

SYNDICAT DES EAUX
DU GANTET

CONFORTEMENT DU BARRAGE
D'ECHANCIÉUX

Dossier PRO
Pièce n°2

Fascicule Hydraulique

016 42487 | Jan. 20 | v.1





Le Crystallin
191/193 Cours Lafayette
CS 20087
69458 Lyon Cedex 06
Email : lyon@hydra.setec.fr
T : 04 27 85 48 80
F : 04 27 85 48 81

Directeur de Projet

WWP

Chef de Projet / RA

QSG

N° affaire

016 42487

Fichier : 42487_RAP_PRO_Piece-2_Fascicule Hydraulique_v1.1.docx

V.	Date	Etabli par	Vérifié par	Nb pages	Observations / Visa
v.1	Jan. 20	BZU	QSG	22	Première émission

TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION	9
2	RAPPEL DU CONTEXTE HYDROLOGIQUE	10
3	CALCULS DE L'EVACUATEUR DE CRUES DE CHANTIER.....	11
4	CALCULS DE DIMENSIONNEMENT DU NOUVEL EVACUATEUR DE CRUES	13
4.1	Calculs de revanche.....	16
5	CALCULS DES OUVRAGES DE VIDANGE	19
6	CALCULS DETAILLES DE LAMINAGE	21
6.1	Situation Exceptionnelle (PHE).....	21
6.2	Situation Extrême (Q10 000).....	21

ANNEXES

Aucune entrée de table d'illustration n'a été trouvée.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Hydrogrammes projet selon [17] – figure extraite du rapport	10
Figure 2 : débit de pointe des crues caractéristiques	10
Figure 3 : résultat de la modélisation hydraulique à $Q_{50} = 14 \text{ m}^3/\text{s}$	11
Figure 4 : section type du coursier avec des pentes à 3H/2V en talus	12
Figure 5 : vue en plan de l'évacuateur de crues et position des profils	13
Figure 6 : section type du coursier : hauteur = 2m, largeur en pied = 2.5 m	13
Figure 7 : résultats de la modélisation (à partir du pied du seuil) pour la crue millénale	14
Figure 8 : Occurrence de dépassement de la cote de danger	15
Figure 9 : résultat de la modélisation hydraulique à $Q_{10\,000} = 40 \text{ m}^3/\text{s}$	15
Figure 10 : Formule de la revanche selon l'USBR	16
Figure 11 : données de vent NV 65 pour le site d'Echancieux	16
Figure 12 : Fetch de la retenue principale	18
Figure 13 : courbe de vidange totale	20
Figure 14 : courbe de fonctionnement de l'EVC pour la situation exceptionnelle (Q_{1000})	21
Figure 15 : courbe de fonctionnement de l'EVC pour la situation extrême ($Q_{10\,000}$)	22

Documents de référence

Les références bibliographiques de l'étude BRL (2015) sont rappelées ci-dessous :

- [1]** Rapport de la Direction Générale des eaux et forêts (GREF), 1938
- [2]** Mémoire explicatif, 15/01/1946
- [3]** Règlement d'eau, 1959
- [4]** Annexe 1, Décret d'utilité publique (DUP), sur les travaux d'alimentation en eau potable, 30/05/1950
- [5]** Décret sur la sécurité des ouvrages hydrauliques, Décembre 2007,
- [6]** Plan du barrage + photos
- [7]** Plan d'ensemble
- [8]** Compte-rendu de la visite du 11 juillet 2008
- [9]** Rapport diagnostic, 08CLS005, version 1, Safege, septembre 2008
- [10]** Dossier de Consultation des entreprises « travaux de curage et de consolidation de la retenue AEP d'Echancieux, Septembre 2008
- [11]** Etude hydrologique, Safege, 2008
- [12]** Rapport diagnostic complémentaire, 08CLS005, version 1, Safege, juin 2009
- [13]** Rapports de surveillance, 2009 – 2010
- [14]** visites techniques approfondies, 20 juin 2012
- [15]** relevé topographique de la retenue, 2015
- [16]** Rapport DREAL, 27 janvier 2015
- [17]** Etude hydrologique révisée, BRL Ingénierie, 2015

Auxquelles on ajoute :

- [18]** Plan topographique et bathymétrique, cabinet PIGEON et SATIF SA, 2018
- [19]** Stabilité de la route – digue, référence CV/KT – 11016/08 CLS, Safege, novembre 2008
- [20]** Rapport de diagnostic, rapport final, Setec Hydratec, Août 2018
- [21]** Rapport de stabilité et de reconnaissances géotechniques, Hydrogéotechnique, en cours de rédaction
- [22]** Identification des Impacts de l'Application de l'Article L214-18 du Code de l'Environnement concernant l'augmentation au 01/04/2014 des débits réservés à l'aval des ouvrages, sur les ressources en eau potable superficielles du département de la Loire, DDAF Loire, janvier 2010
- [23]** Courrier de la DDT Loire ayant pour objet le débit minimum biologique de la prise d'eau du barrage d'Echancieux, février 2011
- [24]** Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai, Comité Français des Barrages et Réservoirs, octobre 2015
- [25]** Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages, CFBR, juin 2013
- [26]** Recherche de l'éventuelle présence de zones de vides et d'hétérogénéités sous le parement béton d'un barrage, Rapport Setec LERM N° 18.43937.001.01.A – 16 NOVEMBRE 2018

Liste des acronymes

- DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
- DDT : Direction Départementale des Territoires
- CFBR : Comité Français des Barrages et Réservoirs
- BETCGB : Bureau d'Etude Technique et de Contrôle des Grands Barrages
- RD : rive droite
- RG : rive gauche
- TN : Terrain Naturel
- PRV : Polyester Renforcé de fibres de Verre
- VF : vidange de fond
- PE : prise d'eau
- PRO : phase projet
- AVP : phase avant-projet
- DIAG : phase diagnostic
- RN : retenue normale
- PHE : plus hautes eaux
- PHEE : plus hautes eaux exceptionnelles
- EVC : évacuateur de crues
- GTR : guide des terrassements routiers
- MOA : Maître d'Ouvrage
- MOE : Maître d'œuvre
- SAUR : Société d'Aménagement Urbain et Rural

1 INTRODUCTION

Ce Fascicule, établi dans le cadre de la mission de maîtrise d'œuvre de confortement du barrage d'Echancieux, présente les données et calculs hydrologique et hydrauliques du projet, et en particulier :

- La justification hydraulique du nouvel évacuateur de crue
- La justification de l'évacuateur de crue de chantier
- La justification des hauteurs de plan d'eau atteintes en crue, prenant en compte le laminage des crues extrêmes
- Le calcul des conditions de vidange

2 RAPPEL DU CONTEXTE HYDROLOGIQUE

L'étude hydrologique de 2015 [17], réalisée par BRL Ingénierie, a conclu à une durée caractéristique de crue de 6 h, et donne les hydrogrammes projet suivants.

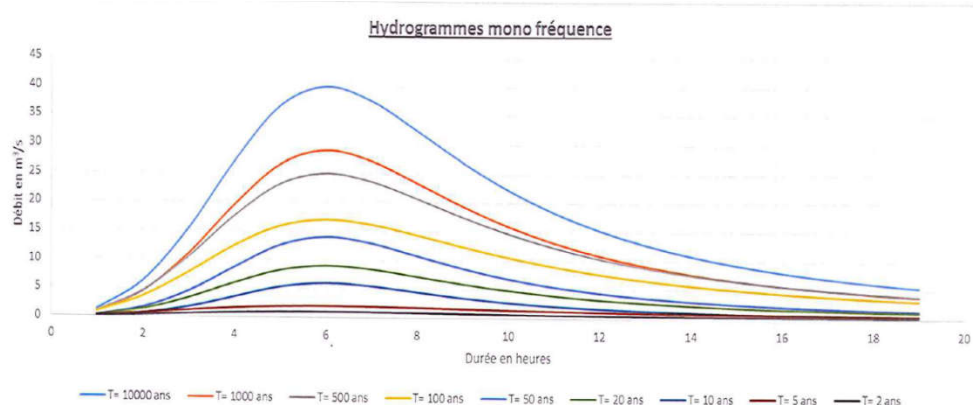


Figure 1 : Hydrogrammes projet selon [17] – figure extraite du rapport

Occurrence de la crue	Débit de pointe
T = 2 ans	1 m ³ /s
T = 5 ans	2 m ³ /s
T = 10 ans	6 m ³ /s
T = 50 ans	14 m ³ /s
T = 100 ans	17 m ³ /s
T = 500 ans	25 m ³ /s
T = 1 000 ans	28,7 m ³ /s
T = 10 000 ans	40 m ³ /s

Figure 2 : débit de pointe des crues caractéristiques

Les mêmes hydrogrammes remis en forme sont présentés sur la figure suivante pour les occurrences 1 000 ans et 10 000ans.

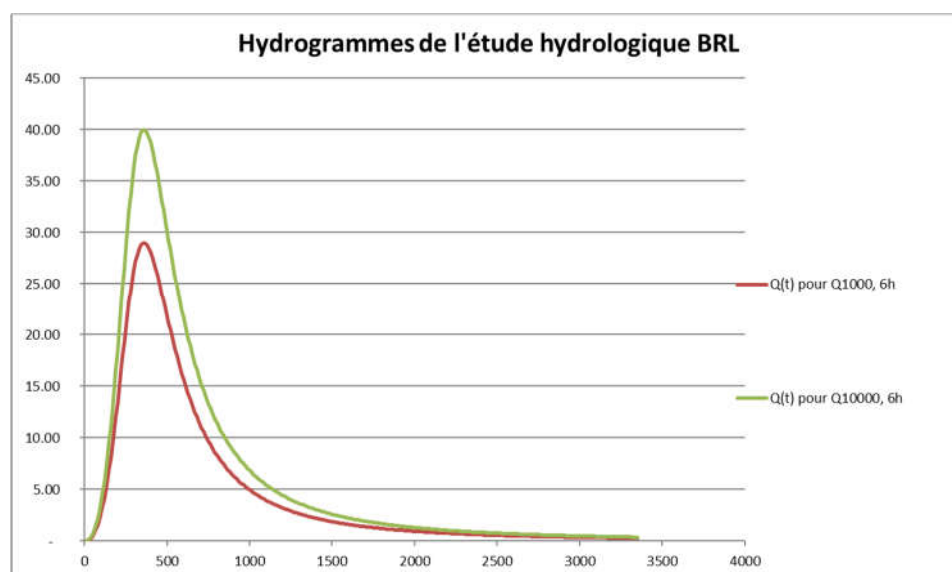


Figure 4 : Hydrogrammes projet selon [17] – remis en forme

Selon [22], le module au barrage d'Echancieux est de 65 L/s.

3 CALCULS DE L'EVACUATEUR DE CRUES DE CHANTIER

Le réaménagement hydraulique de l'évacuateur de crues existant est calculé par une modélisation hydraulique monodimensionnelle.

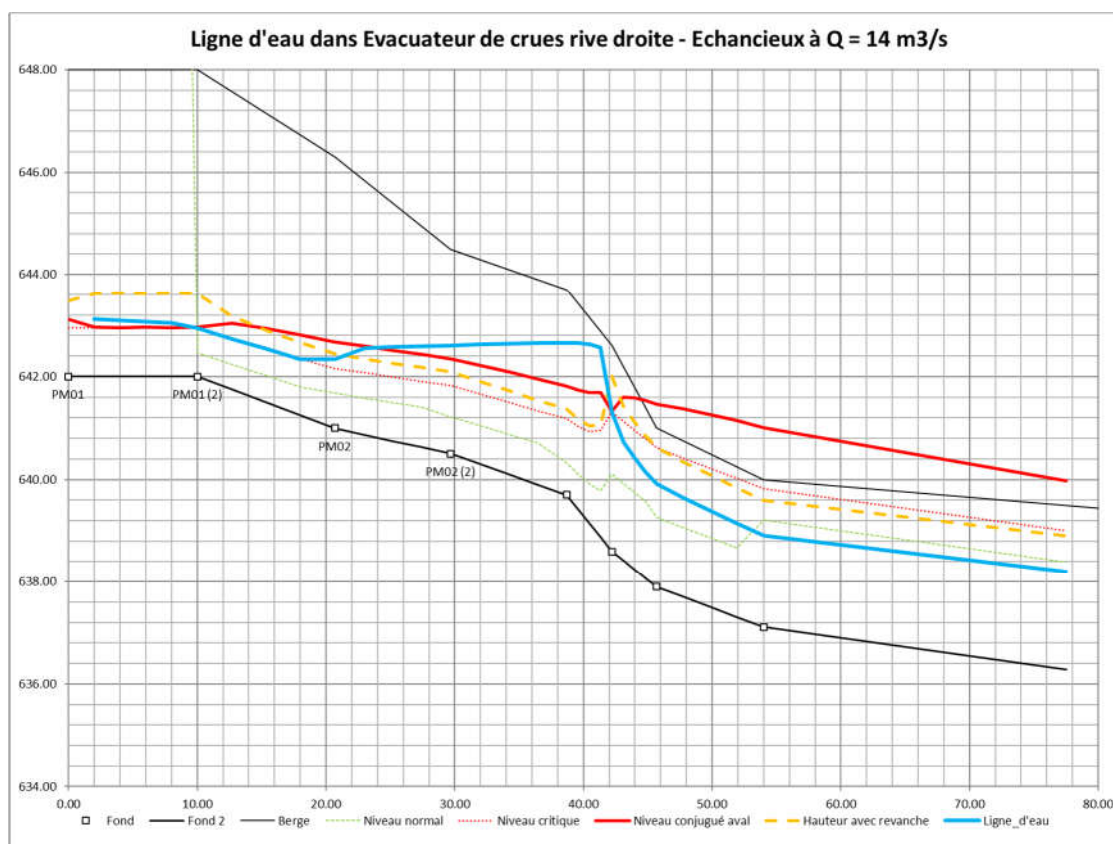


Figure 3 : résultat de la modélisation hydraulique à $Q_{50} = 14 \text{ m}^3/\text{s}$

Une plateforme amont à 642.00 sera créée de sorte que la pente du coursier provisoire soit limitée et que les enrochements puissent être laissés libres. Les vitesses maximales atteintes dans le coursier provisoire sont d'environ 5,5 m/s en amont. La cote atteinte dans la retenue est d'environ 643.2. On constate que l'eau déborde du coursier à partir du passage sous la route et jusqu'à la fin, constat déjà mené dans la situation actuelle du coursier d'évacuateur de crues pour un tel débit.

La section hydraulique modélisée est la suivante.

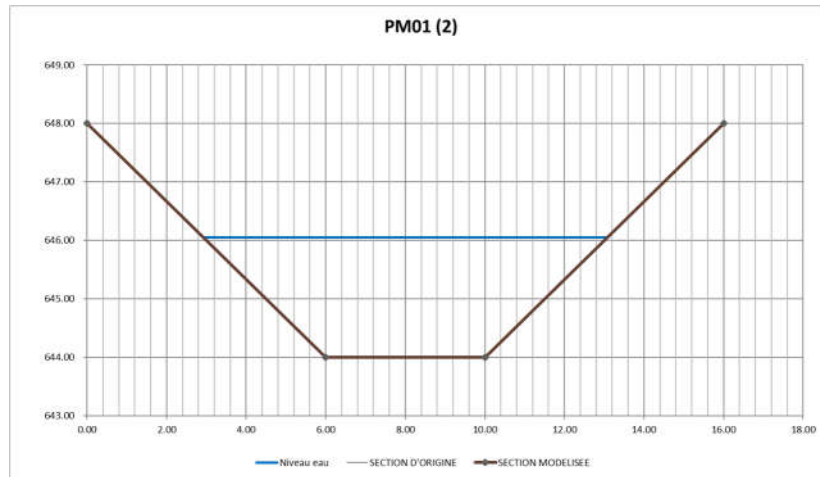


Figure 4 : section type du coursier avec des pentes à 3H/2V en talus

Le dimensionnement des enrochements libres qui seront disposés est donc, selon la formule d'Isbach, tel que :

$$d = 0.022 \times V_c^2$$

d diamètre moyen des enrochements
 V_c vitesse au droit des enrochements

Cela nous donne un diamètre moyen nécessaire d'environ 65 cm en fond.

La formule de Lane pour les enrochements posés sur talus donne

$$d_{\text{talus}} = \frac{d}{\lambda}$$

ϕ angle du talus avec l'horizontale

$$\lambda = \cos(\phi) \times \sqrt{1 - \frac{\tan^2(\phi)}{\tan^2(\theta)}}$$

θ angle d'équilibre des enrochements
 pris égal à 40°

Nous obtenons ainsi les dimensions d'enrochements suivantes pour des talus à 3H/2V :

$$d_{\text{moyen}} = 1.3\text{m et } P_{\text{moyen}} = 900 \text{ kg}$$

Nous préconisons donc les dimensions d'enrochement ci-après :

$$d_{\text{moyen}} = 1.3\text{m}$$

$$P_{\text{moyen}} = 3\,000 \text{ kg, } P_{\text{min}} = 1000 \text{ kg et } P_{\text{max}} = 3\,500 \text{ kg.}$$

Ces enrochements seront ensuite réutilisés dans le coursier de l'évacuateur définitif en rive gauche.

4 CALCULS DE DIMENSIONNEMENT DU NOUVEL EVACUATEUR DE CRUES

Le profil en long du nouvel évacuateur s'établira en déblai dans les matériaux du site, et localement en remblai côté talus rive gauche. Le profil présente trois tronçons de pente relativement homogène, avec une cassure en pied de remblai et un approfondissement en amont de la confluence avec le Gantet pour l'aménagement d'une zone de dissipation.

La section hydraulique à aménager est calculée par une modélisation hydraulique monodimensionnelle.

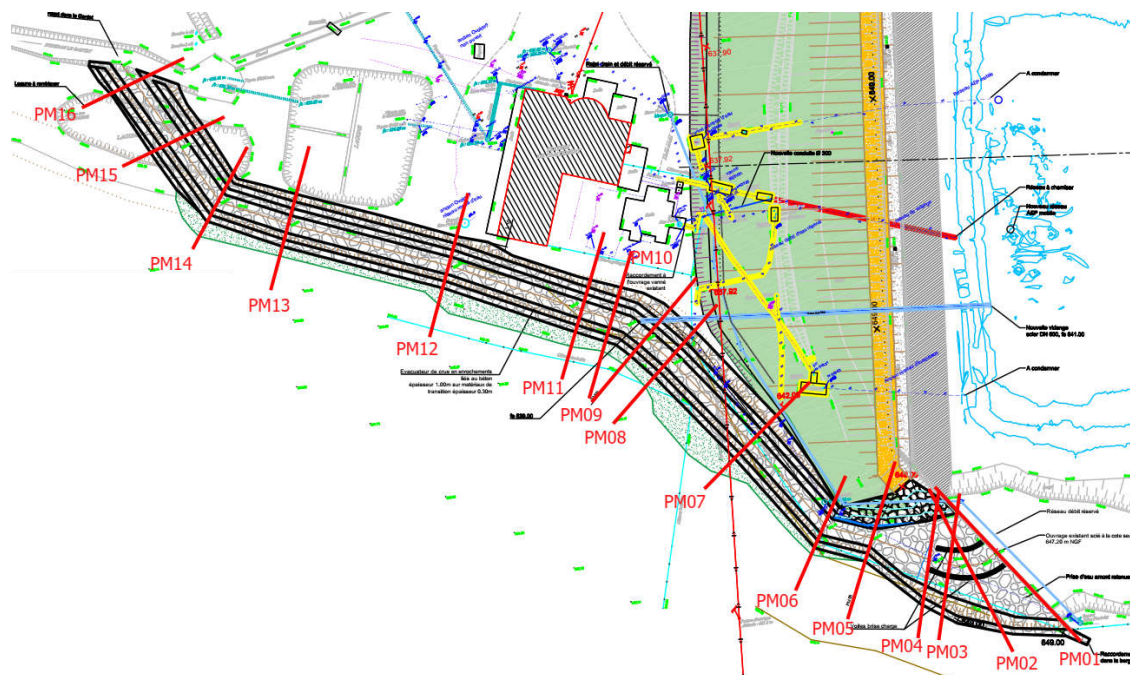


Figure 5 : vue en plan de l'évacuateur de crues et position des profils

La section hydraulique modélisée est la suivante.

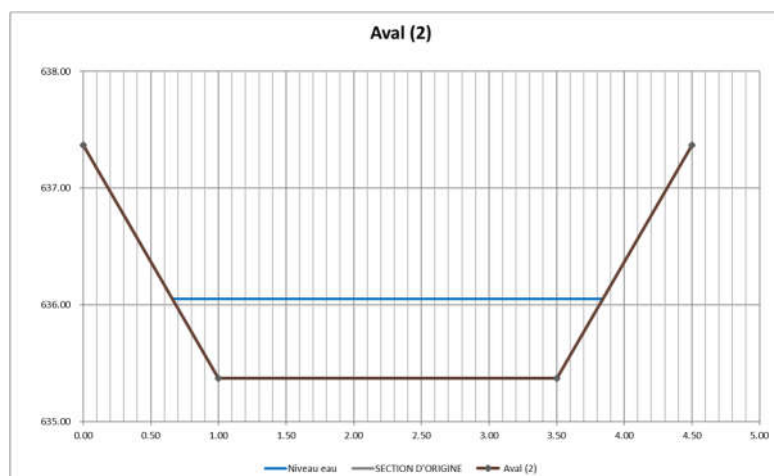


Figure 6 : section type du coursier : hauteur = 2m, largeur en pied = 2.5 m

Pour un barrage de classe C, la crue de projet est la crue millénaire.

Les calculs pour la crue millénaire donnent des résultats tels que :

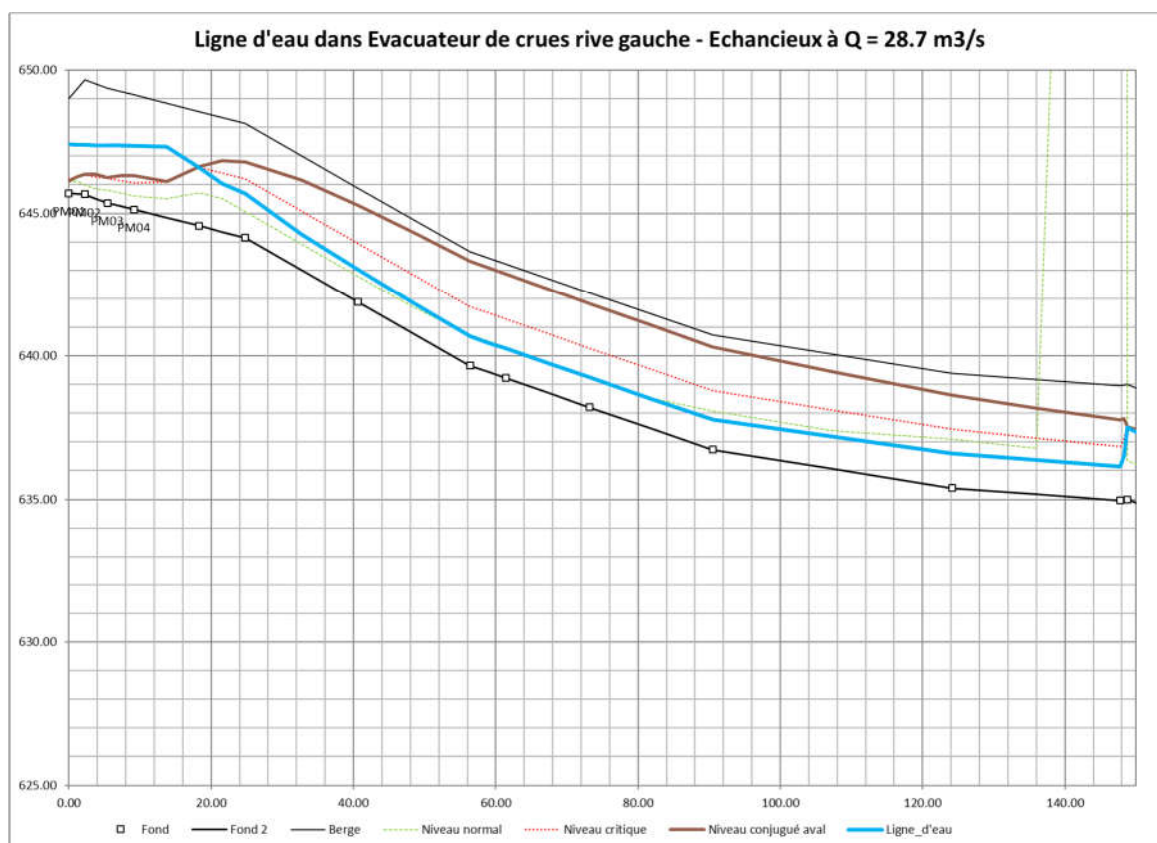


Figure 7 : résultats de la modélisation (à partir du pied du seuil) pour la crue millénale

On constate que le régime est torrentiel dans le coursier. Un ressaut se produit en pied de rampe, dont la longueur est estimée à 6fois la hauteur conjuguée aval, soit 20m environ. De plus, des dispositifs de dissipation seront mis en place en aval immédiat du seuil, de type bajoyers parallèles à l'écoulement pour diriger correctement l'écoulement.

Les vitesses dans le coursier varient entre 2 et 9,4 m/s, les maximaux étant atteints sur le tronçon PM9-PM11.

Selon le Guide des Enrochements du CETMEF, 2009, les enrochements liés sont capables de résister à des vitesses de courant extrêmes de l'ordre de 10 m/s.

La débitance sur le seuil se calcule selon la loi suivante :

$$Q = mL\sqrt{2gh^3}$$

Avec m : coefficient de débit considéré égal à 0,38

- L : longueur déversante de 25 m
- g : l'accélération de la pesanteur 9,81 m/s²
- h : la lame d'eau sur le seuil

Cette formule est applicable car on a vérifié auparavant que le seuil fonctionne bien en dénoyé grâce à la modélisation précitée. Le calage altimétrique du déversoir est obtenu par une poutre seuil en béton armé.

La cote des PHE est donc de **648,00**.

La situation de crue extrême correspond à l'atteinte de la cote de danger. Pour le barrage d'Echancieux, en l'absence de dispositif spécifique permettant d'éviter une érosion du parement aval en cas de surverse, cette cote de danger correspond à la cote de crête.

La probabilité à ne pas dépasser, prescrite par les recommandations du CFBR, est fonction de la classe. Pour un ouvrage de classe C, elle vaut 10^{-4} et correspond donc à une crue décennale sans vent.

Classe du barrage	Probabilité annuelle de dépassement
A ¹¹	10^{-5}
B	3.10^{-5}
C	10^{-4}
D avec $V \geq 50000 \text{ m}^3$	10^{-3}

Figure 8 : Occurrence de dépassement de la cote de danger

Les calculs pour la crue extrême donnent des résultats tels que :

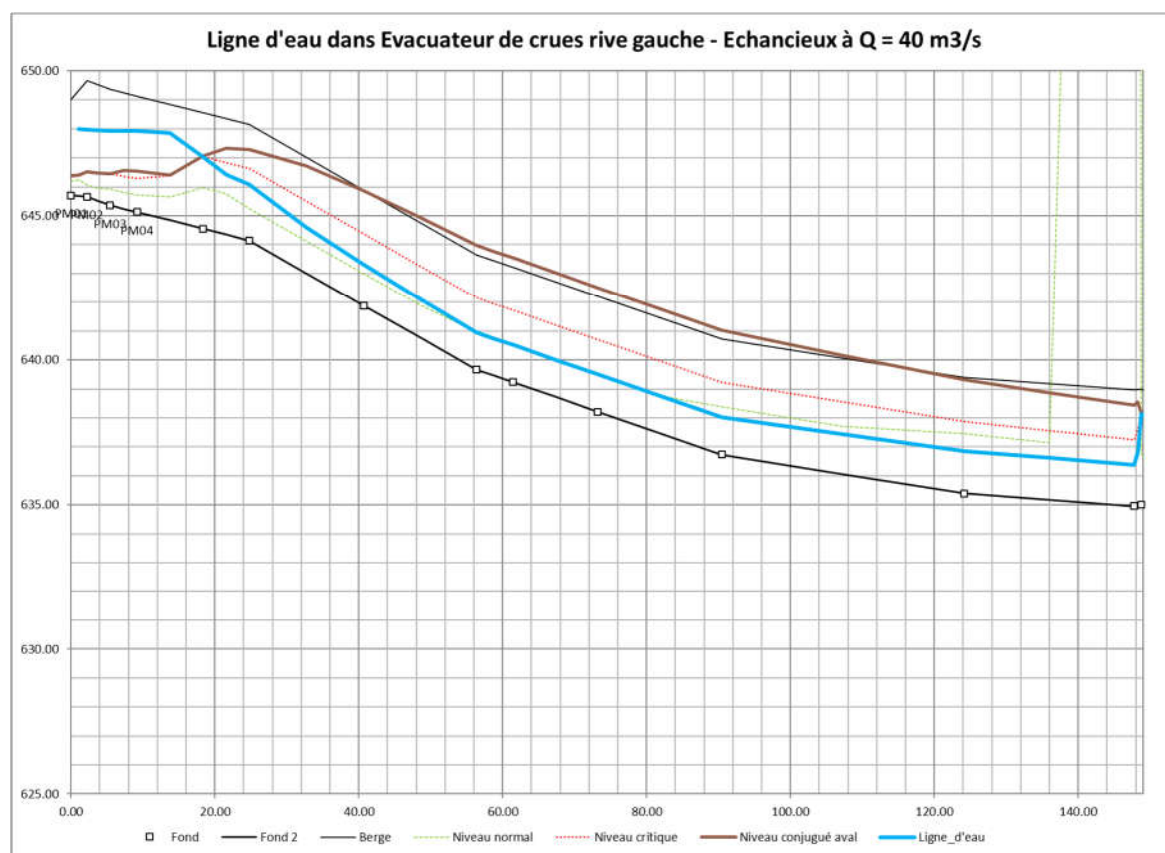


Figure 9 : résultat de la modélisation hydraulique à $Q_{10\,000} = 40 \text{ m}^3/\text{s}$

Pour ce débit, le régime est également torrentiel. On note qu'un ressaut se produit en pied de rampe avant la confluence avec le Gantet, dont la longueur est estimée à une vingtaine de mètres.

Les vitesses dans le coursier varient entre 3 et 9,9 m/s, avec des maximaux sur le tronçon PM11-PM16.

La revanche à assurer est calculée selon la formule de l'USBR :

$$R = 2 + 0,025 \times V \times \sqrt[3]{H}$$

Avec R la revanche en pied

V la vitesse en pied/s

H la hauteur d'eau en pied

1 pied = 0,3048 m et 1 m = 3,2801 pied

Figure 10 : Formule de la revanche selon l'USBR

L'application numérique donne une revanche d'environ 0.7 m, ce qui fait une hauteur totale de bajoyers latéraux de 2m environ.

La cote dans le plan d'eau pour la crue extrême est de 648,20, ce qui laisse une revanche satisfaisante de 0,80 m par rapport à la cote de crête à 649,00.

Les blocs dans le chenal seront liés au béton; le diamètre nominal des enrochements pris en compte sera de 1m répartis en une couche sur une couche de matériaux de transition, soit un poids de 1400kg environ, mis en place sur matériaux drainants de transition. Une partie proviendra des enrochements libres de l'évacuateur de crue de chantier.

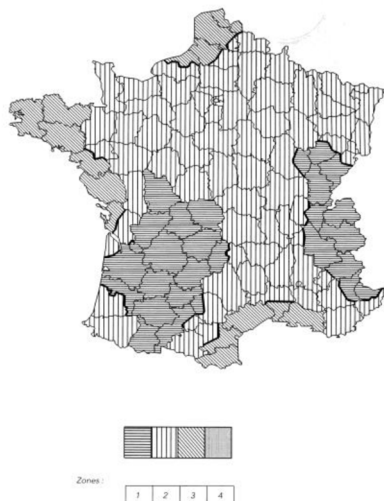
4.1 CALCULS DE REVANCHE

Une revanche suffisante doit être présente entre la cote de crête de l'ouvrage à 649,00 et la cote de retenue atteinte pour les cas :

- Cote à la retenue normale (RN) + vent de période de retour 1000 ans soufflant sur la retenue
- Cote des PHE + vent de période de retour 50 ans soufflant sur la retenue

Le vent de projet est estimé à partir des règles du NV 65 émises par le CFBR. Le site est en zone 2, et il est considéré comme protégé (vent descendant du col dans l'axe de la retenue).

France métropolitaine : carte des zones de vent.



Règles NV65 : pressions et vitesses de vent normal ou extrême					
pressions de référence à 10m au dessus du niveau du sol					
	site	pression normale	pression extrême	Vitesse normale	Vitesse extrême
		Pa	Pa	km/h	km/h
zone1	protégé	400,0	700,0	92,0	121,7
	normal	500,0	875,0	102,9	136,1
	exposé	675,0	1181,3	119,5	158,1
zone2	protégé	480,0	840,0	100,8	133,3
	normal	600,0	1050,0	112,7	149,1
	exposé	780,0	1365,0	128,5	169,9
zone3	protégé	600,0	1050,0	112,7	149,1
	normal	750,0	1312,5	126,0	166,6
	exposé	937,5	1640,6	140,8	186,3
zone4	protégé	720,0	1260,0	123,4	163,3

Figure 11 : données de vent NV 65 pour le site d'Echancieux

La vitesse normale est assimilable au vent 50 ans, il vaut ici 100.8 km/h, soit 28 m/s.

D'après les recommandations du CFBR, la vitesse du vent de période de retour 1000 ans = 1.2Q50 ans, il vaut donc 120.96 km/h, soit 33.6 m/s.

La hauteur des vagues est établie en suivant les recommandations du CFBR pour le calcul du Fetch.

Cas vent T = 50 ans

- **1^{ère} formule :**

Pour les retenues de superficie < 100 ha, on retiendra la formule Bretschneider-Gaillard¹ ci-après.

$$h = 0.26 * th \left[0.578 \left(\frac{gD}{U^2} \right)^{3/4} \right] * th \left[\frac{0.01 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/2}}{th \left[0.578 \left(\frac{gD}{U^2} \right)^{3/4} \right]} \right] * \frac{U^2}{g}$$

Avec :

- U vitesse du vent (m/s) D profondeur de l'eau (m), prise égale à la profondeur d'eau au centre de gravité de la retenue à la cote des PHE, soit 9m environ
- F longueur du Fetch (m) pris égal à la plus grande diagonale, soit 230 m environ

Soit, h = 0.35 m

La vitesse de propagation des vagues peut être évaluée par la formule de GAILLARD ci-après : $V = 1.5 + 2 \cdot h$

Avec :

- v : vitesse de propagation des vagues
- h : hauteur des vagues

soit, V = 2.2 m/s

La revanche liée à l'action des vagues est donnée par la formulation suivante :

$$R = 0.75 + V^2/2g, \text{ soit } R = 1.00 \text{ m.}$$

- **2^{ème} formule :**

Pour le calcul de la hauteur des vagues, on utilise la formule de Smith, adaptée aux conditions d'eaux profondes :

$$H_d = 1,25 H_s = 0,00048 \hat{U}_a \sqrt{F}$$

- Hd est la hauteur de vagues de projet = 1,25 Hs pour les barrages en remblai;
- Hs désigne la hauteur significative des vagues en m ;
- F est la longueur du fetch (surface d'eau continue sur laquelle le vent souffle) de la retenue en m ; F = 230 m (sans considérer la retenue de queue)
- \hat{U}_a désigne la vitesse efficace ajustée du vent à 10 m de hauteur en m/s.

$$\hat{U}_a = U \sqrt{(0,75 + 0,067 \times U)}$$
 où U est la vitesse moyenne sur une heure du vent à 10 m au-dessus de la surface de l'eau pour la période de retour considérée.
- R : hauteur de déferlement. Elle est obtenue selon les recommandations du CFBR, le type de barrage et la pente de son parement amont et

¹: *Petits barrages : recommandations pour la conception, la construction et le suivi*, CFBR-Degoutte, 1997.

dépend également de la longueur d'onde, de la période et de la hauteur des vagues. $R = 0.6\text{m}$.

On retient donc une revanche de 1 m.

Cas vent T = 1000 ans

- 1^{ère} formule :
On obtient une hauteur de vague de 0.42 m, une vitesse de 2.3 m/s et donc une revanche de 1.0 m.
- 2^{ème} formule :
On obtient une hauteur de vague de 0.57 m, une hauteur de déferlement donc une revanche de 0.7m.

On retient donc une revanche de 1.0 m à avoir entre la crête et la RN.



Figure 12 : Fetch de la retenue principale

5 CALCULS DES OUVRAGES DE VIDANGE

Ouvrage de vidange de fond actuel

Actuellement, la capacité de la vidange de fond à RN est telle que :

$$Q = \mu S \sqrt{2gH}$$

Où $\mu = 0.45$ – le coefficient de débit

S : la section de conduite – $\pi(\Phi/2)^2 = 0.071 \text{ m}^2$ ($\Phi = 300 \text{ mm}$)

H : la charge entre la cote de retenue et la cote supposée de la conduite de vidange de fond (= 640)

La capacité à RN est donc de 0,37 m³/s. La vidange de la demi-charge se fait en environ 27h et la vidange totale en 68h environ ; ce qui est conforme aux règles de l'art.

Ouvrage de vidange de fond projeté

Les règles de dimensionnement de vidange de fond doivent être vérifiées :

- diminution de 50 % de la poussée sur le barrage en 8 jours en supposant les apports nuls et sans la participation de la prise usinière ;
- vidange totale de la retenue en 21 jours dans les mêmes conditions.

Le débit évacué par la vidange de fond suit la loi suivante :

$$Q = \mu S \sqrt{2gh}$$

- $\mu = 0.7$;
- S : section de la conduite de vidange ($\Phi = 600 \text{ mm}$)
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$
- h : hauteur d'eau jusqu'au fil d'eau de conduite en mètre (considéré à 640,50 m)

Le coefficient μ est calculé pour ajuster au mieux la loi d'orifice aux calculs de débits effectués en prenant en compte les pertes de charges singulières et régulières le long de la conduite.

Pour les pertes de charge singulières, la formule de Lechapt et Calmon est utilisée, basée sur des ajustements de la formule de Colebrook selon : $j = LQ^M/D^N$ avec :

- Q le débit en m³/s,
- D le diamètre de la conduite en m
- J la perte de charge en mm/m

Les paramètres L, M et N dépendent de la rugosité k de la conduite considérée égale à 1 (ce qui est conservatif), soit L = 1.601, M = 1.975 et N = 5.25.

Les coefficients de pertes de charge singulières suivants sont considérés :

- K = 0.5 pour l'entonnement amont,
- K = 0.2 pour le coude à 122°
- K = 0.3 pour chaque vanne opercule
- K = 0.3 pour l'exutoire.

Le débit total évacuable par la vidange totalement ouverte à RN est 2.3 m³/s.

Le débit total évacuable par la vidange totalement ouverte à la cote 646 est 2 m³/s.

La demi-charge est atteinte pour une cote de 645.10.

La courbe de vidange via la conduite en 600 mm est telle que :

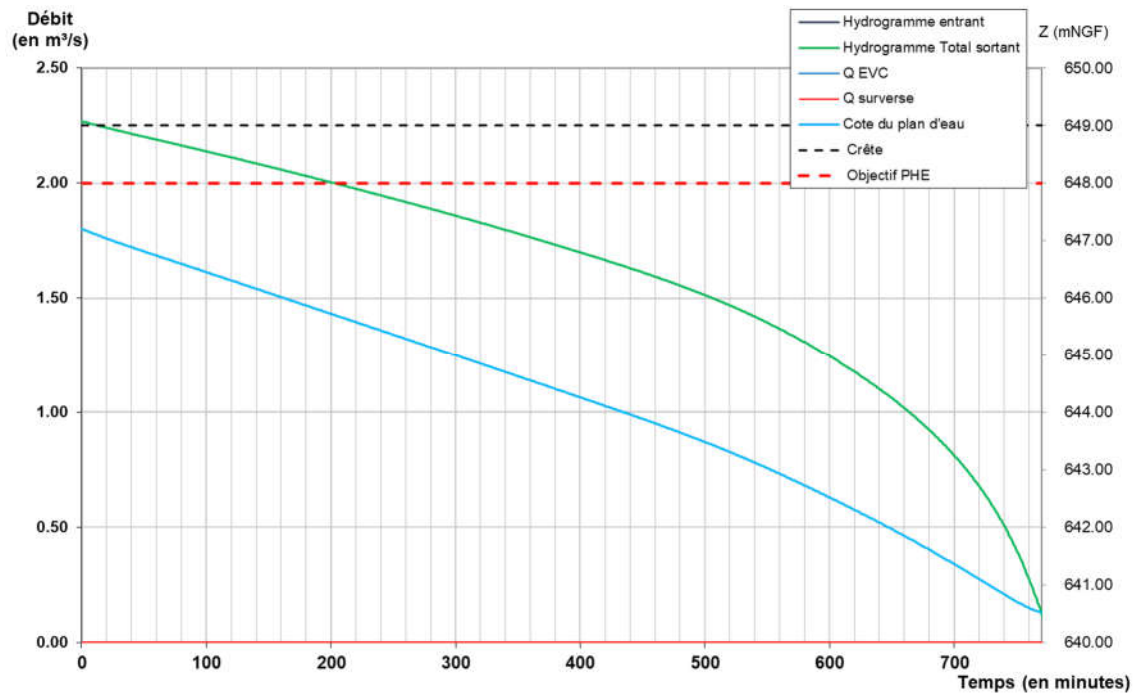


Figure 13 : courbe de vidange totale

Il faut pour réaliser une vidange de la demi-charge environ 6h et pour la vidange totale 18h environ ; ce qui est conforme aux règles de l'art.

6 CALCULS DETAILLES DE LAMINAGE

6.1 SITUATION EXCEPTIONNELLE (PHE)

Pour la situation exceptionnelle, on simule l'arrivée de la crue millénale dans une retenue à la cote de RN.

Il vient le graphique de laminage suivant :

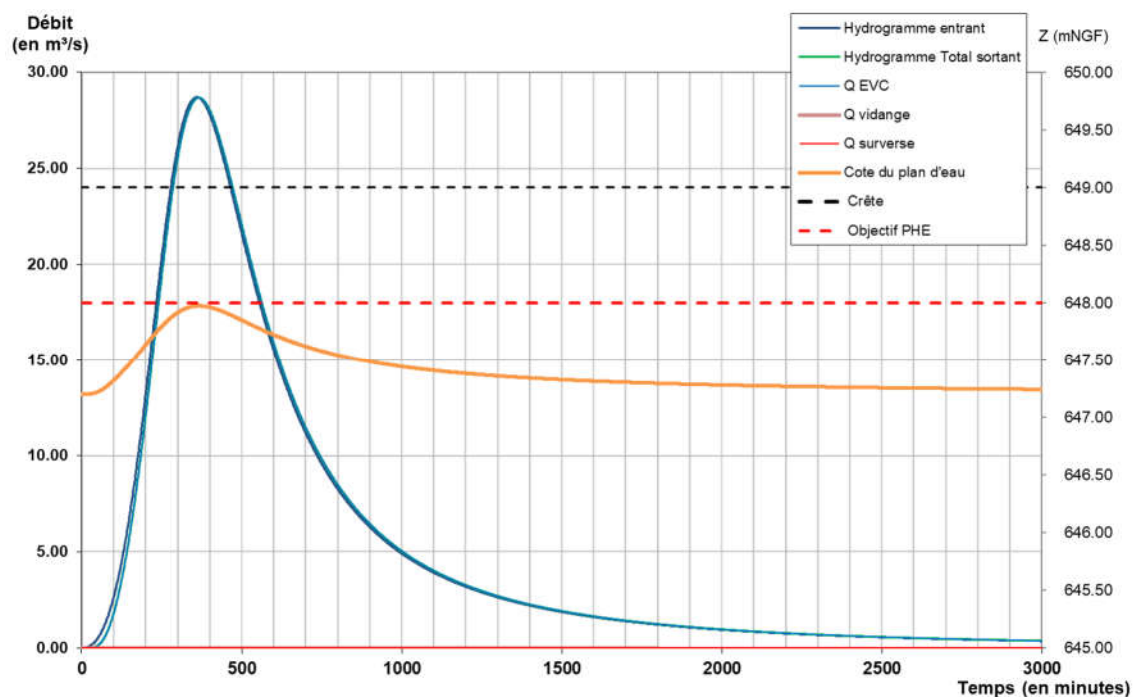


Figure 14 : courbe de fonctionnement de l'EVC pour la situation exceptionnelle (Q1000)

6.2 SITUATION EXTREME (Q10 000)

On simule la crue décamillénale survenant sur une cote de retenue à RN.

Il vient le graphique de laminage suivant :

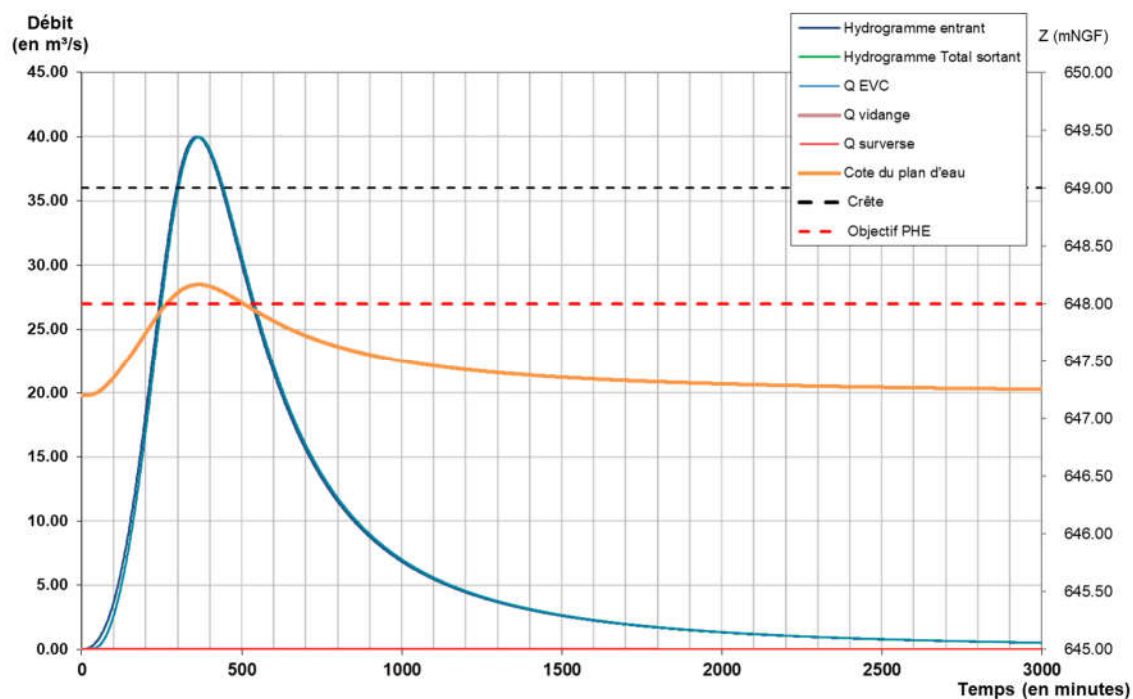


Figure 15 : courbe de fonctionnement de l'EVC pour la situation extrême (Q10 000)

La condition de non-atteinte de la cote de danger est ici largement satisfaite.