# ETUDE DU POTENTIEL D'EROSION DU CHENAL EN AVAL DES VANNES DE FOND DU BARRAGE DE PETIT-SAUT PAR APPLICATION DES CRITERES EGSI ET RMEI

# Scour assessment of the Petit-Saut dam bottom outlet channel following eGSI and RMEI criteria

#### Anaïs FAIVRE, Benoit BLANCHER, Florence LAFON

EDF-CIH, 4 allée du Lac de Tignes, 73290 La-Motte-Servolex, France anais-an.faivre@edf.fr ; benoit.blancher@edf.fr ; florence-c.lafon@edf.fr

#### Thierry LETURCQ

EDF-CEIDRE, 905 avenue camp de Menthe, 13095 Aix-en-Provence, France thierry.leturcq@edf.fr

#### **MOTS CLEFS**

Erosion, évacuateur de fond, indice d'érodabilité, puissance de dissipation hydraulique, modèle numérique 3D, FLOW-3D

## **KEY WORDS**

Scour, bottom outlet, rock mass index, stream power dissipation, 3D numerical model, FLOW-3D

## RÉSUMÉ

Les vannes de fond du barrage de Petit-Saut (Guyane) ont évacué des crues importantes, notamment une crue centennale au printemps 2000. Les récentes inspections bathymétriques ont révélé une érosion marquée du chenal rocheux en aval du radier en béton de cet évacuateur de crues. Afin de caractériser l'évolution potentielle de l'érosion à l'avenir et évaluer les risques éventuels pour la stabilité des structures de l'aménagement, EDF a mené une étude en appliquant la méthode proposée par S. Pells en 2016 [1].

Cette méthode d'évaluation du risque d'érosion en aval des évacuateurs de crues repose sur la caractérisation de l'érodabilité du massif rocheux et des conditions hydrauliques d'évacuation des crues. Le risque d'érosion est alors déduit à partir de l'abaque puissance dissipée - indice d'érodabilité proposé par S. Pells. Cet abaque définit 5 classes d'érosion à partir de 118 références provenant de 26 évacuateurs de crues de barrages en Australie, Afrique du Sud et Etats-Unis.

Les résultats confirment que la fosse d'érosion observée correspond à une fondation rocheuse dont l'érodabilité est avérée quelle que soit la puissance à dissiper. En revanche, le massif rocheux au plus près du radier de l'évacuateur de fond sur environ 15 mètres, qui est très compact et sain, présente une érodabilité qualifiée de négligeable à faible. Une érosion régressive vers le radier de l'évacuateur de crues du barrage semble donc très peu probable.

## ABSTRACT

The Petit-Saut dam bottom outlet (Guiana) released important discharges, especially during a 100-year flood in spring 2000. Recent bathymetric surveys revealed that important erosion occurred in the bottom outlet channel, downstream of the concrete slab. In order to assess the evolution of scour and to anticipate potential damages to the facility, EDF undertook a study following the scour assessment method developed by S. Pells.

This method of assessment of scour risks in spillways is based on the assessment of both rock mass scour vulnerability and hydraulic conditions during flow releases. The scour vulnerability of the channel is then deduced using the comparative chart as published in S. Pells thesis [1]. This chart was set using 118 references from 26 dam spillways in Australia, South Africa and USA. A rock mass index is used to compare rock conditions, the unit stream power dissipation is used to compare hydraulic conditions and 5 erosion classes are defined.

The results confirm that the observed scour hole corresponds to a rock mass which is highly vulnerable to erosion. In constrast, the rock mass immediately downstream of the concrete slab, which is a fresh and competent granite, is expected to be subject to negligible to minor erosion. A large erosion undercutting the spillway slab seems to be unlikely.

## 1. INTRODUCTION

Un phénomène d'érosion en aval de l'évacuateur de fond du barrage de Petit-Saut (Guyane) a été mis en évidence par les récentes bathymétries, réalisées en 2014 et 2017. Cette érosion concerne à la fois le fond du chenal en aval du radier béton et les deux rives (mur bajoyer en rive droite et musoir en enrochements en rive gauche).

Une étude de caractérisation du risque d'érosion en aval a été réalisée en 2018 et 2019 par EDF. L'objectif de cette étude est d'évaluer si l'érosion est susceptible de se poursuivre et d'engendrer des dommages aux ouvrages, afin de prévoir le cas échéant une stratégie de protection. Pour cela, la méthode proposée par S. Pells [1] a été appliquée. Cette méthode permet de définir un degré d'érosion attendue à partir de l'évaluation de l'érodabilité du massif rocheux d'une part, et de l'évaluation de la puissance hydraulique dissipée lors du fonctionnement de l'évacuateur d'autre part. Cette méthode a été privilégiée par rapport à celle proposée par Annandale. En effet, la méthode de S. Pells est plus adaptée aux écoulements tangentiels. De plus, la détermination de l'indice eGSI semble plus robuste que celle de l'indice de Kirsten. L'approche permet en outre de définir des niveaux d'érosion, contrairement à l'approche binaire d'Annandale définissant un seuil d'érosion.

Cet article présente l'historique des sollicitations de l'évacuateur ainsi que l'érosion observée. Il détaille ensuite les études géologiques et hydrauliques réalisées ainsi que l'évaluation de l'érosion attendue résultant de ces deux analyses.

## 2. PRESENTATION DE L'OUVRAGE

Le barrage de Petit Saut est situé à 60 km de l'embouchure du fleuve Sinnamary en Guyane française. L'aménagement a été mis en service en 1994 (début de mise en eau).

Le barrage est de type poids en béton compacté au rouleau, complété par 6 digues annexes en terre et enrochements. Le barrage a une épaisseur en crête de 8 m, une longueur en crête de 740 m et une hauteur maximale de 45 m sur terrain naturel. La crête du barrage est à l'altitude 37 m NGG (digues annexes à 38 m NGG). L'usine hydroélectrique, située en rive droite de l'aménagement, est équipée de 4 groupes Kaplan identiques (débit 110 m<sup>3</sup>/s par groupe).

L'évacuation des crues est réalisée par l'intermédiaire de trois ouvrages :

- un évacuateur de fond, comprenant 3 pertuis vannés, dont le débit maximal total est de 3045 m<sup>3</sup>/s sous la cote des plus hautes eaux (PHE) de 36.50 m NGG,

- un déversoir de surface, seuil à écoulement libre situé en rive gauche de l'évacuateur de fond (séparation par un musoir en enrochements), à la cote de retenue normale (RN) de 35 m NGG, d'une largeur de 60 m et capable d'évacuer un débit de 240 m<sup>3</sup>/s sous la cote des PHE,

 - un clapet de surface de largeur 10 m, de cote de seuil 30.50 m NGG et capable d'évacuer un débit maximal de 344 m<sup>3</sup>/s sous la cote des PHE.



Figure 1: Vue en plan du barrage et de ses organes

Figure 2 : Photo de l'aménagement de Petit-Saut vu de l'aval

L'évacuateur de fond comprend trois pertuis avec une section au droit de la vanne de réglage aval de 7 m de largeur x 6,7 m de hauteur dont le seuil est calé à la cote 0,20 m NGG (Figure 3). Les pertuis sont numérotés de 1 à 3 de la rive droite vers la rive gauche. Chaque pertuis est équipé de deux vannes wagon en série (écartement de 4 m) : la vanne amont de garde ou de sécurité, ouverte en exploitation normale, et la vanne aval de réglage. Le radier béton s'étend sur une longueur d'environ 46 m en aval de la vanne de réglage aval.

En aval de l'évacuateur de fond, le chenal présente une largeur de l'ordre de 26 m. Cette largeur est constante jusqu'à l'extrémité du mur bajoyer rive gauche (à environ 20 m en aval de l'extrémité du radier béton) puis augmente, notamment avec l'affouillement du musoir rive gauche. Le fond du chenal était sensiblement plat à l'origine, calé à la cote 0 m NGG environ

Le mur bajoyer rive droite en aval de l'évacuateur de fond, retenant le remblai rive droite, présente une longueur d'environ 90 m en aval de l'extrémité du radier béton et une altitude en crête de 12.5 m NGG.



Figure 3 : Coupe transversale dans l'évacuateur de fond (figure de gauche) Figure 4 : Photo de l'évacuateur de fond (à gauche) et de l'évacuateur de surface (à droite), vus de l'aval (figure de droite)

# 3. HISTORIQUE DES SOLLICITATIONS DE L'EVACUATEUR ET EVOLUTION DE L'EROSION

#### 3.1 Crues évacuées par les pertuis de fond et gestion des ouvertures

Le tableau ci-après (Figure 5) est une synthèse des crues ayant nécessité la mise en application de la consigne de crue depuis la mise en eau de l'aménagement. Les différentes données (débits maximaux des différents organes, cotes maximales atteintes en retenue...) sont issues des rapports de crue fournis par l'exploitant.

Date	Débit entrant instantané maximal (m <sup>3</sup> /s)	Débit sortant maximal (m <sup>3</sup> /s)	Débit turbiné maximal (m <sup>3</sup> /s)	Débit EVC maximal (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>VDF1</sub> max (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>VDF2</sub> max (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>VDF3</sub> max (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>déversoir</sub> max (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>clapet surface</sub> max (m <sup>3</sup> /s)	Cote maximale atteinte en retenue (m NGG)
14 au 16 avril 2000	3000 (sur 4h)	2032	302	1766	638	494	634	0	0	34.49
17 au 21 mai 2000	2500 (sur 4h)	2079	293	1786	875	638	273	0	0	34.45
4 juin 2002	1289 durant 30 min	631	322	352	170	182	0	0	0	34.98
6 au 10 avril 2012	1925	1375	418	1055	435	620	0	0	0	34.79
8 au 19 juin 2015	1409 (sur 4h)	1281	430	910	0	332	576	2	0	35.08
16 mai au 13 juin 2017	2007 (sur 4h)	1313	436	942	0	453	519	3.53	0	35.09
juin 2018 (3 au 14 ?)	1118 (sur 4h)	891	447	485	0	0	485	2	0	35.06

Figure 5 : Bilan des crues ayant nécessité l'application de la consigne de crue

Ce tableau témoigne des différentes pratiques dans la gestion de l'ouverture des pertuis de fond en crue :

- Lors de la forte crue d'avril 2000, les pertuis ont été ouverts de façon quasiment symétrique. A partir de mai 2000, le pertuis rive gauche a été très peu sollicité, probablement pour éviter d'aggraver l'érosion du musoir en rive gauche.

- Depuis 2015, les ouvertures rive gauche ont été privilégiées afin d'éviter d'aggraver les affouillements à proximité du mur bajoyer rive droite.

#### 3.2 Evolution de l'érosion en aval de l'évacuateur de fond

Lors de la mise en service du barrage de Petit-Saut en 1994, le chenal en aval des évacuateurs de fond du barrage de Petit-Saut était en théorie plat à la cote 0 m NGG. Les levés bathymétriques de novembre 2014 et novembre 2017 montrent les évolutions du chenal en aval de l'évacuateur de fond après une vingtaine d'années d'exploitation et l'évacuation de crues conséquentes. Ces levés couvrent la zone des 120 premiers mètres en aval des évacuateurs de fond et de surface.

Les conclusions du levé bathymétrique de 2014 (Figure 6) sont les suivantes :

- La présence de fosses transversales suivant les lignes de fracture du rocher, dont la profondeur maximale est de – 8 m NGG (en bleu sur la vue 3D, Figure 6) le long du bajoyer rive droite, à environ 30 m du radier ;

- La présence d'une fosse d'érosion le long du mur bajoyer rive droite, avec disparition partielle ou totale des matériaux de blocage et la présence de sous-cavages sous le mur bajoyer rive droite ;

- Une érosion du talus en enrochements côté rive gauche, les matériaux érodés étant présents en rive gauche au pied du talus (ce talus est visible sur la Figure 4, en rive gauche de l'évacuateur de fond).

L'inspection et le levé bathymétrique de 2017 montrent que, avec des ouvertures préférentielles coté rive gauche, et malgré l'évacuation de débits de l'ordre de 900 m<sup>3</sup>/s, le fond du chenal en aval de l'évacuateur de fond a peu évolué depuis la dernière bathymétrie en 2014. Il semble que les matériaux présents en 2014 en rive gauche au pied du musoir, et provenant de l'érosion de celui-ci, aient été déplacés vers la rive droite, certainement dû aux ouvertures préférentielles du pertuis rive gauche, générant les courants de la rive gauche vers la rive droite. Ces déplacements de matériaux seraient à l'origine d'un comblement partiel de la fosse la plus profonde en rive droite observée en 2014.



Figure 6 : Comparatif photo de construction (1994) à droite / Bathymétrie de 2014 à gauche

## 4. CARACTERISATION DE L'ERODABILITE DU CHENAL EN AVAL DE L'EVACUATEUR DE FOND

L'analyse géologique est réalisée à partir des données d'archives disponibles (photographies et descriptions géologiques) résultant de l'ouverture des fouilles à la construction du barrage et à partir des derniers levés bathymétriques. Ces données couvrent uniquement la zone de la fouille de l'évacuateur de fond et aucune information de ce type n'est disponible en aval de la bêche aval du radier. En effet, la zone concernée est en permanence noyée et sa mise hors d'eau nécessiterait des moyens conséquents. Elle n'a donc pas pu faire l'objet d'observations directes récentes.

#### 4.1 Description géologique de la fondation de l'évacuateur de crues

Le barrage de Petit-Saut est fondé sur des granites, de faciès d'altération G1 au minimum (granite avec début d'altération dans la masse). Sur le site des fouilles, une formation meuble est également mise en évidence, constituée de granite altéré en gore et légèrement latérisé. Au sein de cette formation, des boules de granite moins ou non altérées, de tailles variables (décimétriques à plurimétriques) sont présentes. Au niveau des fouilles du barrage, les faciès fortement altérés ont été décapés, à l'époque de la construction du barrage, lorsqu'ils ont été rencontrés. Au-delà de la zone de fouille, c'est-à-dire au-delà de l'emprise de la dalle de l'évacuateur de fond, le gore et les faciès d'altération n'ont pas été décapés.

Les principales familles de discontinuités affectant le massif rocheux au droit du barrage sont les suivantes :

- Famille A, de pendage subhorizontal, structurant le granite en dalles dans la tranche « superficielle » du massif rocheux. Elle est à l'origine du phénomène de desquamation du granite et de l'altération en « pelures d'oignon ». La fréquence de ces fractures diminue avec la profondeur et elles n'existent la plupart du temps plus au-delà d'une dizaine de mètres. Au droit de l'évacuateur de fond, un niveau de rocher sain a été atteint.

- Famille B, fractures orientées de rive à rive au niveau du chenal de l'évacuateur de fond et de pendage entre 55 et 70°. Il s'agit de la famille de fractures la plus représentée à l'échelle du site.

- Famille C, fractures approximativement orientées amont/aval au niveau de l'évacuateur, à pendage subvertical. Leur densité est relativement faible.

#### 4.2 Définition des différentes qualités de massif rocheux

A partir de la description géologique réalisée au précédent paragraphe, les 3 classes de qualité de massif rocheux suivantes sont définies. Elles sont illustrées dans la Figure 7.

- MR1 : Massif rocheux caractérisé par une zone de faille. Le granite est très fracturé et profondément affecté par l'altération météorique. Le MR1' correspond à un faciès de forte altération dans la masse ;

- MR2 : Massif rocheux relativement fracturé mais sain ;
- MR3 : Rocher sain et compact à massif.



Remarque : Le MR3' représente la frange légèrement plus fracturée et décomprimée du MR3.

Figure 7 : Massif rocheux au droit du parement rive gauche et définition des 3 classes de qualité de massif rocheux

Ces qualités de massif rocheux correspondent aux fouilles de l'évacuateur de fond, zone où la géologie a fait l'objet d'observations et de mesures précises et est donc bien connue. Les zones de massif rocheux ayant subi les érosions les plus importantes sont situées environ 40 m en aval de la zone de fouille et n'ont donc pas fait l'objet d'une description permettant d'en établir un modèle géologique précis.

Toutefois, sur la base du modèle géologique de la zone de fouille sous l'évacuateur et de l'imagerie issue des bathymétries de 2014 et 2017, des hypothèses quant à la qualité des massifs rocheux du chenal en aval de l'évacuateur de fond sont réalisées.

Il semble que la zone de la fosse d'érosion principale montre de fortes analogies d'organisation de la fracturation avec la zone où est défini le massif rocheux MR1 (Figure 8). A partir de ces analogies, la similitude géologique de la zone maintenant érodée avec la zone de la Figure 7 représentant le MR1 peut être envisagée de manière crédible :

- les objets structuraux impliqués sont de même attitude et probablement de même nature,

- l'échelle de la zone faillée sur laquelle le MR1 est défini est équivalente à celle de la fosse d'érosion,

- la frange de granite très affecté par l'altération ne semble pas se poursuivre au-delà de 8 à 10 m de profondeur sur la Figure 7, ce qui équivaut à la profondeur maximale de la fosse d'érosion en aval de l'évacuateur.



Figure 8 : Superposition de la bathymétrie de 2014 et des informations du levé géologique

A partir des éléments de comparaison précédents, la Figure 9 ci-dessous illustre l'hypothèse qui est réalisée sur la distribution des qualités de massifs rocheux au droit de l'évacuateur de fond et de son chenal aval (Figure 9) :



Figure 9 : Cartographie des qualités de massifs rocheux selon les hypothèses réalisées

#### 4.3 Détermination des indices d'érodabilité du massif rocheux

La sensibilité intrinsèque du massif rocheux à l'érosion est évaluée à partir des deux indices eGSI et RMEI B proposés par S. Pells [1]. Ces deux méthodes sont appliquées sur les fouilles de l'évacuateur, dans une zone où la géologie a fait l'objet d'observations et de mesures précises et est donc bien connue.

L'eGSI est obtenu à partir du GSI (Geological Strength Index) déterminé à partir de la charte graphique de Hoek, puis ajusté avec un facteur dépendant de l'orientation des principales discontinuités du massif rocheux en fonction de l'écoulement (paramètre Edoa) (Figure 10).



Solution graphique de détermination du GSI (Par Hoek)

Figure 10 : Détermination des eGSI des différentes qualités de massif rocheux en aval de l'évacuateur de fond de Petit-Saut

Le RMEI B est obtenu à partir d'une formule mettant en relation les principales caractéristiques favorisant l'érosion d'un massif rocheux et la probabilité d'occurrence de ces caractéristiques sur le site (Figure 11).

Les indices eGSI et RMEI B sont calculés pour les 3 qualités de massif rocheux : MR1 à MR3, qui ont été reconnues sur le site.

Paramètres		Facteur de probabilité (LF ; Likelihood Factor;)						
favorisant l'érosion (Relative	R F	Très improbable	Improbable	Probable	Très probable	Presque certain		
Importance Factor)		1	2	3	4	5		
P1 : discontinuités <sup>5</sup> et cinématique de détachement	3	MR avec 3 familles de discontinuités, la disc de base est subparallèle à la surface de l'EVC, et n'es pas reliée à la surface,	MR avec 3 familles de disc. ou plus, la disc de base est subparallèle à la surface de l'EVC, la famille 2 est «saillante» en surface, MR 3	MR avec 3 familles de disc. ou plus, avec une disc. basale persistante présentant un pendage amont de 10 à 30° par rapport à la surface de l'EVC,	MR avec 3 families de disc. ou plus, avec une disc. basale persistante présentant un pendage amont <10° par rapport à la surface de l'EVC, MR 2	Discontinuité basale persistante sub- paralièle, s'ouvrant vers l'amont ou l'aval, MR 1		
		ou ; MR massif avec seulement 2 jeux de discont. Et pas de plan basal relié à la surface	ou; la disc, basale est inclinée vers l'amont ou l'aval de plus de 30°par rapport à la surface de l'EVC	ou ; discontinuité basale persistante présentant un pendage aval de 10 à 30° sous la surface de l'EVC	ou ; discontinuité basale persistante présentant un pendage aval <10° par rapport à la surface de l'EVC	ou ; « bande » cisaillée ou MR très fracturé facilement érodable relié à la surface de l'EVC ( ?)		
P2 : nature de la surface d'érosion	3	Surface lisse, usée par l'eau ou un glacier, le Joint 2 n'est pas saillant, les discontinuités sont fermées	Bedding surface affectée par une famille de joints 2 très légèrement saillants (<1mm), très légèrement ouverts ou pas	Surface présentant des petites inrégularités et petites ouvertures (surface générée par un prédécoupage, ou un rippage ou un défoncase au buli)	Surface irrégulière conditionnée par les discontinuités légèrement ouvertes (biasted rock)	Surface irrégulière conditionnée par des discontinuités à l'ouverture étendue (heavily blasted rock)		
P3 : Nature et qualité	2	Surface très rugueuse	Surface rugueuse JRC 8-10	Surface légèrement	Surface lisse JRC<4	Surface très lisse (slickensided)		
des discontinuités <sup>5</sup>		Epontes fermées et discontinuités cimentées	Ouverture <1mm	Ouverture de 1 à 2 mm	Ouverture de 2 à 5 mm	Ouverture >5 mm		
		UCS > 50 MPa	UCS de 20 à 50 MPa	UCS de 5 à 20 MPa	UCS de 1 à 5 MPa	UCS< 1 MPa, ou remplissage « tendre » >5 mm		
24 : Espacement de la discontinuité basale <sup>7</sup>	1	>3 m	1à3m	0,3 à 1 m	0,1 à 0,3 m	<0,1 m		
P5 :	1	≤ 0,5	0,5 à 1	1 à 2	2 à 5	>5		

Figure 11 : Détermination du RMEI B des différentes qualités de massif rocheux en aval de l'évacuateur de fond de Petit-Saut

Les résultats de l'analyse pour ces 3 qualités de massif rocheux sont les suivants :

	eGSI	RMEI B	
MR 1	Massif rocheux caractérisé par une zone de faille. Le granite est très fracturé et profondément affecté par l'altération météorique	15-35	2500
MR 2	Massif rocheux relativement fracturé mais sain	30-45	1500
MR 3	Rocher sain et compact à massif. Le MR3' correspond à l'horizon superficiel légèrement plus fracturé et décomprimé	70-85	150

Figure 12 : Sensibilité à l'érosion des 3 qualités de massifs rocheux : évaluation des indices eGSI et RMEI B

Les trois qualités de massif rocheux présentent des sensibilités très différentes vis-à-vis de l'érosion.

## 5. CARACTERISATION HYDRAULIQUE DE L'ECOULEMENT EN AVAL DE L'EVACUATEUR DE FOND

Afin d'appliquer la méthode d'évaluation du risque d'érosion proposée par S. Pells, il est nécessaire de caractériser l'écoulement en aval de l'évacuateur de fond lors de son fonctionnement pour évaluer sa « puissance érosive ». La puissance hydraulique dissipée est notamment évaluée, paramètre que S. Pells juge le plus pertinent pour représenter les conditions hydrauliques de l'écoulement et évaluer par la suite, grâce à un abaque, l'érosion attendue. Cette analyse hydraulique est réalisée par le biais d'une modélisation numérique 3D sur le logiciel Flow-3D.

#### 5.1 Modèle numérique et cas simulés

Le modèle numérique reproduit la géométrie des ouvrages de génie civil (barrage, évacuateur de fond), des berges, et du fond du chenal (bathymétrie de 2017). Le paramétrage du modèle a été défini en menant des analyses de sensibilité sur les différents paramètres (maillage, rugosité du fond, emprise de la zone modélisée, conditions limites). Les vitesses obtenues sont du même ordre de grandeur que celles relevées sur le modèle physique\* (pour le cas n°6, seul cas commun entre modélisations physiques et numériques). La forme des écoulements est cohérente avec les écoulements observés durant la crue du printemps 2017 (zones de recirculation, étalement de l'écoulement, turbulences à proximité du musoir rive gauche).

\* Nota : Trois modèles physiques au 1/50<sup>ème</sup> du barrage de Petit-Saut ont été réalisés entre 1989 et 1990 au laboratoire national d'hydraulique de Chatou, lors de la phase de conception du projet. L'évacuateur de fond a été représenté et étudié sur le modèle n°2, avec un fond fixe (le modèle n°1 était un modèle en canal vitré de l'évacuateur de surface, et le modèle n°3 reproduisait notamment la partie usine et clapet de surface). Le modèle ne représente néanmoins pas tout à fait la géométrie actuelle de l'ouvrage (bajoyers plus longs, notamment en rive gauche, fond plat). L'emprise était de 350 m en amont et 500 m en aval. Les essais réalisés avaient pour objectif de vérifier la débitance de l'ouvrage, d'étudier les conditions d'entonnement et de qualifier l'écoulement à l'aval. L'existence d'un ressaut à l'aval dont la position varie suivant un mouvement périodique a été observée et des vitesses importantes ont été relevées (plus de 20 m/s au sortir des pertuis pour un débit de 2900 m<sup>3</sup>/s), faisant craindre « des érosions importantes à l'aval des pertuis de fond ». Néanmoins, les rapports ne décrivent pas de façon plus précise les conditions de dissipation et des courants de recirculation.

Trois modèles physiques au 1/50<sup>ème</sup> du barrage de Petit-Saut ont été réalisés entre 1989 et 1990 au laboratoire national d'hydraulique de Chatou, lors de la phase de conception du projet. L'évacuateur de fond a été représenté et étudié sur le modèle n°2, avec un fond fixe (le modèle n°1 était un modèle en canal vitré de l'évacuateur de surface, et le modèle n°3 reproduisait notamment la partie usine et clapet de surface). Le modèle ne représente néanmoins pas tout à fait la géométrie actuelle de l'ouvrage (bajoyers plus longs, notamment en rive gauche, fond plat). L'emprise était de 350 m en amont et 500 m en aval. Les essais réalisés avaient pour objectif de vérifier la débitance de l'ouvrage, d'étudier les conditions d'entonnement et de qualifier l'écoulement à l'aval. L'existence d'un ressaut à l'aval dont la position varie suivant un mouvement périodique a été observée et des vitesses importantes ont été relevées (plus de 20 m/s au sortir des pertuis pour un débit de 2900 m<sup>3</sup>/s), faisant craindre « des érosions importantes à l'aval des pertuis de fond ». Néanmoins, les rapports ne décrivent pas de façon plus précise les conditions de dissipation et des courants de recirculation.

Six cas sont modélisés, en faisant varier le débit et les configurations d'ouverture des vannes de fond, en considérant la retenue à RN. Pour 5 cas, le débit total testé est de 990 m<sup>3</sup>/s, correspondant à la débitance maximale d'un pertuis à RN. Différentes configurations d'ouverture des pertuis sont testées pour évacuer ce débit : évacuation sur chacun des pertuis (cas 1 à 3), évacuation selon des modalités similaires à celles des crues de 2015 et 2017 (cas 4) et répartition homogène sur l'ensemble des pertuis (cas 5). Un dernier cas (cas 6) modélise l'ouverture maximale de l'ensemble des pertuis à RN (débit de 2970 m<sup>3</sup>/s). Ce débit est supérieur à la crue millénale (évaluée à 2800 m<sup>3</sup>/s en 1988 par la méthode du GRADEX) et très proche du débit évacué par les 3 pertuis aux PHE.

#### 5.2 Détermination de la puissance hydraulique dissipée

La puissance hydraulique dissipée peut être calculée en utilisant les formules ci-après, issues de [1] et [2]. La première formule est une approche par bilan d'énergie. La seconde considère la contrainte de cisaillement sur le fond.

$$\pi_{UD} = \rho. g. q. \frac{dH}{dx} = \rho. g. \frac{Q}{L} \cdot \frac{dH}{dx}$$

avec :

 $\pi_{UD}$  : puissance dissipée par unité de surface (W.m<sup>-2</sup>) ;

- $\rho$  : masse volumique de l'eau (1000 kg.m^-3) ;
- g: accélération gravitationnelle (9.81 m.s<sup>-2</sup>);

q : débit par unité de largeur (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>) ;

Q : débit (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) ;

 $\pi_{UD} = \tau_b. U$ 

L : largeur de la section d'écoulement (m) ;

H : charge hydraulique totale (m)

 $\tau_b$  : contrainte de cisaillement sur le fond (N.m-²), variable « shear stress » dans Flow-3D

U : vitesse de l'écoulement (m.s<sup>-1</sup>).

La puissance hydraulique dissipée, calculée selon la formule  $\pi_{UD}=\tau_b.U_{fond}$ , est représentée dans la Figure 13 ci-dessous pour le cas avec tous les pertuis ouverts au maximum à RN (débit de 2970 m<sup>3</sup>/s). La distribution des puissances pour les autres cas est similaire, avec des niveaux de puissance différents.



Figure 13 : Puissance hydraulique dissipée calculée sur le fond (W/m<sup>2</sup>) – Cas 6 : tous pertuis ouverts à RN

Remarque : pour les besoins de visualisation, la vue est prise de dessous. Les puissances sont prises au fond, i.e. à une altitude variable

Pour calculer la puissance hydraulique dissipée par l'approche par bilan d'énergie avec le modèle 3D, des surfaces de contrôle (ou « baffles ») sont définies de façon transversale à l'écoulement en aval des pertuis de fond entre x = -20 m (à l'intérieur des pertuis de fond) et x = 50 m (correspondant à la limite aval du musoir rive gauche). Ces « flux surfaces » permettent de mesurer le débit s'écoulant au travers d'une surface définie ainsi que le flux de la charge hydraulique moyenne à travers cette surface. La charge hydraulique totale est calculée sur chacune des sections de contrôle ([altitude moyenne de la surface libre sur la section] + [vitesse moyenne (dans toutes les directions) sur la section]<sup>2</sup>/2g). On peut ainsi calculer la puissance hydraulique dissipée par unité de surface entre deux sections de contrôle. La Figure 14 ci-dessous présente les résultats de cette approche, pour le cas avec tous les pertuis ouverts au maximum à RN (débit de 2970 m<sup>3</sup>/s). L'allure des graphes pour les autres cas est similaire, avec des niveaux de puissance différents.



Figure 14 : Evolution longitudinale de la charge et des puissances dissipées – Cas 6 : tous pertuis ouverts à RN

Les deux pas d'espaces sont intéressants à considérer : le pas  $\Delta x = 2$  m permet de visualiser les effets très locaux de dissipation brutale, et le pas  $\Delta x = 10$  m offre une représentation plus moyennée de la puissance dissipée, gommant les petites incohérences éventuellement liées à des effets numériques.

Sur le graphe (Figure 14), 3 zones se distinguent :

- Une zone autour de x = 0 (entre x  $\approx$  -2 m et x  $\approx$  6 m) : Cette zone correspond à la partie aval du radier (de l'élargissement progressif de la section d'écoulement au niveau des nez de piles jusqu'au passage entre radier et fond rocheux). Au niveau de cette zone, il se produit une très forte dissipation d'énergie.

- Une zone entre x ≈ 6 m et x ≈ 30 m, correspondant à la zone en aval du radier, jusqu'à la section maximale d'écoulement au niveau de la dépression dans le musoir rive gauche. La dissipation d'énergie y reste importante, mais est plus faible qu'au niveau de la zone précédente.

- Au-delà de x  $\approx$  30 m, la puissance dissipée diminue et atteint de plus faibles valeurs entre les abscisses x  $\approx$  40 m et x  $\approx$  50 m.

Le tableau suivant résume les ordres de grandeur des puissances dissipées pour chaque approche. Les valeurs **en gras** sont celles qui sont prises en compte pour l'évaluation du potentiel d'érosion (cf. partie suivante).

E.03 - Etude du potentiel d'érosion du chenal en aval des vannes de fond du barrage de Petit-Saut par application des critères EGSI et RMEI page 9

	Approch	Approche πuD=Tb.Ufond			
Cas	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Puissance maximale observée	
	(x = -2 à 6 m)	(x = 6 à 30 m)	(x > 40 m)		
4	140 (max pour dx = 2 m)	20 50	2 5	15	
990 – Crue 2015 - 2017	40 - 60	20 - 30	2 - 5		
5	60 (max pour dx = 2 m)	15 <b>35</b>	2 5	10	
990 - Tous	15 - 25	15 - 23	2 - 5		
6	<b>750</b> (max pour dx = 2 m)	100 200	20 40	31	
2970 - Tous	250	100 - 200	30 - 40		

Figure 15 : Puissances hydrauliques dissipées (kw/m<sup>2</sup>) calculées selon les deux approches

L'approche par bilan d'énergie aboutit à un ordre de grandeur de puissance dissipée plus majorant en aval immédiat des pertuis, ce qui permet de définir une « borne supérieure » du niveau de puissance dissipée pouvant être observé. La différence de puissance dissipée maximale entre les deux approches s'explique par le fait que l'approche par bilan d'énergie prend en compte la totalité de l'énergie dissipée, et non uniquement la puissance dissipée par frottement sur le fond, comme le fait la méthode considérant la contrainte de cisaillement.

Toutefois, ces deux approches convergent vers la même conclusion : pour un même débit, répartir le débit sur l'ensemble des pertuis de façon symétrique réduit la puissance dissipée en aval, et donc le risque d'érosion. Pour une même répartition du débit sur les 3 pertuis, plus le débit total évacué est important, et plus la puissance de dissipation hydraulique maximale est importante (puissance plus élevée pour le cas n°6, correspondant à l'ouverture maximale de l'évacuateur de fond à RN).

#### 5.3 Conclusions plus générales apportées par les modélisations numériques 3D

En plus de la puissance hydraulique dissipée, plusieurs paramètres ont été analysés sur les résultats des modélisations numériques : vitesses dans l'axe des pertuis et sur le fond du chenal, position du ressaut hydraulique... Ces résultats permettent de comparer les différents cas entre eux et d'analyser l'impact de la gestion des ouvertures sur les conditions hydrauliques en aval de l'évacuateur. Les conclusions de cette analyse sont les suivantes :

1. D'un point de vue hydraulique, il semble plus favorable de répartir le débit évacué sur les trois pertuis de façon symétrique. En effet, à débit équivalent, la répartition du débit sur un maximum de pertuis permet de :

- Réduire les vitesses en aval des pertuis (pour un débit de 990 m<sup>3</sup>/s, les vitesses maximales sont de l'ordre de 18 à 20 m/s pour un seul pertuis ouvert, 14 m/s pour une répartition sur 2 pertuis et 12 m/s avec 3 pertuis ouverts),

- Réduire la puissance hydraulique dissipée en aval (en considérant l'approche par bilan d'énergie, qui fournit des valeurs majorantes, la valeur maximale de puissance hydraulique dissipée en aval est de 50 kW/m<sup>2</sup> lorsque le débit de 990 m<sup>3</sup>/s est réparti sur 2 pertuis, et 25 kW/m<sup>2</sup> en le répartissant 3 pertuis),

- Obtenir un écoulement plus homogène : les courants transversaux et recirculations sont réduits (les ouvertures non symétriques sont à l'origine de recirculations qui prennent place derrière les pertuis fermés).

2. Parmi les cas simulés, la situation la plus défavorable est le fonctionnement de l'évacuateur à sa débitance maximale à RN (2970 m<sup>3</sup>/s, tous les pertuis sont ouverts). Dans cette situation, de très fortes vitesses sont observées (environ 18 à 20 m/s au maximum). Le ressaut hydraulique débute immédiatement à la sortie des pertuis, avec des niveaux élevés de puissance dissipée.

A noter que, pour un débit de 990 m<sup>3</sup>/s évacué par un seul pertuis, le seul pertuis ouvert subit des vitesses similaires à celles du débit de 2970 m<sup>3</sup>/s évacué sur les trois pertuis. Les fortes vitesses se propagent sur une plus longue distance lorsque le pertuis rive droite seul est ouvert (en comparaison avec une ouverture du seul pertuis central ou du seul pertuis rive gauche). Des recirculations se produisent derrière les pertuis fermés.

## 6. EVALUATION DU NIVEAU D'EROSION ATTENDU

Une fois définies la sensibilité à l'érosion intrinsèque du massif rocheux et la dissipation de puissance hydraulique liée au fonctionnement de l'évacuateur de fond, ces deux paramètres doivent être confrontés afin d'évaluer le niveau d'érosion attendu au niveau du chenal en aval de l'évacuateur. L'évaluation du niveau d'érosion est réalisée par l'introduction de ces paramètres dans les graphiques  $\pi_{UD} = f(eGSI)$  ou  $\pi_{UD} = f(RMEI_B)$  proposés par Pells. En fond de ces graphiques sont représentés 118 références (représentant 26 évacuateurs de crue ayant subi des écoulements importants) étudiés par Pells et auxquels il associe un indice d'érodabilité du massif rocheux, une puissance dissipée et un niveau d'érosion réellement observé. Ces données sont « traitées » graphiquement pour définir, selon les cas, des zones de niveau d'érosion homogène ou des courbes/seuils délimitant ces zones.

La Figure 16 et la Figure 17 représentent les graphes proposés par S. Pells pour les approches avec eGSI et RMEI B, sur lesquelles sont placées les valeurs d'indices d'érodabilité des trois qualités de massif rocheux définies précédemment ainsi que les puissances hydrauliques dissipées.



Figure 16 : Cartographie (à gauche) et courbes seuils (à droite) des niveaux d'érosion définis par S. Pells [1] sur un graphe  $\pi_{UD} = f(eGSI)$ et résultats de l'analyse pour l'évacuateur de fond de Petit-Saut



Figure 17 : Cartographie (à gauche) et courbes seuils (à droite) des niveaux d'érosion définis par S. Pells [1] sur un graphe π<sub>UD</sub> = f(RMEI B) et résultats de l'analyse pour l'évacuateur de fond de Petit-Saut (légende identique à la figure précédente)

Les 2 méthodes eGSI et RMEI B préconisées par S. Pells pour évaluer la sensibilité à l'érosion d'un massif rocheux ont été appliquées à la fondation de l'évacuateur de fond du barrage de Petit-Saut et donnent des résultats similaires et cohérents. Ces résultats peuvent être résumés ainsi :

- Le massif rocheux MR1, défini par une forte fracturation, est très sensible à l'érosion quelles que soient les puissances considérées (niveaux d'érosion modérés à importants) ;

- Le massif rocheux MR2, correspondant à un granite relativement sain mais significativement fracturé, est susceptible de subir une érosion modérée pour des puissances inférieures à 25 kW/m<sup>2</sup>. Au-delà, il est susceptible d'être très érodé.

- Le massif MR3, correspondant au granite sain et compact, est peu sensible à l'érosion : pour les puissances considérées, le niveau d'érosion attendu est négligeable à mineur. Les plus fortes puissances (à partir de 200 kW/m<sup>2</sup>) sont en limite du graphe mais le faible impact de ces puissances sur l'intégrité du massif rocheux semble assez réaliste et probable.

- Les cas étudiés par S. Pells, à partir desquels sont bâties ses solutions graphiques, n'atteignent pas les puissances maximales de l'ordre de 750 kW/m<sup>2</sup> qui sont envisagées à Petit-Saut au niveau des nez de piles (sans contact avec le massif rocheux). Il peut donc être considéré soit que l'analyse est impossible pour de tels niveaux de puissance, soit que les graphes peuvent être extrapolés. Dans ce cas, le massif rocheux MR3 subirait probablement des érosions mineures à modérées s'il devait être soumis à ces niveaux de puissances. Toutefois, cette valeur maximale est à relativiser : celle-ci est un maximum local, comprenant toute la dissipation (dans la masse d'eau et sur le fond), et est observée au niveau du radier et non du fond rocheux

## 7. CONCLUSION

La méthode d'évaluation de l'érosion en aval des évacuateurs de crues développée par S. Pells a été appliquée pour étudier le potentiel d'érosion du chenal en aval de l'évacuateur de fond de Petit-Saut. Une analyse géologique a permis de définir des qualités de massifs rocheux au droit de l'évacuateur de fond et de son chenal à partir des informations issues des fouilles géologiques réalisées lors de la construction de l'ouvrage et d'hypothèses. La sensibilité à l'érosion de ces massifs rocheux a été évaluée. En parallèle, les caractéristiques de l'écoulement en aval de l'évacuateur de fond ont été étudiées pour différents cas de fonctionnement. Le croisement de ces données hydrauliques et géologiques sur les graphes établis par S. Pells a permis de définir les niveaux d'érosion attendus pour les différents massifs rocheux.

Cette analyse permet de développer les conclusions suivantes :

- L'érosion paraît aujourd'hui relativement stabilisée. En effet, l'évolution de la bathymétrie du chenal montre peu d'évolution entre 2014 et 2017 malgré des sollicitations en crue. De plus, la profondeur atteinte par la fosse principale correspond approximativement à l'épaisseur du rocher très érodable visible au niveau de la zone amont où est défini le MR1. Une amélioration du massif rocheux au-delà de cette profondeur est très probable.

- Le massif rocheux entre la fosse et la fondation de l'évacuateur de fond est sain et très compact (MR3). D'après l'analyse réalisée, ce massif est très peu sensible à l'érosion quel que soit le niveau de puissance de dissipation hydraulique considéré. Ainsi, même en cas de progression de l'érosion de la fosse au niveau de la zone du chenal définie comme très érodable (MR1), il est très peu probable que l'érosion régresse vers le radier.

- Si malgré cela l'érosion devait se poursuivre et affecter la zone entre la fosse et le radier de l'évacuateur, celle-ci serait probablement lente et détectée par les bathymétries régulières qui sont mises en oeuvre.

- Par ailleurs, les modélisations hydrauliques ont permis de formuler des recommandations pour adapter les modalités d'ouverture de l'évacuateur de fond en crue, afin de réduire les niveaux de puissance de dissipation hydraulique en aval.

## **RÉFÉRENCES ET CITATIONS**

- [1] Pells, S. (2016). *Erosion of rock in spillways.* School of Civil and Environmental Engineering Faculty of Engineering University of New South Wales. 2016. Thèse.
- [2] Van Schalkwyk, A., Jordaan, J.M. et Dooge, N. 1994. Erosion of rock in unlined spillways. *Commission Internationale des Grands Barrages Dix-huitième Congrès des Grands Barrages, Durban.* Q.71 R.37, pp. 555 571.