

377

DQ6.1.2

Projet de création du parc national des
Dunes-de-Tadoussac

6213-01-008



Projet de parc national des Dunes-de-Tadoussac, Analyse hydrologique et hydraulique de la rivière du Moulin à Baude

N° Projet Stantec :159101556





Projet de parc national des Dunes-de-Tadoussac, Analyse hydrologique et hydraulique de la rivière du Moulin à Baude

Préparé pour:

Société des établissements de plein air du Québec,
Direction des infrastructures

Préparé par:

Stantec Experts-conseils Itée

N. Réf. : 159101556

Index des révisions

Révision	Description	Auteur(e)		Vérification qualité		Revue indépendante	
0A	Émis pour commentaires	MN/CK	2023/12/20	AT	2023/12/20		
00	Final	MN/CK	2024/01/31	AT	2024/01/31		





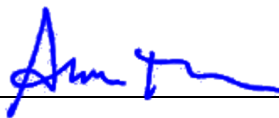
Registre d'approbation

Les conclusions du Rapport, intitulé Projet de parc national des Dunes-de-Tadoussac, problématique d'érosion de la dune inférieure reflètent l'opinion professionnelle de Stantec au moment de la rédaction du Rapport et concernent la portée du mandat décrite dans le Rapport. Les opinions contenues dans ce document sont basées sur les conditions et les informations existantes au moment de la publication du document et ne tiennent compte d'aucune modification ultérieure. Le Rapport ne concerne que le projet pour lequel les services de Stantec ont été retenus et l'objectif énoncé pour lequel le Rapport a été préparé. Le Rapport ne doit pas être utilisé afin de modifier ou de prolonger le projet, ou à tout autre fin ou projet, et toute utilisation non autorisée par quiconque est aux risques de ce dernier.

Stantec a présumé que toutes les informations reçues de la Sépaq (le « Client ») et de tierces parties pour la préparation du Rapport sont exactes. Bien que Stantec ait exercé un jugement et une diligence raisonnable dans l'utilisation de ces informations, Stantec n'assume aucune responsabilité quant aux conséquences découlant d'omissions ou d'erreurs qui pourraient être incluses dans lesdites informations.

Ce Rapport est destiné à l'usage exclusif du Client, en conformité avec le contrat conclu entre Stantec et le Client. Bien que le Rapport puisse être remis aux autorités compétentes applicables et autres parties envers lesquelles le Client est responsable, Stantec ne garantit les services à aucune tierce partie. Aucune autre partie ne pourra avoir recours au rapport sans le consentement exprès de Stantec, lequel sera accordé à l'entière discrétion de Stantec.

Préparé par  Mabelle Nakad, B.Ing., Hydrologie-Hydraulique	Préparé par  Carole Kabore, ing. M.Sc , Hydrologie-Hydraulique
--	--

Vérfié par 
Ammar Taha, ing., M.Sc., Ph. D.

Avec la contribution de :

Daphnée Baudet, Formatage



Table des matières

1.0	INTRODUCTION	1.1
1.1	MANDAT ET OBJECTIFS	1.1
1.2	DESCRIPTION DU PROJET	1.1
1.3	DESCRIPTION DU SITE	1.1
2.0	VISITE DU SITE ET ARPENTAGE	2.1
2.1	VISITE DU SITE	2.1
2.2	RELEVÉ D'ARPENTAGE	2.1
3.0	CRITERES DE CONCEPTION	3.1
3.1	PÉRIODE DE RETOUR	3.1
3.2	CHANGEMENTS CLIMATIQUES.....	3.1
4.0	ANALYSE DE LA RIVIÈRE DU MOULIN À BAUDE	4.1
4.1	ANALYSE HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT	4.1
4.1.1	Délimitation du bassin versant.....	4.1
4.1.2	Choix de la station hydrométrique	4.2
4.1.3	Débits estimés au barrage à partir de la station Sainte-Marguerite	4.3
4.2	ANALYSE HYDROLOGIQUE DE L'ÉVÉNEMENT DU 19 AOÛT 2023.....	4.4
4.2.1	Détermination du débit par la méthode de transfert de bassin versant	4.5
4.2.2	Détermination du débit avec le modèle HEC-HMS	4.5
4.3	DÉBITS DE CRUE RETENUS POUR L'ÉTUDE HYDRAULIQUE	4.8
5.0	MODÉLISATION HYDRAULIQUE	5.1
5.1	DESCRIPTION DU MODÈLE HYDRAULIQUE 2D	5.1
5.1.1	Topographie.....	5.1
5.1.2	Conditions aux frontières.....	5.1
5.1.3	Coefficient de rugosité de Manning	5.1
5.2	CALIBRATION ET VALIDATION DU MODÈLE	5.1
5.3	SIMULATION DU COURS D'EAU	5.3
6.0	CONCLUSION ET RECOMMANDATION	6.1
7.0	RÉFÉRENCES	7.1

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 :	Quelques marques relevées.....	2.1
Tableau 4-1 :	Caractéristiques des stations analysées	4.2
Tableau 4-2 :	Caractéristiques de la station Sainte-Marguerite.....	4.3
Tableau 4-3 :	Débits estimés au barrage	4.4
Tableau 4-4 :	Débit de crue été-automne de la station Sainte-Marguerite (062803)	4.4
Tableau 4-5 :	Facteur de pointe à la station Sainte-Marguerite (062803)	4.4
Tableau 4-6 :	Débits estimés au barrage	4.4
Tableau 4-7 :	Sous-bassins dans l'analyse hydrologique.....	4.6
Tableau 4-8 :	Hauteur des précipitations de l'événement 18-19 août	4.6
Tableau 4-9 :	Débits de crue retenue pour l'étude hydraulique	4.8
Tableau 5-1 :	Élévation des débris en aval du barrage	5.2



Tableau 5-2	Niveaux d'eau au-dessous de l'escalier.....	5.6
-------------	---	-----

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 :	Zone à l'étude - Rivière du Moulin à Baude.....	1.2
Figure 4-1 :	Limite du bassin versant à l'étude	4.2
Figure 4-2 :	Sous-bassins versants.....	4.5
Figure 5-1 :	Photo prise le jour de la visite du site (18/07/2023).....	5.2
Figure 5-2 :	Photo reçue pour la crue de l'événement du 19 août 2023.....	5.3
Figure 5-3 :	Limite du littoral simulé pour la crue 2 ans	5.4
Figure 5-4 :	Le cours d'eau simulé pour la crue été-automne de récurrence 25 ans	5.5
Figure 5-5 :	Le cours d'eau simulé pour la crue été-automne de récurrence 50 ans	5.5
Figure 5-6 :	Répartition des vitesses dans l'effluent ouest du cours d'eau de récurrence 25 ans	5.6
Figure 5-7 :	Répartition des vitesses dans l'effluent ouest du cours d'eau-récurrence 50 ans	5.7
Figure 5-8 :	Répartition des vitesses dans les zones de passage de l'escalier-récurrence 25 ans*	5.8
Figure 5-9 :	Répartition des vitesses dans les zones de passage de l'escalier-récurrence 50 ans*	5.9



1.0 INTRODUCTION

1.1 MANDAT ET OBJECTIFS

La société des établissements de plein air du Québec, ci-après appelé Sépaq, a confié à Stantec le mandat d'analyse de la préparation d'une étude hydrologique et hydraulique de la rivière du Moulin à Baude dans la municipalité de Tadoussac. La Sépaq désire emménager un escalier à proximité de l'effluent Ouest de ce cours d'eau. Les résultats de l'étude permettront à la Sépaq de valider l'emplacement du futur escalier.

1.2 DESCRIPTION DU PROJET

Le projet consiste à préparer une étude hydrologique dans le but d'orienter le client sur l'emplacement de l'escalier afin de l'aider à la préparation du terrain pour le développement futur d'un parc national.

Plus précisément, les activités menées à terme dans ce projet consistent à :

- L'étude hydrologique et hydraulique de la rivière du Moulin à Baude pour déterminer les niveaux d'eau atteints par le cours d'eau en aval du barrage;
- La détermination de la limite du littoral LL sur l'effluent Ouest.
- L'émission de recommandation sécuritaires sur l'emplacement de l'escalier à construire

1.3 DESCRIPTION DU SITE

Le site à l'étude est situé à l'est de la municipalité de Tadoussac, à l'extrémité du chemin de la Rivière-du-Moulin à Baude. La zone d'étude s'étend du barrage de référence X0003103 à l'exutoire de la rivière du Moulin à Baude. Cette rivière s'écoule du barrage dans la direction sud-est, puis se divise en deux effluents (Est et Ouest) qui se déchargent directement dans le fleuve Saint-Laurent. La pente moyenne du lit du cours d'eau est 40% avec des rapides où la vitesse de l'écoulement est importante. La Figure 1-1 présente la zone d'étude.





Figure 1-1 : Zone à l'étude - Rivière du Moulin à Baude

2.0 VISITE DU SITE ET ARPENTAGE

2.1 VISITE DU SITE

La visite du site, effectuée par l'équipe de Stantec le 18 juillet 2023, a permis de vérifier les conditions de la rivière en aval du barrage, de valider les directions de l'écoulement et de visualiser l'emplacement de l'escalier par rapport au cours d'eau. Le personnel suivant de Stantec a effectué la visite :

- Mme Carole Kabore, ing, M.Sc, Chargé de projet et Hydraulique et Hydrologie;
- Mme Mabelle Nakad, B.Ing., Hydrologie-Hydraulique;
- Mr Maxime Bouchard-Rochette, CPI, Hydrologie-Hydraulique;
- Mr Farid Khelladi, arpenteur.

Lors de la visite la Sépaq était représenté par Mme Marie-Christine Cantin,ing, Chargée de projet.

2.2 RELEVÉ D'ARPENTAGE

La visite pour le relevé d'arpentage a été faite le 26 août 2023 par Farid Kelladi, arpenteur chez Stantec. Lors de cette visite, la limite de la limite du littoral (LL) a été relevée en amont et toute de suite en aval du barrage, selon la méthode biophysique basée sur des indicateurs physiques, de plus un relevé d'arpentage de la structure du barrage a été effectué et a permis de développer le modèle hydraulique 2D à l'aide du logiciel HEC-RAS afin de modéliser l'écoulement.

Le Tableau 2-1 présente les marques relevées lors de la visite de site. Il est à noter que les marques de la Limite du Littoral ont été relevées sur les rives gauche et droite du cours d'eau jusqu'au point de séparation des deux effluents. Les points relevés ont servi à la calibration du modèle hydraulique 2D.

Tableau 2-1 : Quelques marques relevées

Distance du barrage (m)	Distance du barrage (m)	Élévation (m)
Niveau d'eau du jour en amont du barrage (m)	38,35	51,143
	61,55	51,135
Élévation de la limite du littoral sur la rive droite (m)	36,15	44,820
	40,5	44,795
Élévation de la limite du littoral sur la rive gauche (m)	35,5	44,700
	38	44,632

Distance du barrage (m)	Distance du barrage (m)	Élévation (m)
Niveau d'eau du jour en aval du barrage sur la rive droite (m)	36,35	44,334
	43,36	44,331
Niveau d'eau du jour en aval du barrage sur la rive gauche (m)	34,4	44,353
	38	44,342
Niveau d'eau du jour en aval du barrage sur la rive droite à	62,55	44,344
	63,25	44,324



Distance du barrage (m)	Distance du barrage (m)	Élévation (m)
l'emplacement des débris (m)	63,5	44,235
	64,5	44,053



3.0 CRITERES DE CONCEPTION

3.1 PÉRIODE DE RETOUR

Les périodes de retour considérées pour la conception du futur escalier, sont soit la crue été-automne de récurrence 25 ans ou de récurrence 50 ans.

3.2 CHANGEMENTS CLIMATIQUES

La dernière mise à jour du chapitre 2 du tome III [1], publié le 30 janvier 2023, indique la majoration à considérer en fonction de la superficie du bassin versant (140,95 km²). Les débits calculés pour les bassins entre 60 km² et 400 km² devront être majorés de 15% pour tenir compte des changements climatiques, et ce, pour l'ensemble du Québec. Ainsi, une majoration de 15% est appliquée sur les débits.



4.0 ANALYSE DE LA RIVIÈRE DU MOULIN À BAUDE

Le calcul hydrologique ainsi que la détermination du débit de conception du pont ont été estimés à l'aide de la méthode de transfert de bassin. Le débit résultant de cette analyse a été utilisé dans la simulation hydraulique de la rivière du Moulin à Baude.

4.1 ANALYSE HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT

La méthode utilisée pour l'étude de l'hydrologie du bassin versant est la méthode de transfert de bassin. Cette méthode consiste à choisir une station hydrométrique ayant un bassin versant présentant des caractéristiques similaires à celui à l'étude et d'effectuer une analyse statistique sur cette station. Les débits ainsi obtenus pour les différentes récurrences sont transposés au bassin versant à l'étude.

4.1.1 Délimitation du bassin versant

La délimitation du bassin versant a été effectuée à l'aide du logiciel HEC-HMS 4.10 rendu disponible par le « US Corps of Engineer ». Les données topographiques requises ont été téléchargées du site web Foret Ouverte (Les cartes utilisées : MNT_22C04NO, MNT_22C04NE, MNT_22C05SO, MNT_22C05SE et MNT_22C05SO) et utilisées pour la délimitation du bassin versant. La carte RHN 02RH002 du Réseau Hydrographique National a également été téléchargée pour identifier d'une part le tracé du cours d'eau jusqu'à sa source, mais aussi pour valider et/ou corriger le réseau hydrographique généré pendant le processus de délimitation du bassin versant. Le bassin versant de la rivière du Moulin à Baude à l'aval du barrage a une superficie de 140,95 km². La Figure 4-1 présente les limites du bassin versant drainant vers la zone d'étude.





Figure 4-1 : Limite du bassin versant à l'étude

4.1.2 Choix de la station hydrométrique

Les stations avoisinantes du bassin versant du pont à l'étude ont été comparées selon les critères suivants :

- La similarité des caractéristiques des bassins versants (agricoles, forêt, topographie) ;
- L'aire du bassin versant (rapport d'aires entre 0,5 et 2).
- La période des mesures ;
- La disponibilité des données (les stations de mesures des débits pour une période de plus de 20 ans ont été retenues) ;
- La distance entre la station et le site à l'étude ;
- Si le débit est influencé ou naturel ;

Le Tableau 4-1 montre les caractéristiques des stations avoisinantes ayant un rapport d'aires des bassins versants entre 0,5 et 2.

Tableau 4-1 : Caractéristiques des stations analysées

Station ID (fédéral)	Station ID (CEHQ)	Superficie (km ²)	Données mesurées	Année	Nombre d'années	Distance (km)	Contrôlé	Commentaire
----------------------	-------------------	-------------------------------	------------------	-------	-----------------	---------------	----------	-------------



02PC004	-	198	Débit, Niveau	1938-1987	50	138	Oui	Éliminée à cause du barrage.
02RH059	-	219	Débit	1978-1979	2	138	Non	Éliminée à cause de manque des données.
02RH052	-	81,6	Débit	1971-1973	3	122,8	Non	Éliminée à cause de manque des données.
02PD004	051005	269	Débit	1970-2019	36	140	Non	Éliminée à cause de la non-représentativité de l'évènement hydrologique enregistré à la rivière du Moulin à Baude le 19 août 2023.
02PD005	051008	121	Niveau	1977-1985	9	141,7	Non	Éliminée à cause de manque des données.

De toutes les stations analysées, seule la station Montmorency de référence 051005 qui se trouve à 140 km du site à l'étude, respecte tous les critères de sélection d'une station pour l'estimation des débits. Cependant aucun évènement hydrologique n'a été enregistré à cette station le 19 août 2023 alors qu'un évènement de crue important a été observé sur la rivière du Moulin à Baude (en aval du barrage). Ainsi la station Sainte-Marguerite Nord-Est de référence 062803 qui est proche de la zone d'étude, mais dont le rapport de superficie n'est pas respecté ($1097/140 = 7,83 > 2$) a été retenue, car l'évènement de crue importante du 19 août a été enregistré dans cette station. Les caractéristiques de la station retenue sont présentées dans le Tableau 4-2.

Tableau 4-2 : Caractéristiques de la station Sainte-Marguerite

Station ID (fédéral)	Station ID	Nom de la station	Données mesurées	Superficie (km ²)	Année	Nombre d'années	Distance (km)	Contrôlé
02RH047	062803	SAINTE-MARGUERITE NORD-EST	Débit	1097	1976-2019	44	22,6	Non

4.1.3 Débits estimés au barrage à partir de la station Sainte-Marguerite

La transposition est faite à l'aide de la formule de transfert de bassin versant utilisée par le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs MELCCFP [2].

$$Q_{T1} = Q_{T2} * \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^a$$

L'exposant régional « a » de valeur de 0,85 a été utilisé.

Les débits maximaux annuels sont obtenus du document « Débits spécifiques de crue aux stations hydrométriques du Québec (Débits moyens journaliers) » rendu disponible par le MELCCFP [3]. Les résultats des maximaux annuels du CEHQ sont présentés dans le Tableau 4-3.



Tableau 4-3 : Débits estimés au barrage

Débits estimés au barrage par la transposition						
Étude de récurrence (années)	2	10	20	25	50	100
Débit de crue (m ³ /s) de la station Sainte-Marguerite Nord-Est (062803)	252	383	436	453	508	563
Débit transposé (m ³ /s)	44	67	76	79	89	98

Une analyse statistique a été réalisée pour estimer les débits de crue été-automne de la station Sainte-Marguerite. Cette analyse utilise les données de débits moyennes journalières de la station enregistrées entre les mois de juin et de novembre. Les débits maximums annuels de la période été été-automne ont permis de constituer une série statistique. La loi Log-Pearson est la plus représentative de la série statistique obtenue. Le Tableau 4-4 ci-dessous résume les résultats des débits statistiques :

Tableau 4-4 : Débit de crue été-automne de la station Sainte-Marguerite (062803)

Station Sainte-Marguerite (062803)						
Étude de récurrence (années)	2	10	20	25	50	100
Débit de crue été-automne (m ³ /s)	145	234	260	268	290	310

Les débits maximums été-automne considérés pour l'analyse statistique sont des moyennes journalières. Pour estimer le débit de pointe instantané, un facteur de pointe de valeur de 1,11 a été considéré pour la station Sainte-Marguerite dans la présente étude, obtenu du document « Calcul des facteurs de pointe à différentes stations hydrométriques sur le territoire québécois, 2020 » rendu disponible par le MELCCFP [4]. Les résultats des facteurs de pointes du CEHQ sont présentés dans le Tableau 4-5.

Tableau 4-5 : Facteur de pointe à la station Sainte-Marguerite (062803)

Station	Nom	Facteur de pointe			
		Printemps Médiane	Printemps Moyenne	Été-Automne Médiane	Été-Automne Moyenne
062803	Sainte-Marguerite	1,10	1,10	1,08	1,11

Les débits de pointe de crues non majorés pour tenir compte des changements climatiques obtenus en utilisant la méthode de transposition de bassin de la station Sainte-Marguerite (062803) sont présentés au Tableau 4-6.

Tableau 4-6 : Débits estimés au barrage

Étude de récurrence (années)	10	20	25	50	100
Débit été-automne au barrage (m ³ /s)	40,8	45,5	46,9	50,7	54,1
Débit de pointe été-automne au barrage (m ³ /s)	45,4	50,5	52,0	56,3	60,1

4.2 ANALYSE HYDROLOGIQUE DE L'ÉVÉNEMENT DU 19 AOÛT 2023

Le 19 août 2023, les résidents de Tadoussac ont observé une crue historique dans la rivière du Moulin à Baude. L'analyse de cet événement était importante dans le cadre de cette étude. Deux approches ont été utilisées pour estimer le débit de cette crue :



- La méthode de transfert de bassin versant;
- La simulation hydrologique de l'événement à l'aide du modèle HEC-HMS.

4.2.1 Détermination du débit par la méthode de transfert de bassin versant

La station Sainte-Marguerite a été sélectionnée pour sa proximité avec la zone d'étude. En effet pour les crues été-automne il est préférable de choisir une station proche du bassin à l'étude car ce sont des événements sont souvent orageux et concentrés dans une zone précise.

Le débit maximal du 19 août 2023 enregistré à la station Sainte-Marguerite est de 102,1 m³/s. Ce débit a été transposé au bassin versant de la zone d'étude. Le débit transposé est de 17,8 m³/s.

4.2.2 Détermination du débit avec le modèle HEC-HMS

L'analyse hydrologique a été réalisée en utilisant le logiciel HEC-HMS, version 4.11. Tous les intrants requis pour le développement du modèle sont expliqués dans les sections suivantes.

4.2.2.1 Délimitation des sous-bassins

Les sous-bassins versants délimités par HEC-HMS pour le bassin versant à l'étude sont présentés à la Figure 4-2.



Figure 4-2 : Sous-bassins versants

Tableau 4-7 : Sous-bassins dans l'analyse hydrologique

Sous-bassin	Superficie du sous-bassin (km ²)
Subbassin-1	8,28
Subbassin-2	6,86
Subbassin-3	3,99
Subbassin-4	8,25
Subbassin-5	5,67
Subbassin-6	3,54
Subbassin-7	4,17
Subbassin-8	8,37
Subbassin-9	3,28
Subbassin-10	3,29
Subbassin-11	10,36
Subbassin-12	3,93
Subbassin-13	3,28

Sous-bassin	Superficie du sous-bassin (km ²)
Subbassin-14	3,83
Subbassin-15	1,43
Subbassin-16	6,47
Subbassin-17	7,38
Subbassin-18	6,11
Subbassin-19	2,00
Subbassin-20	6,00
Subbassin-21	0,30
Subbassin-22	19,21
Subbassin-23	3,48
Subbassin-24	0,05
Subbassin-25	9,37

4.2.2.1 Analyse des précipitations du 18-19 août 2023

Les données des précipitations de l'événement du 18-19 août 2023 ont été obtenues du site du Gouvernement du Canada pour simuler l'événement avec HEC-HMS afin de calculer le débit résultant dans la rivière du Moulin à Baude à l'endroit du barrage. La station de mesure choisie est « Grande Bergeronnes ». Cette station a été retenue parce qu'elle est la plus proche du site à l'étude (soit à 15,7 km de la rivière du Moulin à Baude). L'événement pluvieux a duré du 18 août 2023 à 16h00 au 19 août 2023 à 1h00. Les données horaires des précipitations sont montrées dans le Tableau 4-8.

Tableau 4-8 : Hauteur des précipitations de l'événement 18-19 août

Date	Heure	Hauteur de précipitation (mm)
18 août 2023	16:00	3,5
18 août 2023	17:00	0
18 août 2023	18:00	0,6
18 août 2023	19:00	1
18 août 2023	20:00	3,7
18 août 2023	21:00	4,9
18 août 2023	22:00	2,6
18 août 2023	23:00	8
19 août 2023	0:00	4,6
20 août 2023	1:00	0,2



4.2.2.2 Types des Sols

Classification hydrologique des sols

Les différents types de sols présents dans les sous-bassins des barrages à l'étude ont été identifiés à partir des données de dépôt de surface de la carte écoforestière obtenu du site de Forêt Ouverte. À partir des données présentées au Manuel de Conception des Ponceaux [5], il a été possible de déterminer la classification des sols.

La grande majorité des sols du bassin versant ont une classification de C. Ainsi une classification C a été assignée à l'ensemble du bassin versant.

Utilisation des sols

Les sous-bassins à l'étude sont majoritairement en zone forestière. Le nombre de curve (CN) de tous les sous-bassins versants utilisé est 90, correspondant au type de sol combinaison forêt – herbe du manuel de référence de HEC-HMS [6].

4.2.2.3 Temps de décalage

Le temps de décalage L (lag time) a été calculé en utilisant l'équation issue du chapitre 15 du « Part 630 Hydrology National Engineering Handbook » du Département d'Agriculture des États-Unis. [7] La méthode de calcul a été développée par le Service de Conservation des Ressources Naturelles (NRCS)

$$L = \frac{l^{0,8}(S + 1)^{0,7}}{1900Y^{0,5}}$$

où	L	Lag (hr)
	<i>l</i>	Longueur de l'écoulement (pieds)
	Y	Pente moyenne du bassin versant (%)
	S	Rétention potentielle maximale (pouces) (1000/CN-10)
	CN	Facteur de délai (Curve Number)

La longueur de l'écoulement et la pente moyenne de sous-bassin ont été calculées individuellement pour chaque sous-bassin par HEC-HMS.

4.2.2.4 Détermination du débit de base

HEC-HMS exige qu'il y ait un débit de base dans les rivières à tout moment afin que la pluie ne remplisse pas une rivière sèche pendant chaque simulation. Le débit moyen de l'été 2023 (du 21 juin 2023 jusqu'à 02 septembre 2023) de la station Sainte-Marguerite a été transposé à chaque sous-bassins de la zone d'étude. Ce débit de base estimé varie de 0,011 m³/s à 1,07 m³/s en fonction du sous-bassin.

4.2.2.5 Résultat de la modélisation avec HEC-HMS

Le débit de pointe calculée à l'aide du modèle avec HEC-HMS de l'évènement de 18-19 août est de 118,2 m³/s.



4.3 DÉBITS DE CRUE RETENUS POUR L'ÉTUDE HYDRAULIQUE

Le débit de pointe de l'événement du 18-19 août 2023 enregistré à la station Sainte-Marguerite est de 102,1 m³/s. Le débit transposé au bassin à l'étude par la méthode de transfert de bassin versant est de 17,8 m³/s, alors que le débit obtenu par la simulation HEC-HMS pour cette date est de 118,2 m³/s.

Il est possible de conclure que les débits été-automne de la zone d'étude sont sous-estimés en utilisant la méthode de transposition à partir de la station Sainte-Marguerite. Les débits provenant de la station doivent donc être majorés pour inclure l'incertitude hydrologique et représenter le comportement hydrologique du bassin à l'étude et de tenir compte de la rapidité de la montée de crue été-automne. Cette majoration du débit de pointe est un facteur de multiplication de 6,6 (118,2/17,8).

Les résultats des débits retenus pour les différentes récurrences sont résumés dans le Tableau 4-9. Ces débits utilisés dans la modélisation hydraulique de la rivière du Moulin à Baude.

Tableau 4-9 : Débits de crue retenue pour l'étude hydraulique

Débits estimés au barrage			
Période de récurrence (années)	2	25	50
Débit transposé (m ³ /s)	40,8	46,9	50,7
Débit majoré pour tenir compte des changements climatiques (m ³ /s)	47	54	58
Débit de pointe de crue été-automne(m ³ /s)	-	357	386



5.0 MODÉLISATION HYDRAULIQUE

5.1 DESCRIPTION DU MODÈLE HYDRAULIQUE 2D

La modélisation hydraulique a été réalisée à l'aide du logiciel HEC-RAS 6.3.1 rendu disponible par le « US Corps of Engineer » avec la fonction de modélisation 2D.

5.1.1 Topographie

Les données topographiques disponibles sur le site web Forêt Ouverte ont été téléchargées (Carte 22C04NE) et utilisées pour le développement du modèle hydraulique. Un relevé bathymétrique n'était pas réalisable la journée de la visite du fait des débits importants et de la présence de rapides. L'utilisation du Lidar permet d'avoir des niveaux d'eau conservateurs.

5.1.2 Conditions aux frontières

Les conditions aux frontières amont sont un débit imposé, provenant du réservoir en amont du barrage. Ce débit dépend de la crue utilisée pour la simulation, représentée dans le Tableau 4-9. La condition à la frontière aval correspond au niveau d'eau du fleuve Saint-Laurent.

5.1.3 Coefficient de rugosité de Manning

Les coefficients de rugosité utilisés en aval du barrage pour le modèle HEC-RAS sont 0,026 pour le cours d'eau de la rivière du Moulin à Baude en considérant un coefficient correspondant à une surface rocheuse, et 0,14 pour les zones forestières à l'extérieur des berges. En amont du barrage, les coefficients de rugosité utilisés sont 0,025 en considérant un coefficient correspondant à une surface plantée. Cependant, lors de la visite, des débris ont été observés en amont de la vanne du barrage, dans cette partie le coefficient de rugosité utilisé est 0,045 pour représenter ces débris.

Ces coefficients de rugosité ont été déterminés en considérant le terrain et calibrés en utilisant les niveaux d'eau relevés.

5.2 CALIBRATION ET VALIDATION DU MODÈLE

La hauteur d'eau générée par le débit de pointe maximal annuel de récurrence 2 ans (sans majoration pour les changements climatiques) est comparable à la ligne des hautes eaux présentée dans le Tableau 2-1 de la section 2.2.

La calibration du modèle montre une différence d'environ 5 cm entre les niveaux simulés et le niveau mesuré pour l'eau du jour lors de la visite du site. La simulation avec la crue de 2 ans annuelle donne également une différence de 5 cm entre le niveau d'eau simulé et le niveau de la limite du littoral. La calibration est donc considérée acceptable et les résultats du modèle sont fiables.



Pour valider le débit obtenu à partir de la modélisation hydrologique avec HEC-HMS, une simulation avec ce débit a été réalisée et le résultat du niveau d'eau comparé au niveau d'eau estimé avec les photos du 19 août 2023 reçus de la SEPAQ. Les données relevées incluent l'élévation du pied des roches et la crête des débris de la Figure 5-1 et sont présentés dans le Tableau 5-1.

Tableau 5-1 : Élévation des débris en aval du barrage

	Élévation des points mesurés (m)			Élévation moyenne (m)
Crête des débris	45,578	45,443	45,596	45,54
Pied des roches	44,184	44,092	44,053	44,11

La hauteur entre le pied des roches et la crête des débris est d'environ 1,43 m, et la hauteur entre le haut des débris et le niveau d'eau montré dans la Figure 5-2 est d'environ 0,7 m. Donc le niveau approximatif de l'eau dans la Figure 5-2 est de 46,25 m.



Figure 5-1 : Photo prise le jour de la visite du site (18/07/2023)



Figure 5-2 : Photo reçue pour la crue de l'événement du 19 août 2023

Les vidéos de l'événement du 19 août 2023 transmises par la Sépaq indiquent un important écoulement se trouve dans l'effluent Ouest de la rivière. Une hypothèse sécuritaire selon laquelle, l'écoulement est préférentiellement dirigé vers l'effluent Ouest pour la grande crue a été considérée afin de pouvoir produire le niveau d'eau montré sur la photo. Pour cette raison, l'écoulement dans l'effluent Est de la rivière a été bloqué dans le modèle HEC-RAS pour les débits importants (accumulation des débris qui peut réduire significativement la participation de cet affluent), et l'écoulement se dirige principalement vers l'effluent ouest qui se trouve proche de l'emplacement de l'escalier à construire. Cette hypothèse permet d'avantage d'avoir des niveaux d'eau conservateurs.

Afin de déterminer l'impact des écoulements sur la conception de l'escalier, une simulation avec le débit issue de la modélisation hydrologique ($118,2 \text{ m}^3/\text{s}$) a été réalisée en considérant également que l'effluent Est ne participe pas (hypothèse sécuritaire pour la construction de l'escalier). Les niveaux d'eau obtenus dans l'emplacement à l'endroit où la photo de la Figure 5-2 a été prise, est de 46,12 m (voir la Figure 1-1 qui montre l'emplacement dans l'affluent Ouest).

5.3 SIMULATION DU COURS D'EAU

La limite du littoral (crue 2 ans) de l'effluent ouest, qui se trouve dans la zone de l'implantation de l'escalier, a été simulée. Les résultats des simulations sont présentés à la Figure 5-3.

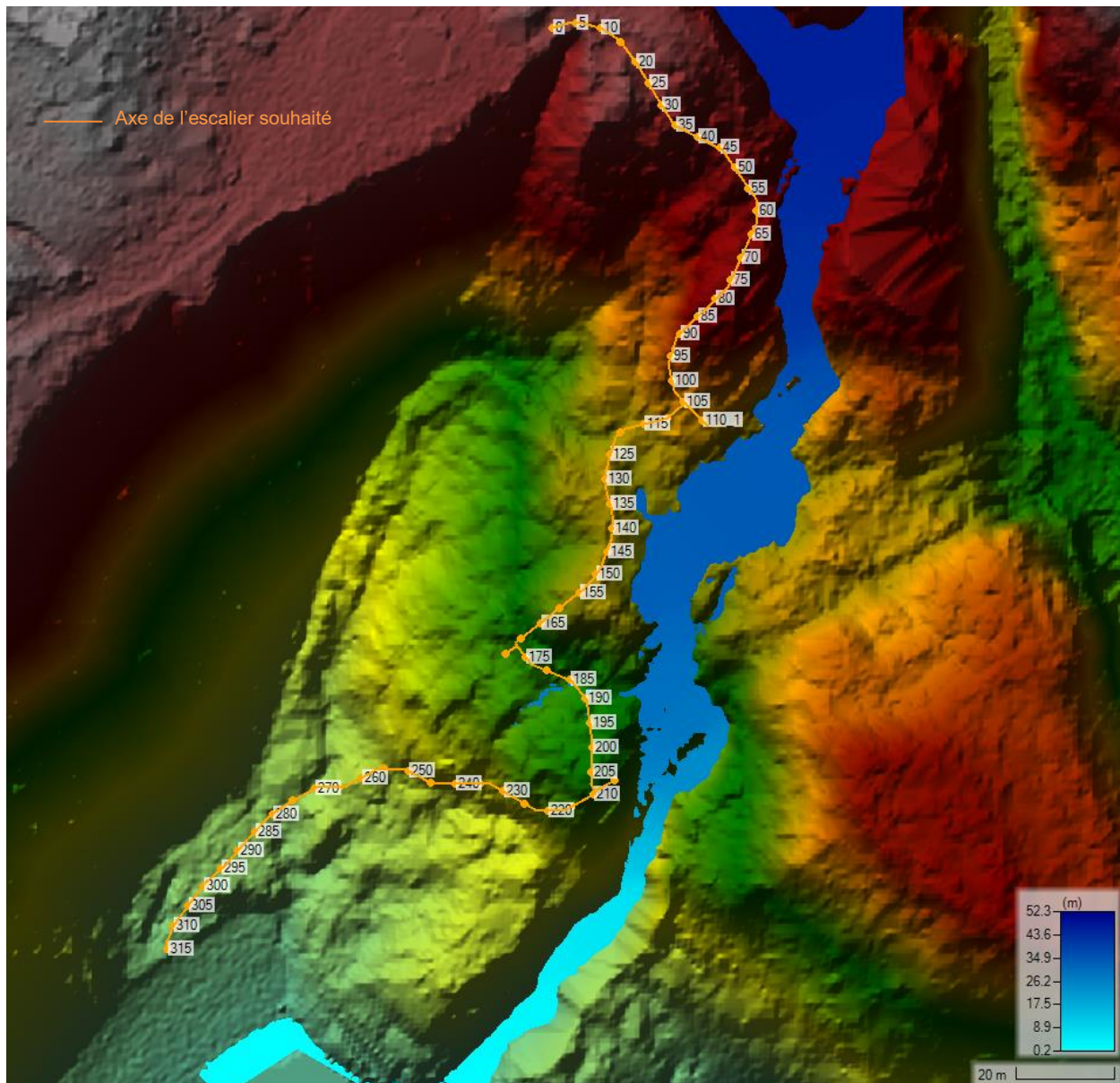


Figure 5-3 : Limite du littoral simulé pour la crue 2 ans

Pour les crues de récurrence 25 ans et 50 ans (crues de conception de l'escalier), il y a un débordement de l'eau de la rivière vers l'emplacement projeté de l'escalier tel que montré dans les Figure 5-4 et Figure 5-5 pour les crues été-automne de récurrence 25 et 50 ans, respectivement. L'étendue de ce débordement est pratiquement similaire pour les deux scénarios. Les niveaux d'eau au-dessous de l'escalier sont présentés dans le Tableau 5-2, la différence des niveaux d'eau entre les crues de récurrence 25 ans et 50 ans varie entre 3 et 10 cm sur le long du cours d'eau.



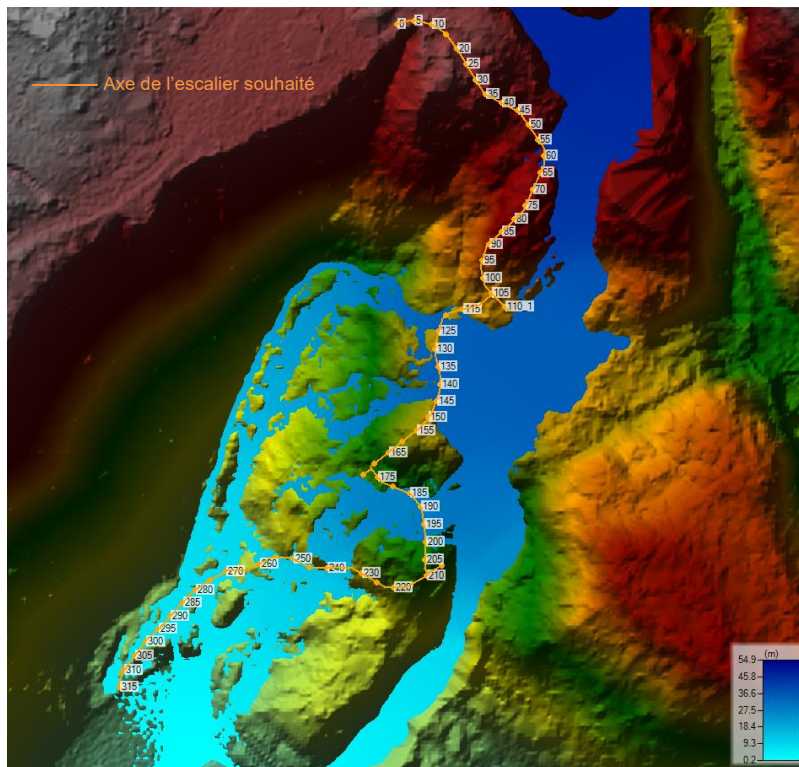


Figure 5-4 : Le cours d'eau simulé pour la crue été-automne de récurrence 25 ans

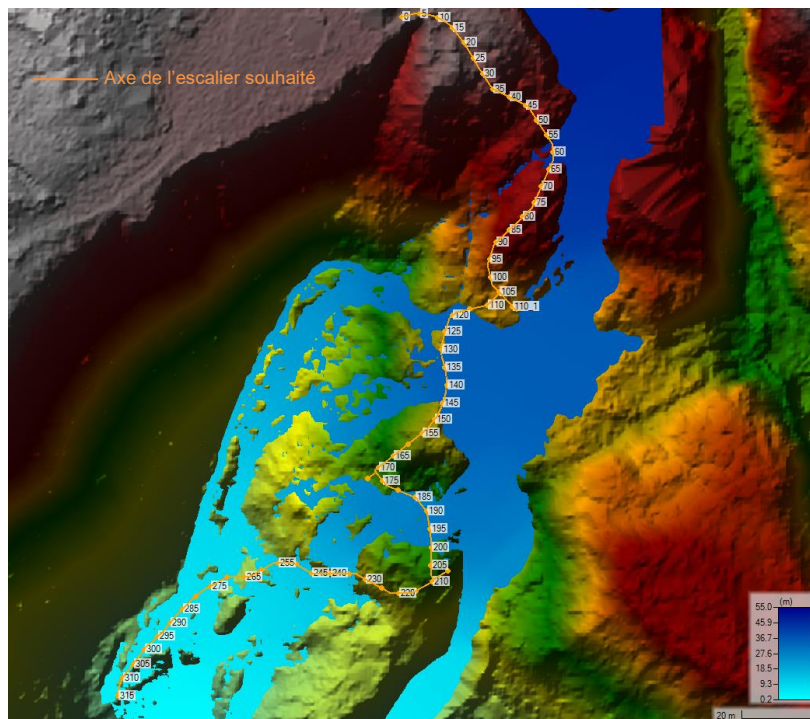


Figure 5-5 : Le cours d'eau simulé pour la crue été-automne de récurrence 50 ans



Tableau 5-2 Niveaux d'eau au-dessous de l'escalier

Station	Niveau du terrain (m)	Q 25 ans	Q 50 ans
		Niveau d'eau (m)	Niveau d'eau (m)
0	54,56	0,00	0,00
5	54,69	0,00	0,00
10	54,43	0,00	0,00
15	54,02	0,00	0,00
20	54,19	0,00	0,00
25	53,68	0,00	0,00
30	53,38	0,00	0,00
35	52,56	0,00	0,00
40	49,15	0,00	0,00
45	47,79	0,00	0,00
50	47,59	0,00	0,00
55	46,61	0,00	0,00
60	45,11	0,00	0,00
65	45,07	0,00	0,00
70	45,69	0,00	0,00
75	45,47	0,00	0,00
80	44,89	0,00	0,00
85	43,34	0,00	0,00
90	41,89	0,00	0,00
95	39,86	0,00	0,00
100	38,10	0,00	0,00
105	35,86	0,00	0,00
110	35,96	0,00	0,00
115	34,79	0,00	34,81
120	34,03	34,17	34,23
125	34,40	34,47	34,52
130	34,78	0,00	0,00
135	34,66	34,69	34,74
140	34,39	34,53	34,58
145	34,21	34,25	34,29
150	34,39	0,00	0,00

Station	Niveau du terrain (m)	Q 25 ans	Q 50 ans
		Niveau d'eau (m)	Niveau d'eau (m)
155	34,09	0,00	0,00
160	32,88	0,00	0,00
165	30,83	0,00	0,00
170	28,09	0,00	0,00
175	27,67	0,00	0,00
180	27,62	0,00	0,00
185	27,46	27,86	27,90
190	28,34	28,57	28,60
195	28,54	28,67	28,70
200	28,63	0,00	0,00
205	29,02	0,00	0,00
210	28,21	0,00	0,00
215	26,09	0,00	0,00
220	23,88	0,00	0,00
225	20,96	0,00	0,00
230	18,30	0,00	0,00
235	16,70	17,10	17,14
240	16,19	0,00	0,00
245	12,86	13,15	13,16
250	12,80	13,00	13,03
255	11,55	11,60	11,62
260	10,23	0,00	0,00
265	9,15	0,00	0,00
270	7,19	7,61	7,71
275	6,79	7,13	7,20
280	6,23	6,53	6,61
285	6,11	6,27	6,33
290	5,95	6,00	6,04
295	5,56	5,71	5,76
300	5,47	5,60	5,64
305	5,09	5,13	5,16
310	4,12	0,00	0,00
315	3,58	0,00	0,00



Les vitesses de l'écoulement dans le cours d'eau sont élevées telles que présentées dans les Figure 5-6 et Figure 5-7.

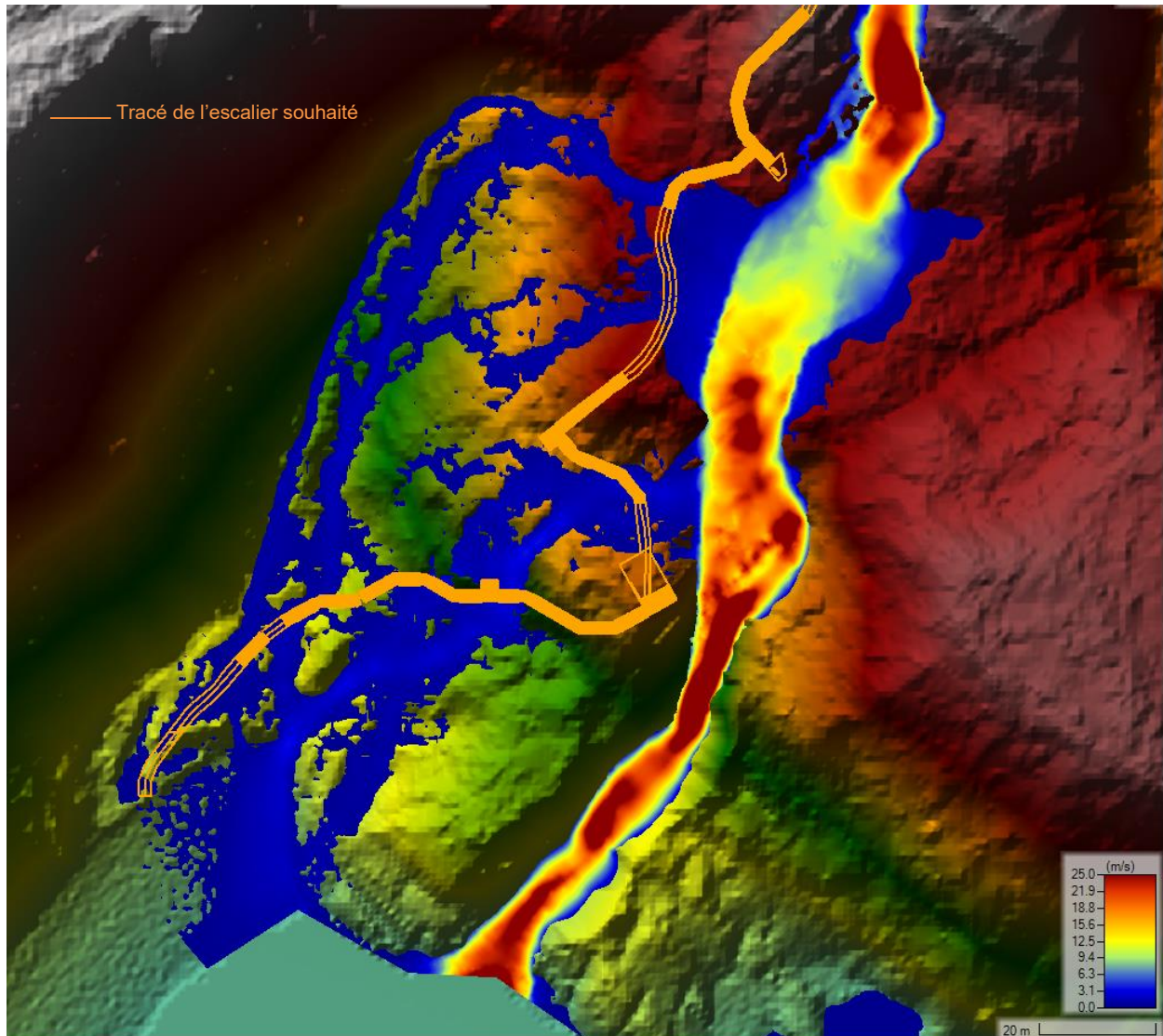


Figure 5-6 Répartition des vitesses dans l'effluent ouest du cours d'eau de récurrence 25 ans



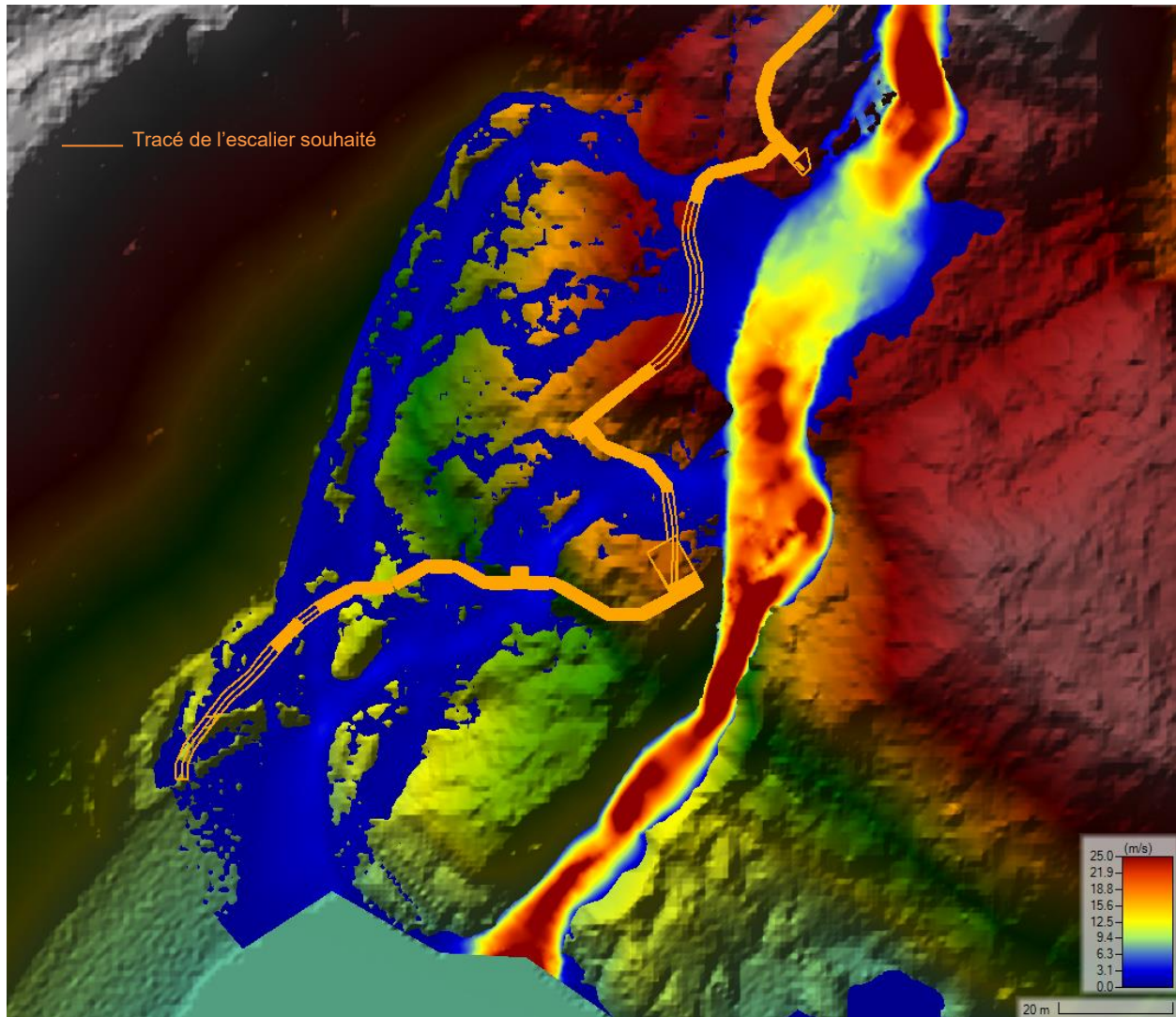


Figure 5-7 : Répartition des vitesses dans l'effluent ouest du cours d'eau-réurrence 50 ans

Mais dans les zones de construction de l'escalier, ces vitesses ne sont pas assez importantes et sont inférieures à 4m/s. Les Figure 5-8 et Figure 5-9

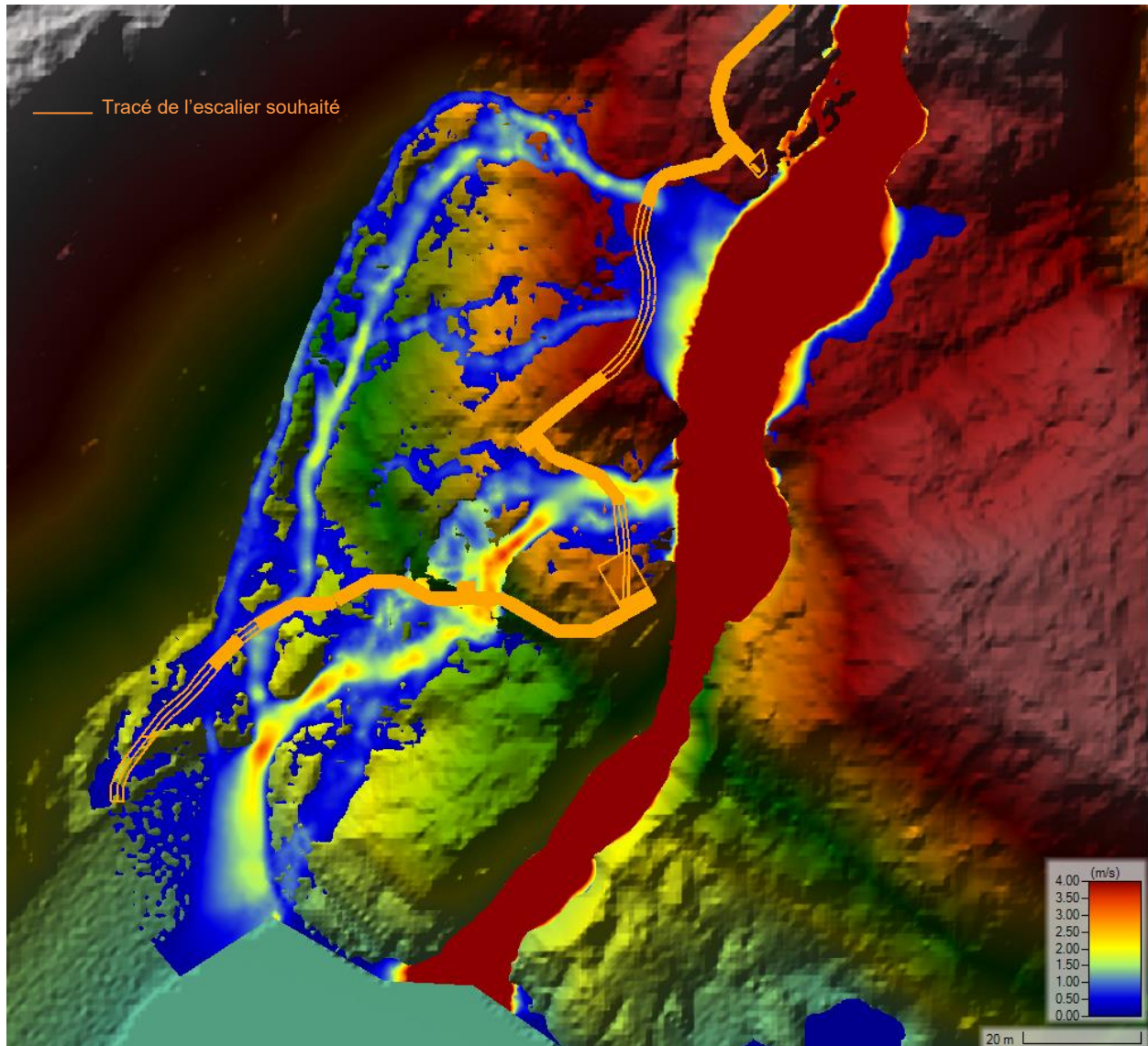


Figure 5-8 : Répartition des vitesses dans les zones de passage de l'escalier-récurrance 25 ans*
*Échelle modifiée pour visualiser les vitesses de l'écoulement autour de l'escalier.

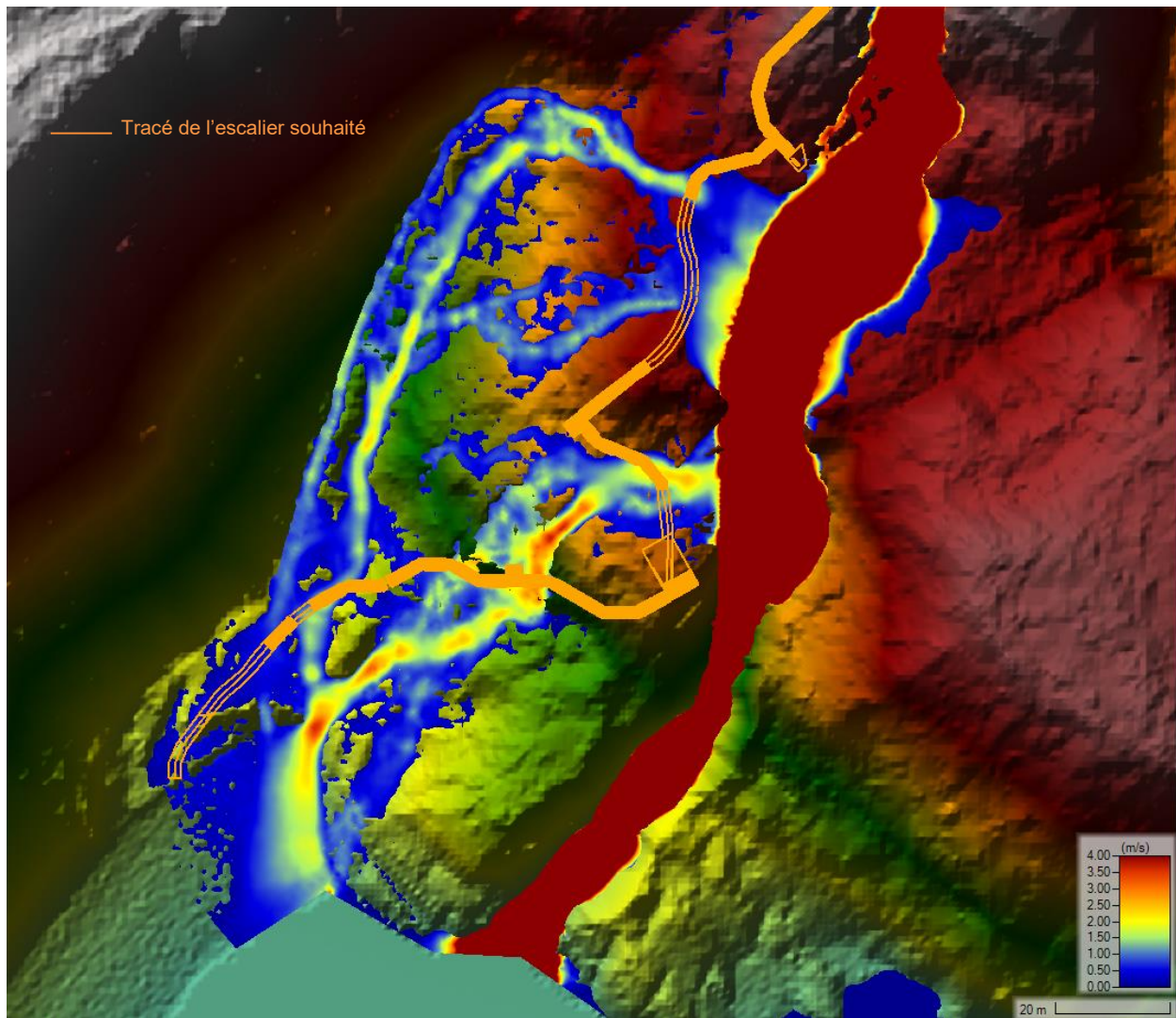


Figure 5-9 : Répartition des vitesses dans les zones de passage de l'escalier-récurrence 50 ans*
*Échelle modifiée pour visualiser les vitesses de l'écoulement autour de l'escalier.

6.0 CONCLUSION ET RECOMMANDATION

La présente étude a permis de déterminer les principales caractéristiques hydrauliques de la rivière du Moulin à Baude, dans la municipalité de Tadoussac.

À la suite de l'analyse hydraulique, le tracé du futur escalier est situé à l'extérieur de la limite du littoral simulé. Cependant, ce tracé passe par des zones de débordement pour les crues de récurrences 25 et 50 ans. La différence entre les niveaux d'eau pour les crues 25 et 50 ans (été-automne) varie entre 3 et 10 cm. L'étendue de l'écoulement et les vitesses sont quasiment similaires pour les deux récurrences 25 et 50 ans.

Dans les zones où l'eau passe au-dessous de l'escalier, le niveau de l'escalier doit tenir compte des niveaux d'eau et les piliers doivent être construits pour résister à l'écoulement. Le niveau du soffite de l'escalier doit respecter revanche minimale de 500 mm.

Les vitesses de l'écoulement dans la rivière sont élevées dans le cours d'eau (voir figure) notamment au niveau des rapides. Ces vitesses sont assez fortes et pourraient causer de l'érosion du roc. Tandis que les vitesses de l'écoulement sont de l'ordre de 1 à 4 m/s dans les zones traversées par l'escalier. Par conséquent, la structure des pieux de l'escalier doit être conçue afin de résister à ces vitesses. Les pieux de l'escalier doivent être protégés, et il est préférable qu'ils soient en béton ou acier galvanisé.



7.0 RÉFÉRENCES

Les références suivantes ont été consultées :

- [1] MTQ, «Tome III,» 2023.
- [2] MELCCFP, «Formule de transfert de bassin versant,» [En ligne].
- [3] MELCCFP, «Tableau des débits de crue aux stations hydrométriques du Québec,» 2020.
- [4] MELCCFP, «Calcul des facteurs de pointe à différentes stations hydrométriques sur le territoire québécois,» 2020.
- [5] MTQ, «Manuel de conception des ponceaux,» 2020.
- [6] USACE, «CN tables, Manuel de HEC-HMS,» [En ligne].
- [7] USDA, «Time of Concentration, Natural Resources Conservation Service, Part 630 Hydrology National Engineering Handbook,» 2010.



**Société des établissements
de plein air du Québec**
Janvier 2024
Dossier :
N° Projet client :
N° Projet Stantec : 159101556