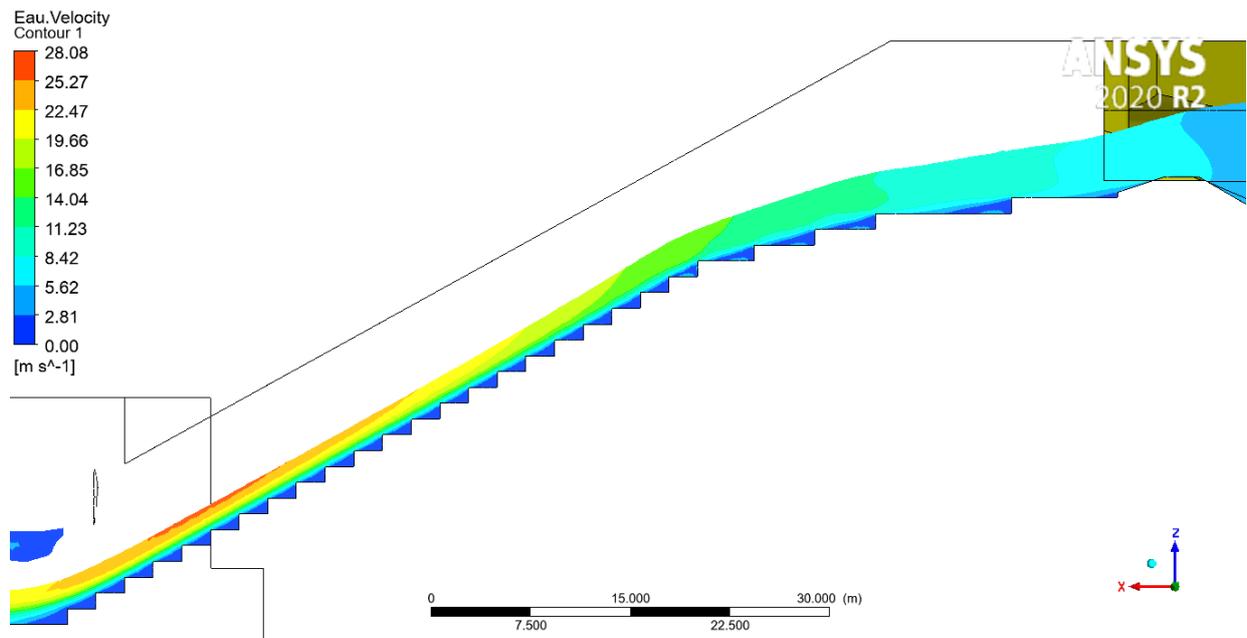


Figure 66 – Iso-valeurs de la vitesse dans le coursier – coupe dans l'axe de l'EVC – Crué 3

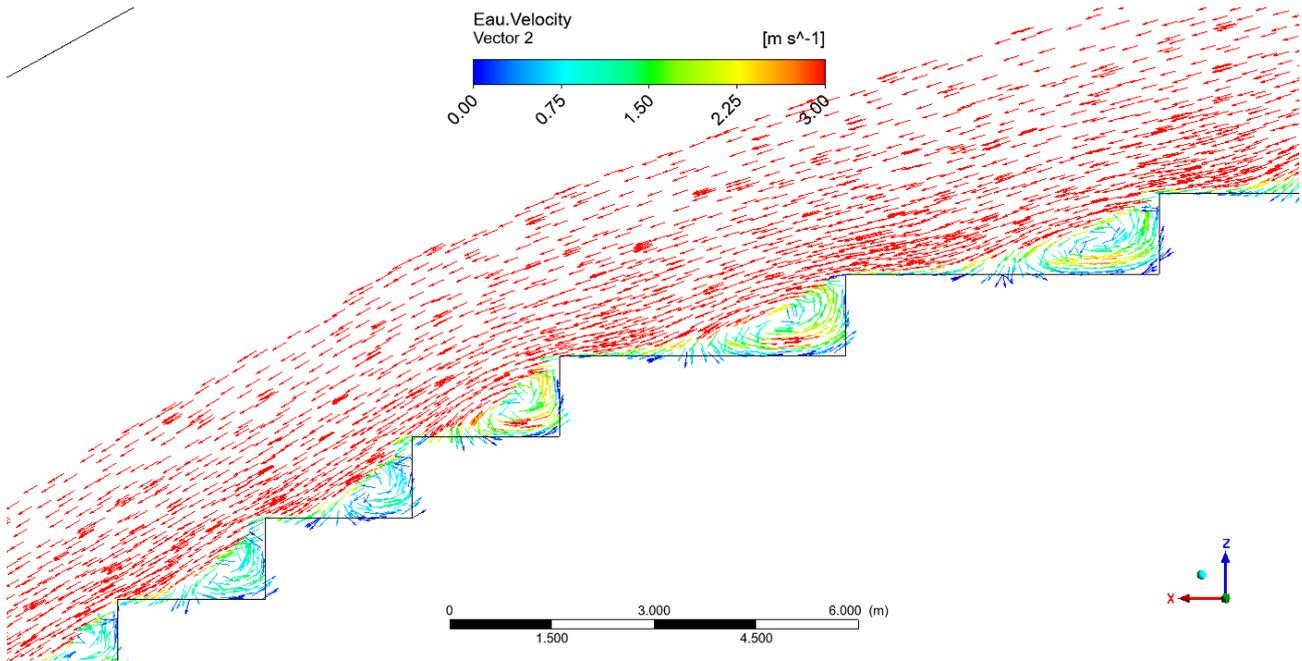


Figure 67 – Vecteurs de vitesse – Zoom au niveau des marches 4 à 8 – Crue 3

5.4.3.3 Calcul du taux de dissipation sur les marches

La dissipation apportée par les marches du coursier a été évaluée à 49,1% pour la crue n°3. Elle est calculée de la manière suivante :

- H_{init} = charge initiale dans la retenue – $Z_{\text{pied du coursier}}$
 $= 268,8 \text{ NGF} - 228,5 = 40,3 \text{ m}$
- $H_{rés}$ = charge résiduelle sur le coursier avant le bassin de dissipation - $Z_{\text{pied du coursier}}$
 $= 249,0 \text{ NGF} - 228,5 \text{ NGF} = 20,5 \text{ m},$
- Taux de dissipation apportée par les marches :
 - ♦ $T (\%) = (H_{init} - H_{rés}) / H_{init} * 100$
 - ♦ Soit $T = (40,3 - 20,5) / 40,3 * 100 = 49,1\%$

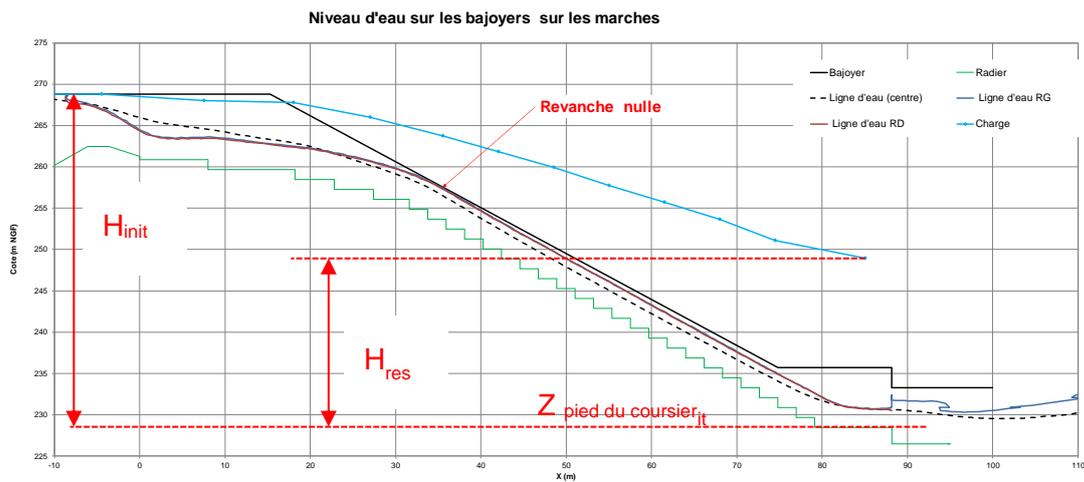


Figure 68 – Charges considérées pour le calcul du taux de dissipation

5.4.4 ECOULEMENT DANS LE BASSIN

Les figures ci-dessous présentent les hauteurs d'eau, les vitesses et le ressaut.

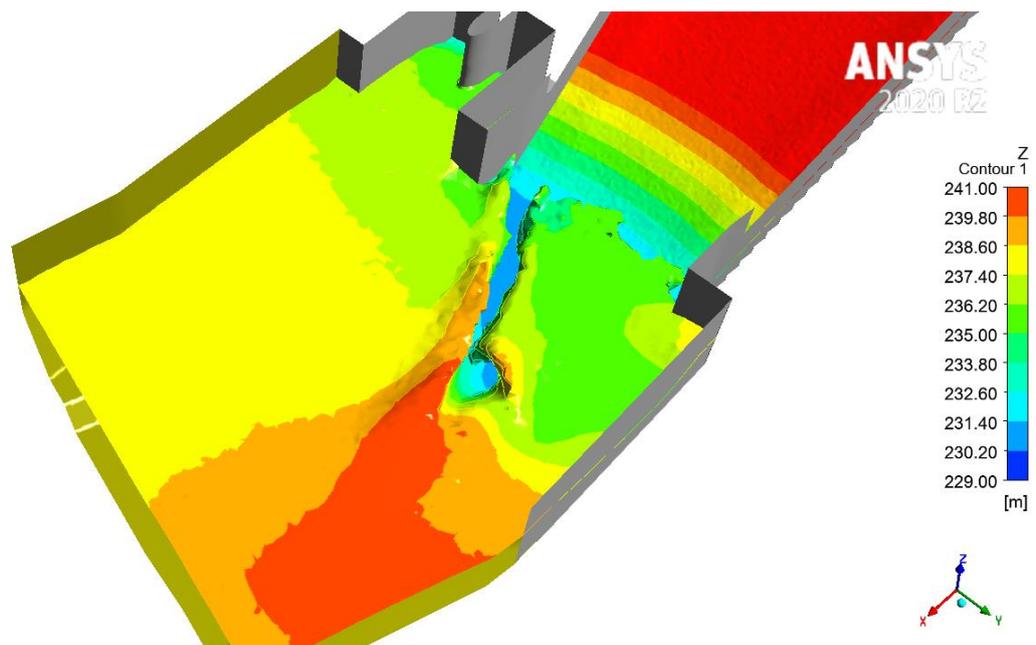


Figure 69 – Iso-valeurs de la cote Z dans le bassin – Fosse excavée – Crue 3

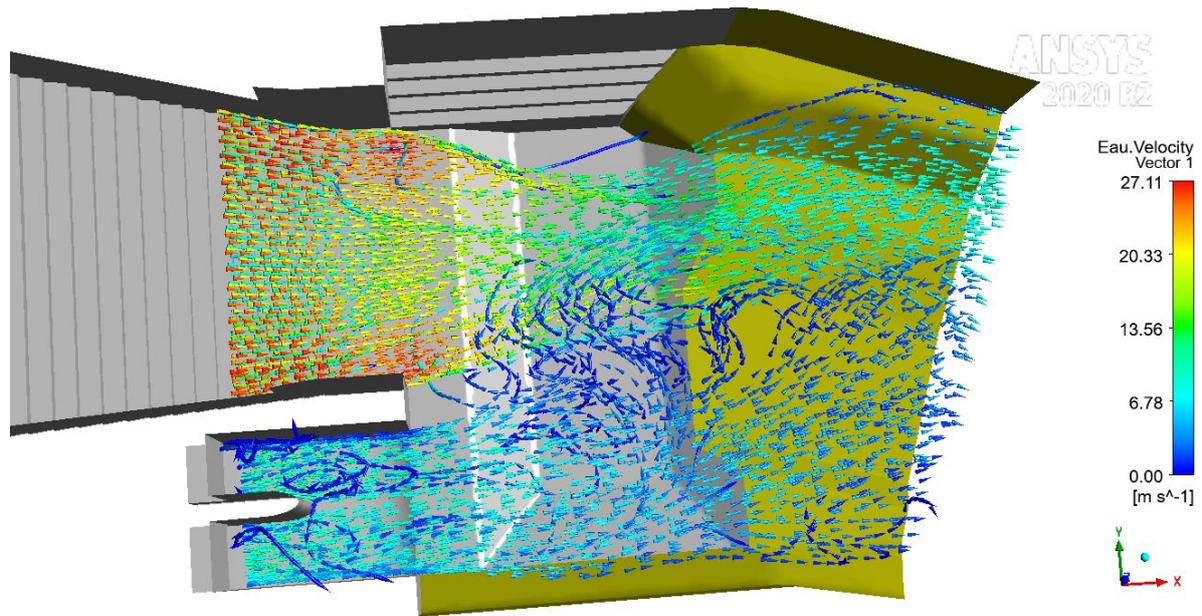


Figure 70 – Lignes de courant et vitesses dans le bassin – Fosse excavée– Crue 3

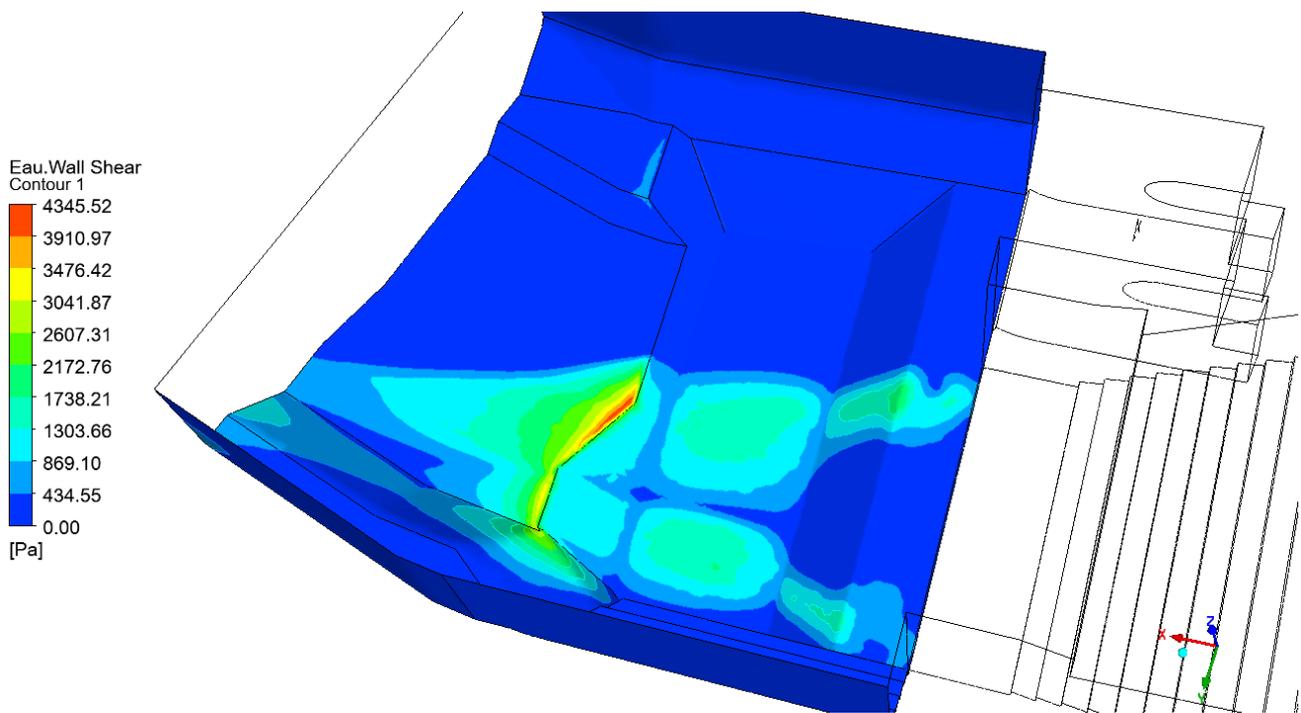


Figure 71 – Contrainte de cisaillement dans le bassin – Crue 3

Ces résultats montrent que :

- L'écoulement issu des galeries est fortement ralenti en raison du niveau aval haut
- Le cisaillement au fond du bassin est maximal en sortie de la fosse

5.4.5 RISQUE D'ÉROSION PAR CAVITATION

La figure ci-dessous présente la répartition de la pression sur les marches. L'unique zone concernée par une pression négative est située entre les marches 5 et 6 à l'aval du seuil de l'évacuateur : la pression minimale y est de -30 kPa. Cette dépression est due au décollement de la lame d'eau induite par le changement de pente du coursier à cet endroit.

La répartition de l'indice de cavitation donnée dans la figure suivante montre des valeurs supérieures à 0,5 dans le crouser sauf dans la zone située entre les marches 5 et 6. Le phénomène de cavitation ne pourrait concerner que cette région. L'indice de cavitation y est cependant supérieur à 0,3. Le risque d'endommagement par cavitation est donc écarté selon les critères considérés (cf. §4).

La vitesse moyenne considérée dans le calcul de l'indice de cavitation est obtenue au droit de la marche n°23 du coursier où la vitesse de l'écoulement est la plus élevée : $V_{moy} = 21,20$ m/s.

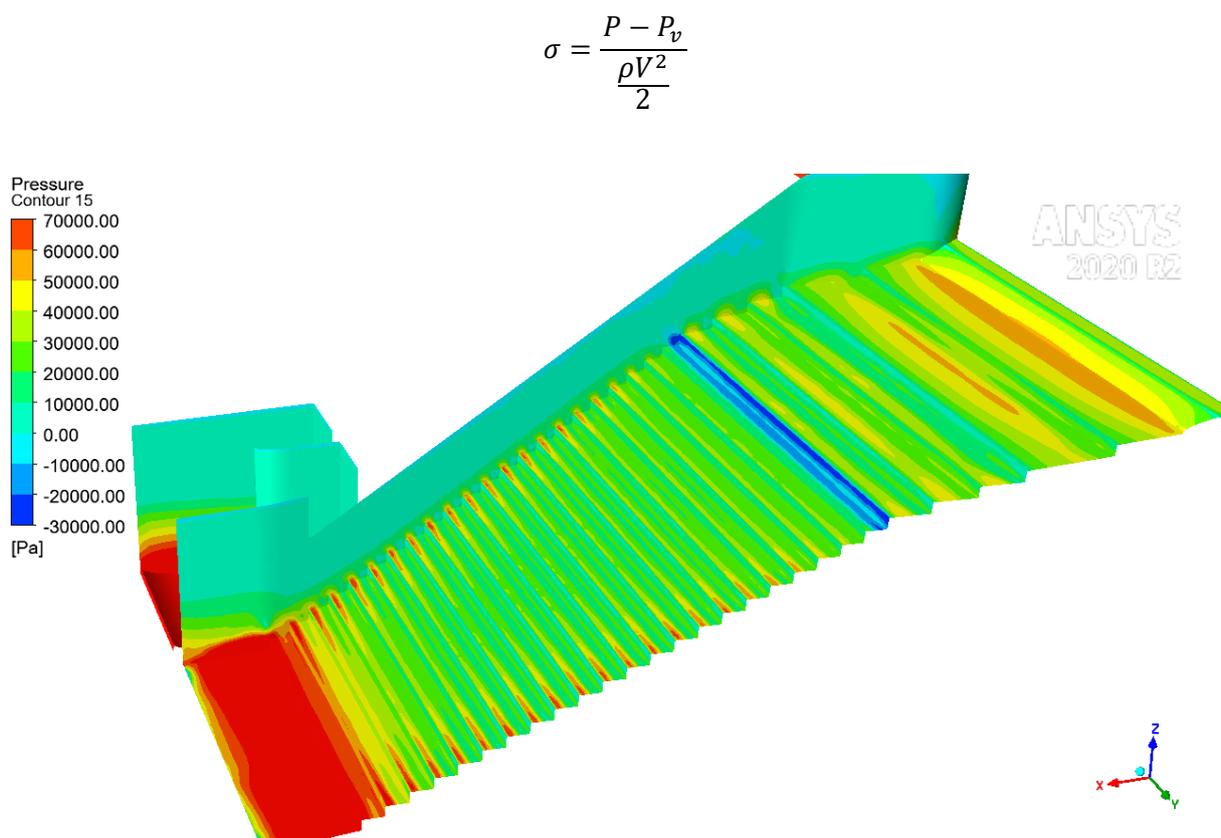


Figure 72 – Pression sur les parois du coursier – Crue 3

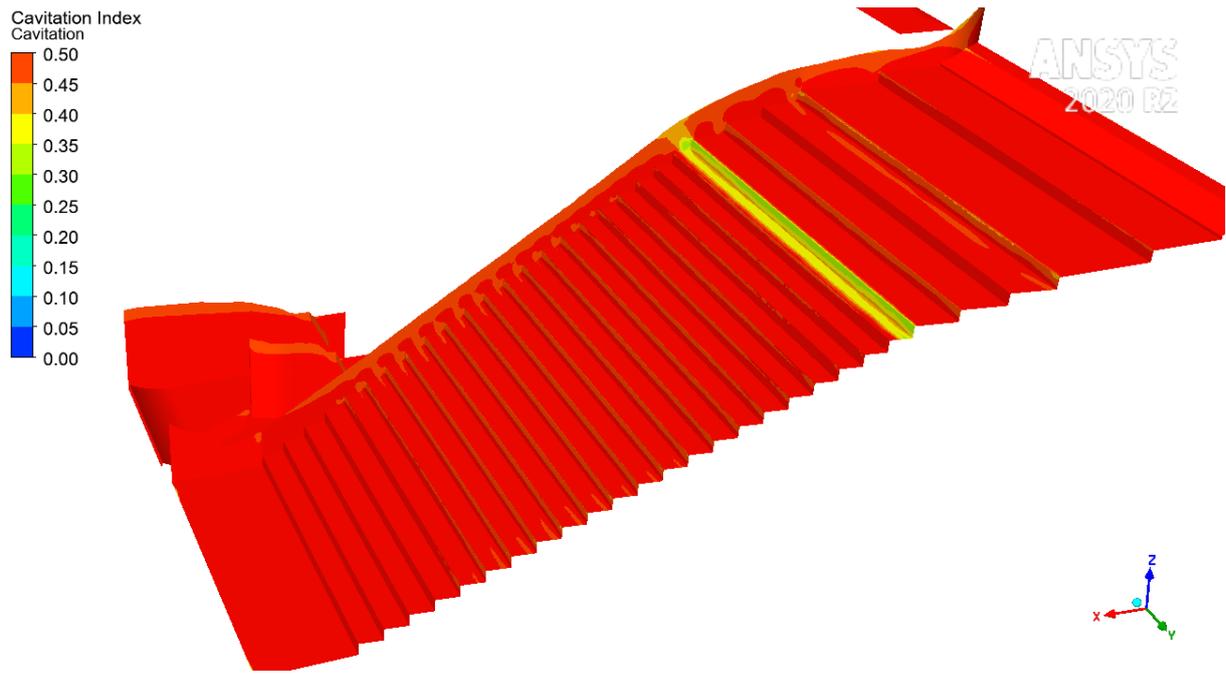


Figure 73 – Indice de cavitation sur le coursier – Crue 3

6 LAMINAGE DES CRUES AVEC LA NOUVELLE LOI D'EVACUATION

La courbe de tarage déduite de la modélisation 3D a été introduite dans le modèle de laminage pour apprécier les conditions d'évacuation des crues exceptionnelle et extrême.

Le graphique suivant présente le laminage de la crue exceptionnelle (Q10 000 ans).

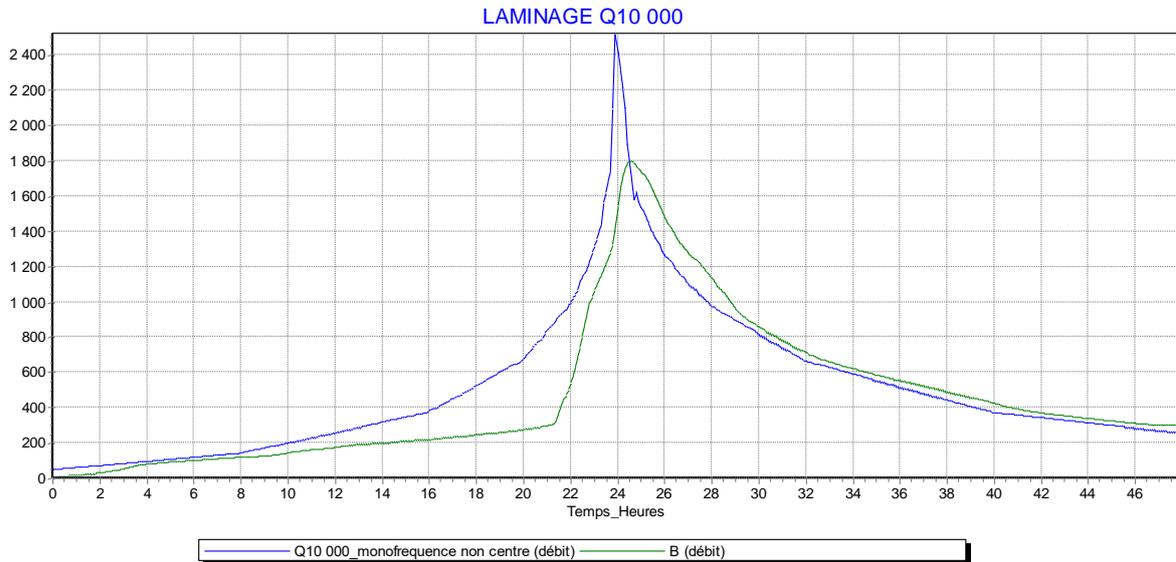


Figure 74 – Laminage Q10 000 avec loi HQ du modèle 3D

Le graphique suivant présente le laminage de la crue extrême (affine 1,3 x Q10 000 ans).

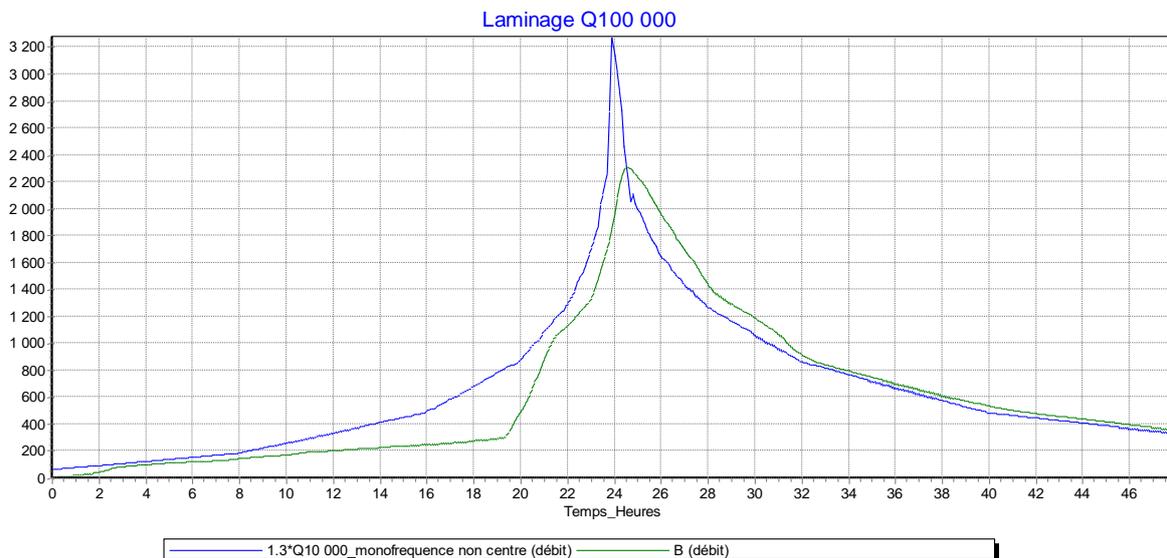


Figure 75 – Laminage 1,3 x Q10 000 avec loi HQ du modèle 3D

Le tableau suivant présente les résultats obtenus.

Tableau 8 – Laminage avec loi HQ du modèle 3D

Situation	Débit de pointe entrant	Débit de pointe sortant	Débit sur le nouvel évacuateur	Débit sortant des galeries	Cote maximale de retenue
10 000	2 520 m ³ /s	1 800 m ³ /s	880 m ³ /s	920 m ³ /s	267,04 m NGF
1,3 Q10 000	3 280 m ³ /s	2 310 m ³ /s	1380 m ³ /s	930 m ³ /s	268,64 m NGF

La cote atteinte pour la crue exceptionnelle est de 267,04 m NGF (contre 267,2 m NGF dans la configuration de la AVP).

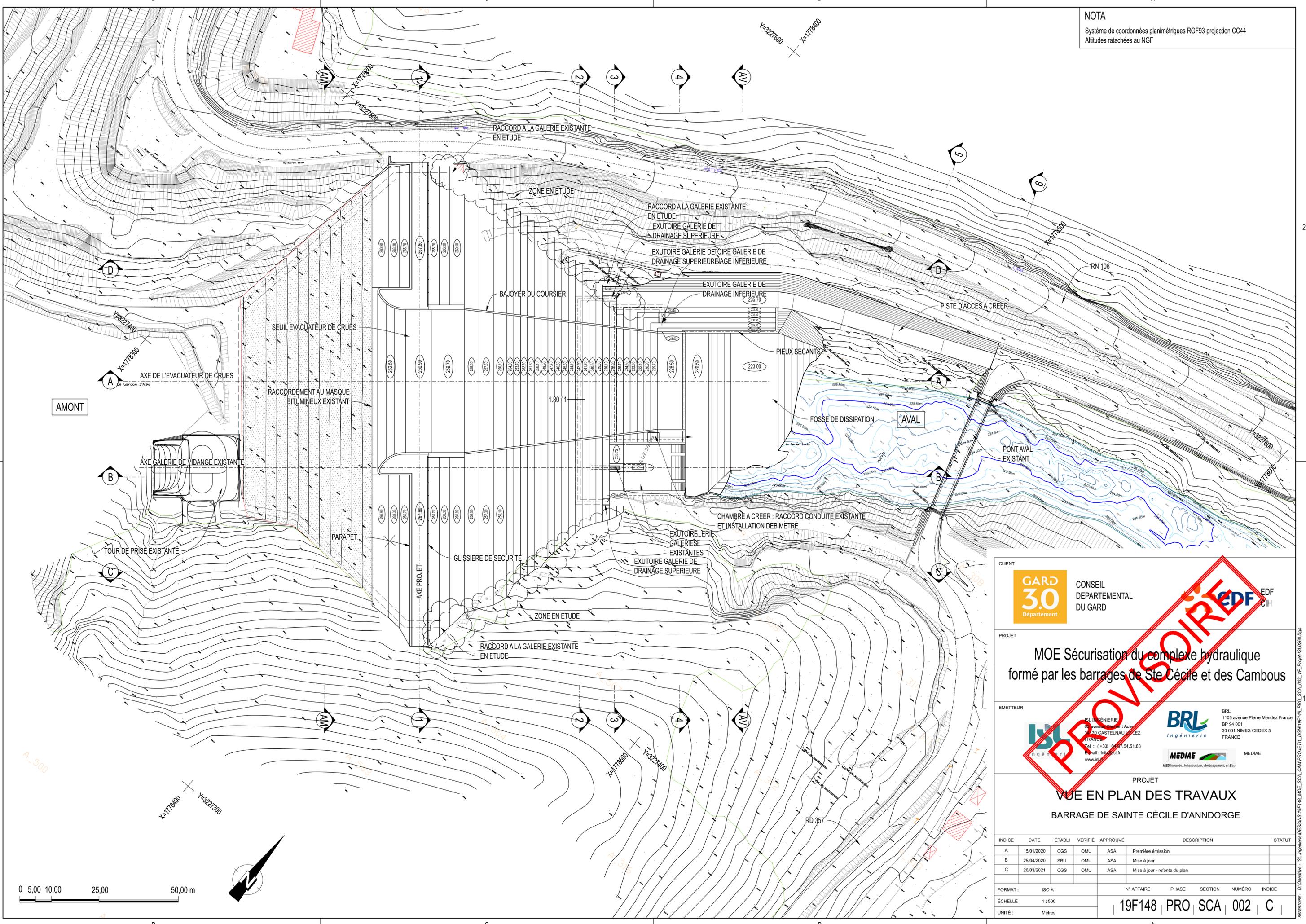
La cote atteinte pour la crue extrême est de 268,64 m NGF (contre 268,8 m NGF dans la configuration de la AVP) soit +1,6 m au-dessus des PHE.

A titre de comparaison, les caractéristiques topographiques actuelles du barrage sont les suivantes :

- cote de crête du barrage : entre 267,2 et 267,5 m NGF ;
- cote de l'arase supérieure du parapet : entre 268,1 et 268,3 m NGF ;
- cote de la RN106 au contact du barrage : 267,6 m à 267,8 NGF (topographie 2020).

ANNEXE 1 PLANS

NOTA
Système de coordonnées planimétriques RGF93 projection CC44
Altitudes rattachées au NGF



CLIENT
GARD 30 Département
CONSEIL DEPARTEMENTAL DU GARD

PROJET
MOE Sécurisation du complexe hydraulique formé par les barrages de Ste Cécile et des Cambous

EMETTEUR
ISL Ingénierie
1105 avenue Pierre Mendès France
30070 CASTELNAU LEZ LEZ
FRANCE
Tel : (+33) 04 67 54 51 88
E-mail : info@isl.fr
www.isl.fr

BRL Ingénierie
1105 avenue Pierre Mendès France
BP 94 001
30 001 NIMES CEDEX 5
FRANCE

MEDIAE
Méditerranée, Infrastructures, Aménagement, et Eau

PROJET
VUE EN PLAN DES TRAVAUX
BARRAGE DE SAINTE CÉCILE D'ANNORGE

INDICE	DATE	ÉTABLI	VÉRIFIÉ	APPROUVÉ	DESCRIPTION	STATUT
A	15/01/2020	CGS	OMU	ASA	Première émission	
B	25/04/2020	SBU	OMU	ASA	Mise à jour	
C	26/03/2021	CGS	OMU	ASA	Mise à jour - refonte du plan	

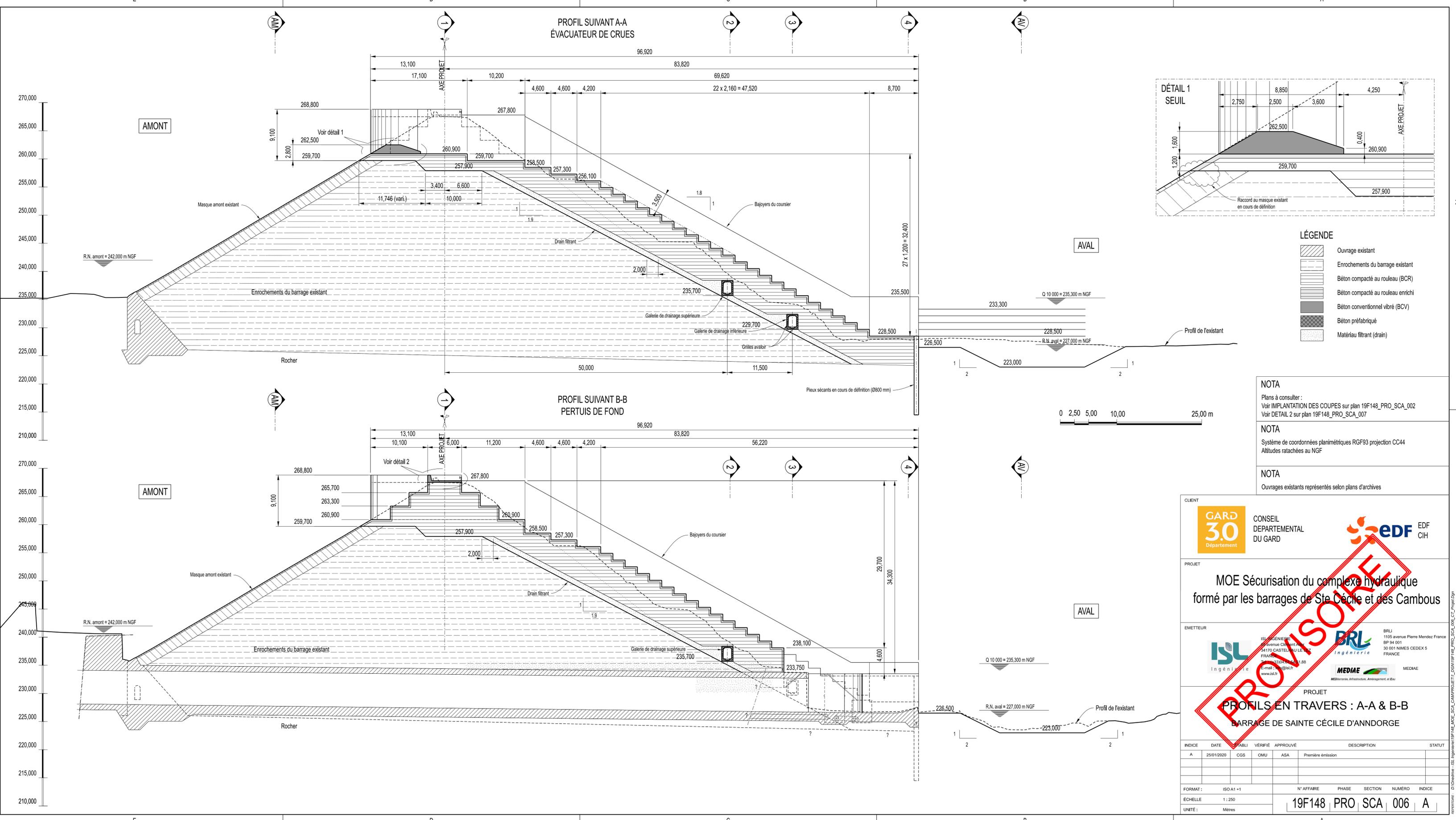
FORMAT : ISO A1
ECHELLE : 1 : 500
UNITÉ : Mètres

N° AFFAIRE : 19F148
PHASE : PRO
SECTION : SCA
NUMÉRO : 002
INDICE : C

PROVISOIRE



référence : D:\Creative - ISL Ingénierie\DESSINS\19F148_MOE_SCA_CAMP\PROJETI_DGN\19F148_PRO_SCA_002_VP_ProjetI\02080.Dgn



- LÉGENDE**
- Ouvrage existant
 - Enrochements du barrage existant
 - Béton compacté au rouleau (BCR)
 - Béton compacté au rouleau enrichi
 - Béton conventionnel vibré (BCV)
 - Béton préfabriqué
 - Matériau filtrant (drain)

NOTA
Plans à consulter :
Voir IMPLANTATION DES COUPES sur plan 19F148_PRO_SCA_002
Voir DETAIL 2 sur plan 19F148_PRO_SCA_007

NOTA
Système de coordonnées planimétriques RGF93 projection CC44
Altitudes rattachées au NGF

NOTA
Ouvrages existants représentés selon plans d'archives

CLIENT

CONSEIL DEPARTEMENTAL DU GARD

EDF CIH

PROJET

MOE Sécurisation du complexe hydraulique formé par les barrages de Ste Cécile et des Cambous

EMETTEUR

ISL Ingénierie
14170 CASTELMAU LEZ LEZ
FRANCE
T: +33(0)4 67 53 18 88
E-mail: info@isl.fr
www.isl.fr

BRL Ingénierie
BRL
1105 avenue Pierre Mendès France
BP 94 001
30 001 NIMES CEDEX 5
FRANCE

MEDIAE
MEDIAE
MEDIAE, Infrastructure, Aménagement, et Eau

PROJET

PROFILS EN TRAVERS : A-A & B-B

BARRAGE DE SAINTE CÉCILE D'ANNORGE

INDICE	DATE	ÉLABI	VÉRIFIÉ	APPROUVÉ	DESCRIPTION	STATUT
A	25/01/2020	CGS	OMU	ASA	Première émission	

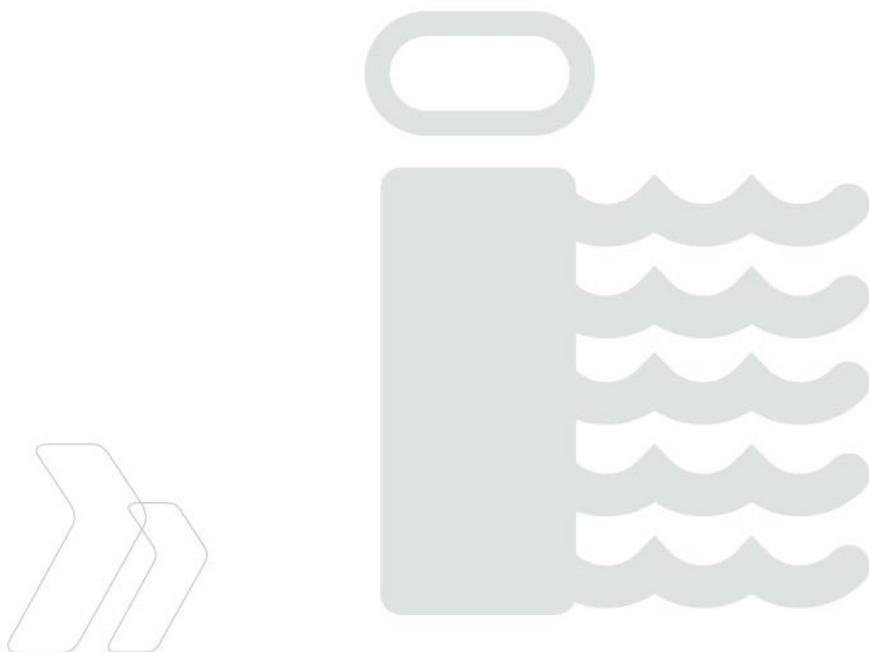
FORMAT :	ISO A1 + 1	N° AFFAIRE :	19F148	PHASE :	PRO	SECTION :	SCA	NUMÉRO :	006	INDICE :	A
ÉCHELLE :	1 : 250										
UNITÉ :	Mètres										



D:\Ouvrages - ISL Ingénierie\19F148_MOE_SCA_CAMP\PROJET\19F148_PRO_SCA_006_CT_Proyet.Dgn

ANNEXE 9 RAPPORT D'ETUDE DES TASSEMENTS ET THERMOMECHANIQUE

Infrastructures
Aménagements
hydrauliques



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

Note de calcul mécanique et thermo-mécanique du
masque



Rapport n° : 19F-148-RM-15

Révision n° : A

Date : 20/08/2021

Votre contact :
Moez JELLOULI
jellouli@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



MEDiterrannée, Infrastructure, Aménagement, et Eau



Ingénierie



Ingénierie

Visa

Document verrouillé du 20/08/2021.

Révision	Date	Auteur	Chef de Projet	Superviseur	Commentaire
A	20/08/2021	MJE	ASA	ASA	

ASA : SALMI Akim

MJE : JELLOULI Moez

Rapport ISL
19F-148-RM-15
Revision A

<http://www.isl.fr/r.php?c=205874>



SOMMAIRE

1	OBJET DU RAPPORT	1
2	DONNEES D'ENTREE	2
2.1	GEOMETRIE	2
2.1.1	COUPE TRANSVERSALE	2
2.1.2	ESPACEMENT DES JOINTS	3
2.2	EVALUATION DU TASSEMENT DU REMBLAI	4
2.2.1	DEMARCHE PROPOSEE	4
2.2.2	TASSEMENT SOUS POIDS PROPRE DU REMBLAI	4
2.2.2.1	Données bibliographiques	4
2.2.2.2	Analyse et prévision des tassements	7
2.2.3	TASSEMENT AU PREMIER REMPLISSAGE - COMPARAISON A D'AUTRES BARRAGES A MASQUE	9
2.2.4	TASSEMENT SOUS CHARGE SISMIQUE	11
2.2.4.1	SES réglementaire	11
2.2.4.2	Résultats des essais de compactage par vibration	11
2.2.4.3	Estimations à partir des formules empiriques	14
2.2.4.4	Conclusion - valeur à retenir	14
2.2.5	TASSEMENT SOUS SURCHARGE DU BCR	14
2.2.6	TASSEMENT SOUS IMBIBITION	14
2.2.7	CONCLUSION	16
2.3	DONNEES D'ENTREE POUR LE CALCUL THERMO-MECANIQUE	16
2.3.1	PHASAGE DE CONSTRUCTION	16
2.3.2	FORMULATIONS DU BCR	17
2.3.3	TEMPERATURE DU BCR A LA MISE EN PLACE	17
2.3.4	CHALEUR D'HYDRATATION DU BCR	17
2.3.5	CARACTERISTIQUES THERMIQUES ET MECANQUES DU BCR	19
2.3.6	TEMPERATURE EXTERIEURE	20
2.3.7	VENT	20
2.3.8	ENSOLEILLEMENT	21
3	CALCUL THERMO-MECANIQUE	23

3.1	OBJECTIFS	23
3.2	DESCRIPTION DU MODELE	24
3.2.1	MAILLAGE	24
3.2.2	INTERFACES	25
3.2.3	REFERENCE DES AXES	25
3.2.4	CONDITIONS AUX LIMITES	25
3.2.5	INITIALISATION ET CALCUL TRANSITOIRE	26
3.3	PLANNING DE MISE EN PLACE DU BCR	26
3.4	RESULTATS DU CALCUL THERMIQUE	28
3.4.1	ISOVALEURS DES TEMPERATURES MAXIMALES	28
3.4.2	TEMPERATURES AU PREMIER HIVER APRES LA FIN DE CONSTRUCTION	29
3.4.3	TEMPERATURES AU DERNIER HIVER CALCULE	30
3.4.4	EVOLUTION TEMPORELLE DES TEMPERATURES	31
3.5	CALCULS MECANQUES ET INTERPRETATION	34
3.5.1	CRITERES DE FISSURATION CONSIDERES	34
3.5.2	PREMIER HIVER – TRACTION DE PEAU	35
3.5.2.1	Direction rive à rive	35
3.5.2.2	Direction parallèle aux joints	36
3.5.2.3	Analyse au premier hiver	37
3.5.3	CONTRAINTES DE TRACTION A LONG TERME	38
3.5.3.1	Direction rive à rive	38
3.5.3.2	Direction parallèle aux joints	39
3.5.3.3	Analyse des contraintes à long terme	40
3.6	DEPLACEMENTS MAXIMAUX AUX JOINTS	40
3.7	CONCLUSIONS DES CALCULS THERMO-MECANQUES	40
4	CALCUL DES TASSEMENTS	41
4.1	OBJECTIFS	41
4.2	DESCRIPTION DU MODELE	41
4.2.1	GEOMETRIE MODELISEE	41
4.2.2	MAILLAGE	42
4.2.3	INTERFACES	44
4.2.4	PROPRIETES DES MATERIAUX	44
4.2.4.1	BCR	44
4.2.4.2	Remblais	44

4.2.4.3	Fondation rocheuse	45
4.2.5	REFERENCE DES AXES	45
4.2.6	CONDITIONS AUX LIMITES	45
4.2.7	CHARGEMENTS APPLIQUES	46
4.2.7.1	Poids propre du BCR	46
4.2.7.2	Tassement des remblais	46
4.2.7.3	Remplissage de la retenue	46
4.2.8	PHASAGE DES CALCULS	47
4.3	ANALYSE DES RESULTATS	48
4.3.1	DEFORMEE DU BARRAGE	48
4.3.2	ORIENTATION DES CONTRAINTES PRINCIPALES	49
4.3.3	CONTRAINTES DE COMPRESSION	51
4.3.4	CONTRAINTES DE TRACTION	52
4.3.5	DEPLACEMENTS AUX JOINTS	54
5	SYNTHESE ET CONCLUSIONS	56

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 1 REFERENCES

TABLE DES FIGURES

Figure 1 - Coupe transversale du barrage au droit de l'évacuateur de crues après confortement	2
Figure 2 - Coupe transversale du barrage après confortement	2
Figure 3 – Géométrie modifiée en crête	3
Figure 4 – Vue en plan – espacement entre joints	3
Figure 5 : Implantation des repères de suivi topographique	5
Figure 6 : tassement des repères sur le parement aval (source BRLi)	5
Figure 7 : Localisation des 3 repères utilisés pour prévoir les tassements	7
Figure 8 : Tassements observés au droit de 3 repères depuis 45 ans	8
Figure 9 : Comparaison à des barrages en enrochements où un tassement moyennement important a été mesuré (Hunter 2003, réf. [3])	9
Figure 10 : Comparaison à d'autres barrages en enrochements à masque ayant un tassement faible (Hunter 2003)	10

Figure 11 : Granulométrie reconstitué (après préparation) et après essai de vibration (après oedomètre 2)	12
Figure 12 : Essai de vibration - accélération mesurée en tête de la colonne de sol	12
Figure 13 – Tassement mesuré (LNEC) – affichage en échelle log et linéaire	13
Figure 14 – BCR mis en place pendant la première année	16
Figure 15 – BCR mis en place pendant la deuxième année	17
Figure 16 – Chaleur dégagée lors de la prise du BCR	18
Figure 17 – Puissance thermique dégagée à la prise du BCR	18
Figure 18 – Réchauffement adiabatique du BCR	19
Figure 19 – Températures mensuelles moyennes sur le site du barrage	20
Figure 20 – Vent moyenné sur 10 min à la station météo de Montpellier	21
Figure 21 – Flux solaire moyen mesuré à la station météo de Montpellier	21
Figure 22 – Pourcentage d'absorption du flux solaire selon l'inclinaison de la surface – sud de la France	22
Figure 23 – Exemple illustratif : refroidissement en peau du BCR avec un cœur encore chaud	23
Figure 24 – Exemple illustratif : schéma de fissuration à long terme avec un refroidissement générale du BCR	23
Figure 25 – Vu du maillage thermique	24
Figure 26 – Vu du maillage mécanique pour un plot d'évacuateur (gauche) et un plot hors évacuateur (droite)	24
Figure 27 – Planning prévisionnel de mise en place du BCR	26
Figure 28 – Vitesse moyenne de mise en place des couches de BCR	27
Figure 29 – Isovaleurs des températures maximales atteintes nœud par nœud	28
Figure 30 – Isovaleurs des températures au premier hiver après la construction de la carapace BCR	29
Figure 31 – Isovaleurs des températures au dernier hiver simulé	30
Figure 32 – Emplacement des points de suivi de la température	31
Figure 33 – Evolution temporelle des températures au point P1	31
Figure 34 – Evolution temporelle des températures au point P2	32
Figure 35 – Evolution temporelle des températures au point P3	32
Figure 36 – Evolution temporelle des températures au point P4	33
Figure 37 – Contraintes de traction dans la direction rive à rive au premier hiver	35
Figure 38 – Contraintes de traction dans la direction parallèle aux joints au premier hiver	36
Figure 39 – Contraintes de traction dans la direction rive à rive à long terme	38
Figure 40 – Contraintes de traction dans la direction parallèle aux joints à long terme	39
Figure 41 – Modèle de tassement – géométrie modélisée	42
Figure 42 – Modèle de tassement – vue 3D du maillage	43

Figure 43 – Modèle de tassement – maillage en coupe transversale	43
Figure 44 – Résultats de l'essai œdométrique (LNEC, réf. [2])	45
Figure 45 – Modèle de tassement – pressions appliquées sous chargement PHE	47
Figure 46 – Déplacements verticaux sous poids du BCR	48
Figure 47 – Déplacements verticaux sous poids du BCR + poussée PHE	48
Figure 48 – Déplacements verticaux avec cumul de tous les tassements + poussée PHE	49
Figure 49 – Orientation des contraintes principales	50
Figure 50 – Tractions et cisaillements importants avec l'ancienne géométrie à marches de 2,4 m	50
Figure 51 – Contraintes principales de compression, phase par phase	51
Figure 52 – Contraintes principales de traction, phase par phase	53
Figure 53 – Contraintes rive à rive sous le plot en extrémité de l'évacuateur	54
Figure 54 – Points de suivi de l'ouverture des joints	54

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Tassements le long de la ligne amont/aval depuis 1967 (repère 74 à 428)	6
Tableau 2 : Tassements le long de la ligne amont/aval depuis 1967 (repère 75 à 427)	6
Tableau 3 : Tassement au droit des 3 repères de référence	7
Tableau 4 : Prévision de tassement au droit des 3 repères de référence	8
Tableau 5 : Caractéristiques des barrages de qualité (tassement moyennement important)	9
Tableau 6 : Caractéristiques des barrages ayant un tassement faible (Hunter 2003)	10
Tableau 7 : Caractéristiques thermiques et mécaniques retenues pour BCR	19
Tableau 8 : Calculs thermiques – températures clés aux points de suivi	33
Tableau 9 : Paliers de traction considérés pour estimer la fissuration du BCR	34
Tableau 10 : Ouvertures calculées aux joints	40
Tableau 11 : Déplacements calculés aux joints	55

|

1 OBJET DU RAPPORT

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 présente les hypothèses et les résultats des calculs thermomécaniques 3D prévus pour le barrage de Sainte-Cécile d'Andorge et leur prise en considération pour la conception de l'aménagement (avec la recharge en BCR).

Cette modélisation poursuit les objectifs suivants :

- Etudier l'impact des tassements sur la recharge en BCR :
 - Tassement résiduel par fluage du remblai sous son poids propre,
 - Tassement sous l'effet du premier remplissage,
 - Tassement au séisme,
 - Tassement sous le poids du BCR,
 - Tassement lors de déversement par imbibition du remblai en partie inférieure :
 - lors des crues exceptionnelles (remontée via les galeries de drainage) et éventuelles vibrations,
 - en cas de défaillance de l'étanchéité du masque ;
- Etudier/apprécier l'effet des joints et leur comportement (ouverture, compression, glissement) ;
- Etudier les contraintes thermiques dans le BCR lors de la dissipation de la chaleur d'hydratation après mise en œuvre ;
- Analyser les conséquences de ces phénomènes (en déplacement et en contrainte) et si nécessaire, proposer et justifier les dispositions permettant de les minimiser.

2 DONNEES D'ENTREE

2.1 GEOMETRIE

2.1.1 COUPE TRANSVERSALE

La géométrie de référence considérée est celle définie par le plan 19F148-PRO-SCA-006-A (version provisoire du 25/01/2020). Les deux figures ci-dessous montrent deux coupes transversales, la première au droit de l'évacuateur de crue et la deuxième en dehors de l'emprise de l'évacuateur de crues.

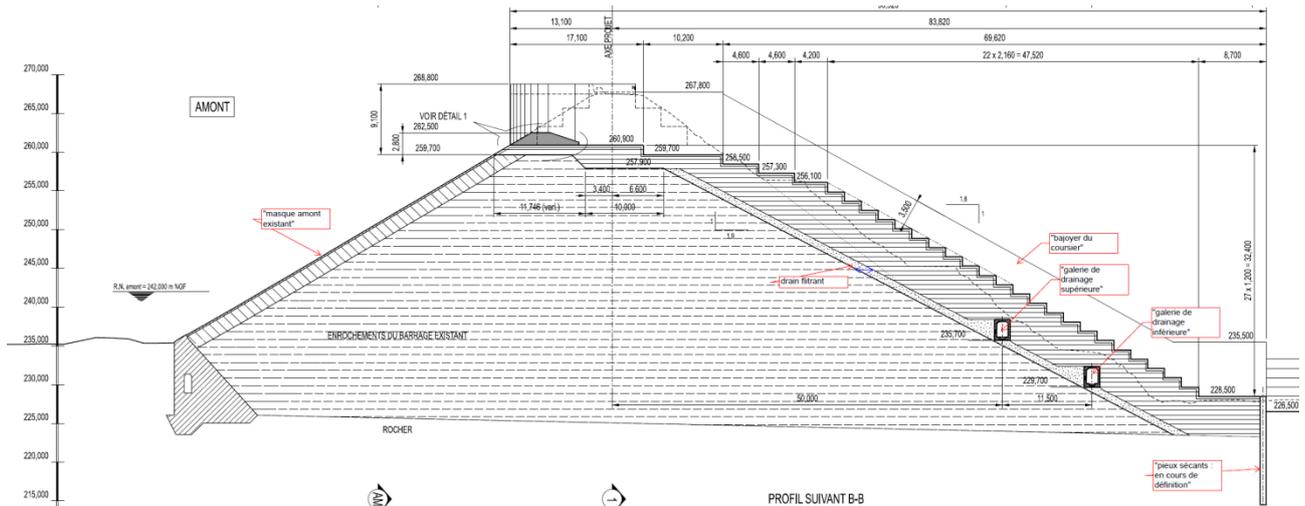


Figure 1 - Coupe transversale du barrage au droit de l'évacuateur de crues après confortement

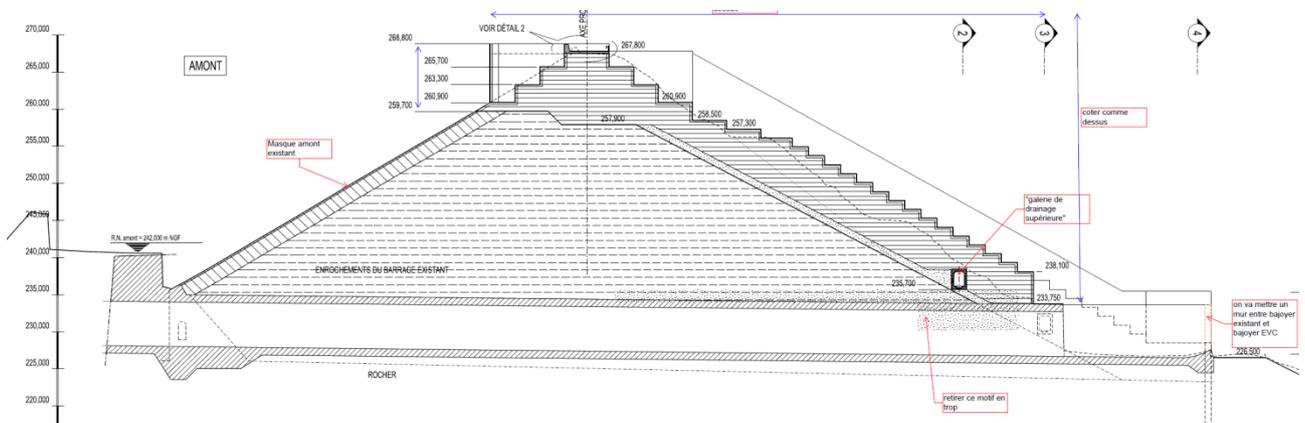


Figure 2 - Coupe transversale du barrage après confortement

Les premiers résultats des calculs pour ces géométries ont montré un risque de fissuration dans la zone d'épaisseur faible du BCR (trait rouge dans la figure ci-dessous). En concertation avec l'AMO (EDF CIH), les marches de 2,4 m ont donc été remplacées par des marches de hauteur 0,3 m à l'amont et 0,6 m à l'aval en respectant la pente moyenne indiquée par les traits bleus (Figure 3).

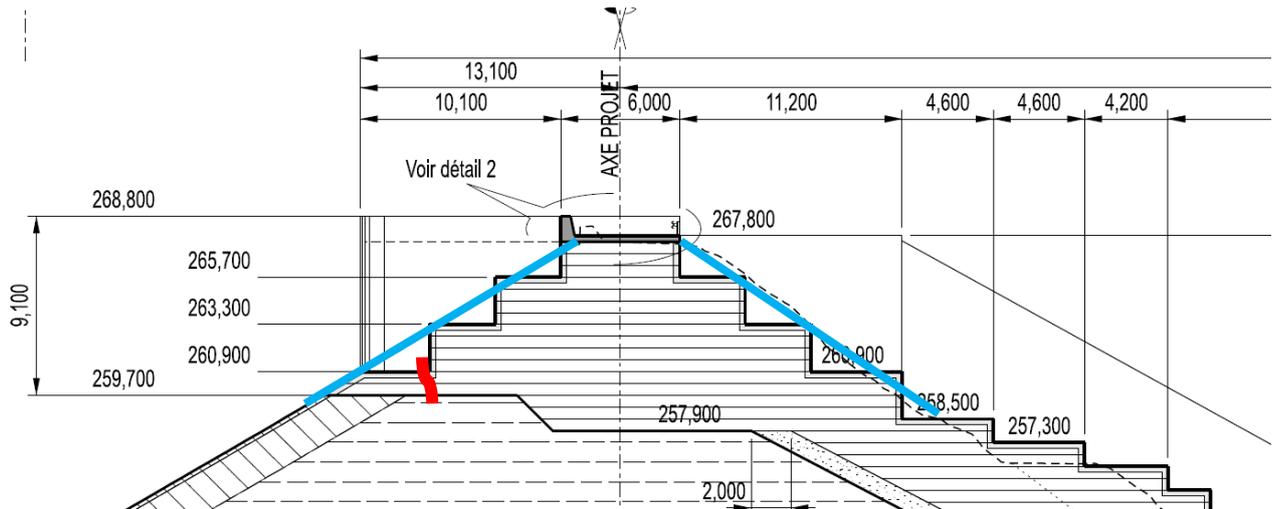


Figure 3 – Géométrie modifiée en crête

2.1.2 ESPACEMENT DES JOINTS

Le plan de calepinage des joints retenu après itérations du modèle est le suivant.

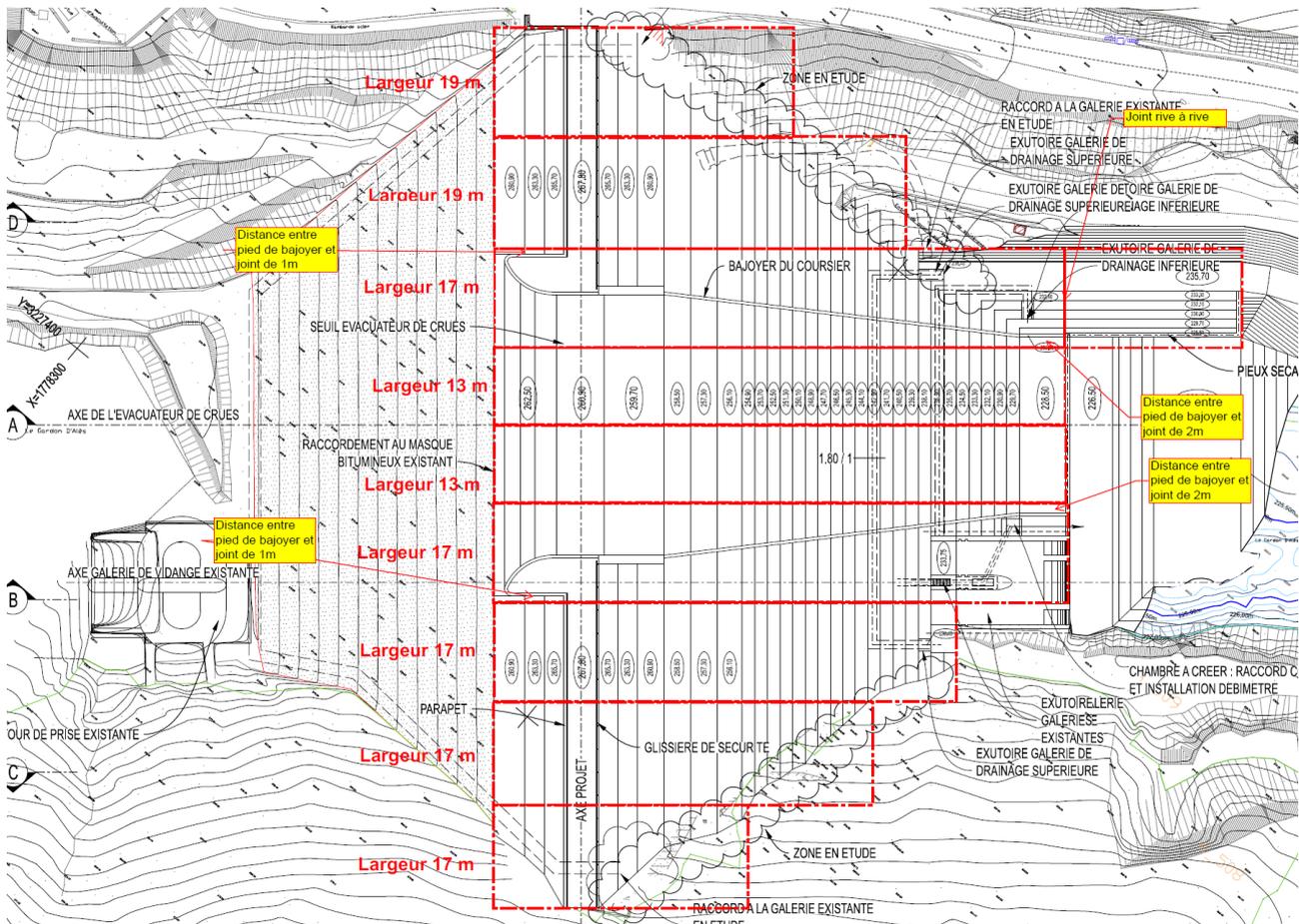


Figure 4 – Vue en plan – espacement entre joints

L'espacement maximal entre joints transversaux est de 19 m.

2.2 EVALUATION DU TASSEMENT DU REMBLAI

2.2.1 DEMARCHE PROPOSEE

La démarche proposée est de paramétrer, dans le modèle 3D, le tassement relatif du remblai sur la base d'une évaluation préalable des différents types de tassement attendus. Le présent paragraphe présente cette évaluation.

2.2.2 TASSEMENT SOUS POIDS PROPRE DU REMBLAI

2.2.2.1 Données bibliographiques

Le rapport de fin de chantier fait état de la pose de 5 sondes de mesure de tassement (téléniveaux) posées lors de la construction aux niveaux 236 m NGF (sommet de la plinthe) et 247 m NGF (mi-hauteur). La mesure était basée sur le principe simple des vases communicants avec des tubes en matière plastique reliés par un jeu de robinets à deux tubes en verre gradués situés dans deux cabines de protection à l'aval du barrage. Il ne reste aujourd'hui aucune trace de ces dispositifs. Par ailleurs, le rapport de fin de chantier ne présente aucune conclusion relative à ce dispositif (tassement en phase chantier) et les archives ne font malheureusement état d'aucune mesure relative à ce dispositif.

Aujourd'hui, les déplacements du barrage sont surveillés :

- en planimétrie et altimétrie par :
 - 15 cibles sur le masque amont réparties sur 3 niveaux,
 - 1 cible sur la tour de prise,
 - 2 cibles extérieures de fermeture,
- en altimétrie uniquement par 25 repères de nivellement sur le couronnement et les risbermes aval du barrage.

Les données disponibles sont discontinues avec les périodes : 1966 à 1990, 1994 et 1997 à 2020.

Les cibles et repères de nivellement du barrage ont fait l'objet d'une nouvelle dénomination à partir de 1996, semble-t-il au cours de la réfection du masque amont. Pour certains repères, ce changement de référence a été accompagné d'un changement d'implantation, y compris pour les repères situés sur le talus aval, non concernés par les travaux du masque amont.

Le maître d'ouvrage ne dispose pas à ce jour de données fiables permettant de recalculer les données topographiques des repères postérieurs à 1996 avec les données topographiques des repères antérieurs à cette date. ISL a proposé un recalage permettant d'assurer une continuité dans la cinétique des tassements constatés depuis la construction.

Les implantations de ces repères sont présentées sur l'extrait de plan suivant issu du rapport d'auscultation 2010.

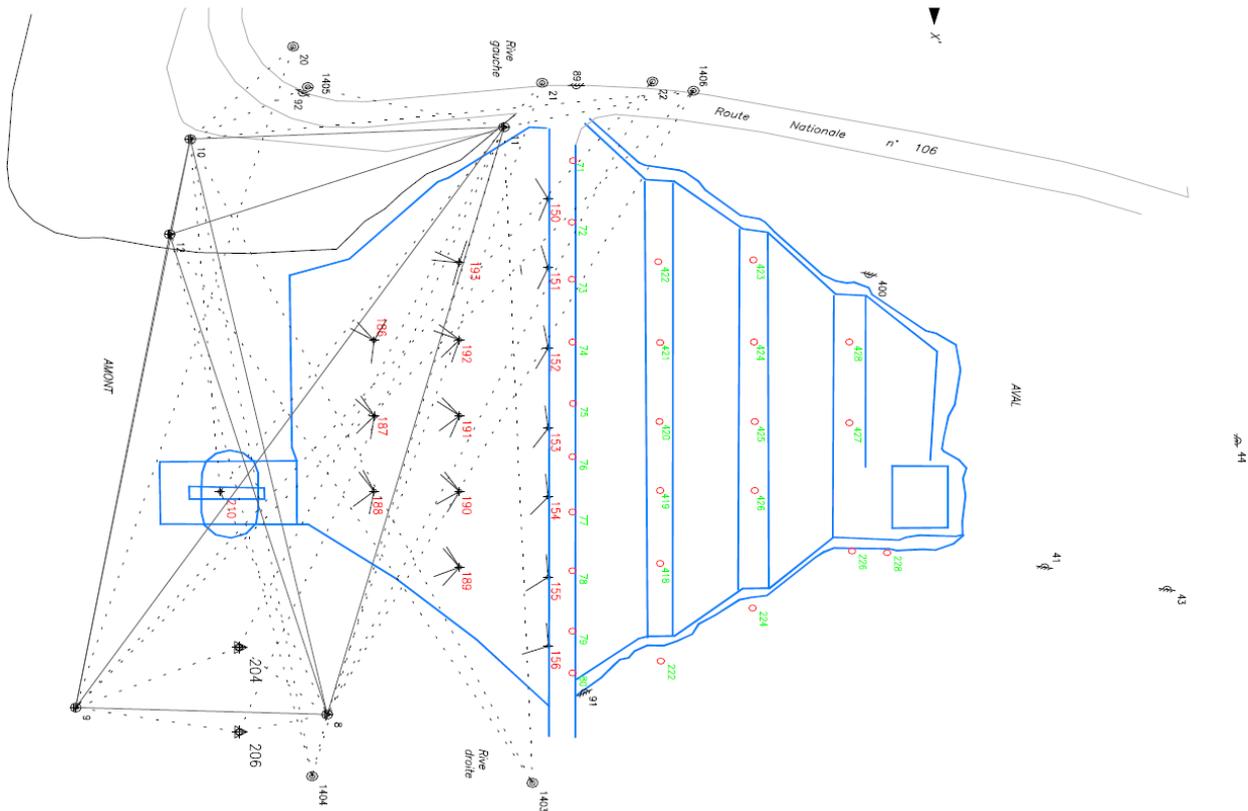


Figure 5 : Implantation des repères de suivi topographique

La figure suivante est issue du rapport d'auscultation de 2012. Elle présente l'évolution de l'altimétrie des repères situés sur la face aval de 1967 à 2012. Le côté vertical du quadrillage représente un tassement de 10 cm. Les tassements maximaux ont été logiquement observés en crête au centre de la vallée. En 45 ans, le tassement maximal observé est de 13 cm en crête en partie centrale du barrage soit environ 0,3 % de la hauteur.

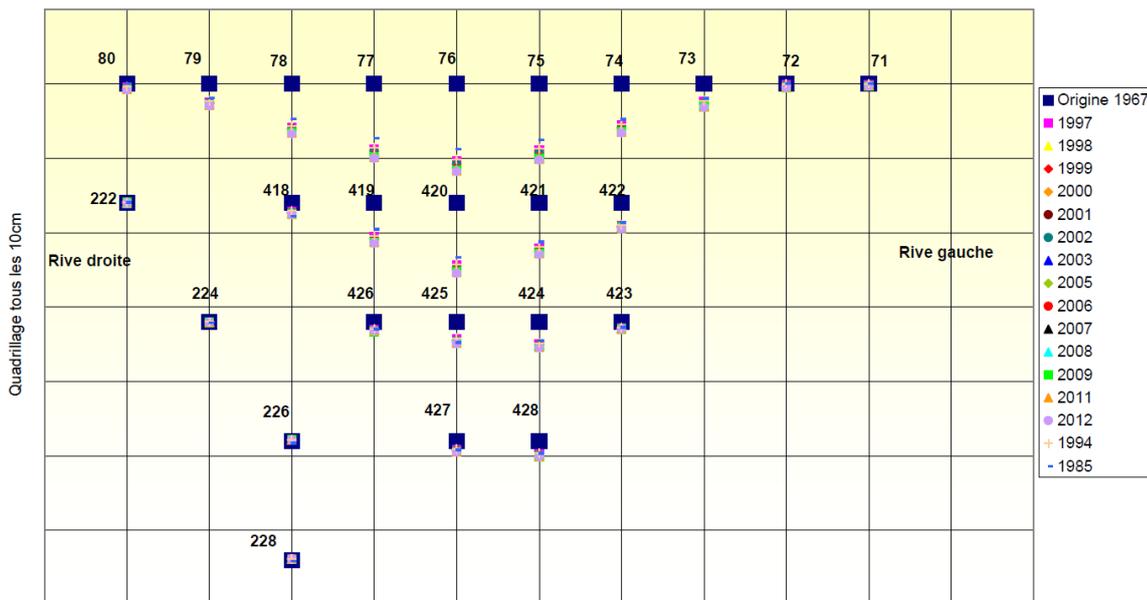


Figure 6 : tassement de 1967 à 2012 des repères sur le parement aval (source BRLi)

Depuis la réfection du masque en 1996, les tassements ont atteint une valeur de l'ordre de 14 mm en 13 ans soit environ 1 mm par an. Sur cette période récente, rapporté à la hauteur de remblai (45 m), le tassement moyen annuel est de l'ordre de 0,002 % ce qui est faible. En pratique, le tassement résiduel diminue au fil du temps et il est estimé aujourd'hui de l'ordre du millimètre par an.

Le tassement peut également être suivi de la crête au pied du barrage le long de deux lignes de repères amont/aval (ligne 74/421/424/428 et 75/420/425/427). Les tassements depuis 1967 sont figurés dans le tableau suivant.

Tableau 1 : Tassements le long de la ligne amont/aval de 1967 à 2012 (repère 74 à 428)

	Crête cote 267,5 m NGF	Risberme cote 256 m NF	Risberme cote 245 m NGF	Risberme cote 234 m NGF
Repère	74	421	424	427
Tassement	9,4 cm	7,3 cm	4,4 cm	1,6 cm

Tableau 2 : Tassements le long de la ligne amont/aval de 1967 à 2012 (repère 75 à 427)

	Crête cote 267,5 m NGF	Risberme cote 256 m NF	Risberme cote 245 m NGF	Risberme cote 234 m NGF
Repère	75	420	424	428
Tassement	12,5 cm	9,5 cm	4,4 cm	1,3 cm

Ces faibles tassements attestent de l'efficacité du compactage du remblai et de la qualité des matériaux.

2.2.2.2 Analyse et prévision des tassements

La méthode mise en œuvre vise à prévoir les tassements rive-rive et amont-aval en suivant 3 repères localisés sur la figure suivante.

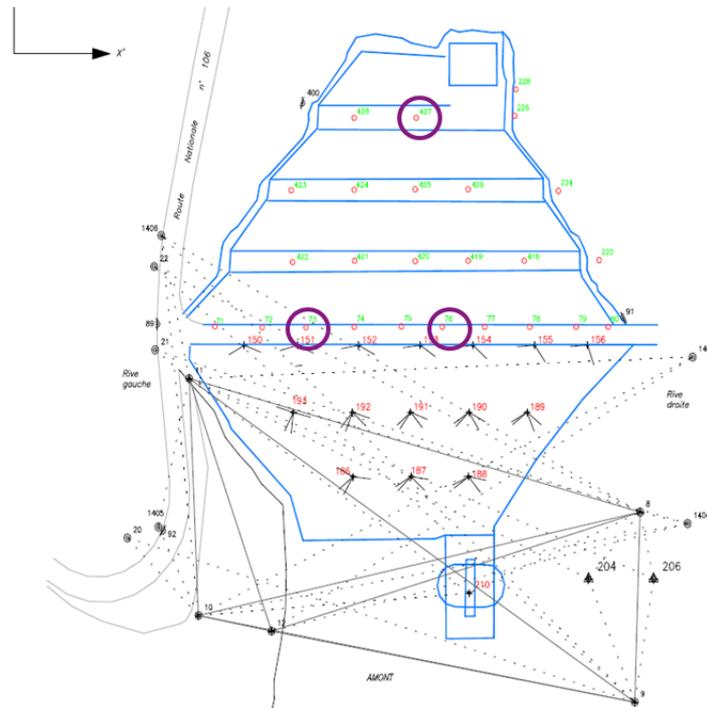


Figure 7 : Localisation des 3 repères utilisés pour prévoir les tassements

Le tableau ci-dessous présente le taux de tassement relatif cumulé depuis la construction de l'ouvrage pour ces repères.

Tableau 3 : Tassement au droit des 3 repères de référence

	h hauteur de remblai (m)	Δh Tassement depuis 1967 (cm)	Taux de tassement $\Delta h/h$ en 2012 (%)
Centre crête	45	13.1	0.29
Rive crête	34	6.8	0.20
Pied de digue	12	2.9	0.24

Le graphique suivant présente le taux de tassement de ces repères depuis la construction. Des courbes de tendance logarithmiques peuvent être appliquées sur les observations.

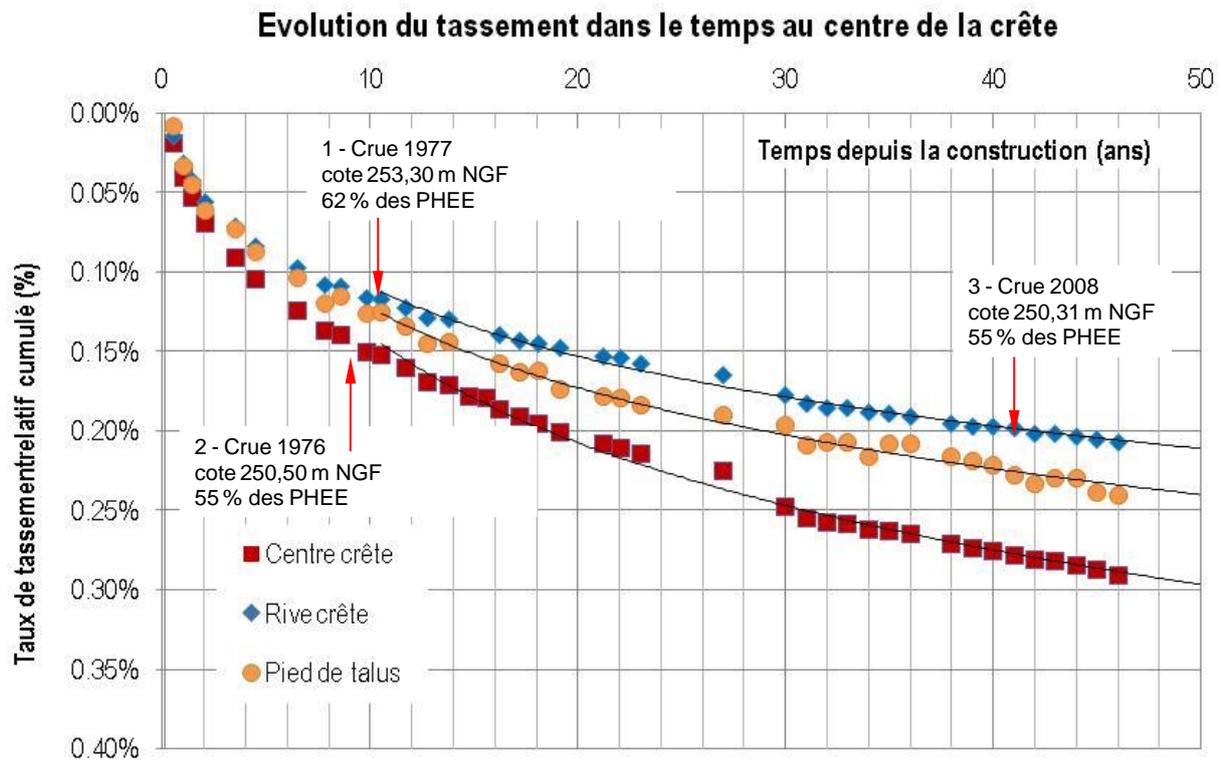


Figure 8 : Tassements observés au droit de 3 repères depuis 45 ans

Les tassements sont réguliers et les coefficients de corrélation sont de 99% pour les 3 courbes de tendance.

Sur ce graphique figurent également les dates d'occurrence des 3 crues ayant conduit aux remplissages les plus importants avec indication du % de la charge maximale (PHEE = 267,2 m NGF). Il apparaît que ces courtes sollicitations (quelques heures) n'ont pas eu d'influence sur le tassement du barrage.

Les courbes de tendance (logarithmiques) peuvent être exploitées pour prédire les tassements à long terme des 3 repères. Ces prédictions sont figurées dans le tableau suivant.

Tableau 4 : Prévision de tassement au droit des 3 repères de référence

Repère	hauteur de remblai (m)	Tassement depuis 1967 (cm)	Prévision dans 100 ans (cm) en l'an 2112	Taux dans 100 ans (cm) en l'an 2112
Centre crête	45	13.1	4.9	0,11%
Rive crête	34	6.8	2.5	0,07%
Pied de digue	12	2.9	1.0	0,08%

Sur un siècle, les tassements attendus sont estimés de l'ordre de 1 à 5 cm selon les repères.

Dans la suite de l'étude, on retiendra un tassement relatif attendu du remblai de 0,1%.

2.2.3 TASSEMENT AU PREMIER REMPLISSAGE - COMPARAISON A D'AUTRES BARRAGES A MASQUE

Les tassements constatés sur le barrage de Sainte Cécile ont été comparés à 17 barrages en enrochements à masque pour lesquels on dispose d'informations sur les tassements induits par le premier remplissage. Les caractéristiques principales de ces barrages et la présentation de leurs tassements sont insérées dans les pages suivantes.

Les barrages retenus se classent dans la catégorie des barrages bien compactés avec des matériaux d'une qualité moyenne à élevée ($20 < R_c < 70$ MPa). On rappelle que les résistances à la compression mesurées sur les enrochements de Ste-Cécile sont comprises entre 23 et 63 MPa avec une valeur moyenne de 44 MPa.

La première comparaison est présentée sur la Figure 9. Sur cette figure, les flèches indiquent la fin du premier remplissage (first filling). Les caractéristiques des barrages servant à la comparaison sont présentées dans le Tableau 5.

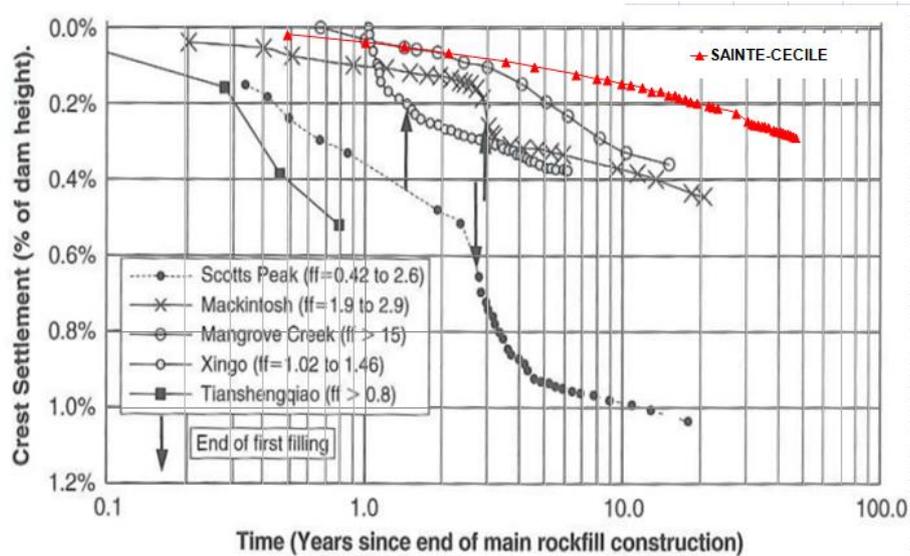


Figure 9 : Comparaison à des barrages en enrochements où un tassement moyennement important a été mesuré (Hunter 2003, réf. [3])

Barrage	Hauteur (m)	R _c (MPa)	Enrochements	d _{max} (mm)	Épaisseur des couches (m)	Densité
Scotts Peak	43	22	Argilite	914	0,9	2,10
Mackintosh	75	45	Grauwacke, qq ardoises	1000	1,0	2,20
Mangrove	80	45-64	Microgrès et grès	400	0,5	2,24
Xingo	140	-	Granite et Gneiss	650	1,0	2,15
Tianshengqiao	178	70-90	Calcaire	800	0,8	2,19
Sainte Cécile	45	23 à 63	Gneiss, schistes	1000	0,6 à 1,3	2,1

Tableau 5 : Caractéristiques des barrages de qualité (tassement moyennement important)

Deux barrages ont montré une sensibilité importante au remplissage : Mackintosh et Scotts Peak. Le barrage de Ste-Cécile a fait l'objet de tassements plus faibles que l'ensemble des barrages du Tableau 5

La seconde comparaison est présentée sur la Figure 10. Elle concerne des barrages dont les taux de tassement ont été comparables à ceux de Ste-Cécile. Les caractéristiques des barrages servant à la comparaison sont présentées dans le tableau précédent.

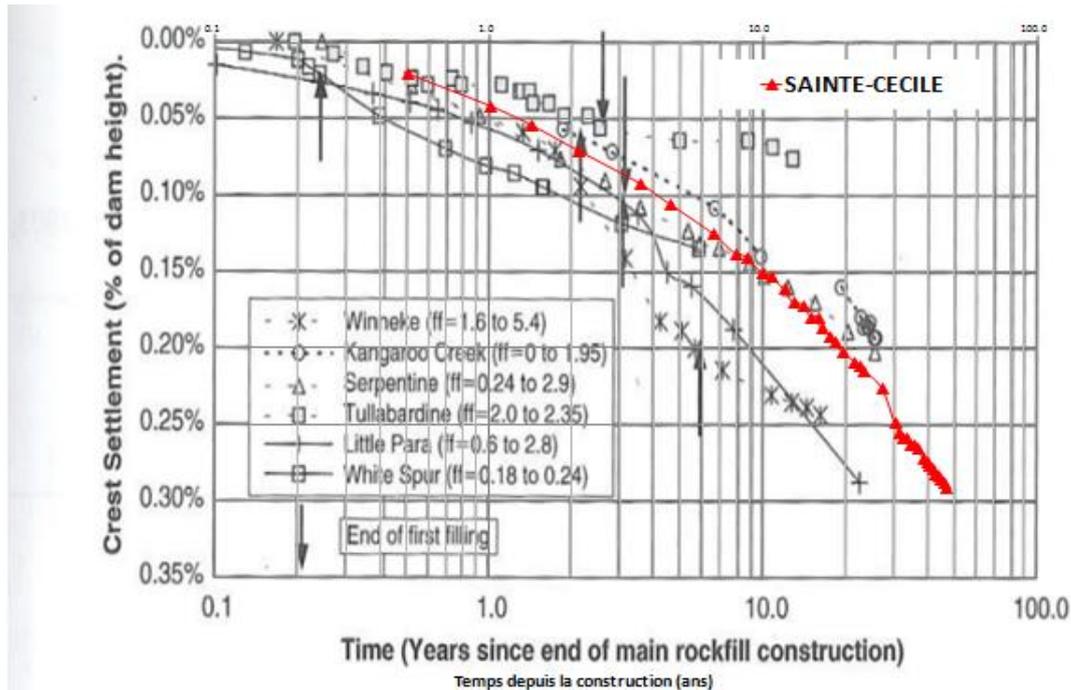


Figure 15.37. Post-construction crest settlement versus time for CFRDs constructed of well-compacted quarried rockfills of medium to high intact strength (Hunter, 2003).

Figure 10 : Comparaison à d'autres barrages en enrochements à masque ayant un tassement faible (Hunter 2003)

Barrage	Hauteur (m)	Rc (MPa)	Enrochements	dmax (mm)	Epaisseur des couches (m)	Densité
Winneke	85	66	Ardoises	800	0,9	2,07
Kangaroo Creek	60	25	Schistes	600	0,9 à 1,8	2,34
Serpentine	38	-	Schistes fracturés	152	0,6 à 0,9	2,10
Tullabardine	25	45	Grauwacke, qq ardoises	400	0,9 à 1,0	2,22
Little Para	53	8-14	Microgrès dolomitiques	110	1,0	2,15
White Spur	43	-	Roches volcaniques	1000	1,0	2,30
Sainte Cécille	45	23 à 63	Gneiss, schistes	1000	0,6 à 1,3	2,10

Tableau 6 : Caractéristiques des barrages ayant un tassement faible (Hunter 2003)

Le barrage de Ste-Cécile a fait l'objet de tassements comparables à l'ensemble des barrages du Tableau 6 : Caractéristiques des barrages ayant un tassement faible (Hunter 2003)

. Ces barrages n'ont pas montré de sensibilité à leur premier remplissage lorsqu'il s'est produit après la première année. On peut notamment remarquer le comportement très proche de Serpentine et Kangaroo Creek à celui de Ste-Cécile.

Ce point, combiné au caractère éphémère (quelques heures) et peu fréquent (avec un maximum de 62% de la charge en 45 ans) du remplissage de Ste-Cécile, conduit à estimer que les futurs remplissages ne conduiront pas à une accélération des tassements.

Les tassements induits par le premier remplissage ne sont donc pas significatifs d'après les résultats de la littérature.

Cependant, le remblai de Sainte-Cécile d'Andorge sera déversant, le premier remplissage de l'état aménagé va amener 100% de la charge de déversement. L'impact de ce déversement sera estimé par la modélisation aux éléments finis

2.2.4 TASSEMENT SOUS CHARGE SISMIQUE

2.2.4.1 SES réglementaire

Le barrage de Sainte-Cécile est un barrage de classe A situé en zone de sismicité 2 (faible). L'arrêté technique du 6 août 2018 définit le niveau sismique forfaitaire à considérer dans ce cas :

- accélération horizontale maximale du sol sous SES = **1,5 m/s²** (noté par la suite PGA¹)
- accélération verticale maximale du sol sous SES = **1,4 m/s²**.

La magnitude du séisme, nécessaire pour le calcul empirique des tassements, peut être estimée à $M = 5,5$ en se référant aux recommandations "Risque sismique et Sécurité des ouvrages hydrauliques" du MEDDE (réf. [1], octobre 2014).

Le tassement sous séisme a été ensuite estimé avec deux méthodes différentes :

- à partir des essais de compactage par vibration réalisés au LNEC (réf. [2]),
- à partir de formules empiriques fournis dans la littérature et dans les recommandations "Risque sismique et Sécurité des ouvrages hydrauliques" du MEDDE (octobre 2014).

2.2.4.2 Résultats des essais de compactage par vibration

Le matériau prélevé dans la tranchée de reconnaissances a été tamisé pour reconstituer une coupure 0/75 mm représentative de l'enrochement en place.

¹ Peak Ground Acceleration

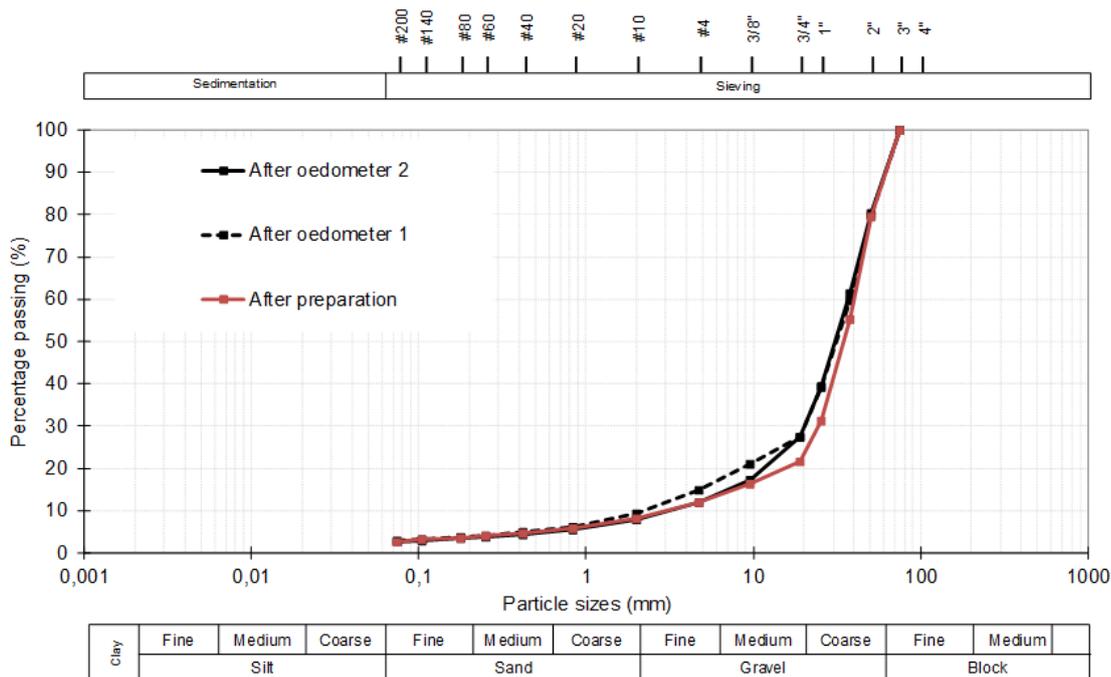


Figure 11 : Granulométrie reconstitué (après préparation) et après essai de vibration (après oedomètre 2)

L'essai de compactage par vibration a été réalisé au LNEC dans un moule oedométrique de 500 mm de diamètre et de hauteur 481 mm. Les matériaux ont été prélevés puis recompressés dans des conditions proches de celles sur site. La densité sèche obtenue après compactage est de 2,06. Un préchargement est fait en appliquant la contrainte verticale de 200 kPa, avec imbibition. Cette contrainte est déchargée et une plaque vibrante est posée sur l'arase de l'échantillon.

L'accélération maximale en tête de la colonne de sol varie entre 3,3 m/s² et 4,4 m/s² comme le montre le graphique ci-dessous (la valeur initiale de 2 m/s² ne semble pas être représentative car l'échantillon n'est pas encore stabilisé et la vibration vient de démarrer).

Accélération mesurée en tête de la colonne de sol

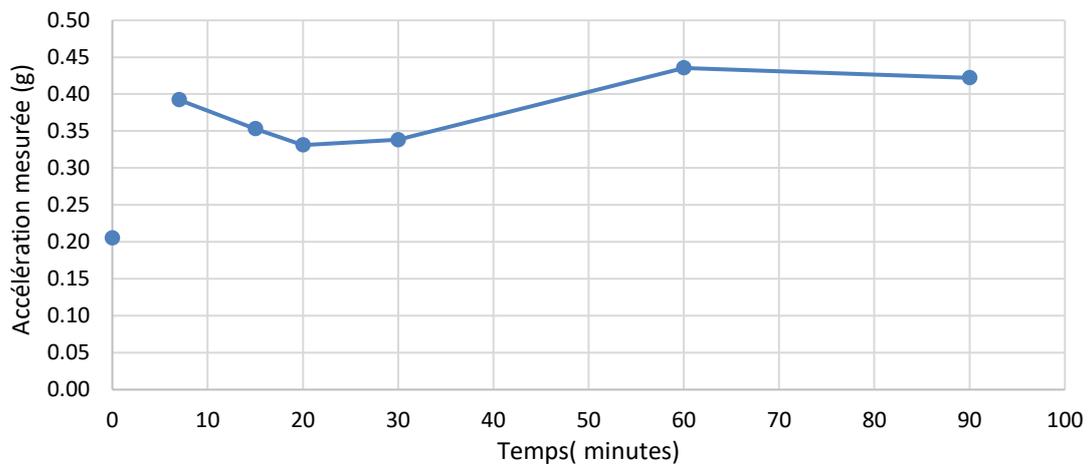


Figure 12 : Essai de vibration - accélération mesurée en tête de la colonne de sol

La fréquence des vibrations est de 50 Hz. Elle est supérieure aux fréquences amplifiées en cas de séisme, comprises généralement entre 1 Hz et 10 Hz (réf. [1], [4], [6]).

Le graphique ci-dessous présente les tassements mesurés en fonction de la durée d'application des vibrations.

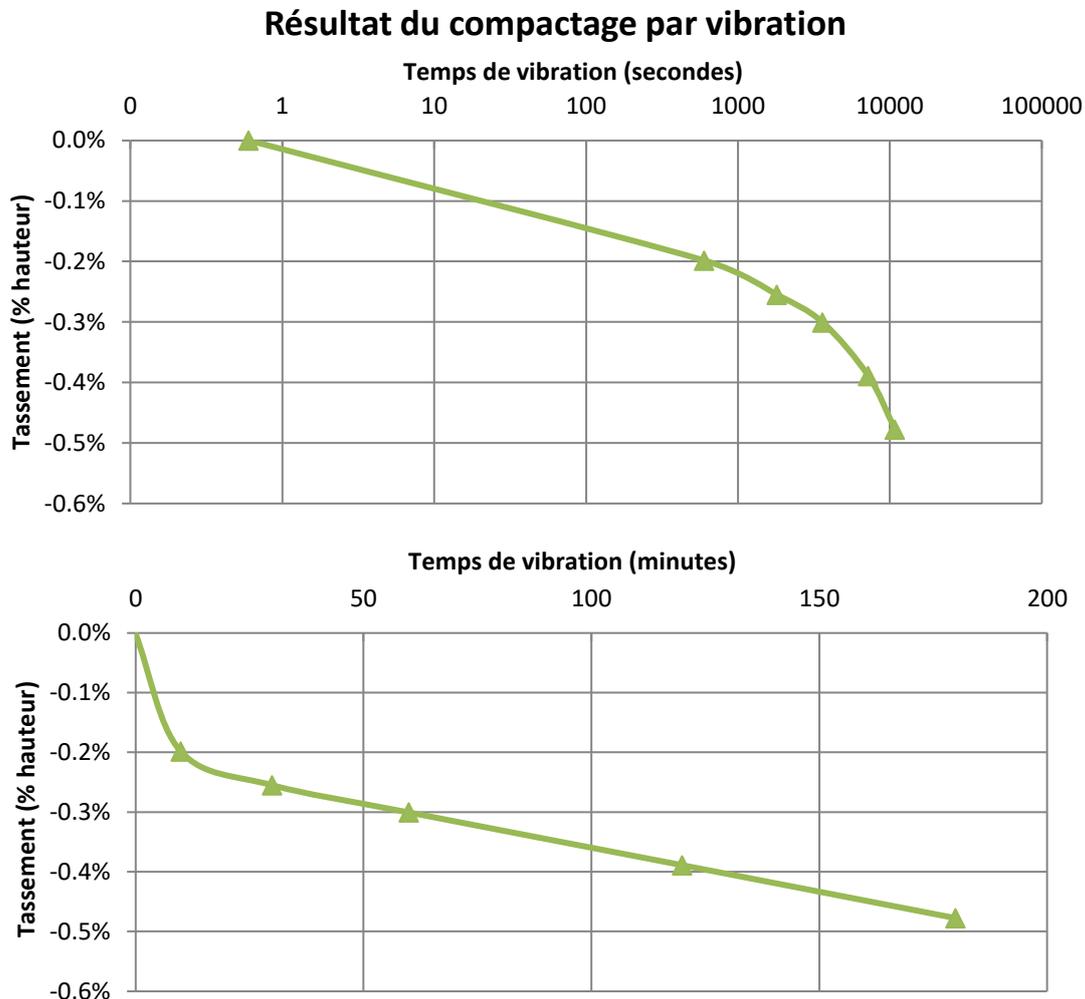


Figure 13 – Tassement mesuré (LNEC) – affichage en échelle log et linéaire

On peut estimer de façon conservatrice que la durée de la phase forte du séisme est de l'ordre de 25 s pour un séisme de magnitude 5,5 en France. Le tassement correspondant à cette durée sur le graphique est de 0,1% pour une accélération comprise entre 3,3 et 4,4 m/s² (valeur moyenne de 3,8 m/s²).

Ce tassement doit ensuite être réduit car l'accélération moyenne dans le barrage sous SES est inférieure à celle de l'essai. L'accélération moyenne sous SES peut être estimée de la façon suivante :

- PGA = 1,5 m/s², correspond à un pic ponctuel d'accélération,
- multiplication par un coefficient de 0,65 pour comparer à une accélération cyclique équivalente,
- amplification dynamique dans le corps du barrage : une amplification en crête de l'ordre 3 peut être considérée (abaques et méthodes réf. [1], [5], [7]), soit une amplification moyenne de l'ordre de 2,

L'accélération cyclique moyenne équivalente est finalement égale à : $1,5 \times 0,65 \times 2 \approx 2 \text{ m/s}^2$

En considérant en première approche une variation linéaire du tassement avec l'accélération, le tassement sous séisme SES peut être estimé de l'ordre de **0,052%**².

2.2.4.3 Estimations à partir des formules empiriques

Deux lois empiriques sont souvent utilisées pour estimer les tassements d'un barrage en remblai sous chargement sismique : celle de Swaisgood et celle de Bureau. Ces lois ne tiennent pas compte avec précision des caractéristiques des matériaux constituant le barrage et ne correspondent en réalité qu'à un retour d'expérience basé sur des estimations des tassements post-sismiques ayant affecté des barrages en remblai de nature hétérogène.

Méthode de Swaisgood (actualisée en 2014, réf. [8]) :

$$\Delta H / H = \exp(5,7.PGA + 0,471.M - 7,22) = \mathbf{0,023\%}$$

Méthode de Bureau et al (actualisée en 2012, réf. [1]) – donne un fuseau entre borne haute et borne basse :

$$ESI \text{ (Earth Severity Index)} = PGA.(M - 4,5)^3 = 0,15$$

$$\text{Borne basse : } \Delta H / H = 10^{(-0,89431+0,54388.\log(ESI)+0,26284.\log(ESI)^2)} = \mathbf{0,007\%}$$

$$\text{Borne haute : } \Delta H / H = 10^{(-0,14431+0,54388.\log(ESI)+0,26284.\log(ESI)^2)} = \mathbf{0,039\%}$$

2.2.4.4 Conclusion - valeur à retenir

Les résultats sont synthétisés dans le tableau suivant.

	Essais sur table vibrante	Swaisgood 2014	Bureau et al Borne basse	Bureau et al Borne haute
Tassement $\Delta H / H$	0,052 %	0,023 %	0,007%	0,039%

Les différentes méthodes utilisées donnent des valeurs concordantes et de même ordre de grandeur. L'essai de compactage par vibration forcée maximise les tassements, il est probable que cela soit causé par les conditions d'essai différentes en comparaison avec un séisme réel et finalement pénalisantes parce que, contrairement au séisme, l'accélération maximale de chaque cycle, est constante.

Dans la suite de l'étude, pour le tassement relatif induit par le séisme, on considérera une valeur conservative de 0,05%.

2.2.5 TASSEMENT SOUS SURCHARGE DU BCR

Le tassement sous surcharge du BCR est directement calculé par le modèle avec une mise en place progressive des couches de BCR.

2.2.6 TASSEMENT SOUS IMBIBITION

Un essai d'imbibition a été réalisé par le LNEC dans les conditions suivantes :

- chargement oedométrique d'un échantillon de 472 mm de hauteur jusqu'à 200 kPa de pression verticale : déformation verticale atteinte = 0,773 mm après 2 jours
- imbibition de l'échantillon et maintien de la pression de 200 kPa pendant 5 jours : déformation verticale atteinte = 0,831 mm

² $0,1 \times (2/3.8) = 0,052$

Même si l'écart de déformation n'est pas imputable à l'imbibition seule, on peut estimer que l'effet de l'imbibition ne dépasse pas $(0,831-0,773) = 0,058$ mm, soit environ 8% du tassement initial sous 200 kPa. Nous ne disposons pas de données à un autre niveau de chargement.

Dans le cadre du dossier de révision spéciale, les écoulements internes ont fait l'objet de modélisation aux éléments finis (réf. [9]). Elles ont conduit à estimer que, même en cas de défaillance majeure du masque, seule une partie du remblai pouvait être saturée et cette saturation ne peut perdurer au-delà du temps de vidange qui est de l'ordre de 6 à 12h selon l'importance de la crue.

Néanmoins, si on suppose que le chargement sous imbibition conduit à une augmentation de 8% des tassements initiaux sous n'importe quel niveau de charge, l'effet sur le barrage ne devrait pas dépasser :

$$\text{Tassement cumulé à 100 ans} \times 8 \% = 0,4\% \times 8\% = \mathbf{0,03\%}.$$

Nota : le tassement cumulé à 100 ans est estimé à 0,4% en prolongeant la courbe présentée **Figure 8**.

2.2.7 CONCLUSION

Les calculs présentés dans les paragraphes précédents sont relativement conservatifs. Ils mènent à une estimation du tassement maximal :

- Tassement naturel du remblai sous poids propre d'ici 100 ans : 0,10%
- Tassement au premier remplissage : à estimer par la modélisation
- Tassement sous chargement sismique : 0,05%
- Tassement sous surcharge du BCR : à estimer par la modélisation
- Tassement sous imbibition : 0,03%

Au total, le tassement cumulé est de l'ordre de 0,18% + tassement sous surcharge du BCR et premier remplissage à estimer par la modélisation.

2.3 DONNEES D'ENTREE POUR LE CALCUL THERMO-MECANIQUE

2.3.1 PHASAGE DE CONSTRUCTION

Le BCR sera mis en place en deux phases :

- 1^{ère} année, entre juillet et août : 16 400 m³ de BCR à mettre en place, avec un arrêt à la cote 238 m NGF. Le rythme moyen est de 380 m³/jour.

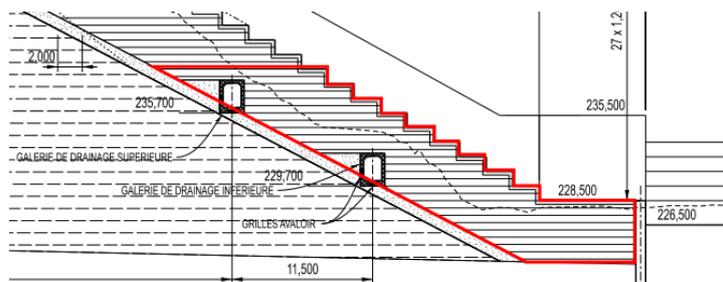
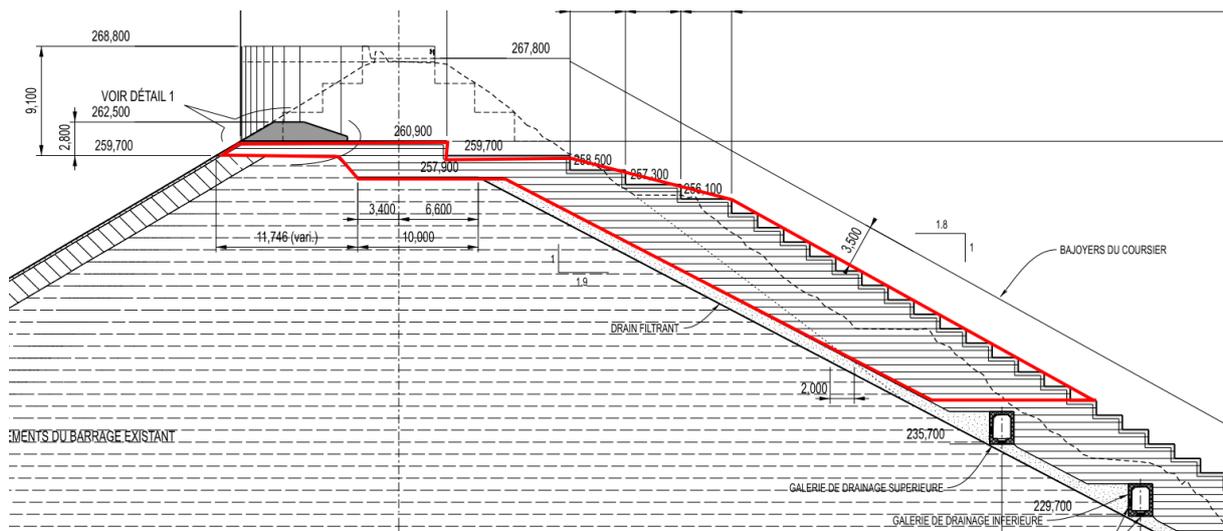


Figure 14 – BCR mis en place pendant la première année

- 2^{ème} année, entre mars et août : 45 000 m³ de BCR à mettre en place, toujours au rythme moyen de 380 m³/jour.



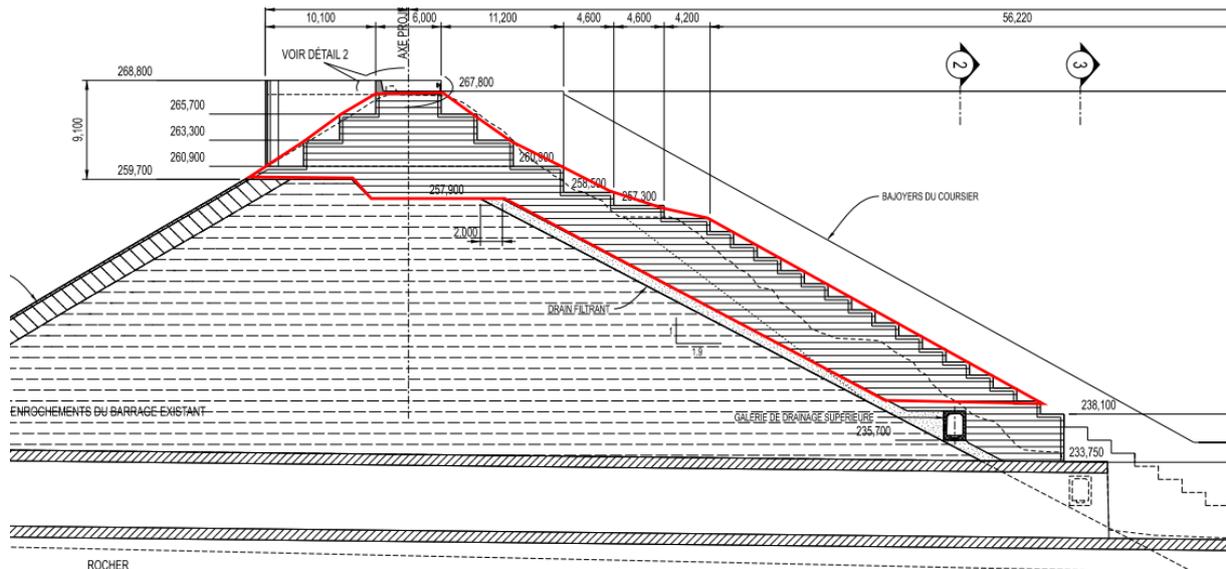


Figure 15 – BCR mis en place pendant la deuxième année

2.3.2 FORMULATIONS DU BCR

Deux formulations de BCR ont été considérées dans les calculs :

- une première formulation notée "BCR1" dans la suite du rapport avec 110 kg/m^3 de liants dont 60 kg/m^3 de clinker,
- une deuxième formulation notée "BCR2" dans la suite du rapport avec 60 kg/m^3 de liants dont 40 kg/m^3 de clinker.

Les caractéristiques thermiques et mécaniques de ces deux BCR sont détaillées par la suite

2.3.3 TEMPERATURE DU BCR A LA MISE EN PLACE

La température du BCR à la mise en place (après transport) est prise égale à la température moyenne mensuelle (courbe donnée au §2.3.6). Il s'agit d'une température maximale à ne pas dépasser et qui pourra être vérifiée sur site.

2.3.4 CHALEUR D'HYDRATATION DU BCR

La chaleur d'hydratation est calculée avec les hypothèses suivantes :

- Clinker : chaleur d'hydratation totale 330 kJ/kg , temps caractéristique = 20h,
- Autres liants : chaleur d'hydratation totale 560 kJ/kg , temps caractéristique = 770h.

Le temps caractéristique correspond au temps pour lequel 50% de la chaleur est dégagée. Il est ralenti par rapport aux valeurs usuelles en présence des retardateurs de prise (hypothèse conservatrice).

La chaleur totale dégagée est donnée dans le graphique ci-dessous.

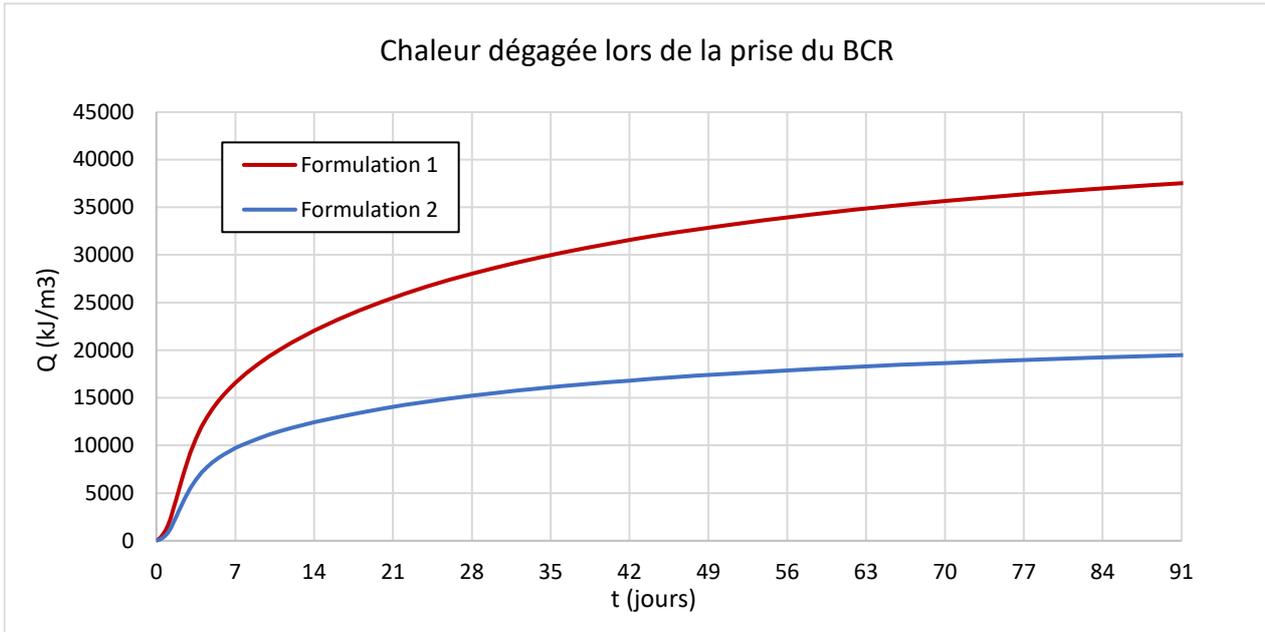


Figure 16 – Chaleur dégagée lors de la prise du BCR

Après 1 an, 92% de la chaleur totale a été dégagée lors de la prise du BCR.

La courbe d'évolution de la puissance moyenne dégagée peut être calculée ($P = dQ/dt$). Elle est donnée dans le graphique ci-dessous.

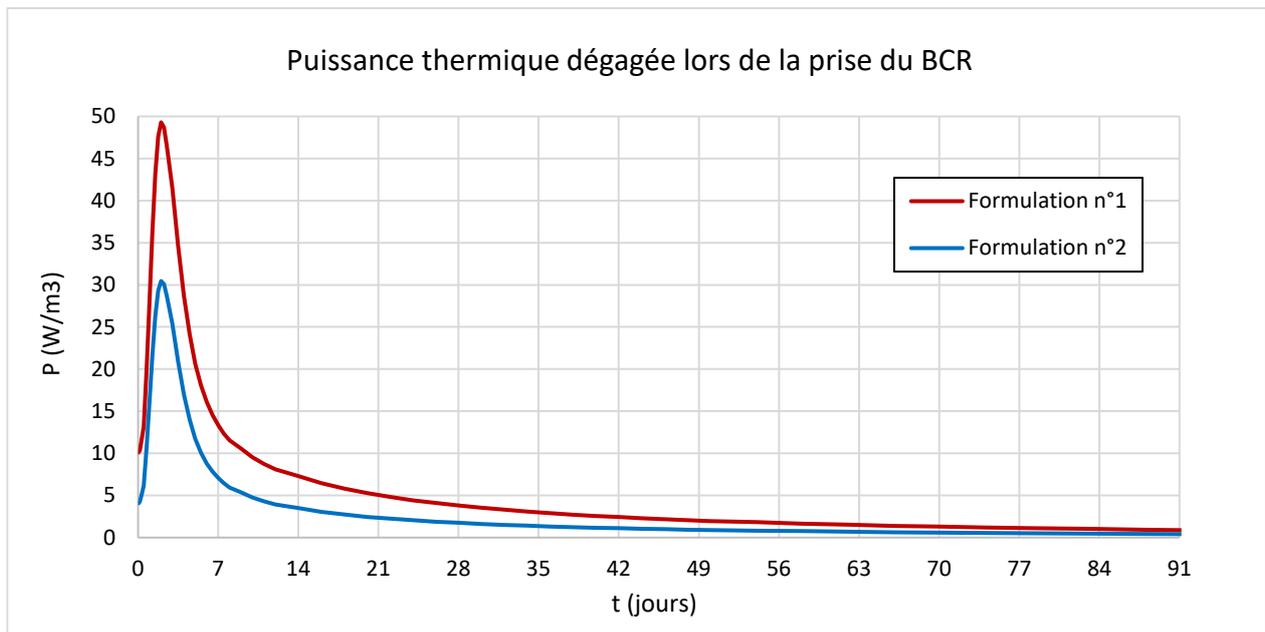


Figure 17 – Puissance thermique dégagée à la prise du BCR

Le pic de dégagement de la chaleur est atteint entre 2 et 3 jours.

Pour information et pour apprécier les ordres de grandeur, le réchauffement adiabatique (sans pertes de chaleur vers l'extérieur) du BCR est calculé et donné dans le graphique suivant (formule : $\Delta T(t) = \Delta Q(t) / \rho c$).

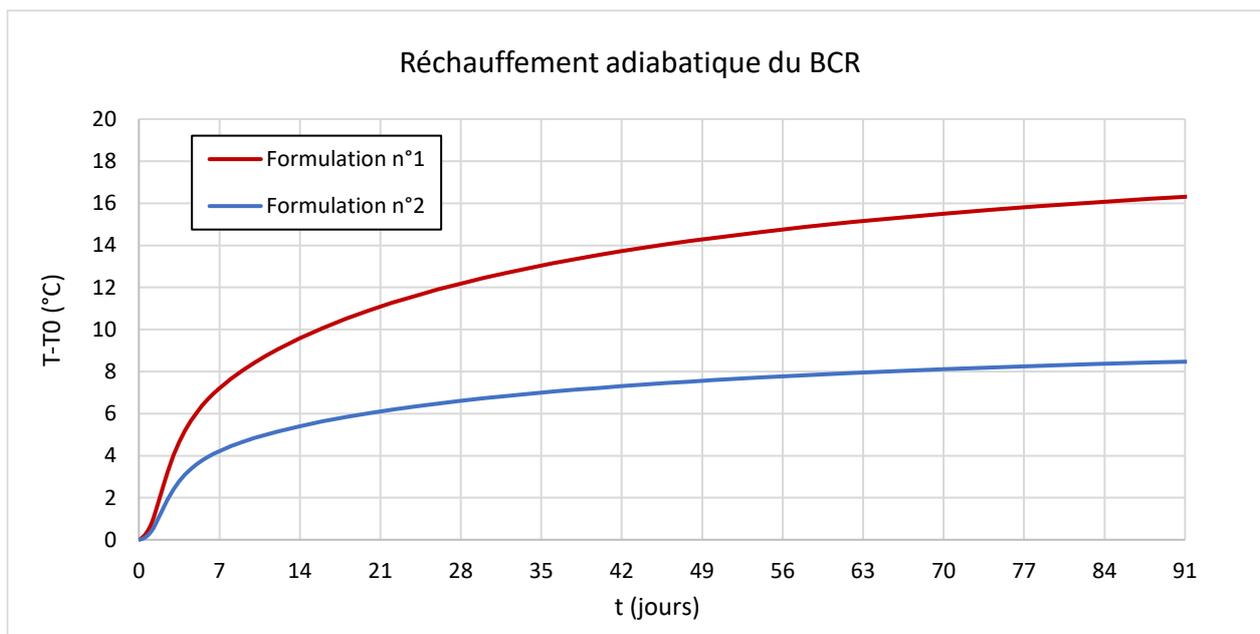


Figure 18 – Réchauffement adiabatique du BCR

2.3.5 CARACTERISTIQUES THERMIQUES ET MECANIQUES DU BCR

Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques thermiques et mécaniques retenues pour les deux formulations du BCR.

Tableau 7 : Caractéristiques thermiques et mécaniques retenues pour BCR

	Formulation 1	Formulation 2
Masse volumique	2 300 kg/m ³	
Conductivité thermique	2 W/m/°C	
Chaleur spécifique	1 100 J/kg/°C	
Coefficient de dilatation thermique	10 ⁻⁵ /°C	
Module d'Young instantané	26 GPa	24 GPa
Module d'Young moyen	17 GPa	16 GPa
Coefficient de Poisson	0,2	0,2
Rc 28 jours	9 MPa	4,5 MPa
Rc 90 jours	12 MPa	6 MPa
Rc 365 jours	15 MPa	7,5 MPa
Rtm 28 jours	1,3 MPa	0,8 MPa
Rtm 90 jours	1,6 MPa	1,0 MPa
Rtm 365 jours	1,8 MPa	1,1 MPa

On peut noter que la différence entre les deux formulations se fait principalement sentir au niveau des résistances mécaniques (Rc et Rtm).

Les caractéristiques données dans le tableau précédent correspondent à une hypothèse de travail et doivent être confortées par les essais. La résistance du BCR ne dépend pas seulement de la quantité de liants mise en place mais également d'autres paramètres qui sont difficiles à prévoir sans essais. Il sera donc important, lors de la phase de préparation du chantier, que l'Entreprise en charge des travaux vérifie ces caractéristiques sur la base d'essais et éventuellement ajuste ces valeurs.

2.3.6 TEMPERATURE EXTERIEURE

La température moyenne journalière est calculée comme la moyenne des deux stations météo suivantes :

- Nîmes (altitude 59 m).
- Le Collet-Sauveplane (altitude 485 m).

La différence entre ces stations proches géographiquement s'explique principalement par une différence d'altitude (de l'ordre de 1°C / 180 m).

Les fiches météo-France de ces stations sont données en annexe.

Le graphique ci-dessous donne les températures moyennes mensuelles :

- moyennes sur toutes les années de mesures ;
- maximales : les mois les plus chauds sur les périodes de mesure.

Pour les phases de réchauffement du BCR, on considère les températures moyennes mensuelles maximales qui sont un bon compromis : ces températures sont conservatives en moyenne mais peuvent être dépassées ponctuellement sur une période de quelques jours.

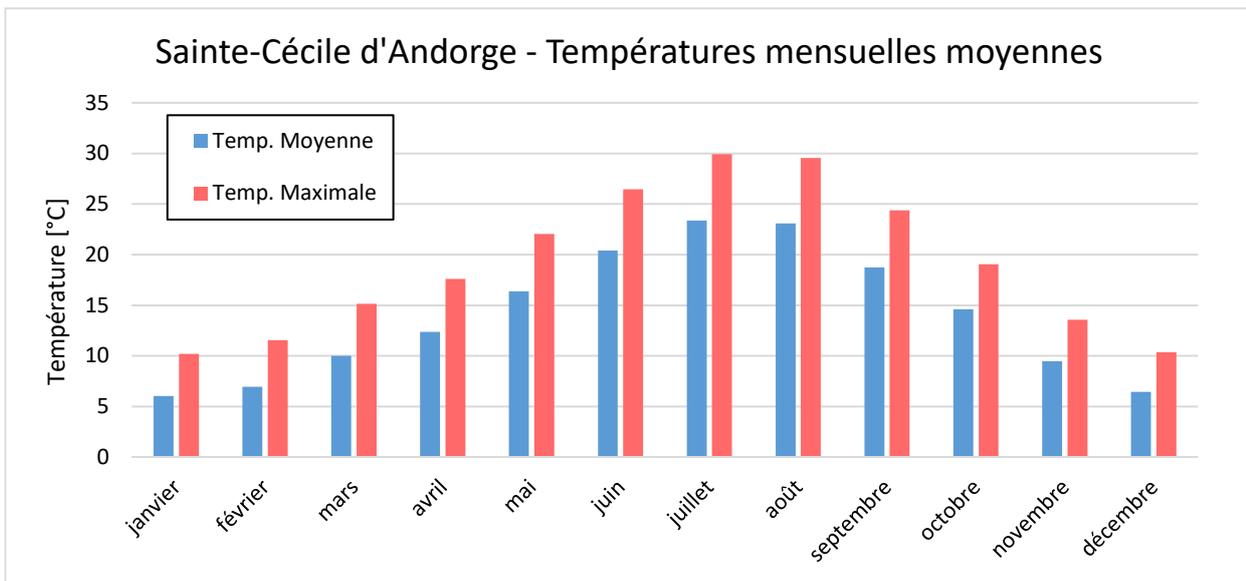


Figure 19 – Températures mensuelles moyennes sur le site du barrage

2.3.7 VENT

Aucune mesure de la vitesse du vent n'est disponible sur site. Le vent moyen est donc pris à la station d'Altier, 25 km au nord du site du barrage (altitude 900 m). En réalité la vitesse du vent dépend de la topographie et de l'altitude, on ne peut connaître qu'approximativement cette vitesse.

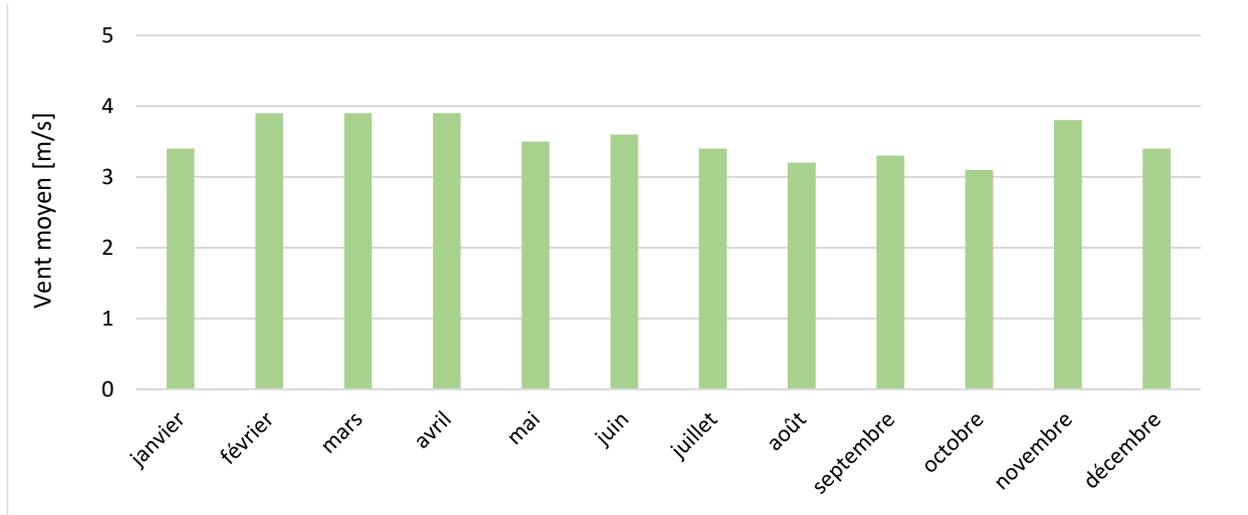


Figure 20 – Vent moyenné sur 10 min à la station météo de Montpellier

On voit que la vitesse moyenne du vent moyen est stable sur une année. On peut considérer la vitesse de 3,5 m/s comme moyenne.

En pratique la vitesse du vent n'a d'influence sur la modélisation que via le coefficient d'échange convectif en paroi noté "h". On utilise l'approximation empirique suivante pour calculer ce coefficient :

$$h = 0,74 + 6,76 \times V^{0,8} \text{ (W/m}^2\text{/}^\circ\text{C)}$$

Ce qui donne : $h \approx 20 \text{ W/m}^2\text{/}^\circ\text{C}$

Cette valeur est assez classique dans les calculs thermiques des bâtiments : "h" varie le plus souvent entre $10 \text{ W/m}^2\text{/}^\circ\text{C}$ et $50 \text{ W/m}^2\text{/}^\circ\text{C}$.

2.3.8 ENSOLEILLEMENT

Les mesures d'ensoleillement sont issues de la station de Montpellier (cette donnée n'est pas disponible aux stations les plus proches). Les mesures sont données dans le graphique ci-dessous.

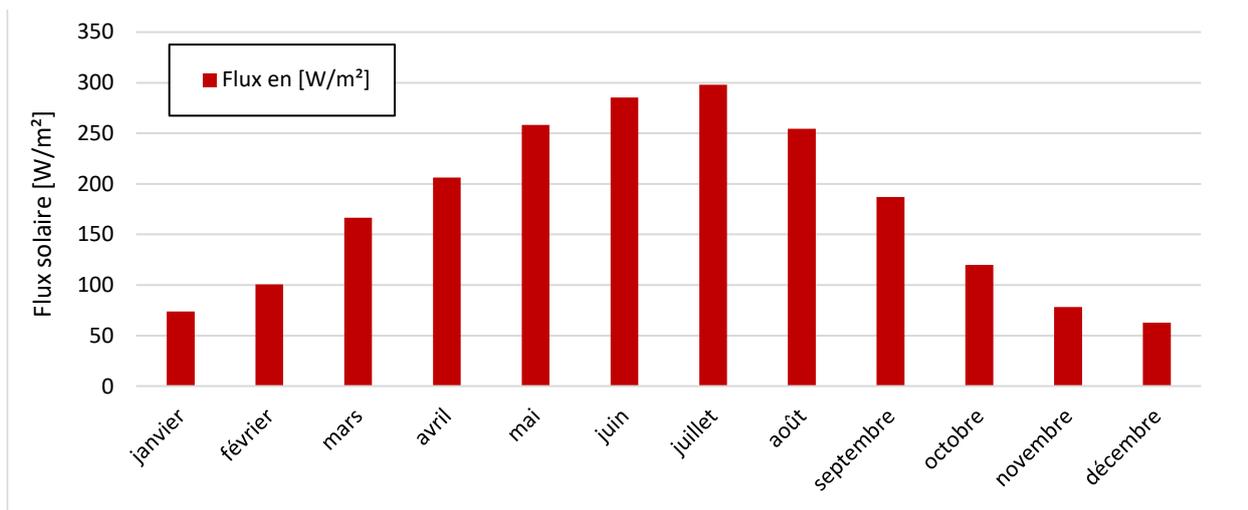


Figure 21 – Flux solaire moyen mesuré à la station météo de Montpellier

Ce flux est ensuite à réduire en considérant :

- que le BCR n'absorbe que 50% du flux solaire incident,
- par l'inclinaison du parement (30° directement nord-est-est) : coefficient 70%.

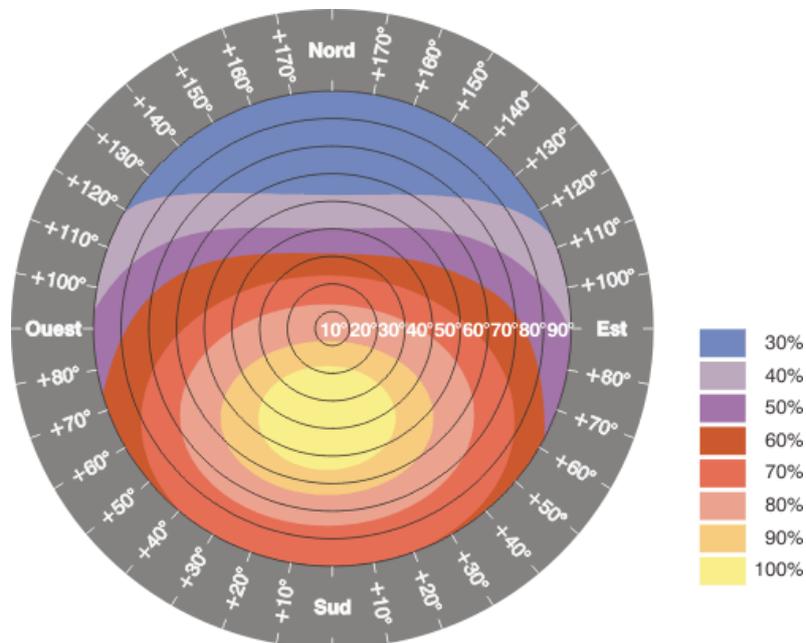


Figure 22 – Pourcentage d'absorption du flux solaire selon l'inclinaison de la surface – sud de la France

3 CALCUL THERMO-MECANIQUE

3.1 OBJECTIFS

La prise du BCR est une réaction exothermique qui conduit au réchauffement des matériaux mis en place. Ce réchauffement peut conduire à deux phénomènes potentiellement préjudiciables :

- Au premier hiver, la peau va se refroidir alors que l'intérieur est encore chaud. La déformation différée entre la peau et le cœur du BCR peut conduire à une fissuration en peau.

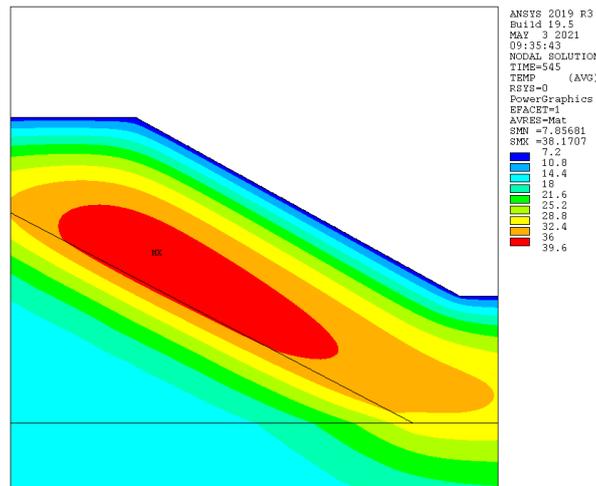


Figure 23 – Exemple illustratif : refroidissement en peau du BCR avec un cœur encore chaud

- A plus long terme, le refroidissement de toute la masse du BCR conduit à une contraction de l'ensemble du BCR. Cette contraction, si elle est empêchée peut conduire à une fissuration importante du BCR. L'étendue de la zone en traction et sa profondeur dépendent de la longueur totale entre joints, de l'épaisseur du BCR et surtout des conditions aux limites qui empêchent la contraction du béton. Dans le cas des plots BCR, le principe peut être illustré par le croquis ci-dessous. Ce croquis montre que les déformations sont empêchées par l'adhérence à la base du plot. La fissuration va donc dépendre des conditions d'adhérence à la base.

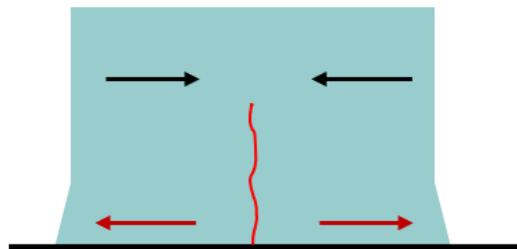


Figure 24 – Exemple illustratif : schéma de fissuration à long terme avec un refroidissement générale du BCR

Les calculs thermo-mécanique visent donc à estimer la fissuration due à la contraction thermique du BCR. La fissuration n'est pas un critère de dimensionnement en soit mais doit être analysée en fonction de ses conséquences sur la sûreté et l'exploitation du barrage à court et à long termes.

3.2 DESCRIPTION DU MODELE

Le modèle de calcul est un modèle tridimensionnel en éléments finis. Il est composé de deux sous modèles :

- modèle thermique transitoire qui calcule l'évolution de la température,
- modèle mécanique qui lit les températures sur le modèle thermique et évalue les contraintes et les déformations mécaniques qui en résultent à des dates précises de la vie de l'ouvrage.

3.2.1 MAILLAGE

Le maillage du modèle thermique est fin et représente toutes les couches de BCR d'épaisseur 30 cm. Les éléments utilisés sont des éléments quadratiques afin de permettre un calcul précis des températures, même à l'intérieur des couches. Chaque couche de BCR a une courbe de dégagement de la chaleur propre à elle et qui commence à sa mise en place (cf. §2.3.4).

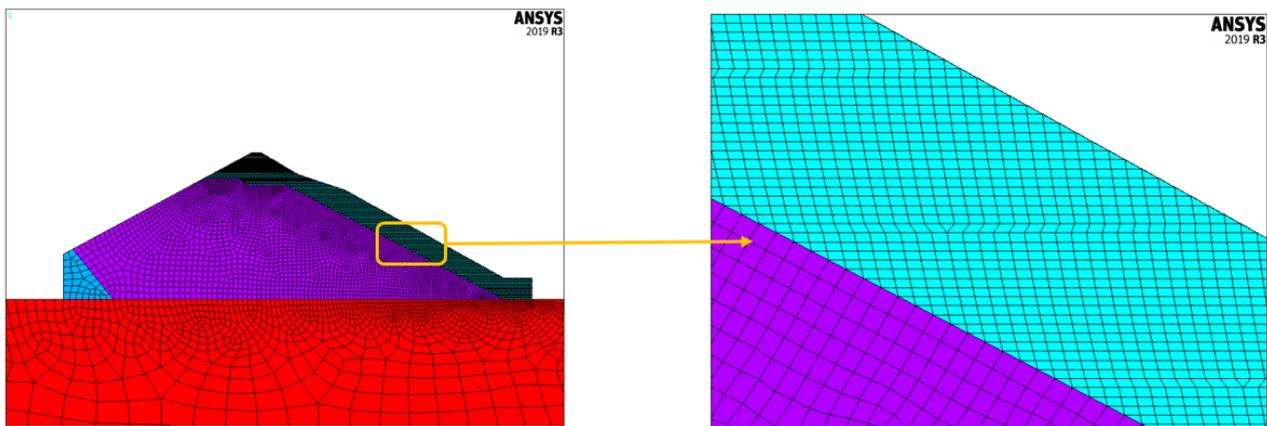


Figure 25 – Vu du maillage thermique

Le modèle mécanique ne représente qu'un plot de BCR et ne modélise en pratique qu'un demi-plot en considérant que le plot est symétrique. Deux plots-types sont considérés : un plot d'évacuateur de 17 m de largeur et un plot hors évacuateur de 19 m de largeur. Pour chaque plot-type, un modèle thermique correspondant est utilisé.

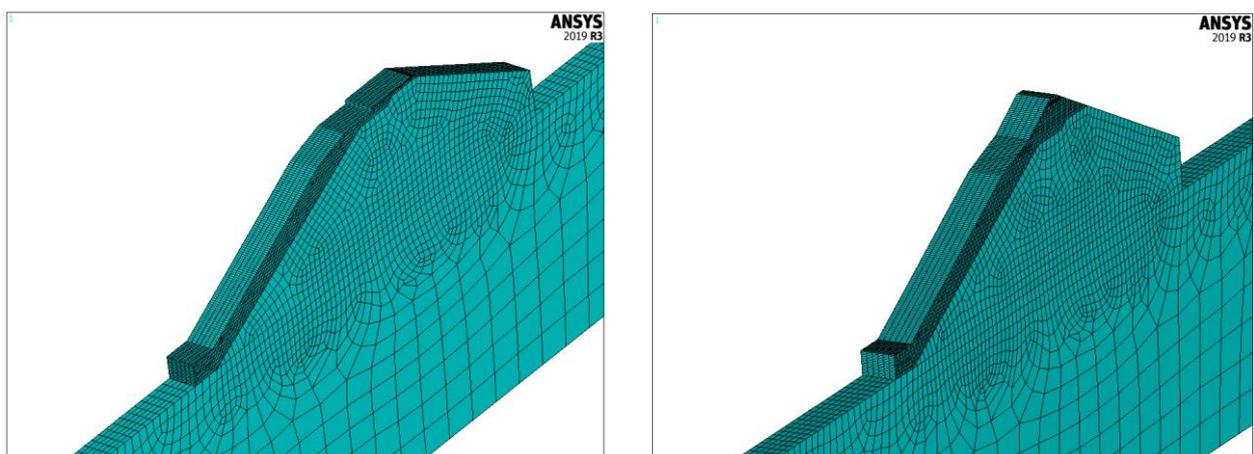


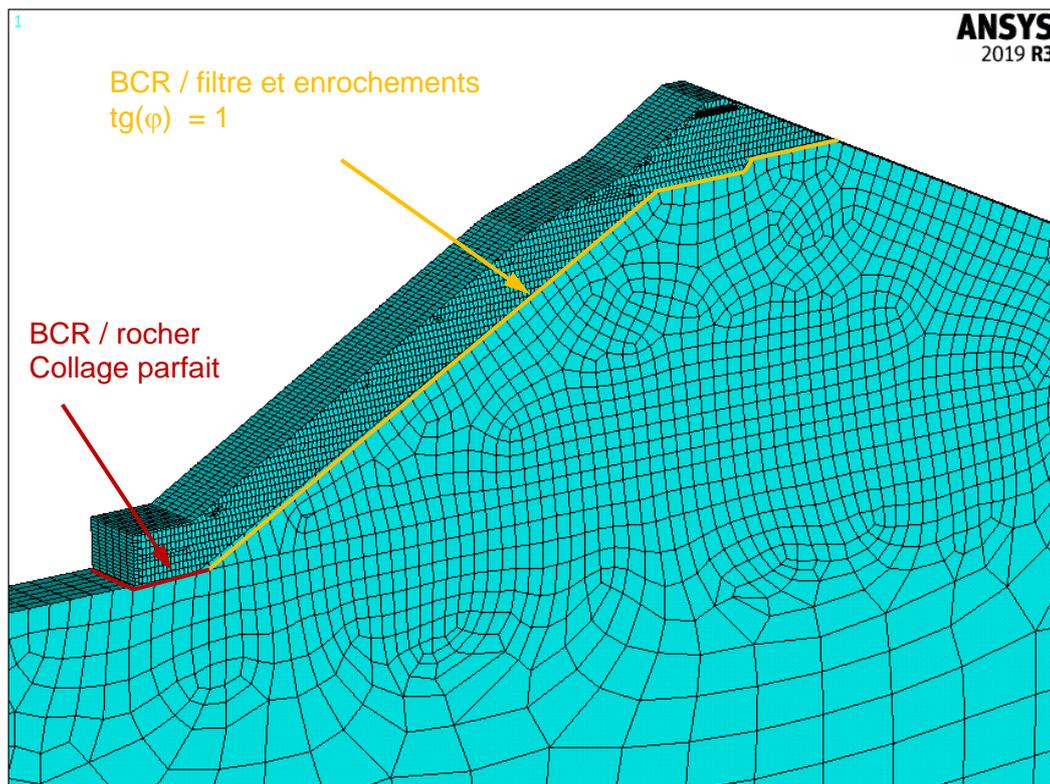
Figure 26 – Vu du maillage mécanique pour un plot d'évacuateur (gauche) et un plot hors évacuateur (droite)

3.2.2 INTERFACES

L'interface entre le BCR et les autres matériaux a été modélisée par des éléments de contact de type Mohr-Coulomb :

- contact avec le rocher : adhérence parfaite (hypothèse conservatrice),
- contact avec le filtre et les remblais existants : angle de frottement de 45°C et cohésion nulle.

Il est à noter que le glissement du BCR sur les matériaux de remblais permet de réduire les contraintes d'origine thermique. Il est donc conservatif de considérer un angle de frottement relativement élevé à cette interface.



3.2.3 REFERENCE DES AXES

- Axe X = de la rive gauche vers la rive droite.
- Axe Y = de l'amont vers l'aval.
- Axe Z = du bas vers le haut.

3.2.4 CONDITIONS AUX LIMITES

Les conditions aux limites du modèle thermique sont :

- conditions de convection avec l'air ($h=20 \text{ W/m}^2/\text{°C}$) + ensoleillement sur les surfaces au contact avec l'air,
- conditions de flux nul sur les bords latéraux et en bas du modèle.

La mise en place progressive des couches s'accompagne d'un transfert des conditions aux limites d'une couche à la couche supérieure.

Les conditions aux limites du modèle mécanique sont :

- $U_x = 0$ au plan de symétrie ($X=0$),
- $U_x = 0$ au niveau des enrochements existants et de la fondation à la demi-largeur du plot ($X=L/2$), le BCR est libre au joint,
- $U_z = 0$ en bas du modèle,
- $U_y = 0$ aux extrémités amont et aval de la fondation.

3.2.5 INITIALISATION ET CALCUL TRANSITOIRE

L'initialisation du modèle thermique s'effectue en appliquant un cycle annuel de température mensuelle moyenne avant le début de la mise en place du BCR (pas de temps = 14 jours).

La mise en place du BCR est calculée avec un pas de temps de $\frac{1}{4}$ de journée afin de bien représenter la courbe de dégagement de la chaleur de chaque couche.

Les autres périodes sont calculées avec un pas de temps variable entre $\frac{1}{2}$ journée (juste après la fin de mise en place du BCR) et 30 jours pour les dernières années de calcul. La période totale modélisée est de 10 ans.

3.3 PLANNING DE MISE EN PLACE DU BCR

Le calcul thermique nécessite de définir un planning de mise en place détaillé de chaque couche de BCR. Un planning prévisionnel a été calculé en considérant les contraintes décrites au §2.3.1 et un rythme de mise en place moyen de $380 \text{ m}^3/\text{jour}$ et 5 jours travaillés par semaine. Le planning calculé est illustré par les deux figures ci-dessous.

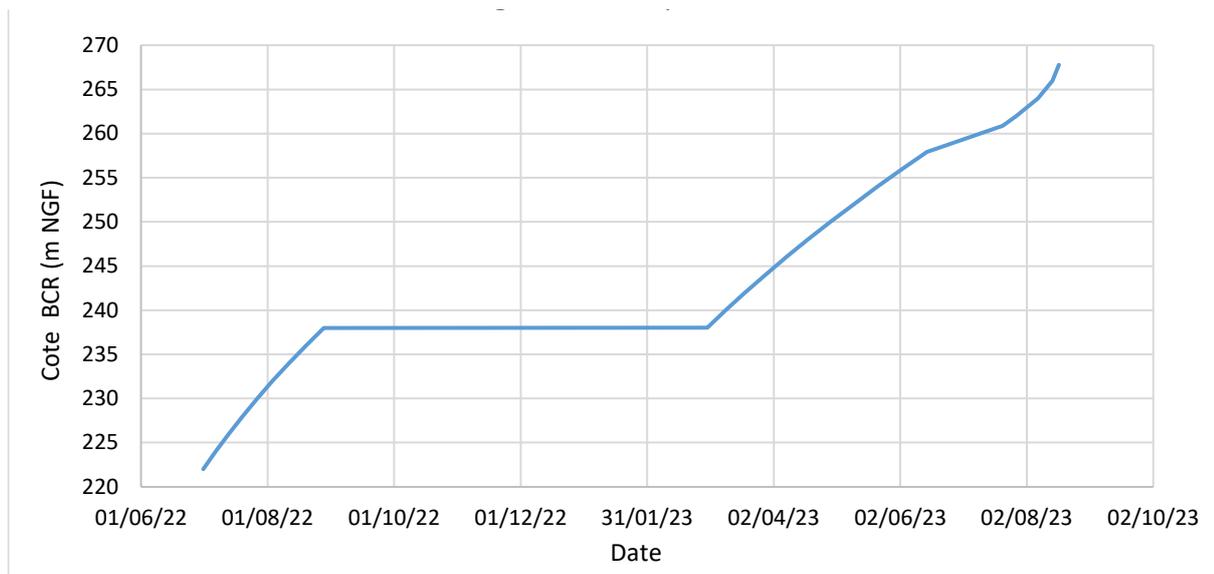


Figure 27 – Planning prévisionnel de mise en place du BCR

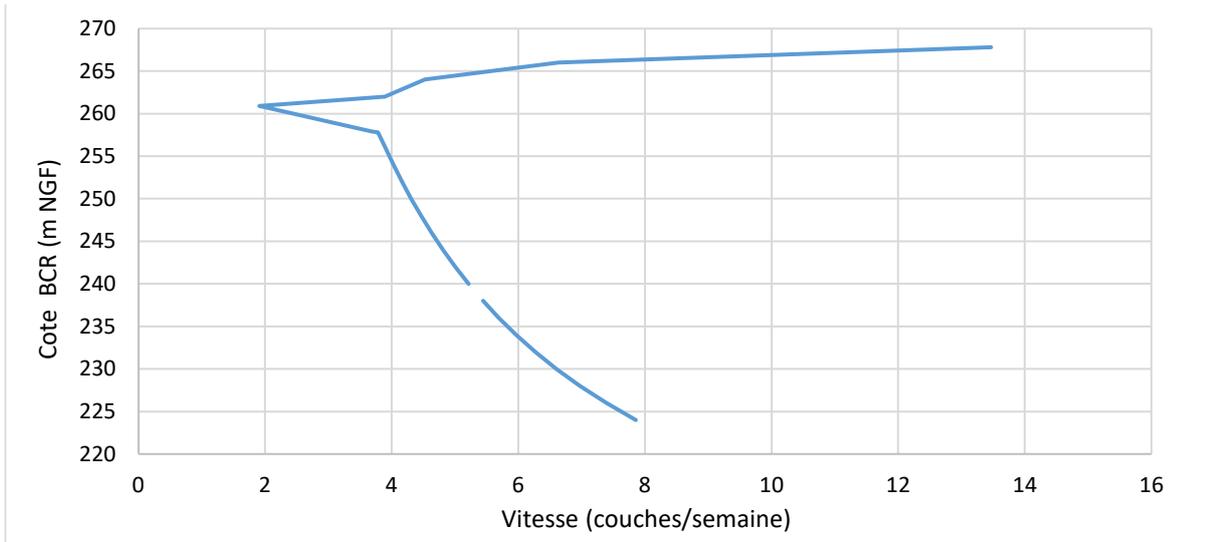


Figure 28 – Vitesse moyenne de mise en place des couches de BCR

3.4 RESULTATS DU CALCUL THERMIQUE

3.4.1 ISOVALEURS DES TEMPERATURES MAXIMALES

Les graphiques suivants présentent les isovaleurs des températures pour les 2 plots considérés et pour les 2 formulations du BCR.

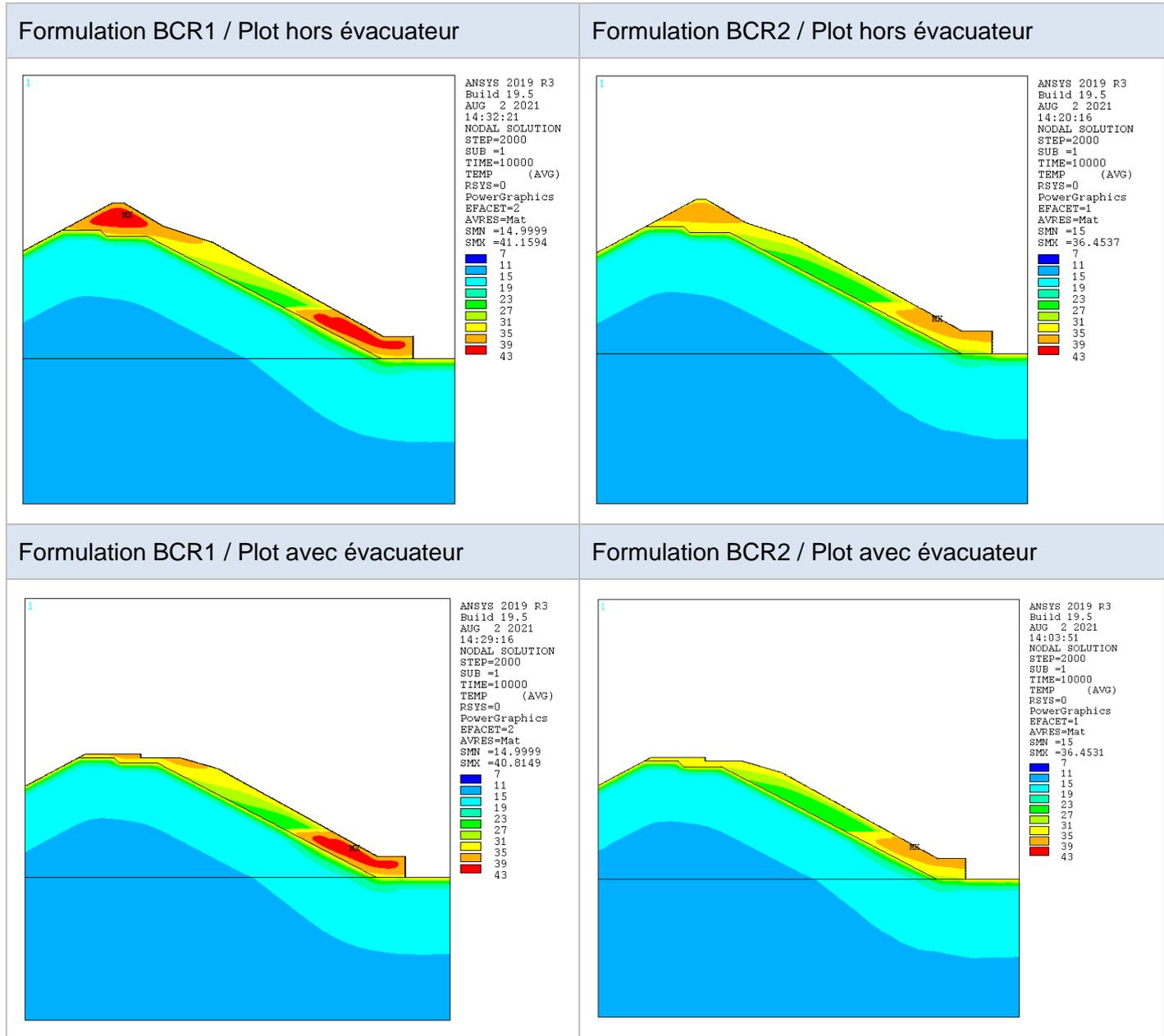


Figure 29 – Isovaleurs des températures maximales atteintes nœud par nœud

Les figures précédentes montrent les zones où le réchauffement est maximal :

- BCR mis en place la première année entre juillet et août,
- BCR mis en place la deuxième année entre juillet et août dans la zone hors évacuateur.

Ces zones sont les plus chaudes pour deux raisons principales :

- mise en place du BCR pendant l'été,
- l'épaisseur de ces zones est importante et empêche un dégagement rapide de la chaleur.

La température maximale atteint 41°C dans le cas de la formulation n°1 et 36,5°C dans le cas de la formulation n°2.

3.4.2 TEMPERATURES AU PREMIER HIVER APRES LA FIN DE CONSTRUCTION

Les graphiques suivants présentent les températures durant le premier hiver après la construction pour les 2 plots considérés et pour les 2 formulations du BCR.

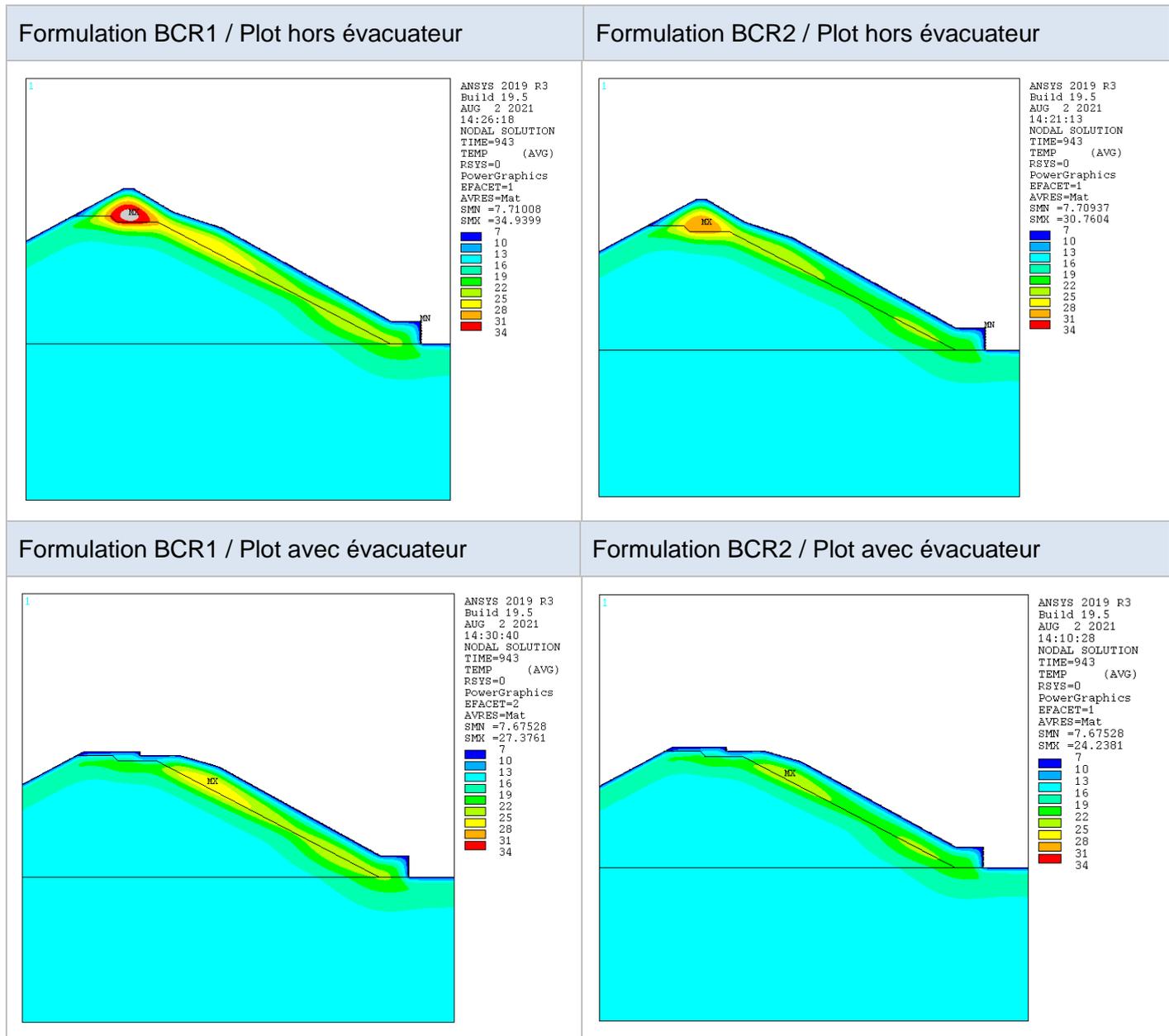


Figure 30 – Isovaleurs des températures au premier hiver après la construction de la carapace BCR

La température minimale prise en compte en hiver est de 6°C (correspond à la moyenne mensuelle de janvier). En peau de BCR la température calculée est légèrement supérieure : 7,5°C en tenant compte d'un léger ensoleillement en hiver et du coefficient d'échange en paroi. On voit sur les figures précédentes que le cœur du BCR est encore relativement chaud à cette date : 35°C dans le cas du BCR1 et 31°C dans le cas du BCR2.

3.4.3 TEMPERATURES AU DERNIER HIVER CALCULE

Les graphiques suivants présentent les températures durant le dernier hiver simulé pour les 2 plots considérés et pour les 2 formulations du BCR.

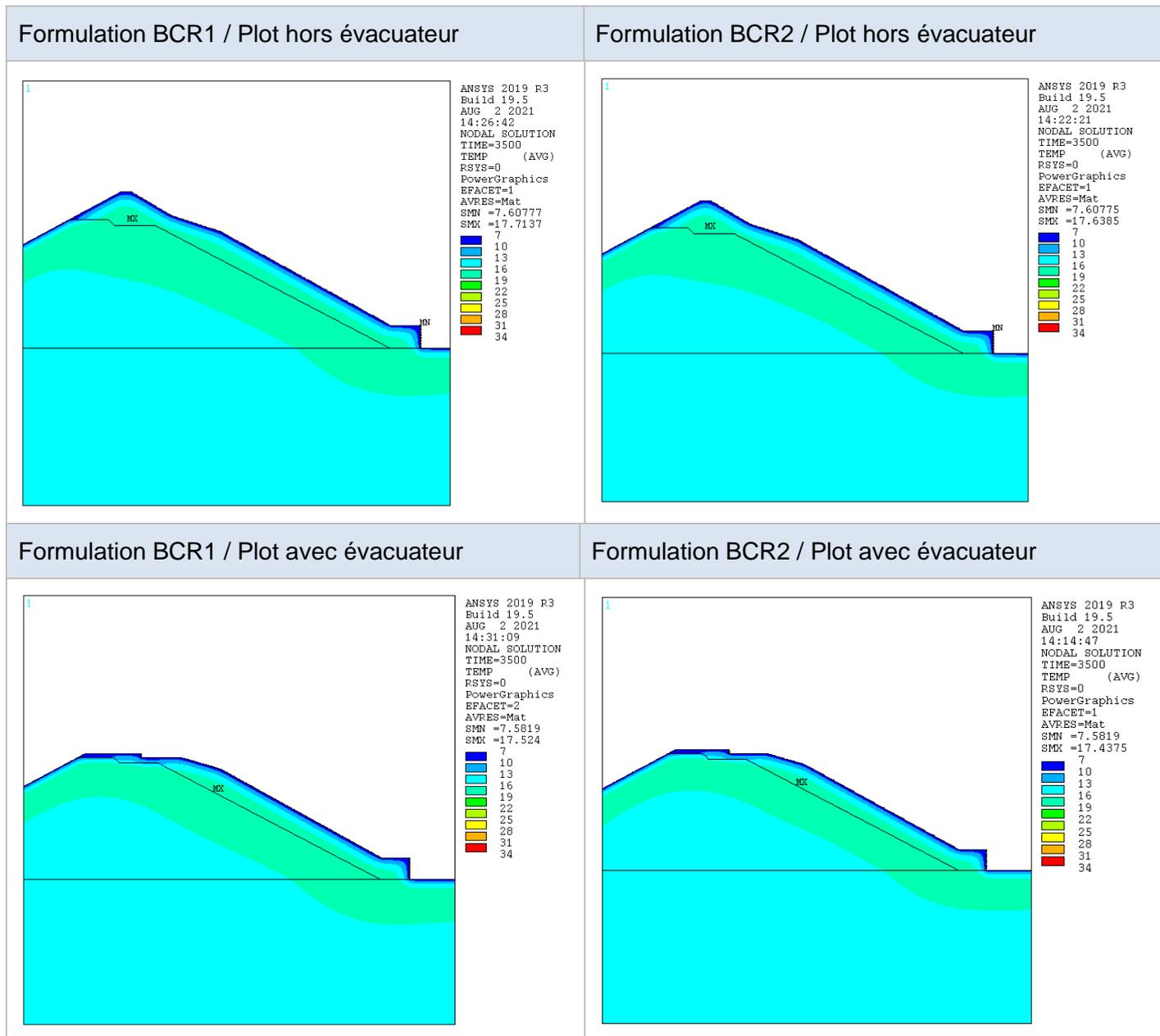


Figure 31 – Isovaleurs des températures au dernier hiver simulé

La température en peau de BCR pour le dernier hiver simulé est de 7,5°C alors que la température au cœur du BCR est quasiment revenue à la température moyenne annuelle (~16°C).

3.4.4 EVOLUTION TEMPORELLE DES TEMPERATURES

Afin de mieux visualiser l'évolution temporelle de la température dans le BCR, 4 points de suivi ont été définis dans le modèle. Ces points sont présentés dans la figure suivante.

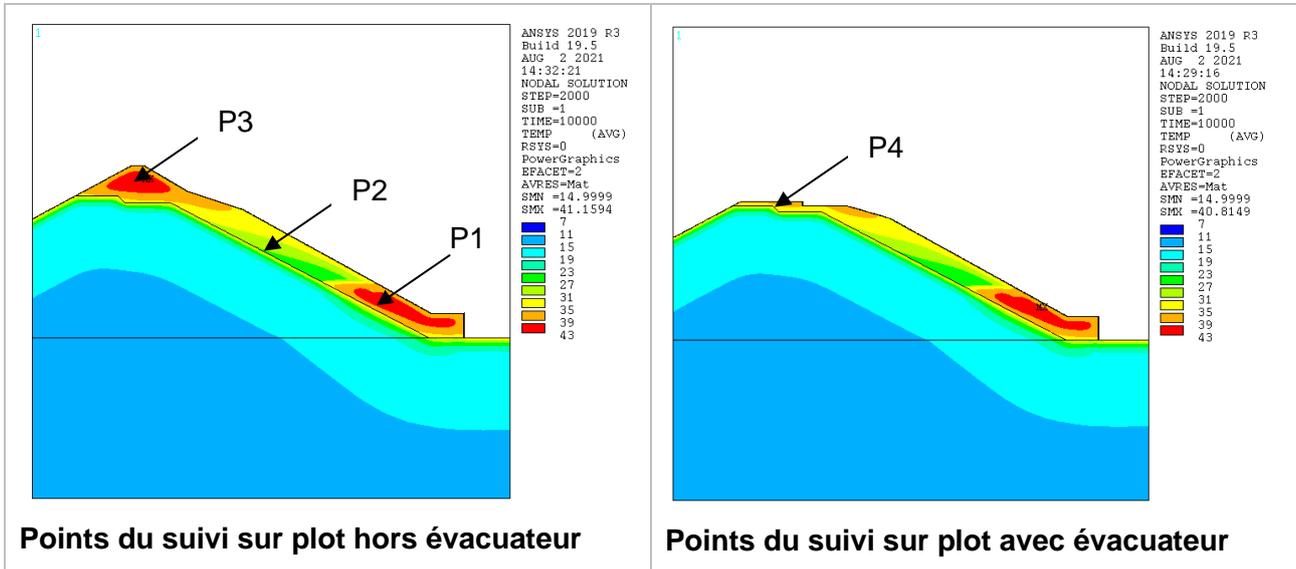


Figure 32 – Emplacement des points de suivi de la température

Les graphiques suivants montrent l'évolution des températures en ces points pour la formulation BCR1 et la formulation BCR2. La date t0 correspond à la date de mise en place de la première couche de BCR.

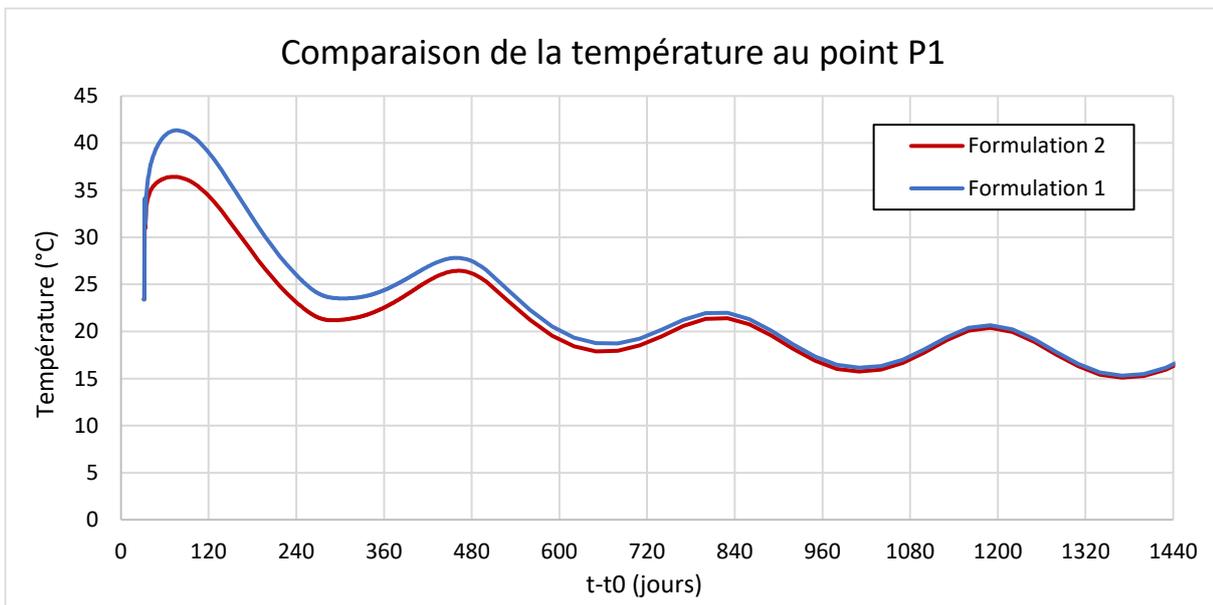


Figure 33 – Evolution temporelle des températures au point P1

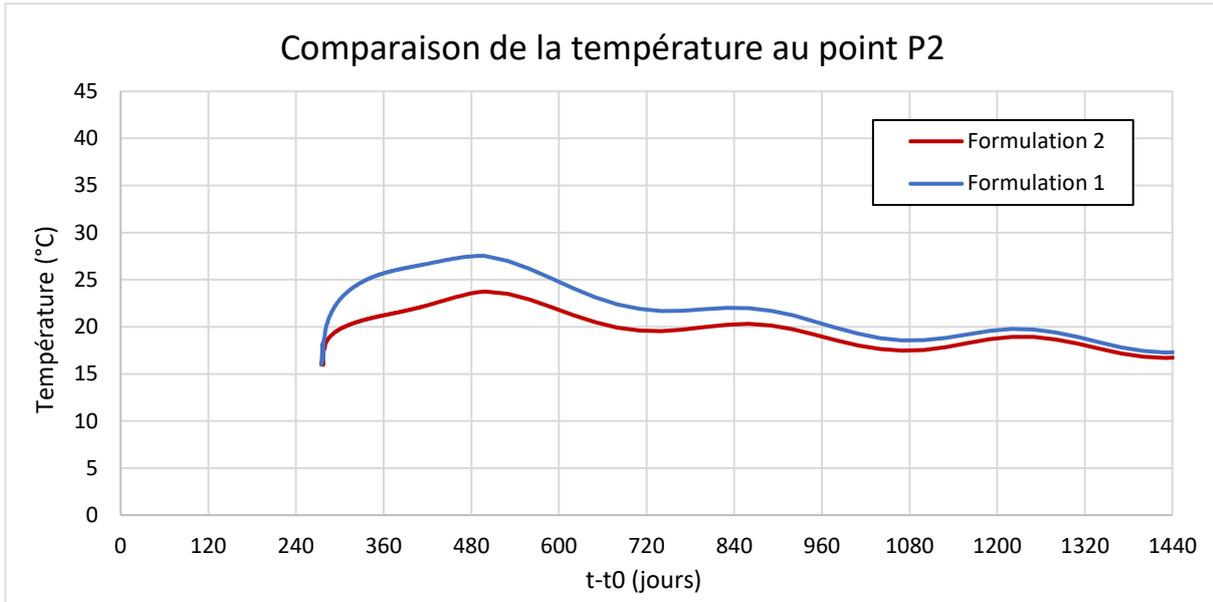


Figure 34 – Evolution temporelle des températures au point P2

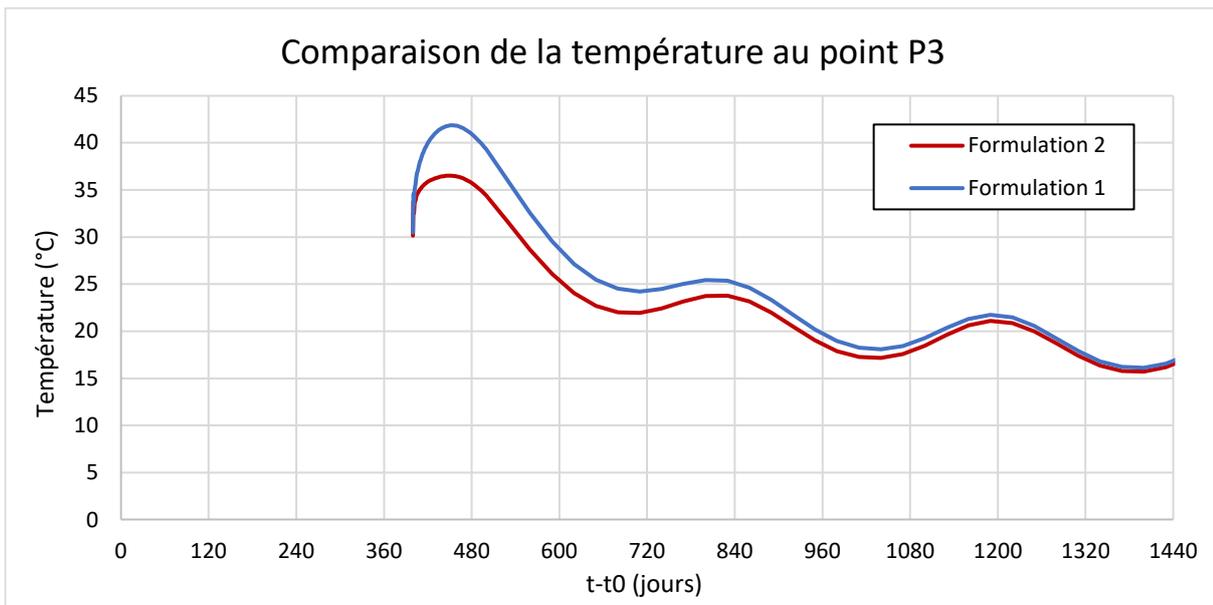


Figure 35 – Evolution temporelle des températures au point P3

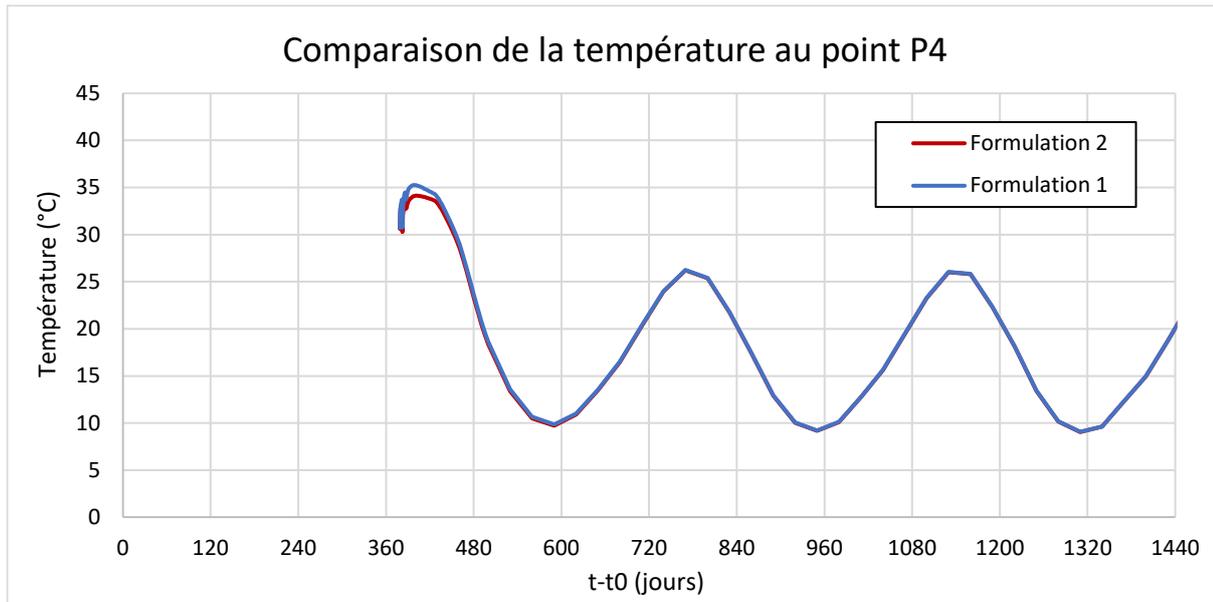


Figure 36 – Evolution temporelle des températures au point P4

Le tableau suivant donne les températures calculées en ces points à différentes dates et le refroidissement par rapport à la température maximale atteinte (chiffre entre parenthèses).

Tableau 8 : Calculs thermiques – températures clés aux points de suivi

		P1	P2	P3	P4
	Mise en place	24°C	16°C	30°C	30°C
BCR1	Tmax	40,3°C	27°C	41,2°C	35,3°C
	Premier hiver	20°C (-20,3°C)	25°C (-2°C)	27,2°C (-14°C)	10°C (-25,3°C)
	Dernier hiver	16°C (-24,3°C)	17°C (-10°C)	16°C (-25,2°C)	10°C (-25,3°C)
BCR2	Tmax	36,1°C	23,4°C	36,3°C	34,1°C
	Premier hiver	19,5°C (-16,6°C)	22°C (-1,4°C)	24,1°C (-12,2°C)	10°C (-24,1°C)
	Dernier hiver	16°C (-20,1°C)	17°C (-6,4°C)	16°C (-20,3°C)	10°C (-24,1°C)

On peut noter en résumé :

- Le refroidissement au point P2 est faible au premier hiver, ce qui augmente le risque de fissuration en peau. A titre de comparaison, la peau du BCR se refroidit de 12°C à 24°C au premier hiver (et dépend principalement de la date de mise en place de la couche).
- Le point P4 est proche de la surface extérieure, il suit rapidement les variations saisonnières y compris au premier hiver.
- L'écart entre la formulation BCR1 et BCR2 se fait sentir aux points situés au cœur du BCR (P1, P2, P3). Au point P3 l'écart atteint 5°C environ.
- L'écart dû à la date de mise en place du BCR est encore plus important que celui dû à la formulation BCR. Cet écart peut atteindre 15°C entre les zones mise en place l'été et les zones mise en place au printemps.

3.5 CALCULS MECANIQUES ET INTERPRETATION

3.5.1 CRITERES DE FISSURATION CONSIDERES

La fissuration du BCR sera estimée en fonction des contraintes de traction qui sont calculées (réf. [10]) :

- en dessous 0,6 Rt : aucune fissuration significative n'est attendue, le comportement est globalement élastique linéaire ;
- entre 0,6 Rt et 1,25 Rt : une microfissuration peut progressivement apparaître ;
- au-delà de 1,25 Rt : la fissuration peut devenir macroscopique.

Pour chaque formulation de BCR, on considère la résistance à la traction à 90 jours. Les paliers de fissuration sont donc les suivants :

Tableau 9 : Paliers de traction considérés pour estimer la fissuration du BCR

Paliers	BCR1	BCR2
Rt à 90 jours	1,6 MPa	1,0 MPa
Palier 1 : microfissuration	1 MPa	0,6 MPa
Palier 2 : fissuration macroscopique	2 MPa	1,2 MPa

Pour faciliter la lecture des figures présentées par la suite, l'échelle des isovaleurs est ajustée pour faire apparaître :

- **en orange les zones qui dépassent le palier 1 = zone avec micro-fissurations,**
- **en rouge et en gris les zones qui dépassent le palier 2 = zone avec des macro-fissures.**

Il est à noter que du fait du conservatisme des calculs (hypothèses, lois de comportement élastiques), la fissuration doit être interprétée comme une fissuration potentielle. Au-delà de ces paliers, la résistance à la traction n'est pas assurée et une fissuration est possible.

3.5.2 PREMIER HIVER – TRACTION DE PEAU

Les figures ci-dessous montrent les contraintes rive à rive et les contraintes dans la direction parallèle aux joints au premier hiver. Une analyse de ces contraintes est donnée par la suite.

3.5.2.1 Direction rive à rive

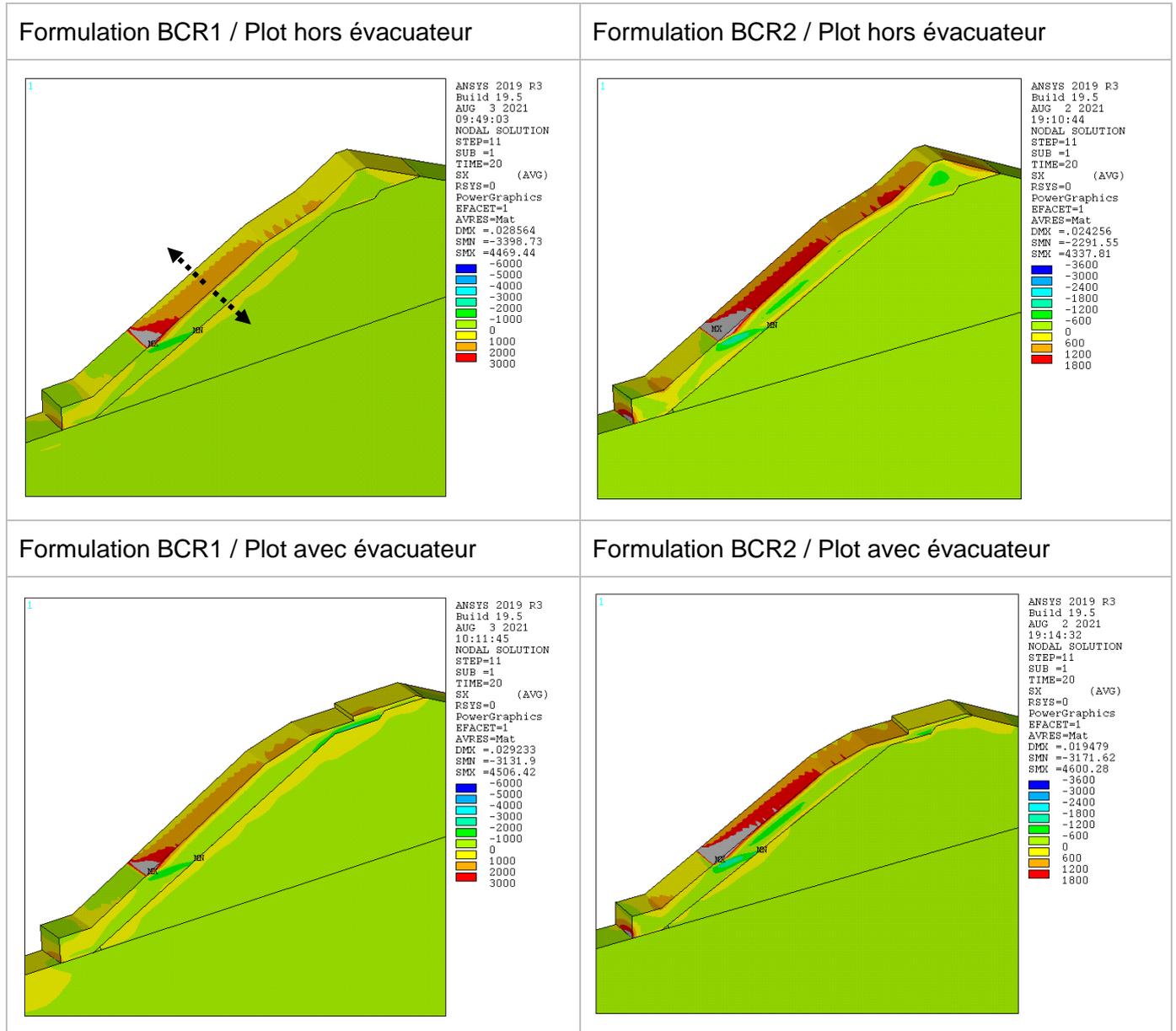


Figure 37 – Contraintes de traction en kPa dans la direction rive à rive au premier hiver

L'épaisseur de la zone qui dépasse chaque palier de traction est donnée dans le tableau suivant :

Paliers	BCR1	BCR2
Palier 1 : microfissuration	1,04 m	1,15 m
Palier 2 : fissuration macroscopique	75 cm	1 m

3.5.2.2 Direction parallèle aux joints

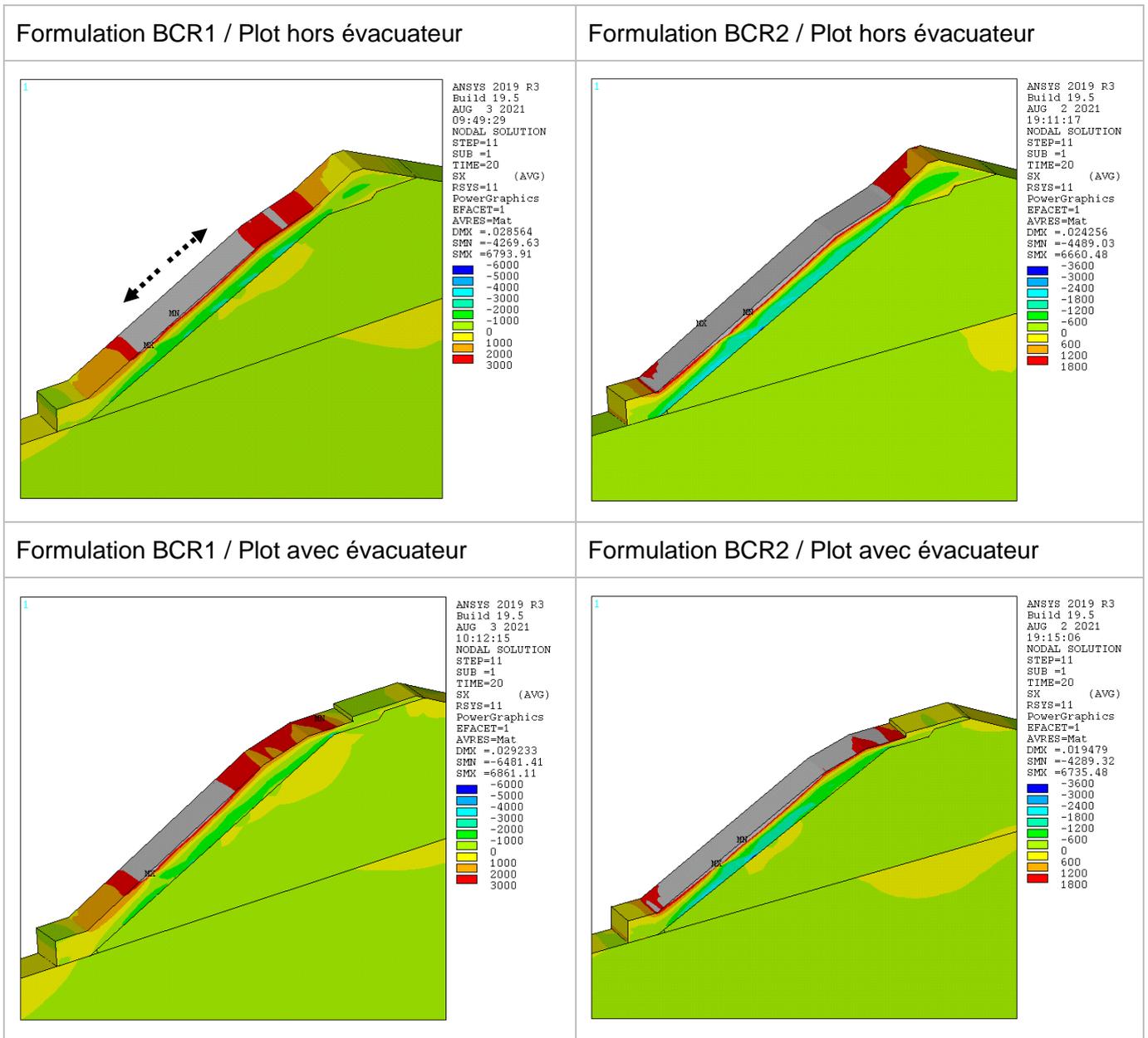


Figure 38 – Contraintes de traction dans la direction parallèle aux joints au premier hiver

L'épaisseur de la zone qui dépasse chaque palier de traction est donnée dans le tableau suivant :

Paliers	BCR1	BCR2
Palier 1 : microfissuration	1,3 m	1,4 m
Palier 2 : fissuration macroscopique	1 m	1,18 m

3.5.2.3 Analyse au premier hiver

Les contraintes de traction se concentrent principalement en peau de BCR, sur le parement aval. L'interprétation de ces contraintes en termes de fissuration potentielle est la suivante :

- Dans la direction rive à rive : la fissuration est concentrée au contact entre le BCR mis en place la première année et le BCR mis en place la deuxième année. L'hypothèse retenue dans les calculs est une adhérence parfaite entre les deux BCR, ce qui conduit inévitablement à un retrait empêché du BCR mis en place la deuxième année et ce quelle que soit la largeur du plot. L'étendue de la zone fissurée est faible en épaisseur (inférieure à 1 m) et en hauteur.
- Dans la direction parallèle aux joints : la fissuration de peau est étendue sur une surface importante du parement aval. L'épaisseur des fissures macroscopiques est en revanche limitée à environ 1 à 1,2 m. Dans la réalité, ces potentielles fissures devraient apparaître au creux des marches comme le montre la figure ci-dessous. Un BCR enrichi ou un BCR armé en peau limitera considérablement l'apparition de ces fissures.



- La formulation BCR1 limite dans tous les cas l'étendue et l'épaisseur des zones fissurées (de 10 à 20 cm en ce qui concerne l'épaisseur de l'éventuelle fissuration macroscopique).

3.5.3 CONTRAINTES DE TRACTION A LONG TERME

3.5.3.1 Direction rive à rive

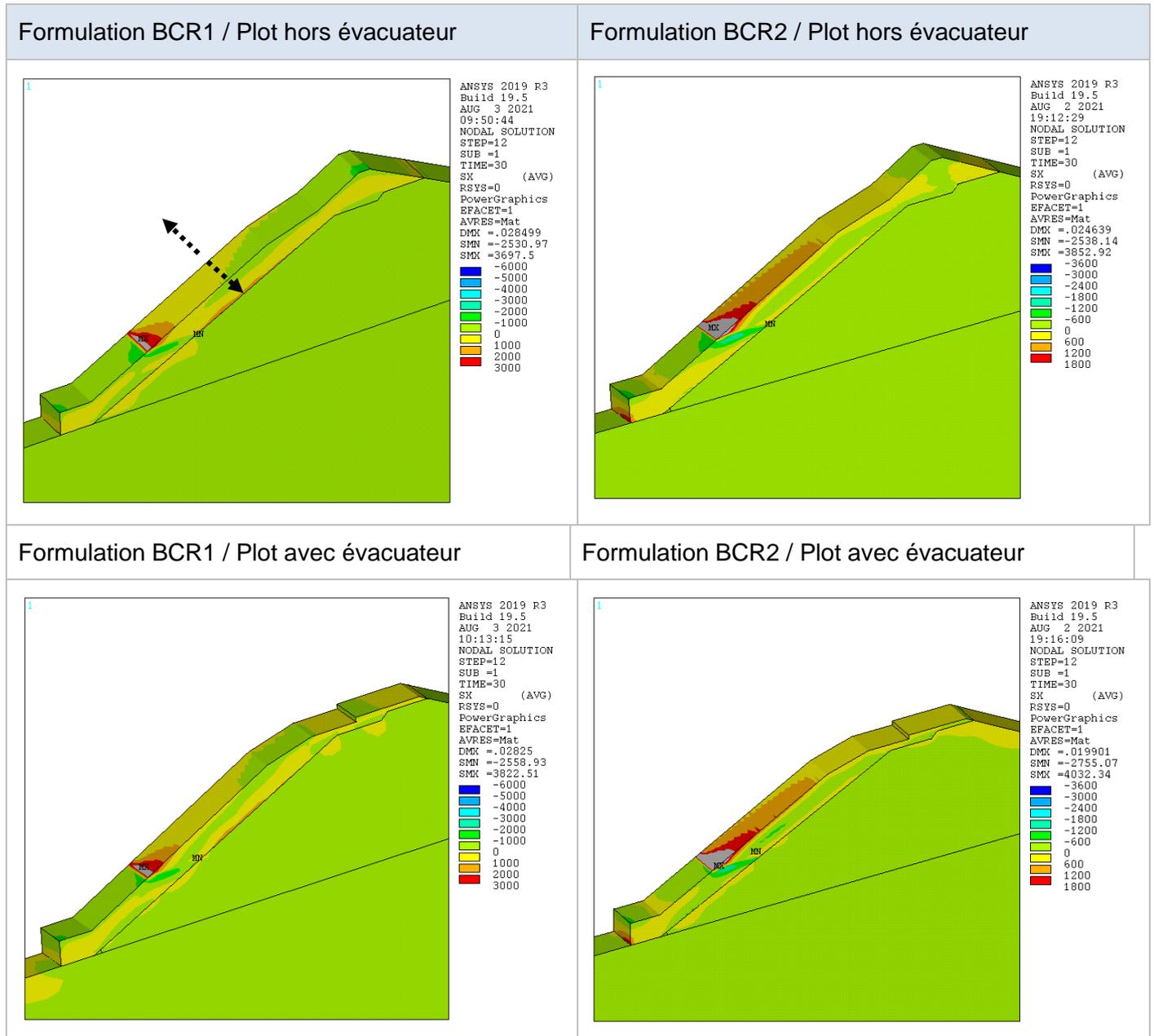


Figure 39 – Contraintes de traction dans la direction rive à rive à long terme

L'épaisseur de la zone qui dépasse chaque palier de traction est donnée dans le tableau suivant :

Paliers	BCR1	BCR2
Palier 1 : microfissuration	95 cm	1,15 m
Palier 2 : fissuration macroscopique	65 cm	95 cm

3.5.3.2 Direction parallèle aux joints

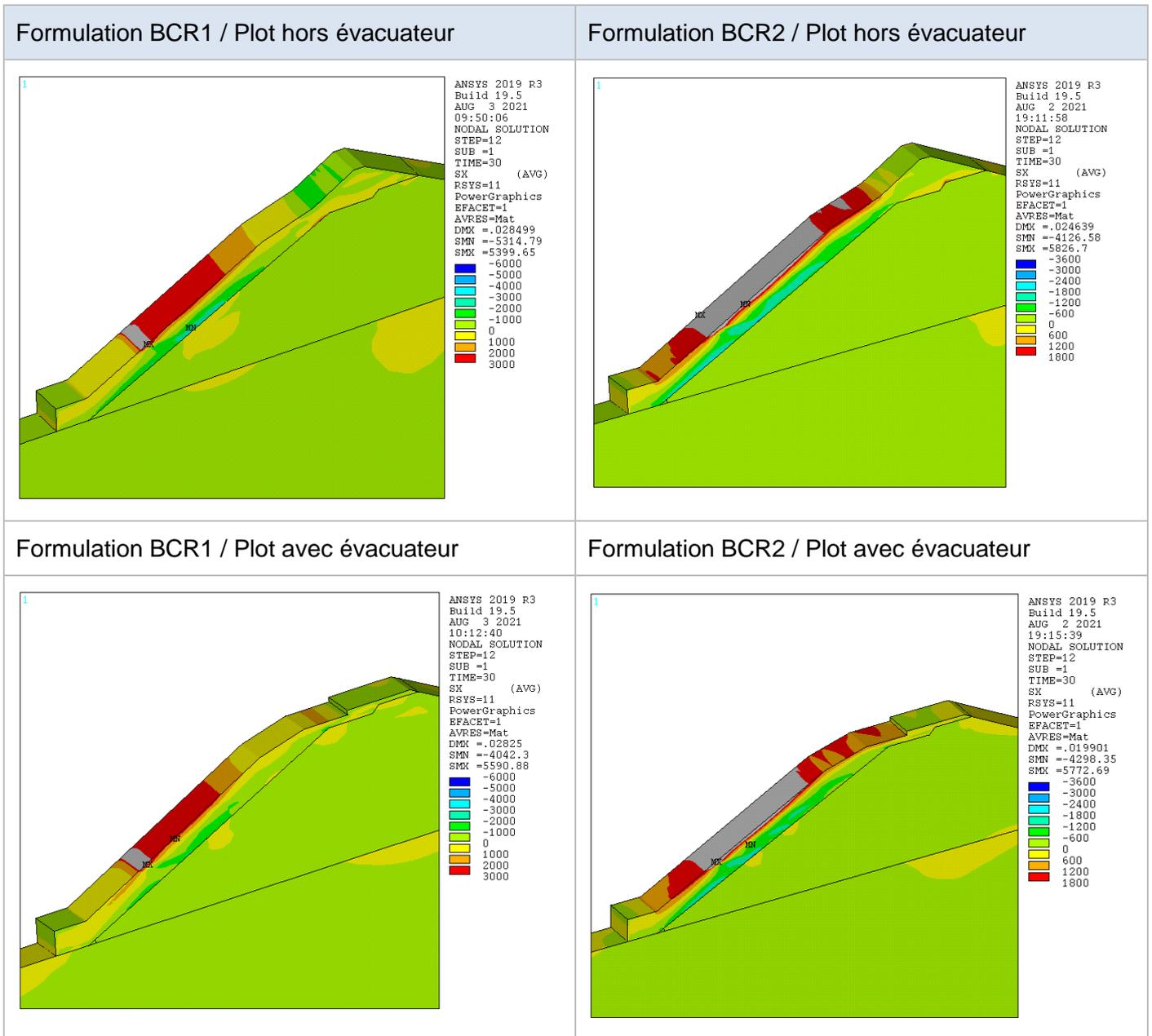


Figure 40 – Contraintes de traction dans la direction parallèle aux joints à long terme

L'épaisseur de la zone qui dépasse chaque palier de traction est donnée dans le tableau suivant :

Paliers	BCR1	BCR2
Palier 1 : microfissuration	1,15 m	1,3 m
Palier 2 : fissuration macroscopique	75 m	1,1 m