



Projet de parc national des Dunes-de-Tadoussac, problématique d'érosion de la dune inférieure

N° Projet Stantec :159101556





Projet de parc national des Dunes-de-Tadoussac, problématique d'érosion de la dune inférieure

Préparé pour:

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

Préparé par:

Stantec Experts-conseils ltée

N. Réf. : 159101556

Index des révisions

Révision	Description	Auteur(e)		Vérification qualité		Revue indépendante	
0A	Émis pour commentaires	CK/TC	2023/12/14	AT	2023/12/14		
00	Émission finale	CK/TC	2024/02/27	AT	2024/02/27		



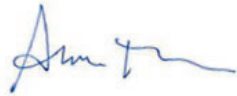
Registre d'approbation

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  Carole Kabore, ing. M.Sc. (Hydrologie-Hydraulique)	Préparé par  2024-02-27 Timothée Coulaux, ing. (Volet géotechnique)
--	---

Vérifié par 

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

Avec la contribution de :

Daphnée Baudet, Formatage



Table des matières

1.0	INTRODUCTION	2.1
1.1	MANDAT ET OBJECTIFS	2.1
1.2	DESCRIPTION DU PROJET	2.1
1.3	DESCRIPTION DU SITE	2.1
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	ANALYSE DE L'ÉROSION DES DUNES DE SABLE	3.1
3.1	ANALYSE GÉOTECHNIQUE DE L'ÉTAT ACTUEL DES DUNES	3.1
3.1.1	Problématique à l'origine du ravinement observée	3.1
3.1.2	État d'avancement	3.5
3.1.3	Zone de faible érosion de surface	3.16
3.2	ANALYSE HYDRAULIQUE DE L'ÉROSION	3.18
3.2.1	Sous-bassin versant et hydrographie	3.18
3.2.2	Analyse hydro-sédimentaire	3.19
4.0	CONCLUSION	4.1
5.0	CONCEPTS POUR LA PROTECTION DES DUNES DE SABLE	5.1
5.1	RESTAURATION DES ZONES DE RAVINEMENT	5.1
5.2	DÉLIMITATION DES ZONES DE CIRCULATION DES VISITEURS	5.2
5.3	DRAINAGE PRÉVENTIF EN AMONT	5.2
5.3.1	Description de la solution de drainage	5.2
5.3.2	Critères de conception de la solution drainage	5.3
6.0	RÉFÉRENCES	6.1

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1 :	Vitesses de l'analyse hydro sédimentaire	3.21
---------------	--	------

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 :	Zones de contraintes applicables au site (IGO2, 2022)	2.2
Figure 1-2 :	Zone à l'étude et localisation des secteurs érodés/ravinés	2.4
Figure 3-1 :	Vue du sommet de talus - Zone de ravinement 2	3.2
Figure 3-2 :	Vue du sommet de talus - Zone de ravinement 3	3.2
Figure 3-3 :	Vue du sommet de talus - Zone de ravinement 4	3.3
Figure 3-4 :	Vue du sommet de talus - Zone de ravinement 5	3.4
Figure 3-5 :	Effet de bout à l'extrémité de l'enrochement - Zone de ravinement 3	3.5
Figure 3-6 :	Zone de ravinement 1 (amont)	3.6
Figure 3-7 :	Zone de ravinement 1 (aval)	3.6
Figure 3-8 :	Zone de ravinement 2 (amont)	3.7
Figure 3-9 :	Zone de ravinement 2 (aval)	3.7
Figure 3-10 :	Zone de ravinement 3 (amont)	3.8
Figure 3-11 :	Zone de ravinement 3 (amont)	3.8



Figure 3-12 :	Zone de ravinement 3 (milieu)	3.9
Figure 3-13 :	Zone de ravinement 3 (milieu)	3.10
Figure 3-14 :	Zone de ravinement 3 (aval)	3.11
Figure 3-15 :	Zone de ravinement 3 (aval)	3.11
Figure 3-16 :	Zone de ravinement 4 (amont)	3.12
Figure 3-17 :	Zone de ravinement 4 (milieu et aval)	3.13
Figure 3-18 :	Zone de ravinement 5 (amont)	3.14
Figure 3-19 :	Zone de ravinement 5 (milieu et aval)	3.15
Figure 3-20 :	Zones de faible érosion de surface observées	3.16
Figure 3-21 :	Zone d'érosion mineure en sommet de talus	3.17
Figure 3-22 :	Zone d'érosion mineure en sommet de talus	3.17
Figure 3-23 :	État du sommet de talus au droit de la maison des dunes	3.18
Figure 3-24 :	Sous-bassins versants et hydrographie de la dune inférieure	3.19
Figure 3-25 :	Configuration du modèle hydraulique	3.20
Figure 3-26 :	Diagramme de Hjulstrom et la plage de vitesses pour une crue annuelle	3.21
Figure 3-27 :	Diagramme de Hjulstrom et la plage de vitesses pour une crue 25 ans été- automne	3.22
Figure 5-1 :	Tracé proposé du fossé d'infiltration et des bassins	5.3
Figure 5-2 :	Détail type d'un seuil de rétention	5.5
Figure 5-3 :	Exemple de profil d'un fossé avec des seuils de rétention	5.5



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 problématique d'érosion de la dune inférieure sur le territoire du futur parc national des Dunes-de-Tadoussac dans la municipalité de Tadoussac.

L'évaluation sommaire de la problématique d'érosion par une équipe multidisciplinaire de Stantec a plutôt permis de déterminer que la problématique est davantage associée à une interaction de deux facteurs, soit : le drainage de surface et la géotechnique sans trouver de lien direct avec le comportement hydrogéologique du site. Ainsi, l'érosion au pied de talus causée par les vagues et les marées ne font pas partie du présent mandat.

Les termes régissant le mandat s'appuient sur les énoncés de l'offre de services acceptée par la Sépaq en date du 23 mai 2023 (réf. : OS_954678_Dunes_Tadoussac_20230523).

De manière générale, la présente étude a pour objectifs d'identifier, d'analyser et de comprendre les problématiques de ravinement observées sur la portion non boisée du talus de sable ainsi que de proposer des recommandations pour corriger la situation et prévenir d'éventuels problèmes.

1.2 DESCRIPTION DU PROJET

Le projet consiste à préparer une étude hydraulique, et géotechnique sommaire dans le but d'orienter le client sur les causes possibles de la problématique actuelle de ravinement et d'érosion observée 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'analyse de la stabilité de talus à partir des données de forage existantes;
- L'analyse du drainage de la zone localisée au nord-est de la dune afin de recommander des solutions de drainage adéquates.

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. Bien que quelques dunes soient présentes, la forme générale du terrain dans le secteur est étroitement liée aux variations du niveau marin relatif, lesquels ont permis la mise en place d'une série de surface deltaïque et de terrasses d'origine glaciomarine.

Le talus côtier d'une hauteur approximative de 60 m fait face à la baie du Moulin à Baude et est situé dans une zone cartographiée et répertoriée comme étant susceptible aux glissements de terrain. La zone à l'étude est assujettie au règlement de contrôle intérimaire (RCI) n° 107-2008 de la MRC de la Haute-Côte-Nord qui vise à régir la construction et l'aménagement des terrains situés dans les zones exposées aux glissements de terrain et à l'érosion des berges. Ainsi, toute intervention projetée en sommet de



talus, dans la pente ou au pied de celle-ci, doit préalablement répondre aux critères et exigences mentionnées dans ce règlement.

La plus grande portion de la zone d'étude retenue par la Sépaq est occupée par des sols sablonneux exempts de couverts végétaux ou de protection de surface (sols à nus) étant cartographiée comme une zone NS1L selon le RCI. C'est dans cette zone que des ravinements et de l'érosion de surface ont principalement été observés. La Figure 1-1 ci-dessous extraite de la cartographie IGO2 du RCI montre les zones de contraintes et les bandes de protection applicables au site.

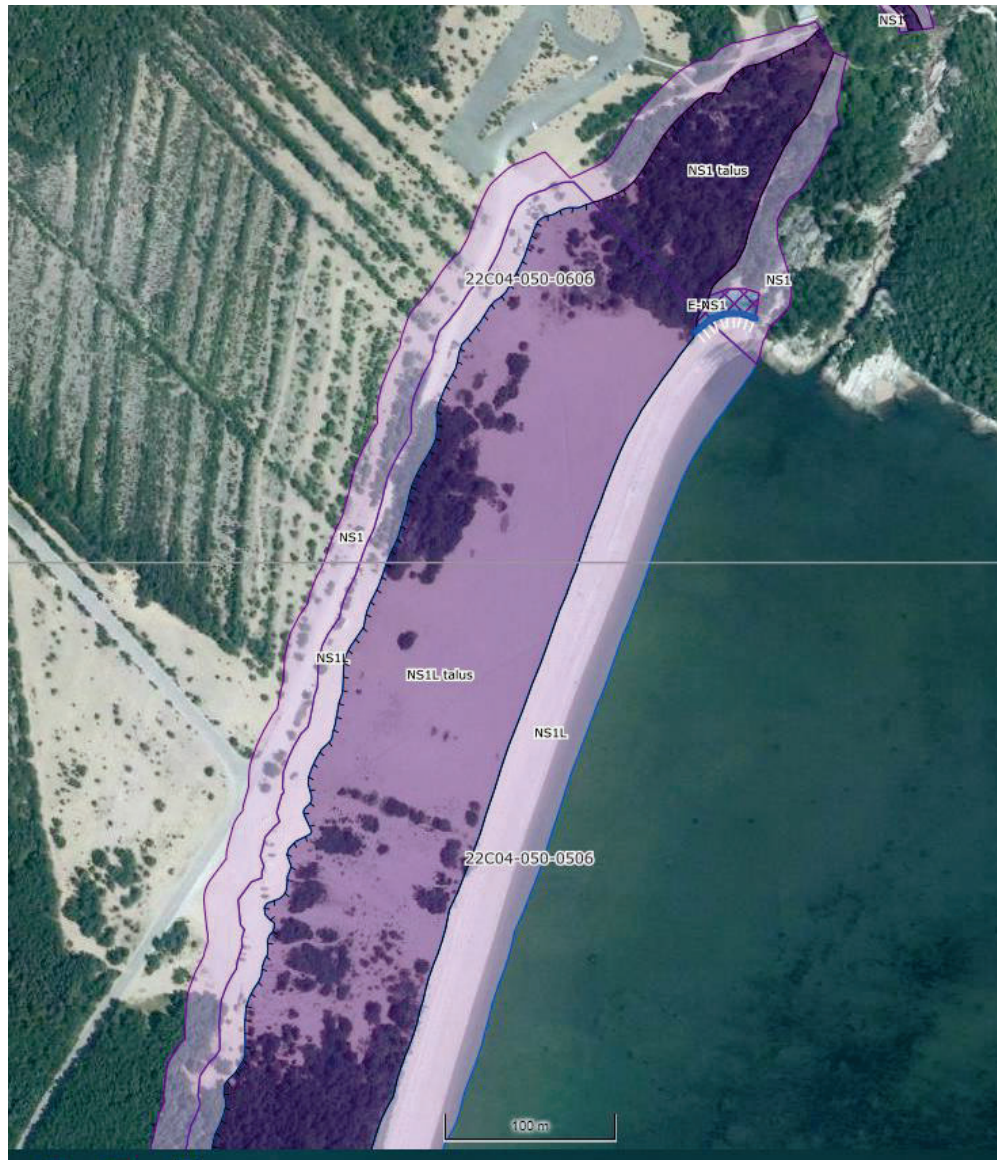


Figure 1-1 : Zones de contraintes applicables au site (IGO2, 2022)

La zone NS1L est définie comme une zone composée de sols à prédominance sableuse, avec érosion, susceptible d'être affectée par des glissements de terrain d'origine naturelle ou anthropique et susceptible de subir des reculs sous l'effet de l'érosion associée au fleuve et au golfe du Saint-Laurent.

Selon les informations disponibles du SIGÉOM, la partie ouest du site à l'étude (secteur non boisé et partiellement boisé) est constituée de sédiments glaciomarins littoraux et pré-littoraux principalement sableux avec des variations de silt et de gravier. La pente dans ce secteur est homogène dans son ensemble. La partie est du site serait plutôt constituée d'une formation rocheuse affleurante, rendant le profil de la pente plutôt hétérogène. Dans le cadre de ce mandat, le volet géotechnique portera essentiellement sur la zone de pente située à l'ouest du stationnement et en aval du chemin d'accès.

Le site fait actuellement l'objet d'une fréquentation élevée, laquelle est anticipée aller en augmentant suite à l'ouverture du parc national. Déjà, une aire de stationnement y a été aménagée (ceinturée par une série de blocs de grand diamètre), des sentiers de piétonniers non officiels sont empruntés et des véhicules hors route (de type VTT, Jeep, motocross, etc.) circulent dans la pente et au pied de talus, laissant des traces au sol et affectant la surface des sols déjà dénudés.

À cet effet, les problématiques de ravinement et d'érosion de surface observées principalement dans la partie sommitale du talus apparaissent attribuables à la convergence des eaux de ruissellement de surface, à un drainage global du site déficient et à la circulation anthropique accrue plutôt qu'à la résurgence des eaux souterraines ou à un problème de stabilité.

Une étude géotechnique et des analyses de stabilité ont été effectuées par la firme Englobe sur le site en 2022 (réf. : 10-02200133.036-0100-GS-R-0001-00) afin de caractériser la nature des sols sur toute la hauteur du talus et de déterminer le facteur de sécurité actuel de la zone à l'étude ainsi que le recul potentiel du sommet de talus en cas de glissement/décrochement de terrain.

La Figure 1-2 présente la zone à l'étude et les zones de ravinement préliminairement identifiées par la firme Englobe et le client.





Figure 1-2 : Zone à l'étude et localisation des secteurs érodés/ravinés

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 d'observer les ravins et d'évaluer le sens des écoulements en amont du talus de. Le personnel suivant de Stantec a effectué la visite :

- Mme Carole Kabore, ing, M.Sc, Chargé de projet et Hydraulique et Hydrologie;
- Mr Timothée Couleaux, ing, Géotechnique
- Mme Mabelle Nakab, 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 Mr Farid Kelladi, arpenteur chez Stantec. Lors de cette visite, la zone de chaque ravin a été relevée. Ce relevé d'arpentage combinée aux données du Lidar a permis de développer un modèle PCSWM pour analyser les vitesses dans les ravins et a également permis de développer un modèle hydraulique 2D à l'aide du logiciel HEC-RAS afin de modéliser la solution de drainage.



3.0 ANALYSE DE L'ÉROSION DES DUNES DE SABLE

Tel que mentionné précédemment, une visite du site a été effectuée le 18 juillet 2023 par une équipe multidisciplinaire de Stantec. Les sous-sections qui suivent présentent un résumé des zones de ravinement et une description des problématiques observées et une description des problématiques observées ainsi qu'une analyse hydraulique sommaire de l'érosion.

3.1 ANALYSE GÉOTECHNIQUE DE L'ÉTAT ACTUEL DES DUNES

Lors de la visite du site, cinq zones d'érosion/ravinement principales ont été observées. Les positions approximatives de ces zones sont montrées sur la Figure 1-2 et sont décrites plus en détail dans les paragraphes qui suivent.

3.1.1 Problématique à l'origine du ravinement observée

Toutes les zones de ravinement observées sont issues d'une problématique de drainage et de gestion des eaux de surface. Lors des événements pluvieux importants ou en période de fonte printanière des neiges, étant donné que la topographie du plateau en sommet de talus penche vers le fleuve, l'eau ruissèle en surface dans les matériaux sableux plus ou moins lâches pour se diriger vers le cours d'eau. Au fil des temps, des zones préférentielles qui étaient auparavant légèrement plus basses que le reste du talus se sont créées et toute l'eau de surface qui n'a pas été interceptée par un système de drainage anthropique ou naturel ou qui ne s'est pas infiltrée dans les sols se dirige naturellement vers ces points bas situés en sommet de talus. Ces zones préférentielles correspondent aux 5 zones de ravinement observées.

Il est à noter que l'absence de végétation et la présence d'un chemin d'accès, et d'un stationnement en gravier directement en sommet de talus, ayant une surface moins perméable que le reste du talus, constituent des facteurs pouvant influencer les apports d'eau de surface dans la zone de pente et ainsi accentuer le phénomène d'érosion de surface qui est en cours. Les photos ci-dessous illustrent la situation actuelle en sommet de talus et montrent les zones basses préférentielles par lesquelles l'eau de surface s'infiltré pour descendre le talus vers le fleuve.





Figure 3-1 : Vue du sommet de talus - Zone de ravinement 2



Figure 3-2 : Vue du sommet de talus - Zone de ravinement 3



Figure 3-3 : Vue du sommet de talus - Zone de ravinement 4



Figure 3-4 : Vue du sommet de talus - Zone de ravinement 5

Les zones de ravinement 1, 2 et 3 ont été travaillées antérieurement afin d'essayer de contrer le phénomène d'érosion qui était en place. Des géotextiles et de l'enrochement (zone 3 uniquement) ont été disposés dans les zones. Malgré ces tentatives, le processus de ravinement s'est poursuivi et a grugé la partie de sols à nus situés à proximité de l'enrochement nouvellement placé, qui a fini par le déstabiliser et le faire bouger à nouveau, accentuant par le fait même le ravin. Ce phénomène est appelé un « effet de bout » et se produit aux extrémités des enrochements mis en place pour contrer l'érosion lorsque celui-ci n'est pas complètement agencé avec les sols situés de part et d'autre (configuration inadéquate), lorsque la clé d'encastrement située en aval de l'enrochement n'est pas réalisée de manière adéquate ou enfin, lorsqu'il n'y a pas un bon moyen de dissipation de l'énergie produite par l'écoulement de l'eau à la sortie de l'enrochement (calibre inadéquat). La photo ci-dessous permet de bien visualiser ce phénomène qui est principalement présent dans la zone de ravinement 3. Les zones de ravinement 1 et 2 ne comprennent pas d'enrochement.



Figure 3-5 : Effet de bout à l'extrémité de l'enrochement - Zone de ravinement 3

3.1.2 État d'avancement

Bien que l'origine et les causes des ravinements observés sont les mêmes pour chacune des zones, leur état d'avancement et de dégradation est assez variable. En effet, les zones de ravinement 1 et 2 sont jugées comme mineures, la zone 3 a été jugée comme critique ou majeure alors que les zones 4 et 5 comme modérées. Ce jugement se base sur les observations et sur les vitesses du Tableau 3-1 de la section 3.2.2. Dans chacune des zones de ravinement, la fin de la zone ayant été affectée par le processus d'érosion se retrouve à un niveau différent par rapport à la hauteur du talus, pouvant corrélérer avec leur état d'avancement observé dans la partie sommitale. Par exemple, les zones 1 et 2 se limitent au sommet de talus tandis que la zone 3 se prolonge jusqu'à 50 à 60% de la hauteur du talus. Dans tous les cas, le processus d'érosion va perdurer dans le temps et les zones de ravinement vont continuer de se creuser si aucune intervention n'est réalisée en ce sens. Il est anticipé que chacune des zones de ravinement se prolonge jusqu'à atteindre, ultimement et dans un temps inconnu, le fleuve situé en pied de talus et le chemin en haut de talus. Les photos qui suivent illustrent l'état d'avancement de chacune des zones d'érosion observées lors de la visite de site effectuée dans le cadre de ce mandat.



Figure 3-6 : Zone de ravinement 1 (amont)



Figure 3-7 : Zone de ravinement 1 (aval)



Figure 3-8 : Zone de ravinement 2 (amont)



Figure 3-9 : Zone de ravinement 2 (aval)



Figure 3-10 : Zone de ravinement 3 (amont)



Figure 3-11 : Zone de ravinement 3 (amont)



Figure 3-12 : Zone de ravinement 3 (milieu)



Figure 3-13 : Zone de ravinement 3 (milieu)



Figure 3-14 : Zone de ravinement 3 (aval)



Figure 3-15 : Zone de ravinement 3 (aval)



Figure 3-16 : Zone de ravinement 4 (amont)



Figure 3-17 : Zone de ravinement 4 (milieu et aval)



Figure 3-18 : Zone de ravinement 5 (amont)



Figure 3-19 : Zone de ravinement 5 (milieu et aval)

En conclusion, bien que ces 5 zones de ravinement dans lesquelles un processus d'érosion de surface est en cours ont été observées et traitées dans ce rapport, cela n'exclut pas la possibilité que d'autres zones se créent avec le temps, notamment, si aucune mesure pour la captation et le drainage d'eau de surface n'est mise en place. Le site est actuellement très sollicité et les visiteurs descendent à pied ou en machinerie vers le fleuve, en empruntant presque toujours les mêmes chemins, faisant en sorte que des dépressions se créent en sommet et dans le talus, dirigeant les eaux de surface vers le même endroit.

Ces zones, avec le temps, finiront par se creuser et le phénomène de ravinement/érosion va recommencer à ces endroits.

3.1.3 Zone de faible érosion de surface

Une zone supplémentaire ayant une problématique d'érosion de surface a été observée un peu plus à l'est que les 5 zones préliminairement identifiées, dans la zone de sols qui n'est pas affectée par l'érosion en pied de talus du Fleuve (NS1). La figure ci-dessous montre la position approximative de cette zone.



Figure 3-20 : Zones de faible érosion de surface observées

Dans cette zone, il y a présence de deux secteurs préférentiels qui se sont créés et par lesquels l'eau de surface circule pour descendre le talus vers le fleuve. Si une gestion efficace de l'eau de surface n'est pas mise en place dans ce secteur, ces zones pourraient se détériorer à moyen/long terme et causer un recul potentiel du sommet de talus. Dans ce secteur, la végétation est beaucoup plus dense et mature que dans les zones des dunes en sable. Une analyse de stabilité globale a été effectuée non loin de cette zone par la firme Englobe. Les recommandations qui en découlent doivent être consultées avant la mise en place de mesures correctives. Il est à noter que dans ce secteur, le socle rocheux a été relevé comme apparent à plusieurs endroits ou en faible profondeur, notamment dans la partie inférieure et au pied de la pente, limitant le risque d'instabilité globale du talus. Ainsi, s'il y a risque de glissement ou de décrochements, ces derniers seront d'ordre superficiel et provoqueront seulement un léger recul du sommet de talus. Les photos qui suivent présentent la problématique d'érosion de surface observée dans cette zone lors de la visite d'inspection.



Figure 3-21 : Zone d'érosion mineure en sommet de talus



Figure 3-22 : Zone d'érosion mineure en sommet de talus



Figure 3-23 : État du sommet de talus au droit de la maison des dunes

3.2 ANALYSE HYDRAULIQUE DE L'ÉROSION

3.2.1 Sous-bassin versant et hydrographie

Les données numériques de terrain ont permis de délimiter le bassin versant drainé par chaque zone de ravinement de la dune inférieure analysée. La Figure 3-24 montre les sous-bassins versants et l'hydrographie de la dune inférieure.

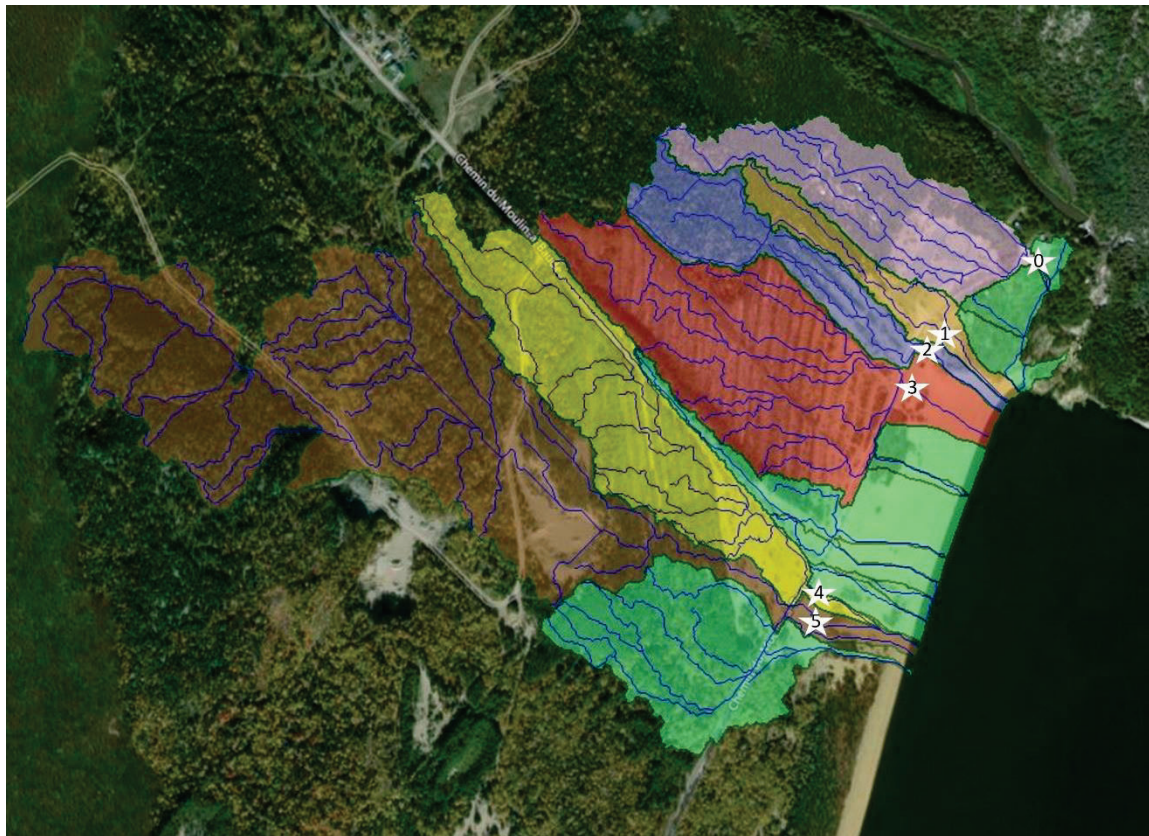


Figure 3-24 : Sous-bassins versants et hydrographie de la dune inférieure

L'exutoire de chaque sous-bassin versant se situe directement en amont de chaque zone de ravinement analysée. Ainsi les zones de ravinement sont des zones d'écoulement préférentiel de l'eau provenant des sous-bassins situés en amont.

3.2.2 Analyse hydro-sédimentaire

3.2.2.1 Modèle hydraulique

Pour estimer le phénomène à l'origine de l'érosion de la dune inférieure, une modélisation sommaire avec le logiciel PCSWMM a été réalisée et a permis de déterminer les vitesses de l'eau en amont de chaque ravinement étudié. Pour chaque ravinement, le modèle hydraulique se compose comme suit:

- Un fossé dont la section transversale représente la section transversale actuelle du ravin analysé;
- Un débit imposé comme une condition à la frontière amont du fossé. Ce débit représente le débit drainé par le bassin versant pour une crue annuelle et une crue été-automne de récurrence 25 ans. Ces deux débits ont été estimés par la méthode de transfert de bassin versant à partir des débits estimés au droit du barrage dans le rapport d'analyse hydrologique et hydraulique de la rivière du Moulin à Baude (Stantec, 2023). La crue annuelle est la crue susceptible de se produire 1 fois par an, il est alors important d'analyser les effets de cette crue sur les dunes de

Tadoussac. Dans le même ordre d'idée, il est également important d'analyser l'effet d'une crue été-automne sur les dunes, car la zone d'étude est sujette à des événements orageux et concentrés sur une aire précise. Dans le rapport d'analyse hydrologique et hydraulique (Stantec, 2023) les crues été-automne de récurrence 25 ans et 50 ans ont été analysées. Pour la présente étude, la crue été-automne de récurrence 25 ans a été utilisée.

- Un exutoire libre comme une condition à la frontière aval du fossé.

Aucune calibration n'a été faite pour ce modèle hydraulique. En effet, la zone de ravinement n'est pas un cours d'eau permanent. Il est considéré comme un fossé et ne présente pas de limite du littoral. Les résultats représentent un ordre de grandeur des vitesses d'écoulement qui permettent d'analyser le phénomène d'érosion dans la dune. La Figure 3-25 présente la configuration modèle hydraulique sommaire.

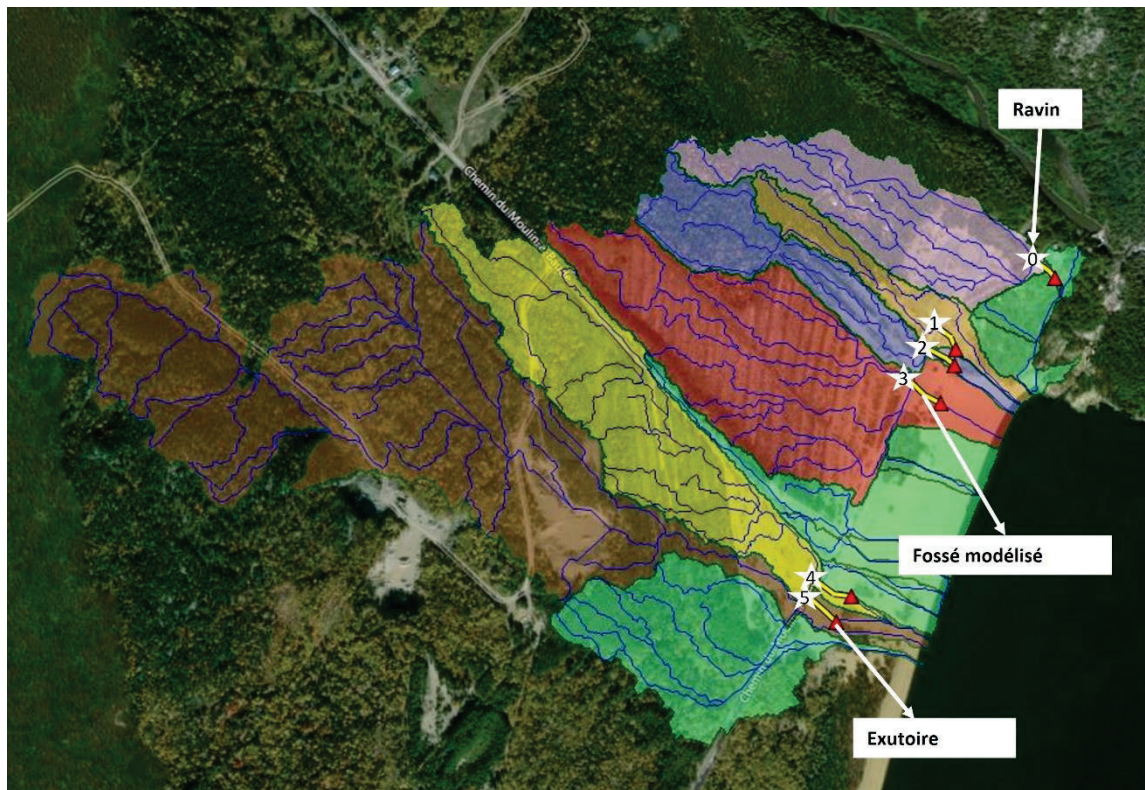


Figure 3-25 : Configuration du modèle hydraulique

3.2.2.2 Résultats de simulation

Les résultats de simulation présentés dans le Tableau 3-1 montrent les vitesses à l'entrée de chaque ravin.

Tableau 3-1 : Vitesses de l'analyse hydro sédimentaire

Ravins	Superficie (km ²)	2 ans annuel			25 ans été-automne		
		Débit (m ³ /s)	Vitesse (m/s)	Vitesse (cm/s)	Débit (m ³ /s)	Vitesse (m/s)	Vitesse (cm/s)
0	0,05	0,019	0,5	50	0,139	0,91	91
1	0,02	0,007	2,01	201	0,053	3,25	325
2	0,04	0,014	1,59	159	0,100	3,14	314
3	0,11	0,037	3,56	356	0,272	6,78	678
4	0,08	0,029	2,49	249	0,214	4,73	473
5	0,23	0,080	3,19	319	0,581	5,52	552

L'analyse de la vitesse et de la taille des particules de sable avec le diagramme de Hjulstrom (USBR, 2003) permet d'estimer la dynamique sédimentaire au niveau de chaque ravin. Le sable de la dune inférieure est formé de fines particules dont la granulométrie est comprise entre 0,63 mm et 2 mm ($2 \text{ mm} > d > 0,063 \text{ mm}$).

Pour une crue annuelle, les vitesses dans les ravins varient de 50 cm/s à 356 cm/s. Les particules de sablent sont alors érodés. La Figure 3-26 présente la plage de vitesses des ravins dans le diagramme d'Hjulstrom pour une crue annuelle.

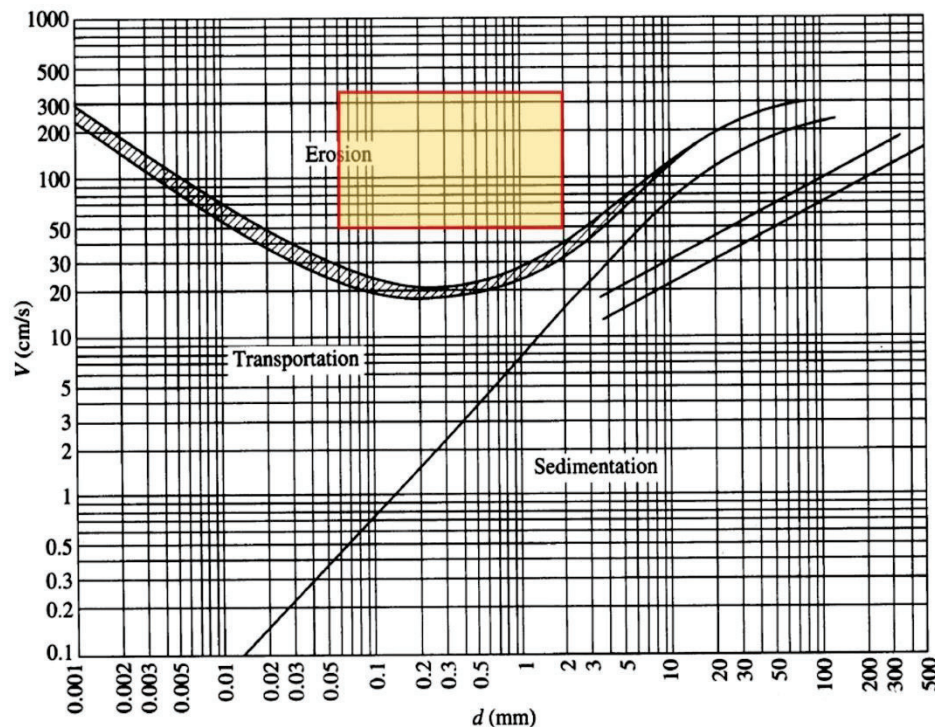


Figure 3-26 : Diagramme de Hjulstrom et la plage de vitesses pour une crue annuelle

Pour une crue 25 ans été-automne, les vitesses des ravins appliquées au diagramme de Huston permettent d'établir l'hypothèse d'un phénomène d'érosion hydro sédimentaire prononcée, car les

vitesses varient de 91 cm/s à 678 cm/s. La pente du talus de sable qui accélère l'écoulement et la nature des matériaux meubles permettent d'expliquer le ravinement dans le talus. La Figure 3-27 présente la plage de vitesses des ravins dans le diagramme d'Hjulstrom pour une crue 25 ans été-automne

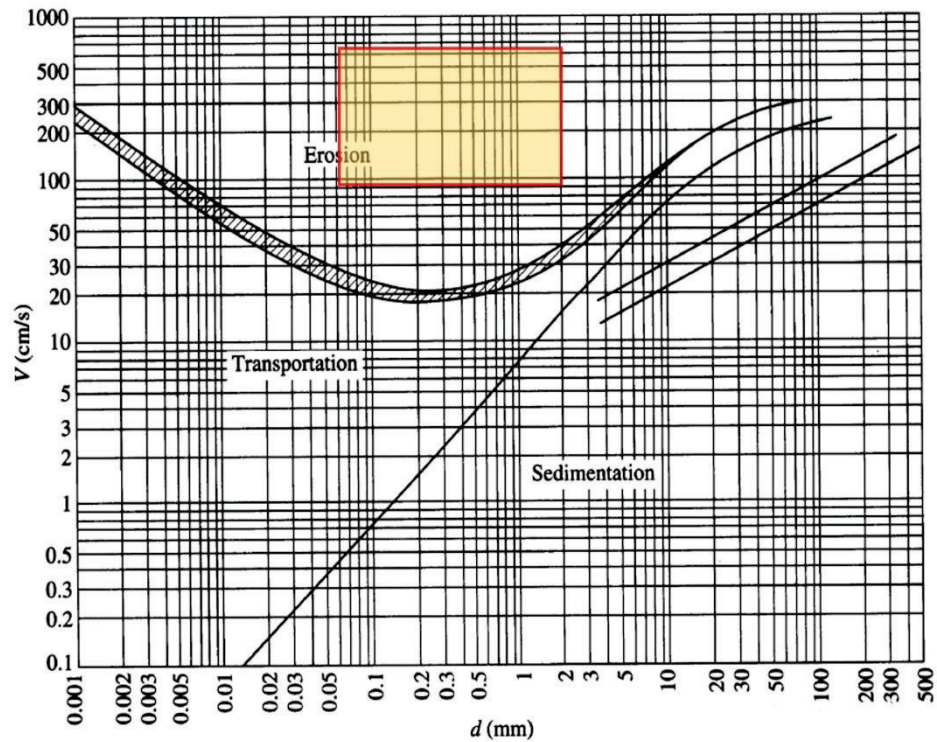


Figure 3-27 : Diagramme de Hjulstrom et la plage de vitesses pour une crue 25 ans été-automne

4.0 CONCLUSION

La présente étude a permis de déterminer et décrire les principales problématiques à l'origine de l'érosion des dunes de Tadoussac. Le drainage inadéquat des eaux de surface et la pente du talus produisent des vitesses importantes qui érodent les dunes à travers des zones d'écoulement préférentielles. Les visiteurs descendent à pied ou en machinerie vers le fleuve en empruntant toujours les mêmes chemins qui créent des dépressions au sommet et dans le talus et finissent par devenir une zone d'écoulement préférentielle. L'érosion des dunes est aussi accentuée par l'absence de végétation et la présence d'un chemin d'accès en haut de talus.

Pour le projet d'aménagement en un parc national par la Sépaq, les solutions ci-dessous permettraient de préserver les dunes :

- La restauration des zones de ravinements par une méthode adaptée aux conditions particulières du site qui viendra s'intégrer au paysage actuel et qui devra être en mesure d'éliminer le phénomène d'érosion actuel.
- L'amélioration de la gestion des eaux de surface et le drainage du site en général pour éviter que d'autres zones d'érosion se forment et pour limiter le recul du sommet de talus à moyen/long terme. Un système de drainage comportant un fossé d'infiltration et un bassin permettrait une recueillir et d'infiltrer de l'eau des sous-bassins en amont du Chemin du Moulin-à-Baude. Ce système devra être localisé à l'extérieur de la zone de contrainte.
- La délimitation de zones de circulation pour les visiteurs afin d'éviter la circulation aléatoire dans le talus de sable. Toute circulation de véhicules motorisés doit demeurer interdite.
- En attendant la réalisation des solutions proposées, un suivi annuel du site est requis pour documenter l'évolution de l'érosion et identifier les nouvelles zones de ravinement. Si requis, des interventions ponctuelles de restauration/amélioration pourront être effectuées par le client.



5.0 CONCEPTS POUR LA PROTECTION DES DUNES DE SABLE

5.1 RESTAURATION DES ZONES DE RAVINEMENT

Dans l'optique où un développement du site est prévu dans le futur, il est fortement recommandé de traiter et de corriger les zones de ravinement présentes sur le site et celles susceptibles de se créer dans un horizon à court terme. La correction des zones de ravinement permettra d'augmenter la stabilité long-terme du talus et de réduire le recul potentiel de ce dernier, en empêchant/limitant toute érosion de surface.

Afin de corriger les zones d'érosion, il est recommandé de procéder à la mise en place d'un enrochement. Un géotextile de séparation devra être mis en place si le calibre de l'empierrement ne permet pas de respecter le critère de séparation/protection, qui provoquerait ainsi un poinçonnement de l'enrochement dans le sable sous-jacent. **Dans un tel cas, le géotextile doit également et obligatoirement permettre à l'eau de s'infiltrer dans les sols au fur et à mesure de la descente pour éviter un trop gros apport d'eau à l'extrémité de l'enrochement (géotextile de séparation/protection + infiltration), provoquant ainsi un effet de bout.**

Il est à noter qu'actuellement, le géotextile et l'enrochement ponctuellement en place dans certaines zones de ravinement n'a pas permis d'éliminer le problème d'érosion différentielle, mais la seulement déplacé. Le concept devra donc être amélioré. Au besoin, la correction avec empierrement pourra être jumelée à une méthode de génie végétal afin de végétaliser la surface de l'enrochement et ses abords pour en limiter l'érosion de surface.

À l'étape de l'ingénierie de détail, les recommandations suivantes devront être prises en compte pour la restauration des dunes :

- La mise en place d'un système de dissipation d'énergie à l'extrémité aval de l'enrochement afin de limiter l'effet de bout. Une clé d'ancrage sera probablement nécessaire pour assurer un support en aval de l'enrochement. La configuration de la clé d'enrochement sera déterminée en ingénierie de détail.
- La prise en compte des contraintes lors des interventions dans le talus pour la restauration des zones de ravinement. En effet, le talus se retrouve en zone de contrainte par conséquent les interventions sont limitées dans la pente par le règlement intérimaire en vigueur. Cette dernière stipule que dans la zone de pente et dans les marges de précautions applicables en sommet de talus, seuls des excavations de moins de 50 cm et des remblais de moins de 30 cm sont permis. En ce sens, il faudra principalement éviter de créer un rehaussement de site, ce qui ajouterait un poids considérable dans le talus et serait considéré comme un facteur aggravant ou déclencheur.
- L'utilisation d'équipements légers voir manuels, lors des opérations de restauration, lorsque les terrassements ne pourront se faire à partir du sommet de talus. Dans la pente, les sols sont dénudés de couvert végétal ou de végétation et sont très instables superficiellement. Jumelé à une forte inclinaison, il n'est pas recommandé de faire descendre de la machinerie dans la pente, au risque de créer des décrochements/instabilités supplémentaires.

- L'ajout de végétation ou de tapis de protection aux abords des zones restaurées pourrait être une bonne solution à moyen/long terme pour limiter le processus d'érosion, lorsque la pente le permet.

5.2 DÉLIMITATION DES ZONES DE CIRCULATION DES VISITEURS

En plus de corriger les 5 zones préalablement définies dans ce rapport, il sera également requis d'établir des chemins préférentiels et identifiés au droit de la zone de pente afin d'éviter le plus possible une circulation aléatoire dans la pente. Ces chemins pourraient par exemple être constitués de gravier ou de poussière de pierre en surface sur une faible épaisseur pour en faciliter son identification par les utilisateurs et être identifiés à l'aide de poteaux et de cordes. Pour le développement futur du site, il est souhaité par le client que les visiteurs puissent continuer de descendre le talus à même la pente de sable. Ainsi, les chemins préférentiels devront être créés dans les zones de pente moins sensibles et qui montrent actuellement aucun signe d'érosion de surface. Dans tous les cas, la circulation de véhicules motorisés et de machinerie dans la zone de pente doit demeurer interdite, le site doit être protégé convenablement pour éviter leur accès.

De plus, toutes zones légèrement situées en contrebas dans le sommet de talus seront victimes à moyen ou à long terme du même phénomène d'érosion de surface et donc, devront faire l'objet de suivis récurrents et devront être traitées/corrigées de la même façon que les 5 zones identifiées, le cas échéant. Les chemins préférentiels de circulation ne devront pas passer par ces zones.

5.3 DRAINAGE PRÉVENTIF EN AMONT

Un fossé drainant pourrait être mis en place entre le plateau et le chemin de gravier afin de récolter et laisser s'infiltrer une partie de l'eau provenant des sous-bassins versants en amont. Un bassin de rétention et d'infiltration devra être réalisé à l'exutoire du fossé pour recueillir l'eau du fossé. Il est recommandé d'éviter tout rejet d'eau en sommet ou dans la pente. Les paragraphes ci-dessous décrivent cette solution de drainage.

5.3.1 Description de la solution de drainage

Le fossé drainant recommandé se subdivise en deux tronçons du fait du sens de l'écoulement. Un bassin devra être réalisé à l'exutoire de chaque tronçon du fossé. La Figure 5-1 présente le tracé de ce fossé.

Le fossé nord-est (FNE) longe le chemin du Moulin-à-Baude sur 400m jusqu'au début du stationnement des dunes Le fossé sud-ouest (FSO) quant à lui longe également le chemin du Moulin-à-Baude et a une longueur de 230m. Comme indiqué précédemment, un rejet dans le talus est à éviter de même qu'un rejet dans la rivière du Moulin à Baude. Le bassin de rétention et d'infiltration sera conçu en fonction des caractéristiques des sols en place. Des seuils pourront être aménagés dans le fossé selon un intervalle à déterminer pendant la conception détaillée. Ces seuils aideront à ralentir l'écoulement de l'eau et favoriseront la rétention, la décantation et l'infiltration de l'eau. Les seuils permettront dans le même temps une réduction de l'érosion du fossé.



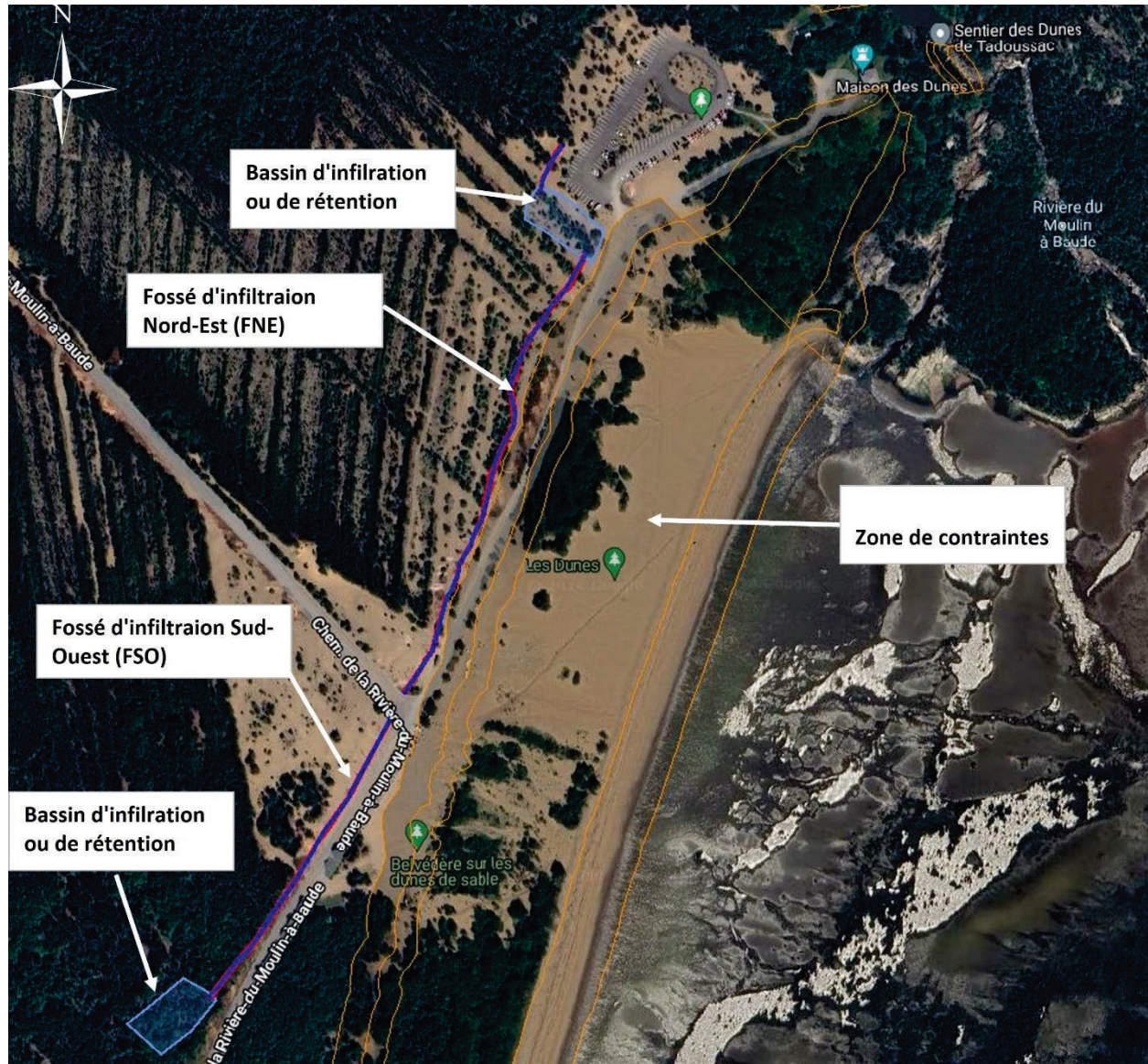


Figure 5-1 : Tracé proposé du fossé d'infiltration et des bassins

5.3.2 Critères de conception de la solution drainage

Les normes applicables suivantes devront être considérées pour la conception de la solution de drainage.

5.3.2.1 Fossé de drainage et d'infiltration

- Période de retour

La conception du fossé devra être faite avec un débit de période de retour de 10 ans pour la capacité totale selon le guide de gestion des eaux pluviales (MELCCFP). Cependant une évaluation du

comportement du fossé devra être analysée avec des conditions plus sévères (soit les débits de récurrences 25 ans et 100 ans).

- Revanche

La revanche minimale à maintenir entre les hauts niveaux d'eau (niveau correspondant au débit de récurrence 2 ans) et le haut du talus est de 0,6 m.

- Vitesses permissibles

Pour le contrôle qualitatif, selon le guide de gestion des eaux pluviales (MELCCFP), les vitesses dans les fossés devront être inférieures à 0,5 m/s.

- Dimensions

Selon le guide des bonnes pratiques pour l'entretien et la conception des fossés municipaux (APEL¹), une largeur du fond du fossé se situant entre 0,6 et 1,8 m favorise l'infiltration et la filtration de l'eau. Elle permet également de drainer l'eau en cas de forte pluie. La largeur maximale en crête du fossé sera de 5 m, selon le guide d'application du règlement sur l'aménagement durable des forêts du domaine de l'état (MFFP, 2023).

5.3.2.2 Dimensions des seuils de rétention

Les seuils devront être emménagés dans les parties du fossé dont la pente est comprise entre 1% et 10%. La distance entre deux seuils est fonction de la hauteur et de la pente du fossé. Elle doit correspondre à la distance pour que la base du seuil amont soit à la même élévation que le centre du seuil en aval (distance D1 dans le détail type de seuil de rétention).

¹ Association pour la protection de l'environnement du lac Saint-Charles et des Marais du Nord (APEL). APPEL est désormais AGIRO



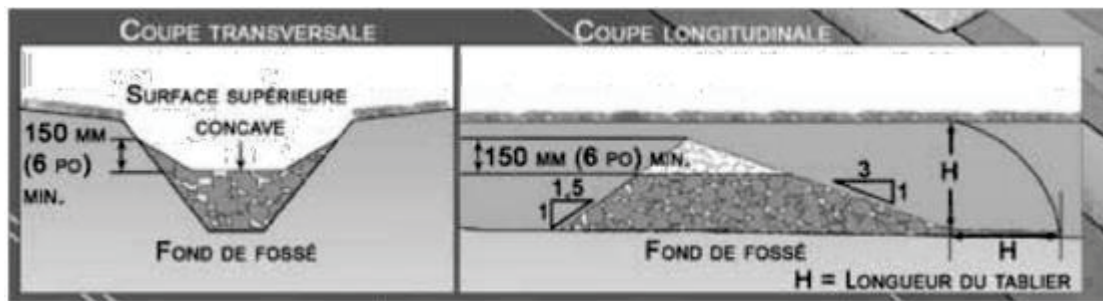
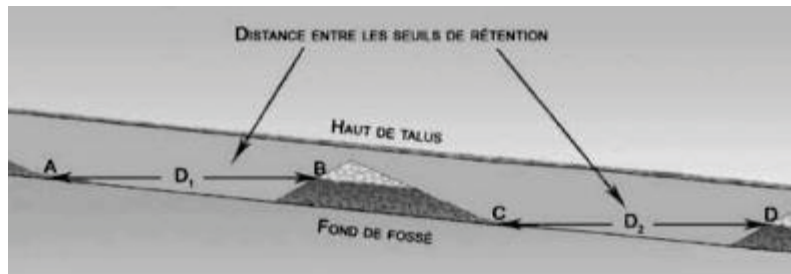


Figure 5-2 Détail type d'un seuil de rétention

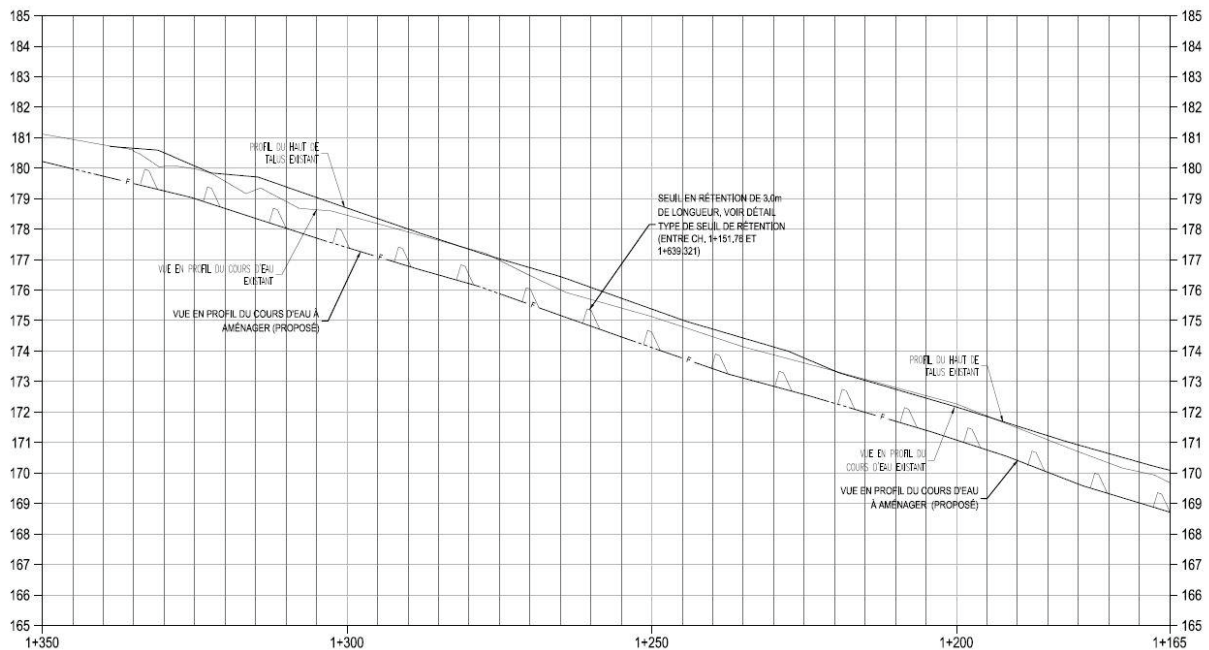


Figure 5-3 Exemple de profil d'un fossé avec des seuils de rétention

5.3.2.3 Bassin

Le type de bassin sera précisé à la suite d'une étude exhaustive des sols en place pour évaluer adéquatement les capacités d'infiltration. À cet effet, un ou deux forages géotechniques seront à réaliser



dans la zone des travaux projetés du fossé et des bassins. Pour un bassin d'infiltration, le taux de percolation doit être supérieur à 60 mm/h. La nappe phréatique ou le roc devra être à au moins 1m sous le lit du bassin selon le guide de gestion des eaux pluviales. Un bassin de rétention sera envisagé si les prérequis d'un bassin d'infiltration ne sont pas respectés. La conception devra prévoir un système de prétraitement pour le bassin retenu.



6.0 RÉFÉRENCES

Les références suivantes ont été consultées :

APPEL (AGIRO). Guide des bonnes pratiques pour l'entretien et la conception des fossés municipaux.

MELCCFP, Guide de gestion des eaux pluviales, Stratégies d'aménagement de conception et pratiques de gestion optimales pour les réseaux de drainage en milieu urbain.

MFFP. Mars 2023. Guide d'application du règlement sur l'aménagement durable des forêts du domaine de l'état.

MTQ. Janvier 2023. Ouvrages d'art. Chapitre 4.

Stantec. Décembre 2023. Projet de parc national des dunes-de-Tadoussac, Analyse hydrologique et hydraulique de la rivière du Moulin à Baude.



**Société des établissements
de plein air du Québec**

Février 2024

Dossier :

N^o Projet client :

N^o Projet Stantec : 159101556

