



Centre Eau Terre Environnement

## Évaluations environnementale, hydrologique et hydraulique d'un enrobé drainant jumelé à une chaussée réservoir en guise d'ouvrage de gestion des eaux pluviales en milieu urbain

Par Khalid Aglida

Mémoire pour l'obtention du grade de Maître ès Sciences (M.Sc.) En sciences de l'eau

#### Jury d'évaluation

Président du jury et examinateur interne

Examinateur externe

Rousseau, Alain N. INRS-ETE

Nadeau, Daniel Université Laval

Directrice de recherche

Codirectrice de recherche

Duchesne, Sophie INRS-ETE

Pelletier, Geneviève Université Laval

© Droits réservés de « Aglida Khalid », Août 2022.

J'aimerais tout d'abord remercier le ministère des Transports du Québec sans qui le projet n'aurait pu être réalisé. Spécialement monsieur Jean-Philippe Robitaille, qui s'est montré très collaboratif et réactif. Dans l'espérance que cette étude pourra apporter les réponses nécessaires pour une éventuelle généralisation de l'utilisation de l'enrobé drainant dans la province de Québec. J'aimerais aussi remercier la compagnie CHI (*Computational Hydraulics International*) pour son accès gratuit à PCSWMM, qui m'a été d'une grande utilité. Un merci aussi à la Ville de Québec et pour leur collaboration et l'accès à leurs installations. Spécialement monsieur Sébastien Deveault, qui s'est montré très collaboratif et réactif.

Je dédie cette maîtrise à mon défunt père, Ahmed, et à ma noble mère, Samia. J'ai hérité d'eux la persistance et le courage de continuer d'avancer malgré les difficultés. Sachez que, quoi que je dise, ça ne sera jamais assez pour vous remercier pour tout ce que vous avez fait et vous faites pour moi. Je remercie par l'occasion, mes frères, Saad et Charafeddine, ainsi que ma sœur Imane pour leur support continu.

Merci à Geneviève Pelletier ma codirectrice pour ses commentaires honnêtes et pertinents. Finalement, j'adresse tout mon respect et ma gratitude à ma directrice Sophie Duchesne, pour sa confiance et son accueil, et l'opportunité de travailler au sein de sa superbe équipe de recherche. Elle m'a supporté tout au long de ce projet et m'a apporté une aide non seulement très professionnelle, mais aussi très humaine.

## RÉSUMÉ

Ce présent projet de recherche visait à évaluer les performances hydrologique et environnementale d'un enrobé drainant comme mesure de contrôle à la source des eaux pluviales sur un stationnement municipal. Plus spécifiquement, un suivi expérimental d'une durée de deux années a été réalisé sur deux zones du stationnement, soit une première construite suivant la méthode conventionnelle (asphalte imperméable et chaussée classique) et une deuxième dotée d'un enrobé drainant, élaboré par le ministère des Transports du Québec, combiné à une chaussée réservoir. La méthodologie consistait à mesurer le taux d'infiltration de l'enrobé drainant en trois points durant les différentes saisons de l'année, à collecter des données de pluie grâce à un pluviomètre placé sur le site expérimental, à suivre les débits pour une période s'étalant sur 24 mois au niveau d'un regard où les eaux de ruissellement des deux zones sont acheminées, à récolter des échantillons d'eau en temps de pluie ainsi qu'à modéliser le comportement hydrologique et hydraulique de la chaussée réservoir.

Les tests d'infiltration ont démontré une grande capacité pour l'enrobé drainant, néanmoins affectée par un effet de colmatage, causé par l'utilisation d'abrasifs en saison hivernale. L'analyse des débits a permis de constater une diminution du volume de ruissellement allant de 68% à 100% et une réduction des débits de pointe de 91% à 100%, pour les 13 événements retenus. À l'échelle de saisons historiques, 2005, 2007, 2008, 2014, 2015, et 2017, entre mai et octobre, la réduction des volumes a atteint 80%. Pour une hauteur totale de précipitation inférieure à 21 mm, d'une période de retour inférieure à 2 ans, aucun ruissellement n'a été constaté pour la zone de l'enrobé drainant. L'analyse des eaux de ruissellement échantillonnées a démontré une amélioration de la qualité des eaux quittant la chaussée réservoir située sous l'enrobé drainant par rapport à celle de l'enrobé conventionnel. La diminution de la concentration de différents contaminants analysés a atteint 75%, 93%, 98%, 99%, 58%, 40%, 54%, respectivement, pour les matières en suspension, les hydrocarbures, le zinc, le cuivre, l'aluminium, le phosphore, et l'azote.

Mots-clés : Taux d'infiltration ; Enrobé drainant ; Matières en suspension ; Performance environnementale ; Pratique de gestion optimale.

## ABSTRACT

The goal of this research project was to evaluate the hydrological and environmental performance of a porous asphalt as a stormwater management practice for a municipal parking lot. More specifically, a two-year experimental monitoring campaign was carried out on two areas of the parking lot, the first built using a conventional method (conventional pavement) and the second equipped with a porous asphalt developed by the Ministère des Transports du Québec combined with a clean stone reservoir. The methodology consisted of measuring the infiltration rate of the porous asphalt at three points during different seasons of the year, collecting precipitation data using an on-site rain gauge located at the experimental site, monitoring flow rates for a period of 24 months at a manhole where runoff from the two areas was routed and collecting water samples during rainfall events, The data was then used to model the hydrological and hydraulic behavior of the porous asphalt.

The tests demonstrated a high infiltration capacity of the porous asphalt, nevertheless affected by a clogging effect, due to the use of abrasives in winter. The flow rate analysis revealed a decrease in runoff volume ranging from 68% to 100% and a reduction in peak flow rates from 91% to 100%, depending on the rainfall event. On a seasonal scale, 2005, 2007, 2008, 2014, 2015, and 2017, between May and October, the reduction in volumes reached 80%. For a total precipitation height of less than 21 mm, with a return period of less than 2 years, no runoff was observed for the porous asphalt zone. The analysis of the sampled runoff water showed an improvement in the water quality leaving the reservoir under the porous pavement compared to that of the conventional asphalt. The decrease in the concentration of different contaminants analyzed reached 75%, 93%, 98%, 99%, 58%, 40%, 54%, respectively, for suspended solids, hydrocarbons, zinc, copper, aluminum, phosphorous and nitrogen.

Keywords : Infiltration capacity ; Porous asphalt ; Suspended solids; environmental performance ; Best management practice.

# TABLE DES MATIÈRES

RE	MERCIEME	NTS	III
RÉ	SUMÉ		v
AE	STRACT		VII
ТА	BLE DES M	ATIÈRES	IX
LIS	STE DES FIC	GURES	XI
LIS	STE DES TA	BLEAUX	XIV
LIS	STE DES AB	RÉVIATIONS	XVII
1	INTRODUC		19
2 REVUE DE LITTERATURE		LITTERATURE	22
	2.1 Gen	ERALITES SUR LES REVETEMENTS PERMEABLES	22
	2.1.1	Description sommaire	22
	2.1.2	Conception et application	23
	2.1.3	Entretien et considérations climatiques	25
	2.1.4	Coûts	26
	2.2 Per	FORMANCES HYDROLOGIQUE ET ENVIRONNEMENTALE DES REVETEMENTS PERMEABLES	27
	2.2.1	Potentiel de réduction des volumes de ruissellement et des débits	27
	2.2.2	Potentiel de dépollution des eaux de ruissellement	
3	METHODO	LOGIE	
	3.1 Des	CRIPTION DU SITE EXPERIMENTAL	
	3.1.1	Conception de la chaussée perméable	
	3.1.2	Configuration du réseau et schéma hydraulique du site	
	3.2 Mes	URE DU TAUX D'INFILTRATION DE L'ENROBE DRAINANT	41
	3.2.1	Test de mesure du taux d'infiltration	41
	3.2.2	Emplacement et périodes de mesure	42
	3.3 Suiv	I ET EVALUATION DE LA PERFORMANCE HYDROLOGIQUE DE L'ENROBE DRAINANT	43
	3.3.1	Suivi de la pluviométrie sur le site	44
	3.3.2	Suivi des débits de ruissellement sur le site	47
	3.3.3	Modélisation hydrologique du site expérimental	50
	3.3.4	Données de base du modèle	
	3.3.5	Construction du modèle	55
	3.3.6	Analyse de sensibilité du modèle	

	3.3.7		Calage et validation du modèle	59
	3.4	SUIV	I ET EVALUATION DE LA PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE DE L'ENROBE DRAINANT	60
3.4.1 3.4.2 3.4.3		1.1	Protocole d'échantillonnage	61
		1.2	Emplacement et méthodes de collecte	62
		4.3	Contaminants analysés	64
4	RESU		IS ET DISCUSSION	67
	4.1 Sur		I DU TAUX D'INFILTRATION DE L'ENROBE DRAINANT	67
	4.2	EVA	LUATION DE LA PERFORMANCE HYDROLOGIQUE DE L'ENROBE DRAINANT	71
	4.2	2.1	Caractérisation de la précipitation et les débits de ruissellement du site	71
4.2.2 4.2.3 4.3 Ev/		2.2	Modélisation du site d'étude	
		2.3	Performance quantitative de l'enrobé drainant à l'échelle de saisons historiques	96
		EVAI	LUATION DE LA PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE DE L'ENROBE DRAINANT	104
	4.3	8.1	Pluviométrie des événements échantillonnés	104
4.3.2 4.3.3		3.2	Résultats d'analyse de la qualité d'eau	105
		3.3	Potentiel de réduction de la charge en MES de l'enrobé drainant à l'échelle des sa	aisons
			115	
	4.4	Bila	N DES PRINCIPAUX RESULTATS	116
5	CONC	CLUS	ION	119
6	BIBLIOGRAPHIE			122
7	ANNE	XES		127
	7.1 Rés		ULTATS DES TESTS D'INFILTRATION	127
7.2 M⊧		Мет	HODE DE CALCUL DU MODULE LID DE PCSWMM	128

# LISTE DES FIGURES

FIGURE 2.1 TYPES DE REVETEMENTS PERMEABLES (TRCA, 2012 ; NAPA, 2008)
FIGURE 2.2 COUPE-TYPE D'UNE CHAUSSEE PERMEABLE A INFILTRATION TOTALE (MTQ, 2018)23
FIGURE 2.3 : COUPE-TYPE D'UNE CHAUSSEE PERMEABLE A INFILTRATION PARTIELLE (MTQ, 2018)24
FIGURE 3.1 LOCALISATION DU SITE EXPERIMENTAL (GOOGLE EARTH 2022)
FIGURE 3.2 EMPLACEMENT DE L'ENROBE CONVENTIONNEL ET DE L'ENROBE DRAINANT SUR LE SITE D'ETUDE ; BLEU : ZONE ENROBE CONVENTIONNEL, ROUGE : ZONE ENROBE CONVENTIONNEL TOTAL, VERT : ZONE ENROBE CONVENTIONNEL CONCERNEE PAR L'ETUDE (GOOGLE EARTH, 2022)
FIGURE 3.3 STATIONNEMENT DE LA BIBLIOTHEQUE LE TOURNESOL (SITE EXPERIMENTAL) EN TEMPS HUMIDE (GALLERIE DE PHOTO, 2020)
FIGURE 3.4 COUPE-TYPE DE LA STRUCTURE DE LA CHAUSSEE PERMEABLE AMENAGEE AU SITE EXPERIMENTAL (ADAPTE DU PLAN TEL QUE CONSTRUIT ; MTQ, 2020)
FIGURE 3.5 RESEAU DE DRAINAGE SOUTERRAIN DU SITE EXPERIMENTAL (LES ZONES BLEU CIEL ET JAUNE REPRESENTENT RESPECTIVEMENT LES ZONES EN ENROBE DRAINANT ET CONVENTIONNEL)
FIGURE 3.6 SCHEMA HYDRAULIQUE DU SITE EXPERIMENTAL (P = PRECIPITATIONS ; EV = EVAPORATION)40
FIGURE 3.7 PROCEDURE DU TEST D'INFILTRATION AU NIVEAU DU POINT 1 (GALERIE DE PHOTOS, 2021)
FIGURE 3.8 EMPLACEMENT DES MESURES DU TAUX D'INFILTRATION DE L'ENROBE DRAINANT
FIGURE 3.9 PLUVIOMETRE A AUGET BASCULANT INSTALLE SUR LE TOIT DE LA BIBLIOTHEQUE (GALERIE DE PHOTOS, 2022)
FIGURE 3.10 ENREGISTREUR DE DONNEES HOBO MICRORX STATION (GALERIE DE PHOTOS, 2022)
FIGURE 3.11 ORGANIGRAMME DES ETAPES DE VALIDATION ET DE TRAITEMENT D'UNE SERIE TEMPORELLE DE PLUIE
FIGURE 3.12 EMPLACEMENT DE MESURE DES DEBITS DE RUISSELLEMENT DES DEUX ZONES
FIGURE 3.13 DEVERSOIR ET SONDE DE PRESSION INSTALLES AU NIVEAU DE L'ENTREE DU REGARD RP-1
FIGURE 3.14 COURBE DE LA PARTIE INFERIEURE TRIANGULAIRE DU DEVERSOIR
FIGURE 3.15 COURBE DE LA PARTIE SUPERIEURE RECTANGULAIRE DU DEVERSOIR
FIGURE 3.16 ORGANIGRAMME DES ETAPES D'ETABLISSEMENT DES HYDROGRAMMES DES DEUX ZONES
FIGURE 3.17 MODELE LID CONCEPTUEL DE LA CHAUSSEE PERMEABLE SUR SWMM

FIGURE 3.18 MODELE SWWM DU SITE EXPERIMENTAL
FIGURE 3.19 MELANGE DES ECHANTILLONS INSTANTANES LORS D'UN ECHANTILLONNAGE COMPOSITE61
FIGURE 3.20 ÉCHANTILLONNAGE DES EAUX DRAINEES PAR LE DRAIN A L'AIDE D'UNE PERCHE
FIGURE 3.21 EMPLACEMENT D'ECHANTILLONNAGE DES EAUX DE RUISSELLEMENT
FIGURE 3.22 ÉCHANTILLONNAGE MANUEL DES EAUX DE RUISSELLEMENT PROVENANT DE LA PARTIE IMPERMEABLE
FIGURE 3.23 AUTOECHANTILLONNEUR INSTALLE AU PUISARD PU-2
FIGURE 3.24 ÉCHANTILLONS COLLECTES LORS D'UN ECHANTILLONNAGE COMPOSITE AUTOMATIQUE
FIGURE 3.25 BOUTEILLES UTILISEES POUR LES DIFFERENTS CONTAMINANTS A ANALYSER
FIGURE 4.1 TAUX D'INFILTRATION MESURE AU NIVEAU DE LA ZONE DE L'ENROBE DRAINANT
FIGURE 4.2 COLMATAGE DE L'ENROBE DRAINANT DU A L'APPLICATION D'ABRASIFS EN SAISON HIVERNALE69
FIGURE 4.3 APPLICATION HETEROGENE EXCESSIVE DE SABLE ET DE SEL EN SAISON HIVERNALE
FIGURE 4.4 PREMIERES SONDES DE PRESSION ET ENREGISTREUR DE DONNEES SENSOR MAID, INSTALLES LE 06/01/21
FIGURE 4.5 HYETOGRAMME ET HAUTEURS D'EAU A L'AMONT DU DEVERSOR DE LA ZONE IMPERMEARLE AVEC
DONNEES ABERRANTES
PIGURE 4.5 HTETOGRAMME ET HAUTEURS D'EAU A L'AMONT DU DEVERSOIR DE LA ZONE IMPERMEABLE AVEC         DONNEES ABERRANTES.         FIGURE 4.6 HYDROGRAMME ET HYETOGRAMME DE L'EVENEMENT N°23.         80
FIGURE 4.5 HYETOGRAMME ET HAUTEURS D'EAU A L'AMONT DU DEVERSOR DE LA ZONE IMPERMEABLE AVEC         DONNEES ABERRANTES.         FIGURE 4.6 HYDROGRAMME ET HYETOGRAMME DE L'EVENEMENT N°23         80         FIGURE 4.7 HYDROGRAMME DE L'EVENEMENT N°28         81
FIGURE 4.5 HYETOGRAMME ET HAUTEURS D'EAU A L'AMONT DU DEVERSOIR DE LA ZONE IMPERMEABLE AVEC         DONNEES ABERRANTES.         FIGURE 4.6 HYDROGRAMME ET HYETOGRAMME DE L'EVENEMENT N°23         80         FIGURE 4.7 HYDROGRAMME DE L'EVENEMENT N°28         81         FIGURE 4.8 HYDROGRAMME ET HYETOGRAMME DE L'EVENEMENT N°30
PIGURE 4.5 HYETOGRAMME ET HAUTEURS D'EAU A L'AMONT DU DEVERSOR DE LA ZONE IMPERMEABLE AVEC         DONNEES ABERRANTES.       74         FIGURE 4.6 HYDROGRAMME ET HYETOGRAMME DE L'EVENEMENT N°23       80         FIGURE 4.7 HYDROGRAMME DE L'EVENEMENT N°28       81         FIGURE 4.8 HYDROGRAMME ET HYETOGRAMME DE L'EVENEMENT N°30       81         FIGURE 4.9 VARIATION DU VOLUME TOTAL RUISSELE DE LA ZONE PERMEABLE LORS DE L'EVENEMENT N°23       81         FIGURE 4.9 VARIATION DU VOLUME TOTAL RUISSELE DE LA ZONE PERMEABLE LORS DE L'EVENEMENT N°23       83
FIGURE 4.3 HYPETOGRAMME ET HAUTEURS D'EAU A L'AMONT DU DEVERSOR DE LA ZONE IMPERMEABLE AVEC         DONNEES ABERRANTES.       74         FIGURE 4.6 HYDROGRAMME ET HYETOGRAMME DE L'EVENEMENT N°23       80         FIGURE 4.7 HYDROGRAMME DE L'EVENEMENT N°28       81         FIGURE 4.8 HYDROGRAMME ET HYETOGRAMME DE L'EVENEMENT N°30       81         FIGURE 4.9 VARIATION DU VOLUME TOTAL RUISSELE DE LA ZONE PERMEABLE LORS DE L'EVENEMENT N°23       83         FIGURE 4.10 TAUX DE VARIATION NORMALISE DU VOLUME TOTAL RUISSELE DE LA ZONE PERMEABLE LORS DE L'EVENEMENT N°23 (MODULE STRC)       83
FIGURE 4.3 HYPETOGRAMME ET HAUTEURS D'EAU A L'AMONT DU DEVERSOR DE LA ZONE IMPERMEABLE AVEC         DONNEES ABERRANTES.       74         FIGURE 4.6 HYDROGRAMME ET HYETOGRAMME DE L'EVENEMENT N°23       80         FIGURE 4.7 HYDROGRAMME DE L'EVENEMENT N°28       81         FIGURE 4.8 HYDROGRAMME ET HYETOGRAMME DE L'EVENEMENT N°30       81         FIGURE 4.9 VARIATION DU VOLUME TOTAL RUISSELE DE LA ZONE PERMEABLE LORS DE L'EVENEMENT N°23       83         FIGURE 4.10 TAUX DE VARIATION NORMALISE DU VOLUME TOTAL RUISSELE DE LA ZONE PERMEABLE LORS DE L'EVENEMENT N°23 (MODULE STRC)       83         FIGURE 4.11 VARIATION DU DEBIT MAXIMAL RUISSELE DE LA ZONE PERMEABLE LORS DE L'EVENEMENT N°23       83
PIGURE 4.5 HYPEIOGRAMME ET HAUTEURS D'EAU A L'AMONT DU DEVERSUR DE LA ZONE IMPERMEABLE AVEC         DONNEES ABERRANTES.       .74         FIGURE 4.6 HYDROGRAMME ET HYETOGRAMME DE L'EVENEMENT N°23.       80         FIGURE 4.7 HYDROGRAMME DE L'EVENEMENT N°28       .81         FIGURE 4.8 HYDROGRAMME ET HYETOGRAMME DE L'EVENEMENT N°30.       .81         FIGURE 4.9 VARIATION DU VOLUME TOTAL RUISSELE DE LA ZONE PERMEABLE LORS DE L'EVENEMENT N°23 (MODULE STRC).       .83         FIGURE 4.10 TAUX DE VARIATION NORMALISE DU VOLUME TOTAL RUISSELE DE LA ZONE PERMEABLE LORS DE L'EVENEMENT N°23 (MODULE STRC).       .83         FIGURE 4.11 VARIATION DU DEBIT MAXIMAL RUISSELE DE LA ZONE PERMEABLE LORS DE L'EVENEMENT N°23 (MODULE STRC).       .84         FIGURE 4.12 TAUX DE VARIATION NORMALISE DU DEBIT MAXIMAL RUISSELE DE LA ZONE PERMEABLE LORS DE L'EVENEMENT N°23 (MODULE STRC).       .84

FIGURE 4.14 TAUX DE VARIATION NORMALISE DU VOLUME TOTAL RUISSELE DE LA ZONE IMPERMEABLE LORS DE L'EVENEMENT N°23 (MODULE STRC)
FIGURE 4.15 VARIATION DU DEBIT MAXIMAL RUISSELE DE LA ZONE PERMEABLE LORS DE L'EVENEMENT N°23 (MODULE STRC)
FIGURE 4.16 TAUX DE VARIATION NORMALISE DU DEBIT MAXIMAL RUISSELE DE LA ZONE PERMEABLE LORS DE L'EVENEMENT N°23 (MODULE STRC)
FIGURE 4.17 RESULTAT DE CALAGE DU MODULE LID, EVENEMENT N°23
FIGURE 4.18 RESULTAT DE VALIDATION DU MODULE LID, EVENEMENT N°30
FIGURE 4.19 RESULTATS DE CALAGE DU MODELE DE LA ZONE IMPERMEABLE, EVENEMENT N°2394
FIGURE 4.20 RESULTATS DE CALAGE DU MODELE DE LA ZONE IMPERMEABLE, EVENEMENT N°18
FIGURE 4.21 RESULTATS DE VALIDATION DU MODELE DE LA ZONE IMPERMEABLE, EVENEMENT N°19
FIGURE 4.22 POTENTIEL DE REDUCTION DU VOLUME EN FONCTION DE LA HAUTEUR DE PRECIPITATION
FIGURE 4.23 POTENTIEL DE REDUCTION DU DEBIT DE POINTE EN FONCTION DE L'INTENSITE MAX. SUR 5 MINUTES DE PRECIPITATION
FIGURE 4.24 CONCENTRATIONS DES MATIERES EN SUSPENSION
FIGURE 4.25 ENTRAINEMENT DE SEDIMENTS PAR LES EAUX DE RUISSELLEMENT EN ZONE IMPERMEABLE EN RAISON D'UN CHANTIER (16/10/2021)
FIGURE 4.26 RESULTATS DE CONDUCTIVITE ELECTRIQUE DES EAUX DE RUISSELLEMENT
FIGURE 4.27 DEPOT DE SELS SUR L'ENROBE DRAINANT, HIVER 2021
FIGURE 4.28 CONCENTRATIONS DES HYDROCARBURES TOTAUX CONTENUS DANS LES EAUX DE RUISSELLEMENT
FIGURE 4.29 PRESENCE D'HUILE A MOTEUR DANS LES EAUX DE RUISSELLEMENT DANS LA ZONE IMPERMEABLE (25/07/2021)
FIGURE 4.30 CONCENTRATIONS EN ALUMINIUM TOTAL
FIGURE 4.31 CONCENTRATIONS EN CUIVRE TOTAL
FIGURE 4.32 CONCENTRATIONS EN ZINC TOTAL
FIGURE 4.33 CONCENTRATIONS EN PHOSPHORE TOTAL
FIGURE 4.34 CONCENTRATIONS EN AZOTE TOTAL

# LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2.1         COMPARAISON DES COUTS DES REVETEMENTS PERMEABLES (ASCE, 201	5)27
TABLEAU 2.2 SYNTHESE DES ETUDES CITES DANS LA DISCUSSION DES RESULTATS DE L'E	TUDE29
TABLEAU 2.3 PERFORMANCE EPURATOIRE DE L'ENROBE DRAINANT RAPPORTEE DANS LE	ES ETUDES CITEES DANS
LA DISCUSSION	
TABLEAU 3.1 CARACTERISTIQUES DE LA STRUCTURE DE LA CHAUSSEE PERMEABLE	
TABLEAU 3.2 DATE DES DIFFERENTES MESURES DU TAUX D'INFILTRATION DE L'ENROBE D	RAINANT43
TABLEAU 3.3 CLASSEMENT DES PARAMETRES DU MODELE NUMERIQUE	52
TABLEAU 3.4 VALEURS DES PARAMETRES CONSIDERES LORS DE L'ANALYSE DE	SENSIBILITE ET LEUR
POURCENTAGE DE VARIATION.	57
TABLEAU 3.5 SEQUENCE DE PRELEVEMENT D'ECHANTILLONS INSTANTANES POU	IR LA FORMATION DE
L'ECHANTILLON COMPOSITE (ZONE IMPERMEABLE)	61
TABLEAU 3.6 CONSERVATION DES ECHANTILLONS ET PROTOCOLES D'ANALYSE DES DIFF	
TABLEAU 4.1 PERIODES D'INDISPONIBILITE DES DONNEES DE PLUIE	71
TABLEAU 4.2 PERIODES DE DISPONIBILITE DES DONNEES DE DEBIT	73
TABLEAU 4.3 TABLEAU DES EVENEMENTS RECOLTES AU SITE D'ETUDE	76
TABLEAU 4.4 ÉVENEMENTS UTILISES LORS DU PROCESSUS DE CALAGE ET DE VALIDATION	I DU MODELE88
TABLEAU 4.5 VALEURS DES PARAMETRES INCONNUS DU MODULE LID OBTENUES LORS	DU CALAGE DU MODELE
	90
TABLEAU 4.6 RESULTATS DE CALAGE DU MODULE LID.	91
TABLEAU 4.7 VALEURS DES PARAMETRES INCONNUS APRES LE CALAGE DU MODELE DE	LA ZONE IMPERMEABLE
	93
TABLEAU 4.8 RESULTATS DE CALAGE DU MODELE DE LA PARTIE IMPERMEABLE	93
TABLEAU 4.9 RESULTATS DE VALIDATION DU MODELE DE LA ZONE IMPERMEABLE	95
TABLEAU 4.10 SAISONS RETENUES APRES LE TRAITEMENT DE LA SERIE DE PLUIE	

TABLEAU 4.11 PERFORMANCE DE L'ENROBE DRAINANT EN MATIERE DE REDUCTION DES VOLUMES A L'ECHELLE DE         SAISONS
TABLEAU 4.12 PERFORMANCE HYDROLOGIQUE DE L'ENROBE DRAINANT LORS DES EVENEMENTS SIMULES
TABLEAU         4.13         DEGRE         D'ASSOCIATION         DES         CARACTERISTIQUES         DE         L'EVENEMENT         DE         PLUIE         AVEC         LA           PERFORMANCE HYDROLOGIQUE DE L'ENROBE DRAINANT POUR LES RESULTATS DU MODELE         PCSWMM
TABLEAU       4.14       PLUVIOMETRIE       DES       PLUIES       CONSIDEREES       LORS       DE       L'EVALUATION       DE       LA       PERFORMANCE         ENVIRONNEMENTALE DE L'ENROBE DRAINANT.       105
TABLEAU 4.15 REDUCTION DE LA CHARGE EN MES A L'ECHELLE DE SAISON
TABLEAU 4.16 POTENTIEL EPURATOIRE DE L'ENROBE DRAINANT DES EAUX DE RUISSELLEMENT
TABLEAU 7.1 : TAUX D'INFILTRATION MESURE DE L'ENROBE DRAINANT       127

# LISTE DES ABRÉVIATIONS

- AI : Aluminium
- Cu : Cuivre
- HC : Hydrocarbures pétroliers C10 à C50
- INRS : Institut National de la Recherche Scientifique
- LID : Low Impact Development
- MELCC : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
- MES : Matières en suspension
- MTQ : Ministère des Transports du Québec
- N : Azote
- P: Phosphore
- SWMM : Storm Water Management Model
- Zn : Zinc

## **1 INTRODUCTION**

Le développement urbain accentué altère le cycle hydrologique local en augmentant le volume des eaux pluviales ruisselées et en diminuant l'infiltration (Stephens et al., 2002). Sur le plan de la qualité de l'eau, ces volumes ruisselés transportent une grande variété de contaminants, acheminés par le biais du système de drainage vers les milieux naturels récepteurs. Ils dégradent ainsi les écosystèmes et diminuent la biodiversité. Sur le plan quantitatif, les risques d'inondations et d'érosion s'accentuent et une moindre proportion des eaux pluviales recharge les nappes souterraines (Schueler, 2008).

Au Québec, face à cette problématique, les pratiques de gestion des eaux pluviales connaissent un développement qui ne cesse de s'accélérer, incitées par la nouvelle réglementation. Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2012, tout futur projet d'aménagement urbain assujetti à l'obtention d'une autorisation en vertu de la Loi sur la qualité de l'environnement (article 22, paragraphe 3<sup>o</sup> du premier alinéa, anciennement article 32) est dans l'obligation d'intégrer des pratiques de gestion optimale des eaux pluviales (PGO). Ceci est le cas des différents projets de route du ministère des Transports du Québec.

Parmi ces PGO, les revêtements poreux associés aux chaussées à structure réservoir jouent le rôle d'alternative aux revêtements conventionnels imperméables. Ils permettent de minimiser l'impact de l'urbanisation sur les systèmes hydrologiques en diminuant les surfaces imperméables, ce qui a comme impact avantageux la réduction des débits et volumes ruisselés en surface (Drake et al., 2012 ; Collins et al., 2008). Dans un contexte régi par les effets aggravants du changement climatique (Lee et al., 2022), ils peuvent aussi procurer un avantage sur le volet qualitatif en réduisant la charge polluante des eaux ruisselées, menant ainsi à une bonification du bilan environnemental des eaux de surface ainsi que des eaux souterraines (Zhang et al., 2022).

Actuellement, l'utilisation des revêtements perméables est restreinte à des voies d'accès, aux stationnements ainsi qu'aux rues résidentielles à faible circulation ; ceci relève du fait que ce type de pratique ne convient pas à tous les contextes d'utilisation, puisqu'il exige un niveau supérieur de maintenance comparativement aux revêtements non poreux conventionnels. Ceci est dû à leur vulnérabilité au colmatage, dont le risque est encore plus accentué dans les zones à climat froid en raison de l'utilisation d'abrasifs en hiver (ASCE, 2015 ; Roseen et al., 2012). Couplés à une chaussée réservoir, la stabilité géotechnique des revêtements poreux fait aussi l'objet de questionnements.

Au Québec, mise à part une précédente tentative d'utilisation d'un enrobé drainant qui a été peu concluante, puisqu'on a dû le retirer à cause de l'affaissement de la structure due à un mauvais drainage des eaux infiltrées, puisqu'on avait alors opté pour une structure de chaussée conventionnelle qui n'était pas destinée, à la base, à recueillir des eaux, cette pratique reste présentement limitée à seulement quelques stationnements sur le territoire.

Nonobstant cette mauvaise expérience, la performance d'un enrobé drainant nouvellement développé, combiné à une chaussée réservoir mérite d'être explorée. Il apportera les réponses nécessaires vers une adoption de cette pratique pour les futurs projets routiers du ministère des Transports du Québec, sachant les grands avantages qu'il peut procurer en tant qu'ouvrage de gestion optimale des eaux pluviales (Roseen et al., 2012).

Dans un contexte de climat froid québécois, le projet de recherche consistait à étudier un stationnement municipal réparti sur deux zones, la première construite suivant la méthode conventionnelle (asphalte imperméable et chaussée classique) et la deuxième dotée d'un enrobé drainant élaboré par le ministère des Transports du Québec, combiné à une chaussée réservoir. Le projet de maîtrise avait comme objectif principal le suivi et l'évaluation des performances environnementale, hydrologique et hydraulique de cet enrobé drainant, combiné à une chaussée réservoir, comme ouvrage de gestion optimale des eaux pluviales face à une situation de référence, soit celle de l'asphalte conventionnel.

Pour ce faire les objectifs spécifiques suivants ont été fixés :

- Le suivi-évaluation du taux d'infiltration de l'enrobé drainant.
- La caractérisation des volumes et des débits de ruissellement dans les parties perméable et imperméable.
- La modélisation hydrologique du site expérimental par le *StormWater Management Model* (SWMM).
- La caractérisation de la qualité des eaux de ruissellement provenant des parties perméable et imperméable.

Ce mémoire comporte une revue de littérature sur les performances hydrologique et environnementale que les revêtements perméables procurent comme solutions de contrôle à la source des eaux pluviales (Chapitre 2). Par la suite, la méthodologie pour parvenir aux objectifs spécifiques fixés est présentée au Chapitre 3. Les résultats obtenus sont décrits, interprétés et discutés au Chapitre 4. À la fin du mémoire, une conclusion synthétise les résultats obtenus et

annonce les limites de cette étude ainsi que les recommandations pour des études futures (Chapitre 5).

# 2 REVUE DE LITTERATURE

### 2.1 Généralités sur les revêtements perméables

#### 2.1.1 Description sommaire

Les revêtements perméables présentent une alternative aux revêtements traditionnels. Ils permettent l'infiltration des eaux de ruissellement à travers les vides procurés par la nature du matériau (matériau poreux) ou la manière de pose (bloc imperméable avec joints) de la surface de la chaussée vers un réservoir de stockage adjacent, situé en dessous, composé de matériaux de forte porosité, où les eaux sont temporairement stockées et/ou infiltrées dans le sol (TRCA, 2012).

Une panoplie de revêtements perméables est disponible. Principalement, on trouve l'enrobé drainant, le béton drainant et les pavés perméables.

- Le béton drainant (béton poreux) (Figure 1a) : préparé à base de mélanges de pierres avec un pourcentage de particules fines réduit, ce qui garantit l'écoulement des eaux de ruissellement vers le réservoir sous-jacent. Le vide créé représente 14% à 31% du volume total du matériau (Sánchez-Mendieta et al., 2021).
- Les pavés perméables (Figure 1b) : généralement composés de pavés de béton ou de brique conçus avec des joints perméables, qui permettent aux eaux pluviales de s'infiltrer dans le réservoir d'agrégats. Ces joints représentent environ 10% de la surface dotée de ce type de pavage (TRCA, 2012).
- L'enrobé drainant (asphalte poreux) (Figure 1c) : d'une composition assez proche de celle de l'enrobé conventionnel, mais avec beaucoup moins de particules fines, créant ainsi un matériau poreux qui permet l'infiltration des eaux. À titre indicatif, l'indice des vides de cet enrobé est compris entre 18% et 25%, face à des valeurs qui ne dépassent pas les 3% pour le revêtement conventionnel (NAPA, 2008).



Figure 2.1 Types de revêtements perméables (TRCA, 2012 ; Napa, 2008)

#### 2.1.2 Conception et application

Généralement, les revêtements perméables sont combinés à des chaussées réservoirs dont la conception varie légèrement d'un revêtement à un autre. Toutes les chaussées perméables ont une structure similaire, composée d'une couche de chaussée de surface perméable, d'une couche de fondation (non illustrée à la Figure 2.2), d'une couche de réservoir d'agrégats de pierre sous-jacente et, bien en dessous, d'une couche anti-contaminante composée d'agrégats de faible dimension similaire au sable, qui joue le rôle de filtre (Figure 2.2).



Figure 2.2 Coupe-type d'une chaussée perméable à infiltration totale (MTQ, 2018)

L'épaisseur de la couche du réservoir est déterminée par une analyse de conception à la fois structurale et hydrologique. La couche réservoir sert à retenir les eaux pluviales et supporte

également les charges du trafic de conception pour la chaussée. Dans les sols à faible infiltration, une partie ou la totalité du ruissellement filtré est recueillie dans un drain souterrain et renvoyée dans le système de drainage. Si les taux d'infiltration dans les sols indigènes le permettent, un revêtement perméable peut être conçu sans drain inférieur, pour permettre une infiltration complète du ruissellement (Figure 2.2). Une combinaison de ces méthodes peut être utilisée pour infiltrer une partie du ruissellement filtré (Figure 2.3).



Figure 2.3 : Coupe-type d'une chaussée perméable à infiltration partielle (MTQ, 2018)

Le choix du type de revêtement perméable à utiliser est influencé par des facteurs de conception spécifiques au site et par l'utilisation prévue de la surface perméable. Des considérations communes à ne pas négliger lors de la conception de tels ouvrages sont (TRCA, 2012) :

Les limites d'application : les chaussées perméables ne doivent pas être utilisées pour les surfaces assujetties à un trafic important. L'enrobé drainant est reconnu comme celui qui offre le plus de possibilités d'application comparé aux deux autres types de revêtements perméables, mais ces possibilités restent tout de même limitées en raison de deux facteurs, soit le coût d'investissement ainsi que la limite physique intrinsèque de cet enrobé (c.-à-d., sa fragilité structurale) (NAPA, 2008). En zone de climat nordique, la chaussée perméable présente une bonne résistance aux impacts des cycles de gel/dégel, mais plusieurs paramètres entrent en jeu dans le cas de gels de longue durée (ASCE, 2015).

- La topographie du site : la pente de la surface de la chaussée équipée d'un revêtement perméable doit être comprise entre 1% et 5%. Dans le cas où la surface laisse infiltrer des eaux de ruissellement provenant de surfaces imperméables adjacentes, la pente de ces dernières ne doit pas excéder 20% (TRCA, 2012).
- La perméabilité du sol : la mesure de la perméabilité du sol est primordiale et figure parmi les données de base de toute étude de conception de chaussée perméable. Si la perméabilité du sol du site est de moins de 15 mm/h, l'installation d'un drain perforé permettant l'évacuation des eaux excédentaires contenues dans la couche réservoir vers le système de drainage municipal devient essentielle (ASCE, 2015).
- Le niveau hydrostatique : la profondeur de la couche réservoir est limitée par le niveau de la nappe souterraine ; la norme exige que la base de l'ouvrage soit positionnée à un mètre au-dessus du niveau saisonnier le plus élevé de la nappe (TRCA, 2012).
- Les conditions météorologiques lors de la mise en place : contrairement aux pavés perméables, l'enrobé drainant et le béton drainant sont très vulnérables à la mise en place lors de journées froides. Une température minimale de 16°C est requise (NAPA, 2008).

#### 2.1.3 Entretien et considérations climatiques

Pour les climats froids comme celui du Québec, des chaussées perméables bien conçues peuvent s'avérer très résistantes aux cycles de gel-dégel et conserver une bonne perméabilité en saison hivernale, pour les trois types de revêtements (Roseen et al., 2009). L'expérience suggère que la neige fond plus rapidement sur une surface poreuse en raison du drainage rapide des eaux de fonte sous la surface de la neige. De plus, les chaussées réservoirs sont généralement conçues pour drainer l'eau en moins de 48 h ; même si le gel se produit avant que ça ne se soit fait, les vides présents dans la structure procurent suffisamment de place pour l'expansion de l'eau en glace, rendant les chaussées perméables peu concernées par les problèmes d'affaissement ou de soulèvement en raison du gel (ASCE, 2015).

Comme toutes les autres pratiques de gestion des eaux pluviales, les revêtements perméables nécessitent une inspection régulière et un entretien pour garantir leur bon fonctionnement. S'ils sont bien entretenus, ils peuvent durer au moins 20 ans (ASCE, 2015). La sensibilité au colmatage est la principale préoccupation liée aux revêtements perméables ; cet aspect est plus problématique en climat nordique avec l'utilisation d'abrasifs et de produits déglaçants. Afin d'éviter ceci, un plan d'entretien qui intègre certaines pratiques, listées ici-bas, est exigé :

- Balayage de surface : une à deux fois par an, à l'aide d'un aspirateur commercial, afin d'atténuer l'accumulation des sédiments en surface. L'utilisation des unités à air ou eau comprimé n'est pas recommandée, car elles pourraient avoir un effet contraire (PWD, 2007).
- Entretien hivernal : l'utilisation de sable et d'abrasifs accélère le colmatage ; aussi, les sels déglaçants doivent être utilisés avec modération et seulement en cas de nécessité. Des études menées par le Centre des eaux pluviales de l'Université du New Hampshire montrent que les chaussées perméables nécessitent 75% moins de sels déglaçants que les chaussées conventionnelles, puisque le nombre de passages d'épandage de sel est réduit tout en garantissant une efficacité équivalente de déglaçage (UNHSC, 2009 ; Houle et al., 2009). Les pavés perméables sont moins affectés par l'utilisation des sables en saison hivernale comparativement à l'enrobé drainant, pour lequel un nettoyage en profondeur à jet d'eau est requis pour récupérer partiellement le taux d'infiltration initial avant colmatage (NAPA, 2008, UNHSC, 2009).
- Déneigement : le déneigement est effectué comme sur toute autre chaussée, mais il faut prévoir des lames en polyuréthane afin d'éviter les dommages qui peuvent être causés par une lame en acier (UNHSC, 2009).
- Colmatage des nids-de-poule : Pour l'asphalte poreux et le béton perméable, un matériau conventionnel standard peut être utilisé pour remplir les nids-de-poule isolés (NAPA, 2008).

Les opérations d'entretien des revêtements perméables n'assurent pas la récupération totale du taux d'infiltration de ces derniers. Un plan d'entretien évolutif durant la durée de vie du revêtement permet de maximiser la durée de vie du revêtement (Ryan et al., 2016).

#### 2.1.4 Coûts

Les coûts de construction des chaussées perméables sont généralement plus élevés que ceux des chaussées conventionnelles, en grande partie en raison de la base d'agrégats plus épaisse nécessaire pour le stockage des eaux pluviales. Cependant, la différence de coût est réduite ou éliminée lorsque le total des coûts du cycle de vie, soit le coût total de construction et d'entretien de la chaussée sur sa durée de vie, est considéré (ASCE, 2015; NRMCA, 2004). D'autres économies et avantages peuvent également être réalisés, dont notamment un besoin réduit en tuyaux d'égout pluvial et d'autres ouvrages de gestion des eaux pluviales, moins d'emprise de sol pour le traitement des eaux pluviales, l'amélioration esthétique et la réduction de l'effet d'îlot

de chaleur urbain (NAPA, 2008 ; NRMCA, 2004 ; Herin et al., 2020). Dans le cas d'espaces réduits, où la mise en place d'autres systèmes de gestion des eaux pluviales s'avère compliquée, les revêtements perméables sont efficaces. Ils combinent les usages du stationnement ainsi que de l'infiltration et de la rétention des eaux pluviales dans un seul ouvrage (NVRC, 1992).

Le coût d'entretien des revêtements perméables présente un pourcentage non négligeable du coût total, qui reste faible par rapport à celui de différentes solutions végétalisées pour la gestion des eaux pluviales (Houle et al., 2013).

Le coût total d'investissement pour les revêtements perméables dépend largement de la superficie drainée ainsi que de l'épaisseur du revêtement et de la profondeur de la couche réservoir adoptée lors du projet. À titre indicatif, des estimations du coût d'installation des trois types de revêtements jumelés à une chaussée réservoir sont rapportés au tableau ci-dessous (NVRC, 2008 ; Houle et al., 2013 ; ASCE, 2015). L'enrobé drainant a l'avantage d'être le moins coûteux parmi les trois types de revêtement. Ce qui peut être expliqué par sa facilité de mise en œuvre à comparer à celles du béton drainant et du pavage perméable qui exigent, respectivement, des contraintes liées au temps de séchage et l'installation généralement manuelle.

 Tableau 2.1
 Comparaison des coûts des revêtements perméables (ASCE, 2015)

Revêtement perméable	Enrobé drainant	Béton drainant	Pavé perméable
Coût de construction	28 – 51 \$/m²	87 – 145 \$/m²	72 – 130 \$/m²

# 2.2 Performances hydrologique et environnementale des revêtements perméables

#### 2.2.1 Potentiel de réduction des volumes de ruissellement et des débits

Plusieurs études ont examiné le potentiel de réduction du volume et des débits de ruissellement des chaussées perméables. Sans tenir compte du revêtement utilisé, le potentiel de réduction des volumes ruisselés est grandement affecté par le type de conception. En effet, les ouvrages conçus avec l'exigence de stocker l'eau et de permettre une infiltration vers le sol naturel réduisent grandement les volumes de ruissellement comparés à ceux pour lesquels l'imperméabilité du sol indigène est plus faible, rendant l'installation d'un drain souterrain une nécessité afin d'évacuer les eaux infiltrées et retenues temporairement dans le réservoir de stockage vers le réseau de drainage municipal (Ferguson, 2005). Mais ces derniers ouvrages restent tout de même très efficaces en termes de réduction des débits de ruissellement de pointe. Ceci a été montré par Drake (2013), qui a observé, pour une durée de deux années, une réduction moyenne de débit de pointe de 90% et une réduction de volume de 40% pour une chaussée poreuse construite sur un sol argileux, situé à Vaughan, en Ontario.

#### 2.2.1.1 L'enrobé drainant

L'enrobé drainant est doté d'un grand taux d'infiltration des eaux ; sa perméabilité varie entre 4300 mm/h à plus de 32000 mm/h, selon le mélange (ASCE, 2015). Le suivi du taux d'infiltration en climat froid, comme celui de Québec, a démontré une insensibilité du taux d'infiltration aux basses températures. En effet, l'étude effectuée par Roseen et al. (2012) a démontré que dans un climat soumis à des hivers rigoureux, avec redoux hivernaux, tels que celui auquel sont soumises les régions du sud du Canada, la perméabilité de l'enrobé drainant, variant entre 14900 mm/h et 26900 mm/h, présentait une absence de cohérence statistique saisonnière.

L'absence d'entretien rigoureux et l'utilisation de sable en saison hivernale peut réduire considérablement la perméabilité de l'enrobé drainant. Une étude publiée en 2013 (Al-Rubaei et al., 2013) a mis en évidence la réduction du taux d'infiltration de 18% sur une période de 24 ans, mais qui reste suffisamment élevée pour empêcher tout ruissellement en surface.

Ce grand taux d'infiltration permet à l'enrobé drainant de réduire considérablement les volumes de ruissellement, dépendamment de la configuration de l'ouvrage. Dans le cas d'infiltration totale, une étude publiée en 2003 (Dempsey et Swisher, 2003) a enregistré une recharge de la nappe souterraine de 100% avec une réduction du volume de ruissellement de 100% pour tous les événements pluvieux observés durant 2 ans d'étude en Pennsylvanie. La réduction des volumes et débits de ruissellement est assurée même avec la présence de sol indigène de faible perméabilité comme les argiles. En Suède, une étude (Stenmark, 1995) ayant comme objectif d'évaluer la performance hydrologique d'un enrobé drainant conçu avec des drains souterrains a permis d'observer une réduction des volumes ruisselés de 50 à 81% et une réduction des débits de pointe de 75 à 92%, dépendamment de la hauteur de précipitation totale ainsi que de la période antérieure sèche de l'événement pluvial. Une réduction du volume de ruissellement de 97% à l'échelle annuelle est atteinte pour un plus grand volume de stockage, donnant ainsi plus de temps aux eaux infiltrées à travers les différentes couches de l'ouvrage de s'infiltrer à travers le sol (Legret et Colandini, 1999).

Le Tableau 2.2 présente les principaux résultats des différentes études qui sont citées dans la discussion des résultats obtenus dans la présente étude.

Référence de l'étude	Localisation de l'étude	Taux d'infiltration de l'enrobé drainant	% réduction du volume de ruissellement	% réduction des débits maximaux
Roseen et al. (2012)	New Hamsphire, É U.	14900mm/h à 26900mm/h	-	-
Dempsey et Swisher (2003)	Pennsylvanie, ÉU.	-	100%	100%
Stenmark, (1995)	Suède	-	50 à 81%	75 à 92%
Legret et Colandini (1999)	Nantes, France	-	97% échelle annuelle	-
Kwiatkowski et al. (2007)	Pennsylvanie, ÉU.	-	90% échelle annuelle	-

Tableau 2.2 Synthèse des études citées dans la discussion des résultats de l'étude

#### 2.2.1.2 Le pavé perméable

Le pavé perméable est constitué de blocs de béton ou de briques imperméables dont le taux d'infiltration dépend de l'espacement entre les joints perméables. Selon Brattebo et Booth (2003), le taux d'infiltration du pavé perméable peut atteindre une valeur de 18000 mm/h.

Comme pour tous les revêtements perméables, le taux d'infiltration du pavé perméable diminue au fil de temps par effet de colmatage, mais elle reste moins affectée par ce dernier que celle de l'enrobé drainant et du béton drainant. Huang et al. (2012) ont observé une réduction de 21% du taux d'infiltration du pavé perméable sur une période de 5 ans de suivi. Pour un pavé perméable ayant une pente de 2% colmaté par des débris de construction, Gonzalez-Anguilo et al. (2008) ont observé que le revêtement infiltrait 81% de la pluie précipitée d'une intensité de 50 mm/h et 90% de la pluie d'une intensité de 25 mm/h.

Malgré la diminution de son taux d'infiltration due à une absence d'un système d'entretien rigoureux, le pavé perméable assure un bon potentiel de réduction des volumes de ruissellement et des débits ruisselés. Dans le cadre d'un projet de recherche de maitrise à l'INRS, une évaluation des performances hydrologiques d'un pavé perméable a été assurée par Catherine Vaillancourt (Vaillancourt et al., 2019). L'étude a montré une diminution des volumes de ruissellement jusqu'à 75% ainsi qu'un décalage de la pointe de débit allant jusqu'à 3 heures (Vaillancourt et al., 2019).

Le potentiel de réduction des volumes de ruissellement dépend fortement du volume utile de stockage de la couche d'agrégats sous-jacente au pavage perméable. En effet, Wardynski et al. (2013) ont investigué un stationnement aménagé en pavé perméable divisé en trois zones avec trois profondeurs maximales de stockage différentes : profonde, moyenne, peu profonde. La couche réservoir de la zone peu profonde avait 25 cm d'épaisseur et un drain souterrain installé à sa base, tandis que celle à moyenne profondeur avait la même épaisseur, mais un drain installé au niveau supérieur de la couche réservoir, alors que la zone profonde avait été aménagée de façon que la couche réservoir ait une épaisseur de 56 cm et un drain situé à 25 cm en dessous du pavé perméable. La zone profonde et la zone de moyenne profondeur ont réduit les volumes de ruissellement respectivement de 99,6% et 100%, alors que la zone peu profonde a à peine atteint 7% comme potentiel de réduction des volumes ruisselés.

#### 2.2.1.3 Le béton drainant

Le taux d'infiltration d'un béton drainant couvert d'une couche de sable d'une épaisseur de 5 cm a été déterminée expérimentalement par Haselbach et Freeman (2006) : celle-ci atteignait une valeur de 140 mm/h, ce qui est équivalent à une pluie centenaire d'une durée de 30 minutes à Southeastern, É.-U.. Chopra et al. (2010) ont mesuré le taux d'infiltration de huit stationnements aménagés en béton drainant. Les résultats ont montré une variation de 10 à 5770 mm/h, dépendamment du site de mesure, en fonction des effets de colmatage, dont l'ampleur varie d'un stationnement à un autre. Ce colmatage est dû à l'emprisonnement des particules de sable dans les pores du béton tandis que les particules fines d'argile sont retenues par le géotextile à la base de l'ouvrage (Leming et al., 2007).

Lors d'une étude effectuée par le *Storm Water Center* de l'Université du New Hampshire en 2012 (UNHSC, 2012), qui consistait à évaluer le potentiel d'infiltration des trois types de revêtements perméables, une réduction des volumes de ruissellement de 95% a été atteinte pour le béton drainant, face à 98% pour l'enrobé drainant.

#### 2.2.2 Potentiel de dépollution des eaux de ruissellement

La capacité des chaussées perméables à éliminer les polluants est étroitement associée à leur capacité à infiltrer les eaux de ruissellement dans le sol sous-jacent au réservoir. La conception à infiltration complète (sans drain) est plus efficace, car pas ou peu d'eau de ruissellement, y compris les polluants qu'elle contient, quittent le site vers le réseau d'assainissement. Quant à la conception à infiltration partielle (avec drain), elle génère plus de ruissellement en quantité et elle est donc plus assujettie à des études visant à évaluer son impact sur la qualité de l'eau évacuée par le drain.

Des études montrent que les revêtements perméables jumelés à des chaussées réservoirs permettent des réductions de charges de plus de 50% pour les solides en suspension, la plupart des métaux et les hydrocarbures (Legret et Collandini, 1999 ; Pratt et al., 1995). La majeure partie des polluants est capturée dans les pores de surface et la base granulaire sous-jacente des chaussées perméables.

Un autre groupe d'études sur les chaussées perméables a examiné la qualité de l'eau infiltrée à travers les sols sous les installations. Dans ces études, la qualité de l'eau infiltrée est utilisée pour évaluer le potentiel de contamination des eaux souterraines. Une de ces études a été réalisée sur une chaussée en béton perméable installée dans le stationnement d'un collège à King City, en Ontario. Cette étude a montré que les eaux pluviales qui s'étaient infiltrées à travers le réservoir granulaire et 1 mètre de sol indigène avaient des concentrations de plusieurs contaminants typiques des parcs de stationnement significativement plus faibles que celles du ruissellement de surface d'un asphalte adjacent (Van Seters et al., 2006). Ces résultats sont cohérents avec les recherches sur la qualité des eaux infiltrées des chaussées perméables à Washington (Brattebo et Booth, 2003) et en Pennsylvanie (Kwiatkowski et al., 2007). Comme pour toutes les pratiques à infiltration d'eaux pluviales, le risque de contamination des eaux souterraines par l'infiltration d'eau de ruissellement de routes, qui sont chargées en sels de déglaçage (dont les composants sont généralement le sodium et le chlorure), est une

préoccupation importante. Les ions chlorure sont extrêmement mobiles dans le sol et sont facilement transportés par percolation de l'eau vers les aquifères.

Le revêtement perméable constitue une première couche de filtration des eaux infiltrées ; c'est pourquoi, dans la littérature, la performance de dépollution varie d'un revêtement à un autre. Dans les sous-sections qui suivent, des résultats d'études antérieures sont rapportés pour chaque type de revêtement.

#### 2.2.3.1 L'enrobé drainant

Plusieurs études se sont intéressées au potentiel de dépollution et de filtration des eaux de ruissellement que l'enrobé drainant peut procurer. En général, la plupart des études ont conclu que l'enrobé drainant assure un bon traitement des matières en suspension (MES), des hydrocarbures, des métaux (Roseen et al., 2009 ; St. John et Horner, 1997). En revanche, le traitement des nutriments et du chlorure ne s'avère pas très efficace. Dans la majorité des études, il est montré que la couche de l'enrobé drainant joue un rôle primordial dans le processus de filtration des MES et des métaux contenus dans les eaux de ruissellement, qui sont des polluants fréquemment rencontrés dans les ruissellements urbains (Boving et al., 2008 ; Roseen et al., 2009 ; St. John et Horner, 1997).

Un groupe d'études s'est intéressé à étudier le potentiel de dépollution de l'enrobé drainant en comparant la qualité des eaux infiltrées à travers les différentes couches de la chaussée poreuse et celle des eaux de ruissellement de surface d'un enrobé conventionnel (St. John et Horner, 1997 ; UNHSC, 2012). Parmi ces études, on retrouve celle effectuée par St. John et Horner (1997), dans l'état de Washington, sur une route à double sens sur laquelle le trafic mensuel est de 9000 véhicules dans chaque sens. Cette route, aménagée en enrobé conventionnel et dont les accotements sont munis d'un enrobé drainant, a fait l'objet d'un suivi de qualité des eaux de ruissellement provenant des deux enrobés. St. John et Horner (1997) ont conclu que l'enrobé drainant assure une amélioration de la qualité des eaux de ruissellement. En effet, les résultats obtenus montraient, pour les eaux de ruissellement provenant des accotements en enrobé drainant, une diminution de la charge en MES, en demande chimique en oxygène (DCO), en phosphore total (PT) et en zinc (Zn) de 75%, 51%, 94% et d'au moins 90%, respectivement.

Un autre groupe d'études a mis en évidence le potentiel d'amélioration de la qualité des eaux de ruissellement que peut procurer l'enrobé drainant face à d'autres pratiques de gestion des eaux pluviales, à savoir les systèmes végétalisés (Roseen et al., 2009 ; UNHSC, 2012). Ainsi, pendant deux années de suivi, Roseen et al. (2009) ont comparé la qualité des eaux de ruissellement

32

provenant de six PGO, y compris un enrobé drainant. Durant la période de suivi, 27 événements pluvieux hydrologiquement significatifs ont été observés avec une différenciation saisonnière (hiver/été) permettant d'évaluer le potentiel de filtration de l'enrobé drainant suivant les saisons. Les échantillons collectés pour chaque événement ont été analysés afin de mesurer leur concentration en MES, hydrocarbures, PT, Zn total et azote (N) dissous. Roseen et al. (2009) ont conclu que l'enrobé drainant avait un meilleur potentiel de réduction des concentrations de polluants que les autres PGO étudiées, excepté pour le N dissous, et que ce pouvoir de réduction n'était pas affecté durant la saison hivernale.

Le Tableau 2.3 présente les principaux résultats des différentes études qui sont citées dans la discussion des résultats obtenus dans la présente étude.

Référence de l'étude	Localisation de l'étude	% de réduction des contaminants procuré par l'enrobé drainant
St. John et Horner (1997)	Washington, EU.	75% MES, 75% DCO, 94% PT, 90% Zn
Roseen et al. (2009)	New Hamsphire, EU.	83% MES, 92%Cu, 94% Zn, 85% Al, 70% N

Tableau 2.3 Performance épuratoire de l'enrobé drainant rapportée dans les études citées dans la discussion

#### 2.2.3.2 Le pavé perméable

Le pouvoir de filtration des eaux de ruissellement du pavé perméable est procuré par les joints perméables entre les blocs imperméables ainsi que par le matériau de la couche de fondation et de la sous-fondation. Indépendamment de la configuration adoptée et de l'espacement des joints, le pavé perméable assure un bon potentiel de réduction des concentrations des polluants des eaux de ruissellement. Plus spécifiquement, il a été démontré que les métaux lourds sont emprisonnés en surface, dans les joints perméables (Dierkes et al., 2002). En Alberta, durant l'hiver, Huang et al. (2012) ont réalisé un suivi de la qualité de l'eau de ruissellement d'un pavé perméable en utilisant des événements de pluie artificiels afin d'évaluer le potentiel de réduction

de pollution de l'ouvrage. Une comparaison entre les concentrations en MES, PT, N total (NT), cuivre (Cu), plomb (Pb) et Zn a été réalisée. Globalement, le pavé perméable a amélioré la qualité des eaux de ruissellement avec des taux de réduction moyens des concentrations des polluants de 91%, 78%, 6%, 68%, 65% et 55%, respectivement, pour les MES, PT, NT, Cu, Pb et Zn.

Certaines études ont rapporté que le pavé perméable est similaire au béton drainant en termes d'amélioration de la qualité des eaux de ruissellement. Par exemple, Collins et al. (2010) ont évalué le pourcentage de réduction des concentrations moyennes des polluants provenant d'un pavé perméable, d'un béton drainant et d'un enrobé conventionnel utilisé comme situation de référence. Durant 7 mois de suivi, les concentrations de NT, nitrites, ammonium et N organique ont été analysées pour les trois zones. Collins et al. (2010) ont conclu que les deux revêtements perméables avaient un pouvoir de réduction des concentrations des polluants analysés équivalent à celui d'un filtre à sable.

#### 2.2.3.3 Le béton drainant

Les études antérieures qui se sont intéressées à l'amélioration de la qualité des eaux de ruissellement par l'application du béton drainant ont permis de démontrer que ce dernier procure un bon potentiel de filtration des eaux (Collins et al., 2010 ; Roseen et al., 2009 ; Wanieslista et Chopra, 2007). Parmi celles-ci, l'étude effectuée par Wanielista et Chopra (2007) a permis de démontrer que le béton drainant procure un bon potentiel de réduction des concentrations en N et en orthophosphates contenues dans les eaux retenues dans la couche réservoir, comparé aux concentrations de ces polluants dans les ruissellements de surface.

Le béton drainant présente deux principales particularités par rapport aux autres revêtements perméables. Grâce à sa composition, il permet de contrôler le pH des eaux de ruissellement, dont la valeur est généralement élevée (Collins et al., 2010 ; Thomle, 2010). Aussi, durant les jours très chauds, qui sont caractérisés par des températures des eaux de ruissellement supérieures à une valeur critique évaluée à 21 °C par Wardynski et al. (2013), cet auteur a démontré que le béton drainant, grâce à sa couleur pâle, permet de réduire la température des eaux retenues dans le réservoir de stockage de façon à ne jamais excéder la valeur critique. Au-delà de cette valeur, l'eau contient moins d'oxygène dissous que l'eau froide (<21°C) ; cette pollution thermique peut dramatiquement affecter certaines espèces de poisson qui peuvent seulement survivre dans une gamme étroite de température d'eau.
# 3 METHODOLOGIE

Le projet de recherche visait à évaluer les performances hydrologique et environnementale d'un enrobé drainant comme mesure de contrôle à la source des eaux pluviales sur un stationnement municipal. Plus spécifiquement, un suivi expérimental d'une durée de deux années a été réalisé sur deux zones du stationnement, soit une première construite suivant la méthode conventionnelle (asphalte imperméable et chaussée classique) et une deuxième dotée d'un enrobé drainant, élaboré par le ministère des Transports du Québec, combiné à une chaussée réservoir. La méthodologie adoptée, décrite dans ce chapitre, consistait à mesurer le taux d'infiltration de l'enrobé drainant en trois points durant les différentes saisons de l'année, à collecter des données grâce un pluviomètre placé sur le site expérimental, à mesurer les débits de ruissellement en temps de précipitation pour une période de 24 mois au niveau d'un regard où les eaux de ruissellement des deux zones sont acheminées et à récolter des échantillons d'eau de ruissellement en temps de pluie pour analyse en laboratoire.

### 3.1 Description du site expérimental

Le site expérimental est le stationnement municipal de la bibliothèque Le Tournesol, d'une superficie totale de 2300 m<sup>2</sup>, situé à une vingtaine de kilomètres du centre de Québec (Figure 3.1). Ce stationnement de la Ville de Québec a fait l'objet d'un réaménagement effectué par le ministère des Transports du Québec (MTQ). Les travaux de réfection ont commencé début septembre 2020 et ont pris fin début octobre 2020.



Figure 3.1 Localisation du site expérimental (Google Earth 2022).

Le réaménagement consistait en une réfection de la portion de la chaussée du stationnement en enrobé conventionnel sur une superficie de 1446 m<sup>2</sup> et en une substitution de la chaussée existante en chaussée réservoir jumelée à un enrobé drainant sur une superficie de 854 m<sup>2</sup> (Figures 3.2 et 3.3). La topographie du stationnement a fait en sorte que la zone de l'enrobé conventionnel a été partiellement considérée lors du suivi hydrologique effectué dans le cadre de ce projet de recherche, puisque seule une partie de la surface de l'enrobé conventionnelle est contributrice au ruissellement acheminé vers le puisard PU-2. La zone intégrée à l'étude a une superficie mesurée de 529 m<sup>2</sup> (Figure 3.2).



Figure 3.2 Emplacement de l'enrobé conventionnel et de l'enrobé drainant sur le site d'étude ; bleu : zone en enrobé drainant, rouge : zone totale en enrobé conventionnel, vert : zone en enrobé conventionnel concernée par l'étude (Google Earth, 2022).



Figure 3.3 Stationnement de la bibliothèque Le Tournesol (site expérimental) en temps humide (Galerie de photos, 2020).

#### 3.1.1 Conception de la chaussée perméable

Parmi les critères de choix du site expérimental, on retrouvait la perméabilité du sol indigène sous-jacent à la structure de la chaussée perméable. Suivant l'étude hydrogéotechnique effectuée par la société Stantec (Godé, 2018), le sol *in situ* est de type sable silteux à silt sableux avec un taux d'infiltration comprise entre 26 mm/h et 61 mm/h. Il s'agit d'un taux d'infiltration moyen, qui a permis d'opter pour une conception de chaussée réservoir dite combinée (avec drain), jumelée à un enrobé drainant monocouche. Ainsi, une partie des eaux précipitées est partiellement infiltrée par le sol pour recharger la nappe, alors que les eaux excédentaires sont évacuées par un drain souterrain perforé placé au niveau de la couche réservoir de la chaussée perméable (Tableau 3.1 ; Figure 3.4).

Couche	Matériau	Epaisseur (mm)	Rôle		
Couche de surface	L'enrobé drainant : monocouche, similaire à l'enrobé conventionnel avec moins de fines	80	Infiltrer les eaux de ruissellement		
Couche de fondation	Pierre nette de diamètre 10-20 mm	200	Couche d'assise et supporter les charges de trafic de conception		
Sous-fondation*    Pierre nette de diamètre    600    Retenir les eaux      (réservoir)    20-40 mm    infiltrées    temporairement /      supporter les    charges de trafic    charges de trafic					
* Caractéristiques du drain souterrain : diamètre 150 mm, largeur de perforation 2 mm-3 mm, aire de perforation > 32 cm <sup>2</sup> /m, matériau PE type 2, placé à une hauteur de 300 mm de la base de l'ouvrage.					

#### Tableau 3.1 Caractéristiques de la structure de la chaussée perméable



Figure 3.4 Coupe-type de la structure de la chaussée perméable aménagée au site expérimental ; les dimensions sont en mm (adapté du plan tel que construit ; MTQ, 2020)

#### 3.1.2 Configuration du réseau et schéma hydraulique du site

En collaboration avec l'équipe de recherche de l'INRS, le site d'étude (le stationnement municipal) a été conçu de sorte que le suivi hydrologique soit assuré avec aisance ; il se présente comme étant un bassin versant constitué de deux sous-bassins versants : la partie perméable, soit celle de l'enrobé drainant (zone bleu ciel sur la Figure 3.5) et la partie imperméable, soit celle de l'enrobé conventionnel (zone jaune sur la Figure 3.5).

Le nivellement de surface de la zone imperméable a été fait de façon que les eaux de ruissellement de surface, lors d'un événement pluvial, soient acheminées vers le puisard PU-2. Ces eaux sont ensuite dirigées vers le regard RP-1, pour rejoindre finalement le branchement au réseau de drainage municipal. En revanche, l'eau précipitée niveau de la zone perméable est infiltrée puis stockée temporairement dans la couche réservoir de la chaussée poreuse ; cette eau infiltrée est ensuite soit totalement infiltrée vers le sol ou partiellement évacuée par les drains souterrains vers le puisard PU-1, rejoignant ainsi le regard RP-1 (Figures 3.5 et 3.6).



Figure 3.5 Réseau de drainage souterrain du site expérimental (les zones bleu ciel et jaune représentent respectivement les zones en enrobé drainant et conventionnel)



Figure 3.6 Schéma hydraulique du site expérimental (P = précipitations ; EV = évaporation)

### 3.2 Mesure du taux d'infiltration de l'enrobé drainant

Afin d'évaluer les potentiels hydraulique et environnemental de l'enrobé drainant, un système de suivi-évaluation a été mis en place, qui consistait en premier lieu à mesurer *in situ* le taux d'infiltration de ce dernier.

Dans ce qui suit, le protocole de mesure du taux d'infiltration est décrit, ainsi que l'emplacement des tests.

### 3.2.1 Test de mesure du taux d'infiltration

Le taux d'infiltration de l'enrobé drainant a été mesuré suivant le test décrit dans la norme C1781/C1781M -14a de l'*American Society for Testing and Materials* (ASTM, 2017). Un tube de diamètre 300 ± 10 mm et d'une longueur minimale de 50 mm était placé au sol tout en veillant à garantir une étanchéité à l'eau (Figure 3.7). Une masse de 3,6 kg d'eau était versée dans le fond du cylindre de façon à ce que la hauteur de la lame d'eau n'excède pas 15 mm et ne soit pas inférieure à 10 mm. Après ce pré-mouillage, la même procédure était refaite tout en chronométrant le temps nécessaire pour l'infiltration totale de la masse d'eau versée. Le taux d'infiltration était finalement calculé suivant l'Équation 1, donnée dans la même norme citée cidessus.

$$I = K \frac{m}{t * d^2} ; (1)$$

où :

m = masse de l'eau infiltrée (kg);

d = diamètre interne du cylindre d'infiltration (mm) ;

t = temps d'infiltration (s);

 $K = 45,84*10^9 \text{ mm}^3 \text{.s/(kg.h)} = \text{coefficient de conversion des unités ((mm^3 \cdot \text{s}) / (kg \cdot \text{h})).$ 



Figure 3.7 Procédure du test d'infiltration au niveau du point 1 (Galerie de photos, 2021).

# 3.2.2 Emplacement et périodes de mesure

Le taux d'infiltration a été mesuré en trois emplacements de la zone perméable (l'enrobé drainant) afin de mettre en évidence l'effet du facteur spatial sur le taux d'infiltration, si jamais il y a lieu (Figure 3.8).



Figure 3.8 Emplacement des mesures du taux d'infiltration de l'enrobé drainant

En climat très froid, semblable à celui de Québec, la caractérisation du taux d'infiltration de l'enrobé drainant consiste notamment à évaluer l'impact des basses températures et du processus de colmatage sur le pouvoir infiltrant de l'enrobé. C'est pourquoi la mesure du taux d'infiltration a été effectuée pendant des périodes spécifiques, soit en saison hivernale, en saison estivale ainsi qu'avant et après les opérations de nettoyage du stationnement municipal (Tableau 3.2).

Période de mesure	Date
Après aménagement du site	07/11/2020
Hiver 2021	09/03/2021
Eté 2021 (avant nettoyage)	08/06/2021
Eté 2021 (après nettoyage)	11/06/2021
Hiver 2022	15/01/2022
Eté 2022 (Avant nettoyage)	13/04/2022

Tableau 3.2 Date des différentes mesures du taux d'infiltration de l'enrobé drainant

# 3.3 Suivi et évaluation de la performance hydrologique de l'enrobé drainant

L'évaluation de la performance hydrologique de l'enrobé drainant consistait à comparer les volumes et les débits de ruissellement provenant de la partie perméable et de la partie imperméable. Pour ce faire, le bilan hydrologique des sous-bassins versants a été caractérisé en procédant à la mesure de ses composantes, à savoir les précipitations et les débits de ruissellement, tout en négligeant l'évaporation.

Dans cette section, le système de suivi de la pluviométrie du site expérimental est détaillé, soit le processus de collecte, de validation et de traitement des données de pluie. Aussi, le système de suivi des débits de ruissellement est décrit, à savoir, les équipements de mesure et leur emplacement ainsi que le processus de traitement des données de débit.

### 3.3.1 Suivi de la pluviométrie sur le site

## 3.3.1.1 Le pluviomètre

Un pluviomètre chauffant à auget basculant S-RGB-M002 d'ONSET a été installé sur le toit de la bibliothèque Le Tournesol le 16 juin 2020 (Figure 3.9). Il permet la mesure de la hauteur d'eau de pluie précipitée sur un pas de temps de 5 minutes avec une bascule de 0,2 mm. La donnée de pluie est enregistrée par un enregistreur Hobo MicroRX Station, qui assure la communication avec la plateforme web HOBOlink via GSM (Figure 3.10).

L'appareil a été étalonné au laboratoire de l'INRS avant d'être installé. L'étalonnage consistait à verser 373 ml par l'ouverture supérieure du pluviomètre, correspondant à 100 tics (1 tic = 0,2 mm), pendant une durée supérieure à 1 heure.

Les données de pluie ont été collectées entre la période comprise entre le 16 juin 2020 et le 25 juin 2022. La période de suivi a connu une période d'invalidité de données, comprise entre le 15 octobre 2021 et le 24 novembre 2021, causée par une défaillance au niveau du capteur du pluviomètre. Durant la période hivernale, le suivi des données de pluie est interrompu et repris à partir du mois d'avril.



Figure 3.9 Pluviomètre à auget basculant installé sur le toit de la bibliothèque (Galerie de photos, 2022).



Figure 3.10 Enregistreur de données Hobo MicroRX Station (Galerie de photos, 2022).

### 3.3.1.2 Validation et traitement de la donnée de pluie

Les données de pluie extraites de l'enregistreur de données du pluviomètre sont sous forme de séries temporelles de précipitations, cumulées sur un pas de temps de 5 min. Elles sont sujettes à certaines sources d'incertitudes, engendrant ainsi des erreurs ; il est donc primordial de les valider avant de pouvoir procéder à la séparation des événements pluvieux (Figure 3.11).

Le processus de validation des séries pluviométriques brutes s'est effectué en deux étapes :

- Etape 1 : La validation du nombre de pas de la série de pluie brute consiste à vérifier le nombre de pas attendus en fonction de l'heure de début et de fin de la série. Un nombre inférieur au nombre de pas théorique représente des données manquantes, qu'il est nécessaire de prendre en compte lors de l'exploitation de la série de pluie. Un nombre supérieur au nombre de pas théorique représente des doublons qu'il faut supprimer en veillant à ne pas les confondre avec les valeurs nulles de la série temporelle.
- Etape 2 : Afin de s'assurer du bon fonctionnement du pluviomètre, les données récoltées par celui-ci sont régulièrement comparées à celles de deux pluviomètres opérés par Environnement Canada, soit celui de Valcartier, situé à 9,7 km du site d'étude, et celui de l'aéroport Jean-Lesage, situé à 11,6 km du site. Bien qu'on puisse s'attendre à certaines différences entre les données de pluie observées aux trois pluviomètres à l'échelle

journalière, les données mensuelles devraient être similaires. De plus, une sousestimation ou une surestimation systématique de la hauteur de pluie journalière observée à la bibliothèque le Tournesol, par rapport aux deux autres pluviomètres, pourrait être un signe d'un biais systématique. Dans ce cas, il faut vérifier la calibration du pluviomètre.

Les évaluations hydrologiques de ce projet de recherche nécessitent une définition et une séparation des événements pluvieux en événements hydrologiquement significatifs. Pour ce faire, trois critères de séparation ont été utilisés :

- Le seuil minimal de temps sec, qui est la valeur d'intensité de pluie en dessous de laquelle le pas de temps est considéré comme sec. Une valeur de 0,3 mm a été fixée pour ignorer une bascule de 0,2 mm (précision du pluviomètre).
- Le temps inter-événement sec minimal au-delà duquel deux événements pluvieux sont considérés indépendants. Une durée de 6 heures a été fixée pour ce projet de recherche.
  Il a été jugé que cette durée correspond à la limite supérieure du temps nécessaire pour que les eaux retenues dans le réservoir de stockage de la chaussée perméable puissent être évacuées par le drain souterrain.
- Le seuil minimal de la hauteur de pluie en dessous duquel l'événement pluvial n'est pas considéré. Cette hauteur de pluie correspond à la rétention d'eau au niveau de la surface de la zone imperméable. Expérimentalement, elle a été fixée à 4 mm pour ce projet de recherche.

Les données de précipitation traitées concernent la période qui coïncide avec la période de disponibilité des données de débits. À savoir, la période automnale de l'année 2021 et, partiellement, la période estivale de l'année 2022. Ceci a permis de définir 30 événements hydrologiquement significatifs.



Figure 3.11 Organigramme des étapes de validation et de traitement d'une série temporelle de pluie

#### 3.3.2 Suivi des débits de ruissellement sur le site

En temps de pluie, la mesure des débits de ruissellement provenant des parties perméable et imperméable s'est faite grâce à deux débitmètres installés au niveau des deux conduites d'entrée au regard RP-1 (Figure 3.12).



Figure 3.12 Emplacement de mesure des débits de ruissellement des deux zones

Les débitmètres sont composés d'un déversoir et d'une sonde de mesure de pression de marque HOBO MX, jumelée à un module qui assure la communication Bluetooth permettant l'extraction à distance des données de la hauteur d'eau à l'amont du déversoir (Figure 3.13).



Figure 3.13 Déversoir et sonde de pression installés au niveau de l'entrée du regard RP-1

La hauteur d'eau dans la conduite circulaire est convertie en débit suivant la courbe du déversoir installé, fournie par le concepteur, qui lie la hauteur d'eau à l'amont et le débit véhiculé (Figures 3.14 et 3.15). On émet l'hypothèse que le régime d'écoulement est uniforme et que la sonde installée en amont ne crée pas assez de turbulence pour remettre en question l'applicabilité de la courbe du déversoir.



Figure 3.14 Courbe de la partie inférieure triangulaire du déversoir



Figure 3.15 Courbe de la partie supérieure rectangulaire du déversoir

Le processus d'établissement des hydrogrammes des deux zones, perméable et imperméable, suivant chaque événement pluvial est résumé à la Figure 3.16.



Figure 3.16 Organigramme des étapes d'établissement des hydrogrammes des deux zones

# 3.3.3 Modélisation hydrologique du site expérimental

Un modèle hydrologique/hydraulique du site d'étude a été réalisé sur le logiciel EPA *Storm Water Management Model* (SWMM) (United States Environmental Protection Agency, 2018). Le choix de ce logiciel est justifié par le fait qu'il est adapté à la modélisation hydrologique en milieu urbain et qu'il dispose d'un module, nommé LID (pour *Low Impact Development*), dédié à la modélisation des PGO des eaux pluviales (qui est dans notre cas l'enrobé drainant).

Mise à part la simulation des eaux de ruissellement et de l'écoulement en conduite qui est procurée par d'autres modèles hydrologiques, SWMM permet aussi de modéliser les transferts d'eau à travers les différentes couches de la chaussée perméable grâce aux fonctionnalités du module LID (Figure 3.17). Dans ce module, la chaussée perméable est représentée par quatre couches horizontales dont la deuxième couche en surface représente le pavage perméable

(Figure 3.17). L'écoulement à travers ces couches est supposé unidimensionnel vertical, tandis que l'apport en eau et l'humidité des couches sont supposés uniformes et que les forces matricielles dans la couche réservoir sont négligeables, ce qui signifie que cette couche agit comme un réservoir de stockage d'eau. La méthode de calcul utilisée dans le module LID de SWMM, qui intègre les différents paramètres des quatre couches, est rapportée dans l'annexe (section 7.2).



Figure 3.17 Modèle LID conceptuel de la chaussée perméable sur SWMM.

Le modèle élaboré a permis d'étudier le site sur le plan hydrologique tout en étant non tributaire des événements pluvieux qui ont eu lieu durant la période de suivi. En effet, la qualité et la pertinence d'une évaluation de performance hydrologique basée seulement sur des événements pluvieux durant une durée déterminée (deux années dans notre cas) dépendent fortement de la représentativité de ces événements pluvieux, alors qu'avec le modèle élaboré, des simulations ont été effectuées à l'échelle de la saison (mai jusqu'à novembre) pour la période historique comprise entre 1998-2018. Les données de pluie utilisées pour cette évaluation proviennent du pluviomètre de la Ville de Québec installé sur un toit à 3 km de notre site d'étude (station Notre-Dame-des-Laurentides). Parmi les données récoltées sur le site pendant la période de suivi

certains ont permis de réaliser le calage préalable du modèle SWMM (2 événements) et de son module LID (1 événement).

# 3.3.4 Données de base du modèle

Le développement du modèle numérique requiert la collecte de données de base qui représentent les paramètres d'entrée du modèle, qui sont de trois types présentés comme suit :

• Les données météorologiques : La pluie est l'une des données d'entrée fondamentales pour la modélisation ; grâce au pluviomètre à auget installé sur le site d'étude, des événements pluvieux décrits sous forme de hyétogrammes représentent la donnée météorologique requise.

• Les caractéristiques des deux surfaces (zone perméable et zone imperméable) : il s'agit des caractéristiques qui affectent les débits et les volumes de ruissellement, à savoir les superficies des surfaces contributrices, les pentes, le coefficient de rugosité de Manning pour les deux enrobés ainsi que le taux d'infiltration, qui est déterminé *in situ*, ainsi que les paramètres du module LID pour les différentes couches qui le constituent (rapportés au Tableau 3.3). Certaines caractéristiques sont disponibles dans l'étude géotechnique et les plans d'exécution réalisés par le ministère des Transports lors de la réfection du stationnement. D'autres sont mesurées. Celles qui restent inconnues seront déterminées lors du calage du modèle (Tableau 3.3).

ableau 3.3 Classement des paramètres du modèle numérique
--

Paramètre	Unité	Catégorie		
		Disponible dans les plans et devis	Mesuré	Inconnu
Zone imperméable (enrobé conventionnel)				
Largeur d'écoulement	m			х
Superficie	ha		х	
Surface imperméable	%	Х		
Pente	%			Х

Paramètre	Unité	Catégorie		
		Disponible dans les plans et devis	Mesuré	Inconnu
Hauteur de stockage (dépressions) sur surfaces imperméables	mm			Х
Rugosité de surface imperméable (n de Manning)	Sans dimension			х
Les autres paramètres du sous-bassin qui con perméable ne sont pas pris en compte puisque imperméable.	Les autres paramètres du sous-bassin qui concernent le modèle d'infiltration ainsi que la surface perméable ne sont pas pris en compte puisque la zone de l'enrobé conventionnel est totalement imperméable.			
Zone perméable / Module LID (enrobé drainant)				
Surface				
Rugosité de surface (n de Manning)	Sans dimension			Х
Pente de surface	%	Х		
Revêtement				
Épaisseur	mm	Х		
Ratio de vides	Vide/solide			Х
Surface imperméable	Fraction	Х		
Perméabilité	mm/h		х	
Sol				
Épaisseur	mm	Х		
Porosité	Fraction de volume			Х

Paramètre	Unité	Catégorie		
		Disponible dans les plans et devis	Mesuré	Inconnu
Capacité capillaire	Fraction de volume			Х
Point de flétrissement	Fraction de volume			Х
Conductivité	mm/h			Х
Pente de conductivité	Sans dimension			Х
Tension capillaire	mm			Х
Stockage				
Épaisseur	mm	Х		
Ratio de vides	Vide/solide			Х
Taux d'exfiltration	mm/h			Х
Drain souterrain				
Coefficient du drain	mm/h			Х
Exposant pour drain	Sans dimension	Х		
Hauteur de décalage du drain	mm	Х		

• Les caractéristiques physiques des composantes du système hydraulique : il s'agit des caractéristiques liées aux matériaux de construction (rugosité des conduites), des dimensions et de la forme des ouvrages hydrauliques, de la disposition des conduites au niveau des regards/puisards et de leur pente. Ces données sont disponibles sur les plans et devis de construction.

#### 3.3.5 Construction du modèle

Le modèle SWMM du site expérimental a été construit sous forme de deux sous-bassins qui correspondent aux deux parties, perméable et imperméable ; le modèle comprend au total trois nœuds, trois conduites et un exutoire (Figure 3.18). La composante du module LID, soit la chaussée poreuse, s'étale sur tout le sous-bassin perméable d'une superficie de 854 m<sup>2</sup>, alors que la partie de l'enrobé conventionnel est représentée par un sous-bassin totalement imperméable qui s'étale sur une superficie de 529 m<sup>2</sup>. Les dimensions des regards (PU-1, PU-2, RP-1) ont été tirées des plans et devis et validées par des mesures sur le terrain ; il s'agit de la profondeur à attribuer au nœud représentant le regard. Les élévations des conduites d'entrée et de sortie par rapport au fond du regard doivent aussi être entrées dans le modèle. La surélévation des radiers de conduite par rapport au fond des regards génère une présence permanente d'eau dans les regards. Cette hauteur d'eau a été prise en compte lors de la modélisation en définissant une hauteur d'eau initiale au niveau des nœuds avec un décalage de 5 cm du radier des conduites de sortie des nœuds. Les caractéristiques de conduites du réseau de drainage sont tirées des plans. Elles sont modélisées avec des liens de forme circulaire, de diamètre 200 mm, avec des pentes similaires à celles présentes dans les plans.

Les deux drains souterrains en polyéthylène haute densité, placés au niveau de la couche réservoir de la chaussée perméable, ont été modélisés avec un drain souterrain du modèle LID. Le débit véhiculé par le drain est calculé sur SWMM suivant l'équation (2).

$$q = C(h - Hd)^n$$
(2)

où :

q = débit sortant (mm/h) par unité de surface;

h = hauteur de l'eau stockée (mm) ;

Hd = hauteur du drain (mm);

C = coefficient du drain (mm/h);

n = exposant du drain.

Etant donné que la performance du drain n'a pas été évaluée en laboratoire, l'exposant et le coefficient du drain restent inconnus. C'est pourquoi la valeur de n = 0,5 a été attribuée à l'exposant du drain, en assumant qu'il agissait comme un orifice. Dans ce cas de figure, le coefficient du drain est calculé suivant l'équation (3) (EPA, 2016).

$$C = 60046 * A_d/A_LID$$
 (3)

où :

- C = coefficient du drain (mm/h);
- $A_d$  = surface du drain (m<sup>2</sup>);
- $A_LID$  = surface de l'ouvrage LID (m<sup>2</sup>).

Dans le cas de notre site d'étude, en utilisant l'équation (3), la valeur du coefficient de drain a été évaluée à 104 mm/h. Elle représente la valeur centrale utilisée lors de l'analyse de sensibilité (voir section 3.3.6).



Figure 3.18 Modèle SWWM du site expérimental

#### 3.3.6 Analyse de sensibilité du modèle

Après avoir élaboré le modèle sur le logiciel SWMM et vérifié la connectivité des différentes composantes du modèle, une analyse de sensibilité s'impose. Elle consiste à évaluer la réponse du modèle face à des modifications de certains paramètres d'entrée pour une gamme réaliste de valeurs pour chaque paramètre et de comparer cette réponse selon certains indicateurs. Pour le cas de cette étude, les indicateurs sont le volume total ruisselé et les débits de ruissellement.

L'analyse de sensibilité est une approche d'appréciation des erreurs liées à l'utilisation du modèle dans le cas où la collecte de données mesurées est impossible ou, comme dans le cas de ce projet, une analyse qui sert à orienter l'utilisateur lors du processus de calage du modèle.

Une analyse de sensibilité du modèle du site d'étude a été effectuée afin de déterminer, parmi les données de base inconnues présentées au Tableau 3.3, celles qui ont le plus d'impact sur le volume total ruisselé et sur les débits de ruissellement. Cette dernière a été effectuée séparément pour les deux sous-bassins du modèle.

En premier lieu, une gamme de valeurs pour chaque paramètre inconnu a été définie selon les données tirées de la littérature (EPA, 2016 ; MDDEP et MAMROT, 2011), sur la base de laquelle une valeur centrale et un pourcentage de variation lié à chaque paramètre ont été calculés (Tableau 3.4) ; ce qui permet de borner l'analyse de sensibilité. La deuxième étape correspond à quantifier les modifications des hydrogrammes de sortie, à savoir les débits maximaux de ruissellement ainsi que les volumes totaux ruisselés pour les deux zones.

Paramètre	Unité	Valeur centrale de départ	% de variation
Zone imperméa	ble (enrobé conventio	onnel)	
Largeur d'écoulement	m	30	50
Pente	%	1,5	50
Hauteur de stockage (dépressions) sur surfaces imperméables	mm	2	100
Rugosité de surface imperméable (n de Manning)	Sans dimension	0,016	50
Zone perméable / Module LID (enrobé drainant)			
Revêtement			
Ratio de vides	Fraction	0,15	50

Tableau 3.4 Valeurs des paramètres considérés lors de l'analyse de sensibilité et leur pourcentage de variation.

Paramètre	Unité	Valeur centrale de départ	% de variation
	Sol		
Porosité	Fraction de volume	0.,6	100
Capacité capillaire	Fraction de volume	0,07	50
Point de flétrissement	Fraction de volume	0,03	50
Conductivité	mm/h	150	50
Pente de conductivité	Sans dimension	9	50
Tension capillaire	mm	1,5	50
Stockage			
Taux d'exfiltration	mm/h	5	100
Drain souterrain			
Coefficient du drain	mm/h	104	25

L'analyse de sensibilité a été effectuée à l'aide de l'outil intégré STRC de PCSWMM en raison de sa simplicité d'utilisation ainsi que pour le faible nombre de simulations requis. En effet, deux simulations sont effectuées par paramètre inconnu, permettant ainsi le calcul du taux de variation normalisé suivant l'équation ci-dessous :

$$R = \frac{Y(Xmax) - Y(Xmin)}{(Xmax - Xmin)/Xmoy}$$
(4)

où :

R = taux de variation de la variable de sortie Y en fonction du paramètre inconnu X;

Y = variable de sortie (débit maximal de ruissellement ou volume total ruisselé) ;

X = paramètre d'entrée inconnu.

Un R positif plus grand indique que le paramètre d'entrée en question a un impact d'augmentation plus grand sur le paramètre de sortie, tandis qu'un R négatif plus élevé (en valeur absolue) indique un impact de réduction (c.-à-d. dans le sens contraire) plus important. En revanche, une valeur de R proche de 0 indique un faible effet sur la variable de réponse d'intérêt.

Les événements de pluie considérés lors de cette analyse de sensibilité sont présentés dans le Chapitre 5.

### 3.3.7 Calage et validation du modèle

Afin d'estimer les valeurs des paramètres inconnus et difficiles à mesurer, on a procédé au calage du modèle. Bien que le logiciel PCSWMM procure la possibilité de le faire automatiquement, on a choisi de procéder suivant un processus itératif d'essais-erreurs pour mieux comprendre l'impact de chacun des paramètres et obtenir un meilleur résultat.

La procédure consiste à entamer le calage par les paramètres les plus sensibles du modèle, selon les résultats de l'analyse de sensibilité, pour ensuite terminer avec ceux les moins sensibles. Les valeurs optimales à conserver sont celles qui permettent d'aboutir à des valeurs de résultats du modèle le plus proche possible de celles mesurées *in situ*. Les résultats du modèle à considérer sont le volume de ruissellement et les débits au niveau de la zone perméable et de la zone imperméable.

Le calage du modèle s'est fait distinctement sur les deux zones, suivant deux étapes :

Sous-bassin imperméable (asphalte conventionnel) :

• Ajuster le volume de ruissellement en premier, en agissant sur le paramètre des dépressions de surface.

• Ajuster la forme de l'hydrogramme ensuite, en agissant sur la largeur de drainage (*width*), la pente du bassin et le coefficient de Manning de l'asphalte conventionnel.

Sous-bassin perméable (asphalte poreux) :

• Ajuster le volume de ruissellement, en agissant sur les paramètres liés à l'infiltration et à la retenue en eau des différentes couches de la chaussée perméable auxquels le modèle est le plus sensible.

• Ajuster la forme de l'hydrogramme, surtout par l'ajustement des paramètres liés à la vitesse d'infiltration des eaux à travers les couches de la chaussée perméable.

Afin d'évaluer la qualité du calage effectué, on a utilisé l'écart sur les volumes ainsi que le critère de Nash-Sutcliffe, défini ainsi :

$$NS = 1 - rac{\sum_{i=1}^{n} (qi-ri)^2}{\sum_{i=1}^{n} (qi-q)^2}$$
 (5)

où :

ri = valeur simulée du débit lors d'un événement pluvieux au pas de temps i ;

qi = valeur mesurée du débit lors du même événement pluvieux au pas de temps i;

q = valeur moyenne mesurée des débits pour toute la série ;

n = le nombre total de pas de temps utilisés pour le calage.

La valeur de NS varie entre moins l'infini et 1. Une valeur de 1 correspond à une corrélation parfaite entre les valeurs simulées et celles mesurées, alors qu'en dessous de 0, la moyenne de valeurs observées est plus représentative que les valeurs simulées par le modèle.

Ainsi, on juge que le calage du modèle est satisfaisant si :

± 10 % d'écart pour le volume

Puisque la valeur optimale pour le critère de Nash est de 1, le calage des débits visera à maximiser la valeur de NS.

Les événements de pluie utilisés lors de ce processus de calage sont détaillés dans le Chapitre 5.

# 3.4 Suivi et évaluation de la performance environnementale de l'enrobé drainant

Un suivi de la pollution physico-chimique des eaux de ruissellement de la zone perméable ainsi que de la zone imperméable a été assuré par une campagne d'échantillonnage qui s'est étalée sur la période comprise entre le 1<sup>er</sup> octobre 2020 et le 31 juillet 2022. En fonction des événements pluvieux, ceci a permis d'évaluer le potentiel de filtration des eaux infiltrées par les différentes couches de la chaussée réservoir en comparant le taux de pollution dans les deux zones.

Dans cette section, le système de suivi de la qualité des eaux de ruissellement est décrit, à savoir, le protocole d'échantillonnage, l'emplacement et les méthodes de collecte, les contaminants à analyser et leurs protocoles d'analyse.

### 3.4.1 Protocole d'échantillonnage

Pour les eaux de ruissellement de la zone imperméable, un échantillonnage composite a été adopté. Il consiste à prendre plusieurs échantillons d'eau instantanés d'un litre durant tout l'événement pluvial, suivant une séquence de pas de temps défini au préalable. Le pas de temps de prise d'échantillons instantanés évolue dans le temps, tout en veillant à échantillonner les premiers ruissellements, qui sont généralement les plus chargés en polluants (Tableau 3.5). L'échantillon composite est obtenu en mélangeant dans le même contenant les échantillons instantanés prélevés (Figure 3.19). Ceci permet de produire un échantillon composite représentatif de la concentration moyenne des polluants contenus dans les eaux ruisselées durant tout l'événement pluvial.

Tableau 3.5 Séquence de prélèvement d'échantillons instantanés pour la formation de l'échantillon composite (zone imperméable)

Nombre d'échantillons prélevés	Pas de temps (min)
(1 litre/échantillon)	
5	2
5	5
5	10
3	15
Nombre requis jusqu'à la fin de l'événement pluvial	30



Figure 3.19 Mélange des échantillons instantanés lors d'un échantillonnage composite

Lors des événements pluvieux pour lesquels un drainage de l'eau stockée dans le réservoir de la chaussée perméable a eu lieu, un échantillon simple d'un litre a été prélevé à la sortie du drain souterrain. On assume que l'échantillon simple est représentatif de la qualité de l'eau qui quitte le réservoir vers le réseau de drainage municipal. En effet, lors du premier événement de pluie pour lequel il y a eu des effluents au niveau de la chaussée perméable, deux échantillons simples ont été récoltés au début et à la fin du ruissellement. Le résultat d'analyse des contaminants (N, PT, MES) contenus dans ces deux échantillons a démontré que la qualité d'eau est similaire au début et à la fin de l'écoulement.

### 3.4.2 Emplacement et méthodes de collecte

Pour la partie perméable (enrobé drainant), l'eau excédentaire drainée par le drain souterrain placé au niveau du réservoir de stockage a été récoltée à l'aide d'une perche (Figure 3.20) à son arrivée au puisard PU-1, identifié à la Figure 3.21.



Figure 3.20 Échantillonnage des eaux drainées par le drain à l'aide d'une perche



Figure 3.21 Emplacement d'échantillonnage des eaux de ruissellement

Pour la partie imperméable (enrobé conventionnel), deux méthodes ont été adoptées.

La première est une méthode manuelle illustrée à la Figure 3.22, qui consistait à récolter l'eau de ruissellement à son arrivée au puisard PU-2 (Figure 3.21), à l'aide d'une gouttière en aluminium et d'une bouteille d'un litre en plastique.

La deuxième est une méthode automatique à l'aide d'un autoéchantillonneur de marque Avensys, installé le 2 juin 2021 au même puisard PU-2 (Figure 3.23), suivant la configuration illustrée à Figure 3.23. L'autoéchantillonneur a été étalonné et configuré suivant la séquence de prise d'échantillons détaillée au Tableau 3.3. Il est muni d'un détecteur d'humidité, qui a été placé dans la conduite de sortie du puisard PU-2. En présence d'eau dans la conduite, le programme de l'autoéchantillonneur se déclenche pour collecter des échantillons instantanés jusqu'à la fin de l'événement pluvieux. Chaque échantillon collecté est stocké dans une des bouteilles, qui sont au nombre de 21 (Figure 3.24).



Figure 3.22 Échantillonnage manuel des eaux de ruissellement provenant de la partie imperméable



Figure 3.23 Autoéchantillonneur installé au puisard PU-2



Figure 3.24 Échantillons collectés lors d'un échantillonnage composite automatique

## 3.4.3 Contaminants analysés

Les échantillons récoltés ont été conservés au frais avant leur analyse au laboratoire dans les 24 h afin de mesurer leur concentration en matières en suspension (MES), en azote total, en

phosphore total et dissous, en métaux totaux et dissous ainsi qu'en hydrocarbures C10-C50 totaux. La conductivité électrique de l'eau a été mesurée pour les différents échantillons.

Le contenant des échantillons dépend du contaminant à analyser. Des bouteilles en plastique propres de 1000 ml ont été utilisées pour les MES, l'azote total et le phosphore total. Pour les métaux totaux et dissous, des bouteilles de 50 ml prélavées ont été utilisées. Pour les hydrocarbures C10-C50 totaux, des bouteilles en verre teinté de 950 ml ont été utilisées (Figure 3.25).



#### Figure 3.25 Bouteilles utilisées pour les différents contaminants à analyser

La mesure de la conductivité et les analyses de MES, de phosphore et d'azote total ont été réalisées par les membres de l'équipe de recherche au laboratoire Eau et Environnement de l'Université Laval dirigé par le Prof. Paul Lessard. Les autres analyses ont été réalisées au laboratoire certifié du Centre Eau Terre Environnement de l'INRS par les techniciens du laboratoire. Les analyses ont été réalisées selon les protocoles listés au Tableau 3.6.

	Tableau 3.6 Conservation des	s échantillons et protocoles	s d'analyse des différents contaminants
--	------------------------------	------------------------------	---

Paramètre analysé	Préparation/Conservation des échantillons	Protocole
MES	4°C	Protocole MA 115-S-S. 1.2
DCO	4°C	Hach 8000
Azote	4°C, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Hach TNT 826
Cations majeurs totaux	Prélever 40 ml d'échantillon non filtré bien mélangé, ajouter 0,4 ml de HNO <sub>3</sub> , ajouter 0,2 ml de HCI, chauffer à 100°C pendant 2 h, compléter le volume à 50 ml avec de l'eau ultrapure	Analyse par ICP-AES Agilent 5110 Dual View. US EPA Method # 200.7

Cations majeurs dissous	filtré, HNO₃ 0,2%	
Cations traces totaux	Prélever 40 ml d'échantillon non filtré bien mélangé, ajouter 0,4 ml de HNO <sub>3</sub> , ajouter 0,2 ml de HCI, chauffer à 100°C pendant 2 h, compléter le volume à 50 ml avec de l'eau ultrapure	Analyse par ICP-MS Thermo X series. US EPA Method # 200.8
Cations traces dissous	filtré, HNO <sub>3</sub> 0,2%	
Hydrocarbures totaux	non filtré, 4°C	Extraction liquide-liquide à l'ampoule avec de l'hexane. Purification avec gel de silice. Dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un détecteur à ionisation de flamme (GC-FID Agilent 7890B). Basée sur la méthode "MA.400-Hyd 1.1" du Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ).

# **4 RESULTATS ET DISCUSSION**

Ce chapitre présente les résultats obtenus lors de ce projet de recherche, ainsi que sur leur interprétation. Il s'agit des résultats de suivi du taux d'infiltration de l'enrobé drainant à la section 4.1, ainsi que des résultats d'évaluation des performances hydrologique et environnementale de l'enrobé drainant, respectivement aux sections 4.2 et 4.3.

# 4.1 Suivi du taux d'infiltration de l'enrobé drainant

Les résultats de mesures du taux d'infiltration de l'enrobé drainant effectuées *in situ* sont présentés à la Figure 4.1. Les valeurs de taux d'infiltration mesuré sont rapportées en annexe (section 7.1).



#### Figure 4.1 Taux d'infiltration mesuré au niveau de la zone de l'enrobé drainant

Le taux d'infiltration de l'enrobé drainant varie entre 728 mm/h et 14658 mm/h. Ce taux d'infiltration important permet d'éviter les ruissellements de surface pendant les temps de pluie ; en effet, aucun ruissellement n'a été observé dans la partie perméable pendant la période d'étude. A titre indicatif, l'intensité de la pluie centenaire d'une durée de 15 min à Charlesbourg

(à 10 km du site d'étude) est de 120,3 mm/h. La valeur la plus faible du taux d'infiltration mesuré est bien au-delà de cette valeur, ce qui montre la bonne performance offerte par l'enrobé drainant installé, en termes d'infiltration des eaux pluviales. Sachant que le taux d'infiltration de l'enrobé drainant dépend fortement du type de mélange utilisé, les valeurs obtenues pour notre site restent tout de même du même ordre de grandeur que celles obtenues lors d'études antérieures : soit une valeur moyenne de 14900 mm/h jusqu'à 26900 mm/h dans Roseen et al. (2012) ; plus de 17400 mm/h juste après aménagement dans Al-Rubaei (2013) ; et des valeurs comprises entre 4300 mm/h et 32000 mm/h, dépendamment du type du mélange de l'enrobé drainant, dans le rapport annuel de l'ASCE (2015).

Une variation spatiale du taux d'infiltration est enregistrée, quelles que soient la période et les conditions de la mesure. En se basant sur des observations visuelles, cette variation peut être expliquée par une hétérogénéité de la porosité de l'enrobé drainant due à une non-conformité d'application de l'émulsion de bitume et de gravier, qui reste difficile à caractériser *in situ*.

Aucune corrélation n'a été établie entre le taux d'infiltration et la saison. En effet, l'enrobé drainant procure une bonne infiltration des eaux à basse température (proche à 0°C), ce qui montre que son taux d'infiltration insensible au climat froid. Ceci a été confirmé par Roseen et al. (2012), qui ont démontré une absence de cohérence statistique saisonnière des valeurs du taux d'infiltration de l'enrobé drainant dans un climat froid similaire à celui de Québec.

Pour chaque emplacement de mesure, une variation est enregistrée suivant l'état de surface de l'enrobé drainant. Ceci met en évidence l'effet du colmatage de la surface dû à l'utilisation d'abrasifs durant la période hivernale (Figure 4.2). Avant les opérations de nettoyage printanier du stationnement, en moyenne, 51% et 70% du taux d'infiltration a été perdu, respectivement, lors des étés 2021 et 2022. Des valeurs qui restent relativement élevées par rapport à celles observées par Roseen et al. (2012), soit 25% en 2 ans de suivi. Ceci est possiblement dû à une utilisation excessive d'abrasifs, caractérisée par une application non uniforme causant un effet de colmatage qui varie d'un point à un autre (Figure 4.3). Le programme d'entretien du stationnement élaboré par le MTQ inclut un nettoyage à l'aide d'un camion vacuum à fréquence de deux à quatre fois par année afin de retirer les débris et garder les espaces vides ouverts ; ces débris sont aussitôt stockés dans le réservoir du camion. Cet entretien permet de régénérer le revêtement puisque la plupart des débris s'accumulent dans les premiers centimètres de la surface. En effet, les opérations de nettoyage par camion vacuum effectuées par la Ville de Québec ont permis la restauration partielle du taux d'infiltration perdu, à hauteur de 51% en moyenne. Cette

d'infiltration pendant toute la durée de vie du revêtement perméable. On pourra penser que les opérations de nettoyage démobilisent les débris non aspirés, ce qui faciliterait leur entraînement par le ruissellement de surface vers le réseau de drainage municipal. Cependant, grâce au taux d'infiltration énorme de l'enrobé drainant, aucun ruissellement de surface n'est attendu en temps de pluie et la totalité des eaux de pluie est stockée temporairement dans la couche réservoir de la chaussée perméable, rendant les opérations de nettoyage sans effet nocif sur la qualité de l'eau. Lors de l'étude effectuée par Al-Rubaei et al. (2013), malgré les opérations de nettoyage effectuées, une perte de 18% du taux d'infiltration a été enregistrée sur une période de 25 ans. Ceci remet en question la nécessité d'utilisation d'abrasifs en saison hivernale puisque l'enrobé drainant présente une surface plus rugueuse comparée à l'enrobé conventionnel, qui lui procure une meilleure adhérence en conditions hivernales ; ceci reste à être démontré avec des essais d'adhérence.

Finalement, le site d'étude reste récent. Il est donc impossible d'extrapoler l'évolution du taux d'infiltration de l'enrobé drainant installé sur la base de seulement deux années de suivi.



Figure 4.2 Colmatage de l'enrobé drainant dû à l'application d'abrasifs en saison hivernale



Figure 4.3 Application hétérogène excessive de sable et de sel en saison hivernale
# 4.2 Evaluation de la performance hydrologique de l'enrobé drainant

Dans cette section, les résultats du suivi hydrologique de l'enrobé drainant sont présentés. Il s'agit du potentiel de réduction des volumes et des débits ruisselés mesurés durant la période de suivi, des résultats de calage et de validation du modèle SWMM, puis des résultats de l'utilisation de ce modèle, soit le potentiel de réduction des volumes ruisselés simulés à l'échelle de saisons sur la base de données historiques.

# 4.2.1 Caractérisation de la précipitation et des débits de ruissellement du site

Dans cette sous-section, la précipitation et les débits de ruissellement du site sont caractérisés pour les deux zones, perméable et imperméable, pour les événements de pluie pour lesquels les données pluviométriques et de débit de ruissellement ont été validées. Ceci a permis d'évaluer la performance quantitative de l'enrobé drainant, à savoir son potentiel de réduction des volumes ruisselés totaux ainsi que de réduction des débits de ruissellement maximaux, par rapport à ceux de la partie imperméable.

# 4.2.1.1 Suivi de la pluviométrie sur le site

Le pluviomètre installé sur le toit de la bibliothèque a permis la récolte quotidienne des données de pluie pendant la période comprise entre le 16 juin 2020 et le 1<sup>er</sup> juillet 2022. Cependant, une perte de données a été enregistrée durant deux périodes distinctes, due à des problèmes techniques, rendant la communication impossible avec l'enregistreur de données du pluviomètre. Le Tableau 4.1 rapporte les périodes d'indisponibilité des données de pluie.

Date de début	Date de fin	Durée (jours)
10-15-2021	11-23-2021	39
05-10-2022	05-31-2022	21

Tableau 4.1	Périodes	d'indisponibilité	des données	de pluie
-------------	----------	-------------------	-------------	----------

Le traitement et l'analyse des données de pluie ont concerné la période post aménagement du site expérimental qui coïncide avec la disponibilité de données de débit, soit la période automnale de l'année 2021 et une partie de la période estivale de l'année 2022. Le traitement des séries de

pluie récoltées pendant cette période a permis de définir 30 événements pluvieux hydrologiquement significatifs pour les besoins de cette étude. Les caractéristiques des événements retenus ainsi que les volumes et débits de ruissellement sont présentés à la soussection 4.2.1.3.

## 4.2.1.2 Suivi des débits de ruissellement sur le site

Les équipements de suivi des débits de ruissellement, au niveau des deux zones du stationnement, ont été installés le 2 juin 2021. Cependant, un changement de sondes de mesure de pression installées à l'amont des déversoirs s'est imposé. Les données de pression mesurées par les premières sondes installées étaient enregistrées et sensées être communiquées via réseau cellulaire à l'aide d'un enregistreur de données (Sensor Maid) muni d'une antenne placée au fond du regard RP-1 (Figure 4.4). A cause de l'emplacement de cette dernière, la communication avec l'enregistreur de données n'était pas assurée, ce qui a rendu la collecte des données de pression impossible. Aussi, les sondes étaient trop encombrantes, ce qui augmentait le risque de turbulence à l'amont du déversoir, surtout pour les forts débits ; ce qui affecte l'applicabilité de l'équation de déversoir qui sert à la conversion des hauteurs en débits.





Figure 4.4 Premières sondes de pression et enregistreur de données Sensor Maid, installés le 06/01/21

Afin de remédier à ces problèmes, un changement de sondes de mesure de pression pour des sondes HOBO MX a été effectué le 25 août 2021. Ces dernières sont moins encombrantes par rapport à celles installées en premier lieu, ce qui a permis une mesure de débit avec plus de précision; elles assurent aussi un transfert de données via Bluetooth.

Pour la période comprise entre le 2 juin 2021 et 25 août 2021, soit avant le remplacement des sondes, les mesures de hauteurs d'eau ont servi à détecter la présence de ruissellement en temps de pluie au niveau de la zone perméable.

En raison du froid, qui peut endommager les équipements de suivi, le suivi des débits de ruissellement sur le site d'étude a concerné la période automnale de l'année 2021 et, partiellement, la période estivale de l'année 2022. Le Tableau 4.2 rapporte les périodes de disponibilité des données de débit.

#### Tableau 4.2 Périodes de disponibilité des données de débit

Date de début	Date de fin
08-25-2021	11-26-2021
04-06-2022	01-07-2022

Pour certains événements de pluie, lors de l'analyse des données de débits recueillies, certaines valeurs de hauteur d'eau aberrantes ont été enregistrées. Celles-ci peuvent être causées par une mauvaise configuration des sondes ou un dysfonctionnement de ces dernières pour des raisons qui restent indéterminées. Lors de l'événement n° 30, présenté au Tableau 4.3, les données de hauteur d'eau dans la conduite qui achemine l'eau de ruissellement provenant de la zone imperméable étaient inexploitables (Figure 4.5). Afin de caractériser les débits de ruissellement lors de cet événement, il a été jugé pertinent d'utiliser l'hydrogramme simulé de la zone imperméable par le modèle SWMM, puisque les résultats de calage et de validation étaient satisfaisants.



Figure 4.5 Hyétogramme et hauteurs d'eau à l'amont du déversoir de la zone imperméable avec données aberrantes.

Un événement de pluie a eu lieu les 12 et 13 novembre 2021, qui coïncide avec la période d'indisponibilité des données de pluie (voir Tableau 4.1). Pour cet événement, les données de hauteurs d'eau provenant des deux zones du site présentaient des valeurs supérieures aux valeurs attendues, et dépassaient même parfois le diamètre des conduites (200 mm). Les volumes ruisselés calculés sur la base de ces valeurs de hauteur d'eau étaient irréalistes, correspondant à un événement de pluie d'une hauteur totale de précipitation supérieure à 400 mm. Cependant, la hauteur de précipitation mesurée par la station pluviométrique de l'aéroport Jean-Lesage, à 11,6 km du site d'étude, est autour de 42 mm lors de cet événement. Ceci laisse penser que la hauteur d'eau dans le regard RP-1 a augmenté, dépassant l'élévation des radiers des deux conduites d'entrée (où les débits sont mesurés). Ceci peut être expliqué par de fortes intensités de pluie, qui ont dû générer une mise en charge du réseau de drainage municipal au point de sortie des eaux de ruissellement du stationnement.

## 4.2.1.3 Performance hydrologique du site

Les événements pluvieux pour lesquels les données de pluie et de débit ont été validées ont permis d'évaluer la performance hydrologique de la zone perméable comparée à la zone imperméable. Pour chaque événement pluvial, diverses caractéristiques ont été calculées, présentées au Tableau 4.3. Sur la base des hydrogrammes établis, qui concernent chaque zone, le pourcentage de réduction du débit maximal ainsi que la différence de volume ruisselé entre les parties perméable et imperméable ont été calculés. Afin de normaliser les débits et les volumes de ruissellement, ces derniers ont été divisés par la superficie drainée, du fait que cette dernière est différente dans chaque zone du site d'étude.

Pour certains événements présentés au Tableau 4.3, les volumes et les débits de ruissellement n'ont pas été calculés ; ces événements coïncident avec la période pour laquelle les premières sondes de pression étaient installées (1<sup>er</sup> juin 2021 jusqu'au 25 août 2021). Les hauteurs d'eau mesurées durant cette période n'étaient pas valides ; cependant, ces données ont permis d'évaluer s'il y a eu des effluents au niveau de la chaussée réservoir. Dans le Tableau 4,3, la mention « oui » a été ajoutée dans la colonne correspondant aux volumes ruisselés de la zone perméable pour les événements lors desquels il y a eu des effluents au niveau de la chaussée réservoir.

Certaines caractéristiques de l'événement n° 28 n'ont pas été calculées, dû au fait que cet événement a eu lieu pendant une période d'indisponibilité des données de pluie. Cet événement fait partie des rares événements de la période de suivi du débit pour lesquels il y a eu des effluents au niveau de la partie perméable. C'est pourquoi cet événement a été conservé dans le Tableau 4.3.

Tableau 4.3 Tableau des événements récoltés au site d'étude

Numéro	Date	H	Imoy	Imax	Durée	Durée	V ruisselé	V ruisselé	%	Débit	Débit	%
		totale (mm)	(mm/n )	5 min (mm/h)	ant. sèche	ae pluie	zone imperméa	zone perméable	volume	maximai zone imperméable	perméable	reduction débit
		()	,	(	(h)	(h)	ble (l/m²)	(l/m²)	total (%)	(l/s/m²) x	(l/s/m²) x	maximal
										0,0001	0,0001	(%)
1	6/3/2021	7,4	0,76	4,8	41,0	9,72	-	-	-	-	-	-
2	6/14/2021	10,8	1,39	7,2	252,0	7,77	-	-	-	-	-	-
3	6/16/2021	13,2	1,01	12,0	13,3	12,35	-	-	-	-	-	-
4	6/18/2021	20,6	1,67	16,8	71,56	12,40	-	-	-	-	-	-
5	6/19/2021	5,0	1,12	21,6	8,6	4,45	-	-	-	-	-	-
6	6/21/2021	21,6	3,79	79,2	42,0	5,70	-	-	-	-	-	-
7	6/26/2021	59 <i>,</i> 6	2,13	24,0	106,8	28,00	-	(Oui)	-	-	-	-
8	6/27/2021	13,0	1,12	45,6	8,8	11,56	-	-	-	-	-	-
9	6/30/2021	15,6	1,86	7,2	42,3	8,61	-	-	-	-	-	-
10	6/30/2021	6,0	11,66	28,8	8,7	0,60	-	-	-	-	-	-
11	7/6/2021	10,2	10,52	69,6	142,3	0,90	-	-	-	-	-	-
12	7/8/2021	34,4	2,89	12,0	47,1	11,88	-	(Oui)	-	-	-	-
13	7/14/2021	26,4	1,70	67,2	115,7	15,55	-	-	-	-	-	-
14	7/16/2021	10,6	1,64	33,6	31,1	6,47	-	-	-	-	-	-
15	7/23/2021	6,6	19,05	55,2	173,1	0,30	-	-	-	-	-	-
16	7/25/2021	25,8	4,60	21,6	41,1	5,62	-	(Oui)	-	-	-	-
17	7/26/2021	5,6	0,77	33,6	13,6	7,21	-	-	-	-	-	-
18	8/29/2021	15,8	1,13	12,0	804,0	14,00	14,99	0,00	100%	4,71	0,00	100%
19	9/5/2021	17,4	2,72	26,4	148,8	6,31	17,18	0,00	100%	7,28	0,00	100%
20	9/6/2021	5,8	0,38	7,2	12,5	15,41	5,34	0,00	100%	1,13	0,00	100%
21	9/8/2021	8,6	0,93	14,4	33,1	9,19	8,06	0,00	100%	3,46	0,00	100%
22	9/12/2021	12,4	1,26	19,2	76,3	9,78	11,63	0,00	100%	3,89	0,00	100%
23	9/15/2021	36,4	3,44	48,0	60,7	10,57	35,92	6,64	82%	15,49	1,03	93%
24	9/24/2021	6,8	0,67	9,6	215,5	10,50	6,55	0,00	100%	2,39	0,00	100%

Numéro	Date	H totale (mm)	lmoy (mm/h )	lmax 5 min (mm/h)	Durée ant. sèche (h)	Durée de pluie (h)	V ruisselé zone imperméa ble (I/m²)	V ruisselé zone perméable (l/m²)	% réduction volume total (%)	Débit maximal zone imperméable (l/s/m²) x 0,0001	Débit maximal zone perméable (l/s/m²) x 0,0001	% réduction débit maximal (%)
25	9/27/2021	6,4	1,80	12,0	65,5	3,56	6,07	0,00	100%	3,29	0,00	100%
26	9/29/2021	6,2	0,47	7,2	43,0	13,19	5,71	0,00	100%	1,37	0,00	100%
27	9/30/2021	6,2	1,72	24,0	9,4	3,60	5,78	0,00	100%	5,17	0,00	100%
28	10/16- 17/2021	52 <i>,</i> 0	-	-	378,7	32	49,38	16,02	68%	21,57	1,83	91%
29	4/7/2022	19,0	1,06	7,20	319,2	17,82	18,19	0,00	100%	1,38	0,00	100%
30	6/9/2022	21,4	1,70	21,60	26,1	12,46	21,42	0,16	99%	5,94	0,07	99%

Les événements retenus pour le suivi hydrologique du site expérimental varient de 5 à 59,2 mm en termes de hauteur totale de précipitation, et de 0,3 à 32 h comme durée d'événement. La période de retour de chaque événement a été déterminée à l'aide des courbes IDF de la station Charlesbourg-Parc-Orléans (Maillot et Talbot, 2022). L'ensemble des événements ont une récurrence de moins de 2 ans.

En comparaison avec la zone imperméable aménagée en enrobé conventionnel, la chaussée perméable jumelée à l'enrobé drainant a permis de réduire considérablement les volumes et les débits de ruissellement. Excepté pour les événements n° 7, 12, 13, 23, 28 et 30, l'eau précipitée s'est totalement infiltrée à travers le sol sous-jacent à l'ouvrage, ce qui se traduit par un pourcentage de réduction des volumes et des débits de 100%. La performance hydrologique de l'enrobé drainant a été évalué pour les trois événements où il y a eu une infiltration seulement partielle à travers le sol (Figures 4.6, 4.7 et 4.8). Le potentiel de réduction des volumes et des débits de l'enrobé drainant varient respectivement de 68% à 99% et de 91% à 99% pour ces trois événements. En termes de volume ruisselé, cette performance hydrologique dépend fortement de la hauteur totale précipitée de l'événement ainsi que de la période antécédente sans pluie. Pour presque la même hauteur totale précipitée, lors des événements n°6 et n°30 (21 mm), l'eau retenue temporairement dans la couche réservoir s'est infiltrée totalement lors de l'événement n°6, alors que lors de l'événement n°30, une faible quantité d'eau a été évacuée par le drain souterrain. Ceci est expliqué par le fait que contrairement à l'événement n°6, lors de l'événement n°30 la couche réservoir était initialement partiellement remplie, puisque l'événement a été précédé par un autre événement d'une hauteur totale de 24 mm, avec une durée inter-événement ne dépassant pas 27 h.

La configuration de la conception adoptée pour la chaussée réservoir aménagée au site d'étude (détaillée plus tôt dans la section 3.1.1), soit un indice de vide de 30%, devrait procurer un volume de réserve utile avoisinant 140 m<sup>3</sup>, dépassant ainsi les volumes précipités durant les événements lors desquels des effluents au niveau du drain ont été observés. Ceci peut être expliqué par un écart entre les plans et la réalisation, à savoir l'épaisseur de la couche réservoir qui est en réalité plus faible que ce qui était prévu, ou son indice de vide qui a une valeur plus faible, affectée soit par le fuseau granulométrique de la pierre nette réellement utilisée ou soit par le compactage des différentes couches de la chaussée.

Les valeurs du potentiel de réduction des volumes et des débits de l'enrobé drainant installé restent tout de même du même ordre de grandeur que celles obtenues lors d'études antérieures. Legret et Colandini (1999) ont évalué la réduction des volumes de ruissellement par un enrobé

drainant avec drain souterrain à 97% à l'échelle annuelle. Lors d'une étude effectuée par Roseen et al. (2012), qui consistait à évaluer le potentiel d'infiltration de l'enrobé drainant, une réduction des volumes de ruissellement de 98% a été atteinte. Avec des sols indigènes de faible perméabilité, Stenmark (1995) a établi un potentiel de réduction des volumes ruisselés de 50 à 81% et une réduction des débits de 75 à 92%, dépendamment de la hauteur de précipitation ainsi que de la période antérieure sèche de l'événement.



Figure 4.6 Hydrogramme et hyétogramme de l'événement n°23







Figure 4.8 Hydrogramme et hyétogramme de l'événement n°30

#### 4.2.2 Modélisation du site d'étude

Dans cette section, les résultats de modélisation du site d'étude sur SWMM sont présentés. Il s'agit de l'analyse de sensibilité ainsi que des résultats de calage et de validation du modèle pour chaque sous-bassin. La section présente aussi les résultats d'évaluation de la performance quantitative de l'enrobé drainant à l'échelle de saisons historiques en utilisant le modèle SWMM.

#### 4.2.3.1 Analyse de sensibilité

Comme décrit à la section 3.3.6, une analyse de sensibilité du modèle a été distinctement effectuée pour les deux sous-bassins, suivant le volume de ruissellement total et le débit maximal comme valeurs de sortie du modèle, pour les différents paramètres inconnus. Cela a été fait à l'aide du module STRC de PCSWMM, grâce auquel le taux de variation a aussi été calculé.

L'événement n° 23 a été utilisé pour de l'analyse de sensibilité du modèle. Sachant qu'il a servi aussi au calage du modèle, le choix de ce dernier s'est basé sur la disponibilité et la validité des données de débit provenant des deux zones du site ainsi que des données de pluie.

#### Sous-bassin perméable LID (zone de l'enrobé drainant) :

Les résultats de sensibilité du modèle en termes de volume total ruisselé sont présentés aux Figures 4.9 et 4.10. Dans un ordre décroissant, la pente de conductivité, la porosité, le taux de fuite et la capacité capillaire ont un effet de réduction sur le volume total ruisselé. Par définition, la porosité et la capacité capillaire de la couche de sol affectent le volume qui parvient à la couche sous-jacente (couche réservoir). L'augmentation de la porosité se traduit par une augmentation des volumes de vide dans la couche de sol, augmentant ainsi le volume occupé par l'eau infiltrée à travers la couche de l'enrobé drainant. Sachant que la capacité capillaire représente le volume d'eau retenu par le sol une fois drainé, l'augmentation de cette dernière favorise la rétention en eau du sol. D'une autre part, la pente de conductivité affecte surtout la vitesse d'infiltration de l'eau à travers la couche de sol. L'augmentation de la pente de conductivité se traduit par une diminution rapide de la conductivité du sol en fonction de son humidité, diminuant ainsi le débit d'infiltration de l'eau vers la couche réservoir, ce qui favorise l'infiltration souterraine de l'eau. Quant au taux de fuite, son augmentation signifie une augmentation du volume qui s'infiltre vers le sol sous la couche réservoir, diminuant ainsi le volume d'eau évacué par le drain souterrain. Pour leur part, la conductivité du sol et le point de flétrissement ont un impact positif sur le volume ruisselé. L'augmentation de la conductivité augmente le débit de remplissage de la couche

réservoir, réduisant l'infiltration souterraine, ce qui favorise l'évacuation d'eau par le drain souterrain. En revanche, le ratio des vides de l'enrobé drainant et le coefficient du drain sont sans effet. Ceci est dû à la valeur centrale de la porosité prise en compte lors de l'analyse de sensibilité. En effet, à une certaine valeur de la pente de conductivité (< 17), le coefficient de drain et le ratio des vides n'ont aucun effet.





Figure 4.9 Variation du volume total ruisselé de la zone perméable lors de l'événement n°23 (module STRC)

Figure 4.10 Taux de variation normalisé du volume total ruisselé de la zone perméable lors de l'événement n°23 (module STRC)

Les Figures 4.11 et 4.12 présentent les résultats de sensibilité du modèle en termes de débit maximal ruisselé. La porosité et la pente de conductivité ont le plus grand effet de réduction sur le débit maximal ruisselé. La conductivité du sol suivie par la capacité capillaire ont un effet d'accroissement sur le débit maximal. L'effet de tous ces paramètres est attendu, excepté celui de la capacité capillaire, qui est supposée avoir un faible effet de réduction sur le débit, dépendamment des caractéristiques de l'événement de pluie. Cependant, le ratio de vides de l'enrobé drainant, le point de flétrissement ainsi que le coefficient du drain n'ont aucun effet.

Similairement aux résultats de sensibilité du modèle en termes de volume, le modèle est insensible au coefficient du drain et au ratio de vides de l'enrobé drainant lorsque la pente de conductivité est inférieure à 17.



Figure 4.11 Variation du débit maximal ruisselé de la zone perméable lors de l'événement n°23 (module STRC)



Figure 4.12 Taux de variation normalisé du débit maximal ruisselé de la zone perméable lors de l'événement n°23 (module STRC)

#### Sous-bassin imperméable (zone de l'enrobé conventionnel) :

Le premier paramètre de sortie du modèle considéré lors de l'analyse de sensibilité du modèle est le volume total ruisselé. Les résultats de cette analyse sont présentés aux Figures 4.13 et 4.14. Le stockage en surface imperméable est le seul paramètre qui a un impact significatif sur le volume total ruisselé de la zone imperméable. Ceci est attendu, puisque le stockage en surface

imperméable est le seul paramètre qui agit directement sur le volume ruisselé, puisqu'il représente la quantité d'eau retenue par la surface.



Figure 4.13 Variation du volume total ruisselé de la zone imperméable lors de l'événement n°23 (module STRC)



Figure 4.14 Taux de variation normalisé du volume total ruisselé de la zone imperméable lors de l'événement n°23 (module STRC)

En revanche, le débit maximal ruisselé en zone imperméable est réduit par le stockage en surface imperméable, suivi par le coefficient de rugosité de Manning. L'augmentation du coefficient de Manning de la surface imperméable fait en sorte d'augmenter les forces de cisaillement au niveau de la surface de contact eau/surface imperméable, ce qui engendre une diminution des vitesses d'écoulement et une augmentation du tirant hydraulique, pour les mêmes largeur et longueur d'écoulement. Pour des vitesses d'écoulement plus réduites, le temps de séjour du volume ruisselé est plus grand et le temps de réponse est plus grand entre la variation du débit entrant

(intensité de précipitation) et la variation du débit sortant (de ruissellement), puisque les volumes entrants nécessitent plus de temps afin de parvenir à l'exutoire. Ceci explique la diminution du débit maximal avec l'augmentation du coefficient de rugosité Manning. Ainsi, il a fallu plus de temps pour atteindre un débit constant maximal pour une intensité maximale de précipitation constante, ce qui n'est pas le cas pour l'événement utilisé lors de l'analyse de sensibilité, pour lequel le débit maximal a été atteint en réponse à une intensité maximale de très courte durée. faisant en sorte que le débit maximal enregistré lors d'une augmentation du coefficient de Manning est plus faible. La largeur d'écoulement et la pente ont un effet d'accroissement sur le débit maximal ruisselé. En augmentant la largeur d'écoulement, la longueur de l'écoulement diminue, rendant le temps de parcours des eaux ruisselées plus court. Ceci est expliqué par le fait que le modèle représente le sous-bassin comme un canal rectangulaire dont la largeur et la longueur correspondent respectivement à la largeur d'écoulement et à la longueur d'écoulement du sous-bassin. Donc, avec un plus grand parcours d'écoulement généré par une diminution de la largeur d'écoulement, l'information de variation de débit d'entrée (l'intensité de précipitation) nécessite plus de temps pour parvenir à l'exutoire, ce qui s'exprime par la variation du débit de ruissellement. Aussi, tel expliqué précédemment, l'effet de la variation de la largeur d'écoulement sur le débit maximal devrait être plus important lors des événements de pluie qui représentent de fortes augmentations d'intensités de pluie sur de courtes périodes. Dans le même ordre d'idée, la diminution de la pente se traduit par une diminution des vitesses d'écoulement et, donc, par une diminution du débit maximal de ruissellement.



Figure 4.15 Variation du débit maximal ruisselé de la zone perméable lors de l'événement n°23 (module STRC)



Figure 4.16 Taux de variation normalisé du débit maximal ruisselé de la zone perméable lors de l'événement n°23 (module STRC)

## 4.2.3.2 Calage et validation du modèle

Guidé par les résultats de l'analyse de sensibilité, le calage du modèle a été effectué suivant les étapes annoncées à la section 3.3.7. Dans ce qui suit, les résultats de calage et de validation sont détaillés pour chaque zone du site d'étude (perméable et imperméable).

Les événements utilisés pour le calage et la validation du modèle sont présentés au Tableau 4.4. Un seul événement a servi au calage du module LID, vu qu'il représente l'unique événement pluvial pour lequel il y a eu des effluents au niveau de la chaussée poreuse avec disponibilité des données de pluie. Les conditions initiales ont un effet important sur les volumes ruisselés. Par faute d'indisponibilité des données de précipitation lors de l'événement de pluie additionnel pour lequel il y a eu des effluents au niveau de la chaussée perméable, il était impossible d'effectuer un calage en utilisant ce deuxième événement. L'étude se poursuit pour deux années supplémentaires de suivi pendant laquelle il sera impératif de valider le modèle avec d'autres événements ou encore d'améliorer son calage.

Numéro de	Numéro de Date de Hauteur Dure		Durée de	Utilisation						
revenement	revenement	pluie (mm)	(h)	Calage	Validation					
	Zone perméable (LID : enrobé drainant)									
23	9/15/2021	36,4	10,57	x						
30	6/9/2022	21,4	12,46		x					
Zone imperméable (enrobé conventionnel)										
23	9/15/2021	36,4	10,57	x						
18	8/29/2021	15,8	14,00	x						
19	9/5/2021	17,4	6,31		x					

Tableau 4.4 Événements utilisés lors du processus de calage et de validation du modèle

## Sous-bassin perméable LID (zone de l'enrobé drainant) :

Au départ, l'événement n°23 a été simulé avec le modèle en utilisant les valeurs centrales des différents paramètres inconnus du module LID (voir section 3.3.6). Par contre, contrairement au volume observé, le volume ruisselé simulé avec ces valeurs était nul. C'est pourquoi, comme première approche, les valeurs des différents paramètres inconnus affectant le volume de ruissellement ont été optimisées suivant leurs plages de variation de façon à favoriser l'infiltration vers la couche réservoir. Mais ceci a été fait en vain, le volume simulé lors de cette modification étant toujours nul. Il a donc fallu estimer le volume de stockage de la couche réservoir pour valider les données observées. Ce volume dépend principalement du volume total de la couche réservoir, de la hauteur du drain ainsi que de l'indice des vides de la pierre nette qui constitue ladite couche. Sachant que SWMM modélise la chaussée perméable suivant des couches horizontales de même surface (voir le modèle conceptuel du module LID, Figure 3.17), ceci représente une limitation de modélisation, puisqu'en réalité la chaussée perméable aménagée sur le site d'étude est conçue suivant un talus 1:2 réduisant ainsi le volume total de la couche réservoir (voir Figure 3.4). Aussi, pour un indice de vide de 30% (défini sur les plans de conception), le volume procuré par la couche réservoir reste largement supérieur au volume

précipité lors de l'événement n°16 (hauteur de pluie = 25,6 mm), soit le plus petit événement observé pour lequel il y a eu des effluents au niveau du drain de la chaussée perméable. Afin de compenser la surestimation du volume de stockage due à la forme du modèle conceptuel du module LID et à la surestimation (supposée) de l'indice de vide de la couche réservoir, une valeur de 10% pour ce dernier a été fixée. Cette valeur a été choisie de façon que le volume précipité lors l'événement n°16 soit sensiblement supérieur au volume de stockage procuré par la couche réservoir.

L'outil de calage automatique STRC de PCSWMM a été testé et s'est avéré insuffisant. C'est pourquoi un calage manuel suivant un procédé d'essais-erreurs a été suivi pour raffiner les résultats du calage automatique. La première étape du calage du modèle, comme annoncé à la section 3.3.7, consistait à ajuster le volume ruisselé en agissant sur les paramètres qui ont le plus d'impact sur ce dernier. Suivant l'analyse de sensibilité, la porosité et la pente de conductivité ont le plus d'impact sur le volume ainsi que sur le débit de ruissellement. En premier lieu, ils ont été automatiquement optimisés à l'aide de l'outil STRC. Ces valeurs optimisées ont été fixées lors des prochaines étapes du calage. Ensuite, le taux de fuite, étant le 3<sup>e</sup> paramètre ayant le plus d'impact sur le volume ruisselé. La capacité capillaire et le point de flétrissement agissent en opposition sur le volume ruisselé. Afin de simplifier le processus, la différence entre la capacité capillaire et le point de flétrissement ad été capillaire et le point de flétrissement agissent en opposition, tout en veillant à ce que la capacité capillaire soit toujours supérieure au point de flétrissement. Ceci a permis d'affiner le résultat d'ajustement du volume ruisselé, pour obtenir un écart de 1% entre les volumes observé et simulé.

La deuxième étape du calage avait comme objectif de synchroniser l'hydrogramme simulé avec celui observé. Pour ce faire, la conductivité hydraulique a été optimisée automatiquement à l'aide de l'outil STRC. Puis, le résultat a été affiné manuellement suivant des variations itératives graduelles de 1%. Sachant que la conductivité hydraulique affecte aussi le volume ruisselé, la variation de cette dernière a engendré une augmentation de l'écart sur le volume, mais qui reste faible. A la fin de ces deux étapes, les valeurs obtenues des paramètres inconnus restent dans les plages physiquement logiques. Elles sont présentées au Tableau 4.5.

Paramètre	Unité	Valeur
Porosité	Fraction de volume	0,47
Capacité capillaire	Fraction de volume	0,11
Point de flétrissement	Fraction de volume	0,07
Conductivité	mm/h	240
Pente de conductivité	Sans dimension	11
Tension capillaire	mm	0,1
Taux d'exfiltration	mm/h	0,7
Indice des vides de la couche réservoir	%	10
Coefficient du drain	mm/h	104

Tableau 4.5 Valeurs des paramètres inconnus du module LID obtenues lors du calage du modèle

L'hydrogramme mesuré présente de nombreuses pointes de débits, qui ont été observées aussi sur le terrain, dont la cause reste non identifiable. En effet, les écoulements du drain se produisaient par à-coups, qui n'ont pas pu être expliqués avec les informations disponibles. Vu les hypothèses du modèle, et la manière dont il est conçu, ces variations de débit observées ne peuvent pas être modélisées, et elles n'ont pas non plus à l'être pour les besoins de cette étude. C'est pourquoi le calage du module LID a consisté à ajuster le volume et le synchronisme de l'hydrogramme sans toutefois être capable de reproduire les variations des débits. Ceci a grandement affecté le coefficient de Nash-Sutcliffe. Cependant, le résultat atteint a été jugé acceptable pour les besoins de l'étude, vu les différents problèmes rencontrés et les limites que SWMM présente.

Les résultats du calage avec l'événement n°23 sont présentés au Tableau 4.6 et à la Figure 4.18.

Tableau 4.6 Résultats de calage du module	e LID
---	-------

Numéro de l'événement	Volume ruisselé observé (I)	Volume ruisselé simulé (I)	Ecart sur le volume (%)	Coefficient de Nash
23	5674	6225	9,7	0,274



Figure 4.17 Résultat de calage du module LID, événement n°23

À la suite du calage du module LID, une validation a été effectuée en utilisant le seul autre événement pour lequel il y a eu des effluents au niveau de la chaussée perméable avec disponibilité de données valides de pluie et de débit. L'événement utilisé et les résultats de la validation sont présentés à la Figure 4.18.



Figure 4.18 Résultat de validation du module LID, événement n°30

Aucun débit n'est simulé par le modèle lors de l'événement n°30. Cet événement est caractérisé par un très faible volume observé, ne dépassant pas 139 L. Cette valeur de volume est incluse dans l'erreur relative assumée lors du calage du modèle. L'objectif du calage était la reproduction du comportement moyen de la chaussée réservoir afin de simuler correctement le débit et le volume ruisselé en zone perméable. L'événement n°30, avec sa faible valeur de volume observé, laisse penser que le modèle reproduit moins bien les événements à très faible volume ruisselé. Mais il est considéré que le modèle reste tout de même valide pour la majorité des événements de pluie utilisés lors de l'évaluation de la performance hydrologique sur la base des données historiques, présentée plus tard dans le mémoire (section 4.2.3.2).

## Sous-bassin imperméable (zone de l'enrobé conventionnel) :

Pour la partie imperméable, un calage automatique en utilisant le module STRC a apporté de très bons résultats. Afin d'affiner l'ajustement, un calage manuel a été effectué par la suite, en agissant sur la hauteur de stockage en zone imperméable afin d'améliorer le plus possible la réponse du modèle au début de l'événement. Les valeurs des différents paramètres à déterminer à la fin du procédé de calage sont présentées au Tableau 4.7. Notons que ces valeurs restent dans les plages physiquement logiques.

Tableau 4.7 Valeurs des paramètres inconnus après le calage du modèle de la zone imper
--

Paramètre	Unité	Valeur
Largeur d'écoulement	m	57
Pente	%	1,02
Hauteur de stockage (dépression) sur surfaces imperméables	mm	0,75
Rugosité de surface imperméable (n de Manning)	Sans dimension	0,027

Les résultats du calage et ses indicateurs de qualité sont présentés au Tableau 4.7 et aux Figures 4.19 et 4.20.

Tableau 4.8 Résultats de calage du modèle de la partie imperméable

Numéro de l'événement	Volume ruisselé observé (I)	Volume ruisselé simulé (I)	Ecart sur le volume (%)	Coefficient de Nash
18	7932	7886	0,5	0,873
23	19000	19090	0,1	0,872



Figure 4.19 Résultats de calage du modèle de la zone imperméable, événement n°23



#### Figure 4.20 Résultats de calage du modèle de la zone imperméable, événement n°18

Les hydrogrammes simulés pour les deux événements épousent les hydrogrammes observés, que ce soit lors de la crue ou de la décrue. Les débits maximaux sont bien représentés. Ceci se traduit par un écart sur les volumes ne dépassant pas 0,5% et un coefficient de NASH > 0,87.

Une validation du modèle a été effectuée avec l'événement n°19. Les indicateurs numériques ainsi que les hydrogrammes de cette validation sont présentés au Tableau 4.8 et à la Figure 4.21.

Numéro de l'événement	Volume ruisselé observé (I)	Volume ruisselé simulé (I)	Ecart sur le volume (%)	Coefficient de Nash
19	9090	8571	5,7	0,745

Tableau 4.9 Résultats de validation du modèle de la zone imperméable



#### Figure 4.21 Résultats de validation du modèle de la zone imperméable, événement n°19

La valeur du coefficient de Nash indique que le modèle reproduit très bien les débits ; un écart de volume ne dépassant pas 6% confirme également que le modèle reproduit acceptablement les volumes. La courbe simulée est presque confondue à la courbe observée, excepté les débits de pointe, qui sont moins bien représentés. Le résultat de la validation est jugé satisfaisant.

#### 4.2.3 Performance quantitative de l'enrobé drainant à l'échelle de saisons historiques

Le modèle élaboré a permis d'étudier le site sur le plan hydrologique sans être tributaire des événements pluvieux qui ont eu lieu durant la période de suivi. Les résultats d'évaluation de la performance quantitative de l'enrobé drainant à l'échelle de saisons selon des données historiques sont présentés dans cette section.

#### 4.2.3.1 Traitement des données de pluie historiques

Les données manquantes dans une série de pluie historique peuvent engendrer un réel problème de sous-estimation des hauteurs totales précipitées durant la saison. Ceci pourrait entraîner une surestimation de la performance quantitative de l'enrobé drainant à l'échelle de la saison. C'est pourquoi la série de pluie utilisée a été assujettie à une analyse préalable, qui consistait à évaluer les périodes d'indisponibilité de données. Les résultats du traitement sont présentés au Tableau 4.9.

Saison	Période de données manquantes (j)	Retenue	Non retenue
2018	11		X
2017	1	х	
2016	10		X
2015	0	х	
2014	0	х	
2013	153		X
2012	92		Х
2011	12		Х
2010	28		X
2009	5	х	
2007	1	х	
2006	13		Х
2005	4	х	
2004	30		X
2003	18		Х
2002	31		X
2001	36		Х
2000	184		Х
1999	184		Х

Tableau 4.10 Saisons retenues après le traitement de la série de pluie

Suite à cette analyse, six saisons ont été retenues ; celles-ci ne présentent pas ou presque pas de données manquantes.

## 4.2.3.2 Performance quantitative de l'enrobé drainant

Le comportement hydrologique du site d'étude a été simulé par le modèle SWMM pour chaque saison retenue suite au traitement de la série de pluie historique. Le pourcentage de réduction du volume ruisselé procuré par l'enrobé drainant en comparaison avec le volume ruisselé dans la zone imperméable (enrobé conventionnel) a été calculé. Les résultats sont présentés au Tableau 4.11.

Saison	Hauteur totale	Enrobé	drainant	Enrobé co	nventionnel	
	de pluie (mm)	Volume total (I)	Volume total (I/m <sup>2</sup> )	Volume total (I)	Volume total (I/m <sup>2</sup> )	% réduction de volume
2017	718,3	120500	141,10	504500	964,63	85%
2015	736,6	118700	139,90	512000	978,97	86%
2014	788,8	165500	193,79	585800	1120,08	83%
2008	858,1	138700	162,41	597300	1142,07	86%
2007	643,1	70300	82,32	413200	790,06	90%
2005	640,0	167600	196,25	510500	976,10	80%

A l'échelle des saisons, l'enrobé drainant procure un grand potentiel de réduction des volumes ruisselés, qui varie entre 80% et 90%. Ces valeurs restent légèrement inférieures à celles trouvées par Legret et Colandini (1999). Lors de leur étude, sur la base de mesures expérimentales *in situ*, Legret et Colandini (1999) ont établi une réduction de volume de ruissellement de 97% à l'échelle annuelle, qui, par contre, a été atteinte pour un plus grand volume de stockage. Plusieurs facteurs ont un impact sur le potentiel hydrologique de l'enrobé drainant, à savoir la pluviométrie sur le site, le volume de stockage ainsi que la perméabilité du sol indigène sous-jacent à l'ouvrage.

A l'échelle des événements de pluie, le potentiel hydrologique de l'enrobé drainant dépend étroitement du type d'événement. C'est pourquoi une analyse approfondie a été effectuée à l'échelle des événements ; celle-ci avait comme objectif de déterminer les caractéristiques de l'événement qui ont le plus d'impact sur le potentiel de réduction des volumes et des débits de pointe. L'analyse s'est limitée aux événements de pluie pour lesquels il y a eu des effluents au

niveau de la chaussée perméable. Les caractéristiques de tous ces types d'événements qui ont eu lieu durant les saisons historiques retenues et leurs performances hydrologiques sont présentées au Tableau 4.12.

Evénement	Hauteur totale de	Durée (h)	Intensité moy.	Intensit é max.	Période sans	e Enrobé drainant			Enrobé conventionnel			9	Potentiel hydrologique		
	pluie (mm)		(mm/h)	(mm/h)	pluie (h)	Q max (I/s)	Q max (ml/s/m²)	V (I)	V (l/m²)	Q max (/s)	Q max (I/s/m ²)	V (I)	V (l/m²)	% réduction Q max	% réduction V
6/16/2005	39,6	28,00	1,4	16,8	6,5	0,59	0,69	9760	11,43	1,42	2,72	30810	58,91	75%	81%
6/19/2008	27,3	19,23	1,4	34,8	8,2	0,61	0,72	12010	14,06	4,84	9,26	26580	50,82	92%	72%
8/4/2010	39,6	3,65	10,8	92,4	8,5	1,78	2,08	27530	32,24	11,70	22,37	48960	93,61	91%	66%
10/14/2005	89,8	46,47	1,9	15,6	11,3	0,84	0,98	45900	53,75	2,56	4,89	93630	179,02	80%	70%
7/29/2014	65,5	19,36	3,4	42,0	14,5	2,35	2,75	43160	50,54	7,17	13,72	77940	149,02	80%	66%
7/28/2014	65,5	16,24	4,0	42,2	15,0	2,35	2,75	43160	50,54	7,17	13,72	77870	148,89	80%	66%
9/13/2015	36,8	20,67	1,8	42,0	15,2	0,63	0,74	8603	10,07	5,76	11,02	28180	53,88	93%	81%
7/17/2006	34,7	13,29	2,6	73,2	19,2	0,63	0,74	10460	12,25	10,13	19,37	29070	55,58	96%	78%
6/16/2008	21,6	12,70	1,7	54,0	20,0	0,45	0,53	5516	6,46	6,75	12,90	17050	32,60	96%	80%
5/29/2009	37,7	28,73	1,3	8,4	27,8	0,60	0,70	9389	10,99	1,29	2,47	29360	56,14	72%	80%
9/9/2004	121	28,22	4,3	48,0	29,8	2,44	2,85	79350	92,92	5,73	10,95	143800	274,95	74%	66%
9/30/2010	52,9	32,13	1,6	37,2	31,9	0,64	0,74	21800	25,53	2,11	4,03	49840	95,30	82%	73%
10/1/2010	52,9	32,07	1,6	24,0	33,5	0,64	0,74	21800	25,53	2,11	4,03	49820	95,26	82%	73%
9/6/2010	44,2	48,66	0,9	24,0	34,7	0,39	0,45	6347	7,43	2,20	4,20	29790	56,96	89%	87%
9/22/2005	34,1	22,80	1,5	22,0	37,0	0,42	0,50	7037	8,24	2,16	4,12	25200	48,18	88%	83%
9/14/2008	35,3	24,00	1,5	27,6	38,0	0,46	0,53	7349	8,61	3,41	6,51	26040	49,79	92%	83%
7/1/2015	66,7	13,33	5,0	27,6	39,9	1,38	1,61	27440	32,13	2,92	5,59	62010	118,57	71%	73%
7/31/2004	68,3	25,51	2,7	67,2	42,7	1,51	1,77	35220	41,24	8,25	15,77	71730	137,15	89%	70%
8/31/2005	78,5	20,13	3,9	27,6	44,0	2,09	2,45	49950	58,49	4,12	7,87	91590	175,12	69%	67%
10/8/2014	33,1	31,00	1,1	12,0	45,0	0,35	0,41	2705	3,17	1,59	3,04	20660	39,50	87%	92%
9/28/2010	48,1	27,83	1,7	37,2	46,6	0,70	0,82	15660	18,34	4,92	9,41	41210	78,80	91%	77%
9/25/2005	80,5	22,17	3,6	18,0	56,9	1,12	1,31	49020	57,40	3,38	6,46	95540	182,68	80%	69%
6/29/2006	38,5	16,38	2,4	16,8	57,7	0,69	0,81	13010	15,23	1,50	2,87	33400	63,86	72%	76%
6/6/2005	33,8	22,42	1,5	56,4	61,0	0,45	0,53	5949	6,97	3,69	7,05	13880	26,54	92%	74%
8/13/2014	90,9	27,90	3,3	12,0	65,8	1,04	1,22	53350	62,47	2,16	4,12	101500	194,07	70%	68%

Tableau 4.12 Performance hydrologique de l'enrobé drainant lors des événements simulés

Evénement	Hauteur totale de	Durée (h)	Intensité mov.	Intensit é max.	Période sans	Enrobé drainant Enrobé conventionnel Potentiel H			Enrobé conventionnel			Potentiel hy	ydrologique		
	pluie (mm)		(mm/h)	(mm/h)	pluie (h)	Q max (I/s)	Q max (ml/s/m²)	V (I)	V (l/m²)	Q max (/s)	Q max (I/s/m ²)	V (I)	V (l/m²)	% réduction Q max	% réduction V
9/21/2018	36,2	16,23	2,2	30,0	68,0	0,50	0,59	9865	11,55	3,72	7,12	29120	55,68	92%	79%
7/15/2004	27,1	13,35	2,0	16,8	77,8	0,39	0,46	4235	4,96	2,37	4,53	18540	35,45	90%	86%
10/28/2015	45,0	17,53	2,6	15,6	79,4	0,68	0,80	17970	21,04	1,99	3,81	41750	79,83	79%	74%
10/23/2009	38,0	39,88	1,0	7,2	79,9	0,43	0,51	8113	9,50	1,14	2,19	28200	53,92	77%	82%
10/25/2008	38,1	21,20	1,8	15,6	80,6	0,78	0,91	12700	14,87	1,83	3,50	32870	62,85	74%	76%
9/27/2008	37,5	27,74	1,4	15,0	83,8	0,61	0,71	9586	11,22	1,62	3,10	29400	56,21	77%	80%
9/13/2010	34,7	26,32	1,3	42,0	92,2	0,42	0,50	5770	6,76	5,09	9,74	24230	46,33	95%	85%
8/11/2015	74,7	25,81	2,9	14,4	105,8	1,47	1,72	40070	46,92	2,96	5,65	79610	152,22	70%	69%
8/21/2016	27,2	21,60	1,3	12,0	107,5	0,45	0,53	4480	5,25	1,50	2,86	18960	36,25	82%	86%
5/4/2015	28,7	19,51	1,5	10,8	109,9	0,46	0,54	4899	5,74	2,43	4,64	22400	42,83	88%	87%
10/4/2014	42,5	21,60	2,0	14,4	120,0	1,02	1,20	15890	18,61	1,83	3,50	38400	73,42	66%	75%
5/22/2012	27,7	18,95	1,5	18,0	125,1	0,40	0,47	4176	4,89	2,12	4,05	18870	36,08	88%	86%
10/15/2017	49,3	19,93	2,5	37,2	130,6	0,94	1,10	19440	22,76	3,76	7,20	45670	87,32	85%	74%
10/12/2006	40,0	26,36	1,5	21,6	171,4	0,61	0,71	12030	14,09	2,70	5,17	33510	64,07	86%	78%
8/4/2017	54,3	33,22	1,6	44,4	184,3	1,05	1,23	21820	25,55	5,92	11,31	51050	97,61	89%	74%
8/4/2017	54,2	30,00	1,8	44,4	185,8	1,05	1,23	21820	25,55	5,92	11,31	51020	97,55	89%	74%
10/24/2017	57,2	16,10	3,6	49,2	205,4	1,52	1,78	28950	33,90	6,51	12,45	59320	113,42	86%	70%
10/15/2004	58,2	26,73	2,2	20,4	212,9	1,00	1,17	24570	28,77	2,40	4,60	55480	106,08	74%	73%
10/20/2016	115,4	86,40	1,3	12,0	264,0	0,74	0,86	57550	67,39	1,84	3,51	118700	226,96	75%	70%

Un bon potentiel de réduction du volume ruisselé a été constaté à l'échelle des événements, compris entre 65% et 92%. Les valeurs supérieures ont été enregistrées lors des événements les plus petits en termes de hauteur de pluie (Figure 4.22). Quant au potentiel de réduction du débit maximal, il varie entre 65% et 96%. Particulièrement, il a tendance à être supérieur lors des événements de pluie intense (Figure 4.23). Même pour des événements de pluie avec une récurrence de plus de 50 ans (hauteur de pluie > 103,4 mm), l'enrobé drainant permet une réduction de volume et de débit satisfaisante, qui reste supérieure à 60%.



Figure 4.22 Potentiel de réduction du volume en fonction de la hauteur de précipitation



Figure 4.23 Potentiel de réduction du débit de pointe en fonction de l'intensité max. sur 5 minutes de précipitation

Afin de mesurer le degré d'association entre les caractéristiques de l'événement pluvial et le potentiel de réduction du volume et du débit maximal de l'enrobé drainant, le coefficient de corrélation de Spearman a été calculé. Ce coefficient évalue la relation monotone, mais pas nécessairement linéaire, entre deux variables. Dans une relation monotone, les deux variables ont tendance à changer ensemble, mais pas nécessairement à un taux fixe. Les résultats d'estimation de la corrélation sont présentés au Tableau 4.13.

Tableau 4.13 Degré d'association des caractéristiques de l'événement de pluie avec la performance hydrologique de l'enrobé drainant pour les résultats du modèle PCSWMM.

Variable indépendante	Variable dépendante	Coefficient de corrélation Spearman	Degré d'association
Hauteur totale de précipitation (mm)	% de réduction du volume total	-1,00	Corrélation parfaite de signe négatif
Intensité maximale sur 5 min (mm/h)	% de réduction du débit maximal	0,58	Corrélation moyenne de signe positif
Période précédente sans pluie (h)	% de réduction du volume total	0,17	Corrélation très faible de signe positif
Période précédente sans pluie < 30 h (h)	% de réduction du volume total	0,29	Corrélation faible de signe positif
Période précédente sans pluie > 30 h (h)	% de réduction du volume total	0,1	Corrélation non significative

La tendance d'augmentation de la réduction du volume est parfaitement corrélée avec la diminution de la hauteur totale de précipitation. Ceci reflète l'importance du volume de stockage de la couche réservoir dans la performance hydrologique de la chaussée perméable. Pour une période précédente sans pluie inférieure à 30 h, l'effet du changement de cette dernière sur la réduction des volumes est plus grand, comparé à l'effet des périodes précédentes sans pluie supérieures à 30 h pour lesquelles une corrélation non significative a été remarquée. Ceci laisse à penser qu'au-delà de 30 h, l'effet d'un événement de pluie précédent est non significatif et que les conditions initiales sont similaires à celle d'un temps sec. Dans le cas contraire, plus la période précédente sans pluie augmente, plus le potentiel de réduction de volume augmente, dépendamment de la hauteur de pluie de l'événement précédant (qui conditionne le niveau d'eau

initial dans la couche réservoir). Une corrélation moyenne de signe positif est observée entre l'intensité maximale de précipitation et le potentiel de réduction du débit maximal. Ceci signifie que l'enrobé drainant permet une bonne régularisation du débit ruisselé, particulièrement lors des orages caractérisés par une forte intensité de précipitation et une courte durée d'événement.

# 4.3 Evaluation de la performance environnementale de l'enrobé drainant

Dans cette section, les résultats du suivi de la pollution physico-chimique des eaux de ruissellement de la zone perméable ainsi que de la zone imperméable sont présentés, à savoir le potentiel de filtration des eaux infiltrées par les différentes couches de la chaussée perméable en comparant le taux de pollution dans les deux zones. Aussi, le potentiel d'épuration des eaux de ruissellement à l'échelle de saisons historiques est présenté dans cette section.

# 4.3.1 Pluviométrie des événements échantillonnés

La campagne d'échantillonnage des eaux de ruissellement a concerné presque tous les événements de pluie qui ont eu lieu entre le 1<sup>er</sup> octobre 2020 et 1<sup>er</sup> juillet 2022. L'évaluation du potentiel épuratoire de l'enrobé drainant consistait à comparer la qualité des eaux de ruissellement provenant des deux zones. C'est pourquoi les résultats d'analyses présentés dans ce présent mémoire concernent seulement les événements où un écoulement des eaux de ruissellement à travers le drain a été observé.

Ceci donne un total de six pluies, lesquelles ont toutes eu lieu à l'été et à l'automne 2021 excepté un événement, qui a eu lieu à l'été 2022. Les résultats pour ces pluies sont détaillés au Tableau 4.14 ici-bas. Tableau 4.14 Pluviométrie des pluies considérées lors de l'évaluation de la performance environnementale de l'enrobé drainant.

Date de l'événement	Période antérieure sèche (h)	Hauteur totale (mm)	Durée (h)	Intensité max. sur 5 min (mm)
8-Jul-2021	47	34,4	12,00	12,0
25-Jul-2021	41	25,8	5,62	21,6
15-Sep-2021	60	36,4	10,50	48,0
16-Oct-2021*	378	52,0	32,00	-
12-Nov-2021*	37	35,0	11	-
6-Jui-2022	26	21,4	12,46	21,6

\* L'événement coïncide avec la période d'indisponibilité de données de pluie; les données ont été récupérées sur Environnement Canada pour la station de l'aéroport Jean-Lesage.

# 4.3.2 Résultats d'analyse de la qualité d'eau

Les résultats d'analyse de laboratoire pour les différents échantillonnages sont présentés dans cette section. Lors de l'événement du 16 octobre 2021, l'autoéchantillonneur n'a pas démarré; on s'est donc contenté, pour la zone imperméable lors de cet événement, d'un échantillon composite des eaux de ruissellement de surface. Les résultats d'analyse des hydrocarbures et des métaux pour l'événement du 6 juin 2022 ne sont pas présentés dans ce présent document, étant donné que l'analyse se fait normalement à la fin de la saison d'été. Aussi, ces résultats ne sont pas disponibles pour l'événement du 8 juillet 2021, en raison des coûts plus élevés pour leur analyse au laboratoire. Un prolongement du suivi est prévu au moins jusqu'à l'automne 2022.

## 4.3.2.1 Matières en suspension (MES)

Les MES sont une composante commune des ruissellements urbains. Une quantité excessive de MES nuit à la vie aquatique, en affectant la photosynthèse et la respiration, détériorant ainsi la vie des milieux récepteurs. Aussi, les particules solides jouent le rôle de transporteurs d'autres polluants qui sont attachés à leur surface. Afin d'évaluer le pouvoir de filtration de l'enrobé drainant des eaux infiltrées à travers les différentes couches de l'ouvrage, la concentration en MES dans les eaux ruisselées provenant des deux zones a été évaluée. La Figure 4.24 présente les concentrations en MES lors des six événements échantillonnés.



#### Figure 4.24 Concentrations des matières en suspension

On constate tout d'abord à la figure précédente que l'eau de ruissellement de la partie imperméable (échantillonnée en surface) est plus chargée que l'eau évacuée vers le réseau d'assainissement (collectée au niveau de la conduite d'évacuation par l'autoéchantillonneur). Ceci est attendu et est dû au dépôt d'une partie des sédiments contenus dans les eaux de ruissellement dans la fosse de décantation aménagée au puisard PU-2. Lors des événements des 25 juillet, 15 septembre et 16 octobre 2021, une concentration très élevée en MES est constatée pour les eaux ruisselées au niveau de la zone imperméable; ceci est dû à la présence d'un chantier de construction à proximité du site d'étude pour lequel le chemin d'accès est situé sur le site d'étude, entraînant ainsi l'accumulation d'une quantité non négligeable de sédiments en surface. En temps de pluie, les sédiments sont entraînés par les eaux de ruissellement (Figure 4.25). Ensuite, contrairement à l'hypothèse de départ, lors des premiers événements (8 juillet 2021 et 25 juillet 2021), il est constaté que les eaux drainées à travers la structure réservoir de la partie perméable sont plus chargées en MES que les eaux de ruissellement de la partie imperméable du stationnement. Ceci n'est pas observé lors des événements qui ont suivi ; il est possible que ces MES proviennent de l'entraînement de sédiments accumulés dans le drain lors des travaux de construction. En termes de la concentration de MES, l'enrobé drainant procure un bon potentiel d'amélioration de la qualité des eaux lors des autres événements de pluie, avec une réduction moyenne de la concentration en MES de 75%. Cette valeur est la même que celle établie par St. John et Horner (1997) lors d'une étude qui consistait à évaluer le potentiel de dépollution de l'enrobé drainant face à une situation de référence d'un enrobé conventionnel.


Figure 4.25 Entrainement de sédiments par les eaux de ruissellement en zone imperméable en raison d'un chantier (16/10/2021)

## 4.3.2.2 Conductivité électrique des eaux de ruissellement

L'utilisation de sels déglaçants et d'abrasifs en saison hivernale est très répandue au Québec. De grandes concentrations en sel contenu dans les eaux de ruissellement peuvent être nuisibles aux plantes et affecter la qualité de l'eau utilisée comme source d'eau potable. La conductivité électrique reflète principalement le degré de salinité des eaux de ruissellement. Les résultats de mesure de la conductivité électrique des échantillons récoltés sont présentés à la Figure 4.26.



Figure 4.26 Résultats de conductivité électrique des eaux de ruissellement

On constate tout d'abord que, d'une façon similaire à ce qui a été constaté pour la concentration en MES, la conductivité électrique des eaux ruisselées en surface au niveau de la zone imperméable est supérieure à celle des eaux évacuées vers le réseau de drainage. La fosse de décantation joue le rôle de dilueur des eaux avant qu'elles soient évacuées vers le réseau d'assainissement. Ensuite, la conductivité électrique des eaux drainées à travers la chaussée perméable est très élevée tout le long de la période de suivi. Elle a tendance à diminuer durant l'été 2021 jusqu'à la fin de l'automne 2021, pour ensuite être à son maximum au début de l'été 2022. Ceci est dû à l'utilisation des sels déglaçants durant les hivers 2021 et 2022 (Figure 4.27). En temps de pluie, l'eau précipitée devient très saline à son contact avec les dépôts de sel en surface avant de s'infiltrer à travers la structure de la chaussée ; vu l'évolution de la conductivité durant tout l'été et l'automne 2021, il semble que le lessivage des sels de la chaussée nécessite une longue période. Ces eaux salines s'infiltrent à travers le sol sous-jacent, ce qui pourrait contaminer les eaux souterraines. L'utilisation excessive de sels en saison hivernale reste une grande problématique pour les revêtements perméables en général et, afin d'en atténuer les conséquences, il va falloir adapter les opérations d'entretien hivernal en utilisant beaucoup moins de sels. Houle et al. (2009) ont démontré que les revêtements perméables nécessitent 75% moins de sels que les revêtements traditionnels imperméables.



Figure 4.27 Dépôt de sels sur l'enrobé drainant, hiver 2021

## 4.3.2.3 Hydrocarbures totaux C10-C50

Les hydrocarbures présents dans les eaux de ruissellement proviennent principalement des rejets des huiles et essences des voitures qui occupent le stationnement (site d'étude). En grande quantité, ils peuvent être néfastes pour certaines espèces de poisson. Ils affectent aussi l'approvisionnement en eau potable. Les résultats de concentration en hydrocarbures sont présentés à la Figure 4.28.



Figure 4.28 Concentrations des hydrocarbures totaux contenus dans les eaux de ruissellement

Indépendamment de la concentration en hydrocarbures contenus dans les eaux ruisselées au niveau de l'enrobé conventionnel, la concentration à la sortie du drain est en dessous de la plage de mesure (50 ug/L), excepté lors de l'événement du 25 juillet 2021, pour lequel la concentration en hydrocarbures est 1000 fois inférieure à celle de l'eau de ruissellement. La valeur de 12000 ug/L observée lors de cet événement, supérieure à la normale, peut être expliquée par la présence de rejets d'huile à moteur des engins de génie civil utilisés sur le chantier de construction à proximité du site d'étude (Figure 4.29). On constate que l'enrobé drainant procure un grand potentiel épuratoire en termes d'hydrocarbures, même dans des conditions anthropiques extrêmes. Ceci est appuyé par les résultats d'une étude effectuée par Roseen et al. (2009), lors de laquelle il a été montré que l'enrobé drainant a le meilleur potentiel épuratoire en termes d'hydrocarbures parmi les revêtements perméables testés.



Figure 4.29 Présence d'huile à moteur dans les eaux de ruissellement dans la zone imperméable (25/07/2021)

#### 4.3.2.4 Métaux dissous et totaux

Les Figures 4.31, 4.32 et 4.33 présentent, respectivement, les résultats des concentrations en aluminium, cuivre et zinc. En général, l'effet de dilution procuré par la fosse de décantation fait en sorte que les eaux évacuées vers le réseau de drainage sont moins contaminées que celles du ruissellement de surface. Aussi, il a été observé que l'enrobé drainant permet de réduire considérablement la contamination des eaux en métaux, atteignant parfois, des concentrations en dessous de la plage de mesure (< 0,001 mg/L) (voir Figure 4.32). On observe un potentiel d'épuration moyen qui s'élève à 98%, 99% et 58%, respectivement, pour le zinc, le cuivre, et l'aluminium. Ces valeurs restent du même ordre de grandeur que celles établies lors d'études antérieures (Roseen et al., 2009 ; St. John et Horner, 1997). Cependant, et contrairement aux résultats de concentration en zinc et en cuivre, la concentration en aluminium contenue dans les eaux sortant du drain souterrain reste supérieure au critère de qualité des eaux de surface (limite supérieure fixée à 0,4 mg/L) (MELCC, 2022). Les résultats du suivi hydrologique de la zone perméable ont montré que les volumes évacués vers le réseau de drainage municipal sont très

limités ; donc, même avec des valeurs de concentration en aluminium supérieures à 0,4 mg/L, leurs effets de contamination restent limités.



Figure 4.30 Concentrations en aluminium total



Figure 4.31 Concentrations en cuivre total



#### Figure 4.32 Concentrations en zinc total

#### 4.3.2.5 Nutriments

L'azote et le phosphore sont des nutriments qui peuvent se trouver en grande quantité dans les eaux de ruissellement, s'il y a présence de végétation, d'un site d'enfouissement ou d'une installation septique à proximité. Des concentrations élevées en nutriments favorisent la croissance d'algues et de plantes aquatiques dans les milieux récepteurs. Aucune source de nutriments n'est présente sur le site d'étude, mais il reste intéressant d'évaluer leurs concentrations dans les eaux de ruissellement et dans celles évacuées par le drain souterrain. Les résultats d'analyse de laboratoire sont présentés aux Figures 4.33 et 4.34.

Tout d'abord, et d'une façon similaire aux résultats de concentration en MES, on constate que les eaux provenant de la chaussée perméable sont plus concentrées en phosphore que les eaux de ruissellement de la zone imperméable lors des événements des 8 et 25 juillet 2021. Les échantillons des eaux du drain pour ces événements étaient plus chargés en MES, ce qui laisse penser que ceux-ci étaient aussi riches en phosphore, faisant en sorte d'augmenter sa concentration dans les eaux qui quittent le réservoir de stockage à travers le drain. En effet, lors des événements qui ont suivi, l'enrobé drainant a permis une réduction de la concentration en phosphore, de 40% en moyenne. Cette valeur reste plus faible que celle répertoriée dans l'étude effectuée par St. John et Horner (1997), dans laquelle la réduction de la concentration en

phosphore a atteint 95%. La campagne d'échantillonnage se poursuivra jusqu'à la fin de l'automne 2022 ; il sera intéressant de suivre l'évolution de la performance épuratoire de l'enrobé drainant durant ces prochains mois.

Lors des événements des 15 septembre, 16 octobre et 21 novembre 2021, une réduction de la concentration en azote a été observée, atteignant 54%. Cependant, lors des événements des 8 juillet 2021 et 9 juin 2022, la concentration en azote est plus élevée dans les eaux provenant de la chaussée perméable que dans les eaux de ruissellement de la zone imperméable. Ceci reste difficilement explicable et il va falloir faire le suivi sur un nombre d'événements plus grand afin de déterminer si ces événements représentent des cas particuliers ou s'il y a vraiment une source d'azote qui pourrait expliquer les concentrations plus élevées en azote. Néanmoins, la concentration en azote des eaux provenant de la chaussée perméable reste inférieure aux normes de la qualité d'eau du MELCC (1,5 mg/L).



Figure 4.33 Concentrations en phosphore total



#### Figure 4.34 Concentrations en azote total

# 4.3.3 Potentiel de réduction de la charge en MES de l'enrobé drainant à l'échelle des saisons

L'évaluation de la réduction de la charge (masse) en MES procurée par l'enrobé drainant est plus parlante que l'évaluation de la réduction en termes de concentration, puisqu'elle fait aussi intervenir le potentiel de réduction des volumes. Sur la base des volumes ruisselés dans les deux zones durant les saisons des données historiques, simulés avec PCSWMM, la charge en MES entraînée par ces volumes a été évaluée. Lors de ces calculs, c'est la concentration moyenne en MES des six événements de pluie échantillonnés qui a été prise en compte. Les résultats de la réduction de la charge en MES de l'enrobé drainant pour chaque saison sont présentés au Tableau 4.15.

Saison	Enrobé drainant			Enrobé conventionnel			%
	V total (I/m²)	Concentration moyenne MES (mg/L)	MES (g/m²)	V total (I/m²)	Concentration moyenne MES (mg/L)	MES (g/m²)	réduction de la charge en MES
2017	141,10	28,33	4,00	964,63		138,74	97%
2015	138,99		3,94	978,97		140,80	97%
2014	193,79		5,49	1120,08	1/2 02	161,10	97%
2008	162,41		4,60	1142,07	143,65	164,26	97%
2007	82,32		2,33	790,06		113,63	98%
2005	196,25		5,56	976,10		140,39	96%

Tableau 4.15 Réduction de la charge en MES à l'échelle de saison

D'après le tableau 4.15, l'enrobé drainant assure un très bon potentiel de réduction de la charge en MES, variant entre 96% et 98%. Ceci reflète le grand potentiel épuratoire de l'enrobé drainant aménagé.

### 4.4 Bilan des principaux résultats

Dans cette section, les principaux résultats de l'étude sont présentés, à savoir les résultats d'évaluation des performances hydrologique et environnementale qui découlent du suivi de terrain qui a été effectué ainsi que ceux obtenus à l'aide de la modélisation hydrologique/hydraulique. Les différentes limites et incertitudes de l'étude sont aussi discutées dans cette section.

Concernant le volet hydrologique, le système de suivi-évaluation s'est limité à la période automnale de l'année 2021 et à une partie de la période estivale 2022. Ce suivi a permis d'analyser les données de 13 événements de pluie, pour lesquels l'enrobé drainant a permis une réduction des volumes de ruissellement allant de 68% à 100% et une réduction des débits maximaux de 91% à 100%. Tous les événements de pluie avaient une période de retour inférieure à 2 ans. Afin d'évaluer la performance hydrologique de l'enrobé drainant durant des événements de pluie d'une période de retour plus importante, un modèle hydrologique/hydraulique du site a été élaboré sur PCSWMM. La courte période de suivi, qui ne dépassait pas 18 mois, ainsi que les différents problèmes d'indisponibilité de données ont fait en sorte que le module LID du modèle numérique a été calibré sur un seul évènement de pluie et pas validé. Ceci représente une des principales sources d'incertitudes des résultats découlant du modèle numérique. Pour le

prolongement de la période de suivi pour une période de deux années supplémentaires, la principale recommandation à retenir est l'amélioration du calage du modèle élaboré afin de reproduire le mieux possible le comportement de la chaussée perméable aménagée sur le site. Ceci ne remet point en cause les résultats atteints par l'utilisation du modèle numérique, qui ont montré un bon potentiel de réduction des volumes de l'enrobé drainant, compris entre 80% et 90% à l'échelle des saisons simulées, qui comprenaient des événements de pluie caractérisés par des périodes de retour allant jusqu'à 50 ans.

Sur le volet environnemental, la campagne d'échantillonnage des eaux de ruissellement et l'analyse des contaminants ont permis d'évaluer la performance épuratoire procurée par l'enrobé drainant. Le Tableau 4.16 synthétise les différents résultats de réduction des concentrations des différents contaminants analysés. Malgré le caractère exceptionnel de l'utilisation du stationnement durant la période de suivi, causé par la présence de deux chantiers de construction à proximité du site d'étude, l'enrobé drainant a démontré un très bon potentiel épuratoire des eaux de ruissellement.

Contaminant	% moyen de réduction de la concentration
MES	75%
Hydrocarbures C10-C50	99%
Zinc	98%
Cuivre	99%
Aluminium	58%
Azote	40%
Phosphore	54%

Tableau 4.16 Potentiel épuratoire de l'enrobé drainant des eaux de ruissellement				
l'adieau 4. 16 Potentiei eduratoire de l'enrope drainant des eaux de ruissellement	Tablaau 446 Datantial á	murataira da l'amrahá	Arabaant daa aaw	r da mulacallamant
	l'ableau 4. l'o Potentiel e	puratoire de l'enrope	e drainant des eaux	t de ruissellement

Le modèle numérique a permis, pour sa part, d'évaluer le potentiel de réduction de la charge en MES à l'échelle des saisons historiques simulées. Ainsi, le site assure un très bon potentiel de

réduction des charges en MES, de variant entre 96% et 98%. Ceci reflète le grand potentiel épuratoire de l'enrobé drainant aménagé.

## 5 CONCLUSION

L'objectif principal de cette étude était d'évaluer les performances hydrologique, hydraulique et environnementale d'un enrobé drainant jumelé à une chaussée réservoir en guise d'ouvrage de contrôle à la source des eaux pluviales en milieu urbain. L'ensemble des travaux effectués lors de cette étude a permis d'atteindre cet objectif.

Sur le volet hydrologique, le système de suivi-évaluation mis en place a permis de caractériser le taux d'infiltration de l'enrobé drainant et d'évaluer les volumes et les débits de ruissellement des deux zones, soit celle aménagée en enrobé drainant et celle en enrobé conventionnel. Grâce aux données récoltées, un modèle hydrologique du site a été élaboré à l'aide du module LID du logiciel PCSWMM. A partir de ce modèle, la réduction des volumes de ruissellement et des débits de ruissellement a été évaluée à l'échelle de saisons historiques. Aussi, les caractéristiques des événements pluvieux qui ont le plus d'impact sur cette performance hydrologique ont été définies.

L'enrobé drainant aménagé est doté d'un grand taux d'infiltration, gui varie entre 728 mm/h et 14658 mm/h, dépendamment de la saison et du point de mesure. Ce taux d'infiltration semble insensible au climat froid, puisqu'aucune corrélation n'a été établie entre le taux d'infiltration et la saison. Cependant, l'usage du site a un grand impact sur le taux d'infiltration. En raison du colmatage dû à l'utilisation d'abrasifs en saison hivernale, le taux d'infiltration a diminué de 51% et 70%, respectivement, après l'hiver 2021 et l'hiver 2022. Grâce aux opérations d'entretien printanier, le taux d'infiltration a été récupéré partiellement. Le suivi hydrologique effectué a révélé un potentiel de réduction des volumes de ruissellement et des débits de pointe procuré par l'enrobé drainant, variant respectivement de 68% à 100% et de 91% à 100%, dépendamment de l'événement de pluie. Pour une hauteur totale de précipitation inférieure à 21 mm, aucun ruissellement n'est constaté pour la zone de l'enrobé drainant. A l'échelle de saisons des données historiques, le modèle élaboré a permis d'estimer que l'enrobé drainant a un grand potentiel de réduction du volume total ruisselé, qui varie de 80% à 90%, dépendamment de la pluviométrie. L'étude statistique effectuée sur les saisons historiques simulées a montré que la hauteur de précipitation est la principale caractéristique affectant la performance de réduction des volumes de l'enrobé drainant et qu'au-delà de 30 h, la période précédente sans pluie n'a aucun effet sur ce dernier. En termes de débit ruisselé, la performance de réduction procurée par l'enrobé

drainant et d'autant plus importante pendant les événements de pluie caractérisés par une grande intensité maximale de type orage.

Sur le volet qualitatif, le suivi de la pollution physico-chimique des eaux de ruissellement de la zone perméable ainsi que de la zone imperméable a permis d'évaluer le potentiel de filtration des eaux infiltrées par les différentes couches de la chaussée réservoir en comparant le taux de pollution dans les deux zones.

L'analyse des eaux de ruissellement échantillonnées lors des événements pluvieux a démontré une amélioration de la qualité des eaux ruisselées à travers le drain de la structure chaussée comparée à celle de l'enrobé conventionnel pour la majorité de contaminants et des événements pluvieux, due au pouvoir de filtration assuré par les différentes couches de l'ouvrage. La diminution de la concentration des différents contaminants analysés a atteint 75%, 93%, 98%, 99%, 58%, 40%, 54%, respectivement, pour les MES, les hydrocarbures totaux, le zinc, le cuivre, l'aluminium, le phosphore total et l'azote total. Cependant, la conductivité des eaux quittant la structure réservoir reste très élevée, dû à l'utilisation de sels déglaçants en saison hivernale, avec un faible taux de lessivage. Lors d'applications futures de ce type de revêtement perméable, il faudra adapter les opérations d'entretien hivernal en évitant d'utiliser du sel déglacant ou, le cas échéant, en diminuer la quantité. Selon l'estimation des charges en MES des eaux de ruissellement des deux zones du site à l'échelle de saisons des données historiques, simulées sur PCSWMM, l'enrobé drainant permettrait une réduction de plus de 96% de cette charge. Ceci reflète le grand potentiel épuratoire de cette pratique de gestion des eaux pluviales en milieu urbain. Aussi, il a été relevé que la tendance d'augmentation de la réduction du volume est parfaitement corrélée avec la diminution de la hauteur totale de précipitation et que l'enrobé drainant permet une bonne régularisation des débits ruisselés, particulièrement lors des orages caractérisés par une forte intensité de précipitation et une courte durée d'événement.

Dans une optique future, il serait intéressant de valider les résultats de la présente étude. Il faudrait notamment améliorer le calage du modèle hydrologique/hydraulique établi à l'aide de données de terrain récupérées lors d'un éventuel prolongement de la période de suivi. Aussi, la période de suivi a coïncidé avec la présence de deux chantiers de construction à proximité de la zone d'étude. Malgré les mesures d'atténuation appliquées, ceci a grandement affecté la qualité des eaux de ruissellement au niveau du stationnement ; le suivi de la qualité de l'eau durant une période future dans des conditions normales d'exploitation du stationnement révélera des résultats plus représentatifs des conditions normales d'opération. L'aménagement du site expérimental reste récent. Ainsi, il faudrait continuer à mesurer le taux d'infiltration de l'enrobé

drainant pendant plusieurs années afin de mieux évaluer l'effet du colmatage et d'évaluer l'impact des différentes opérations de nettoyage printanier ; ceci permettrait également de définir les opérations de nettoyage les mieux adaptées. Pour des travaux futurs, il serait intéressant d'évaluer l'évolution du taux d'infiltration de l'enrobé drainant assujetti à une application minimale d'abrasifs en saison hivernale tout en évaluant son adhérence, ce qui permettrait de définir un seuil adéquat de quantité d'abrasifs tout en garantissant une bonne adhérence de surface.

En synthèse, l'utilisation de l'enrobé drainant reste très limitée sur le territoire de la province de Québec. Pourtant, la présente étude s'inscrit dans le répertoire de plusieurs études qui ont démontré son efficacité comme ouvrage de gestion durable des eaux pluviales en milieu urbain et, plus spécifiquement, dans un climat froid comme celui de Québec.

# 6 **BIBLIOGRAPHIE**

- 1. Al-Rubaei A M, Stenglein A L, Viklander M, Blecken G-T. (2013). Long-Term Hydraulic Performance of Porous Asphalt Pavements in Northern Sweden. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 139(6): 499-505.
- 2. American Society of Civil Engineers (ASCE). (2015). Permeable Pavement. ASCE, Reston, VA, États-Unis.
- ADOPTA. (2017). La gestion durable et intégrée des eaux pluviales, Philosophie et présentation de la boîte à outils des techniques alternatives, [enligne], <u>http://www.crescautlys.be/wp-content/uploads/2017/01/Intervention-ADOPTAJournee-Transfeau.pdf.</u> (Dernière consultation le 01/02/2021).
- 4. ASTM. (2020). Standard Test Method for Surface Infiltration Rate of Place Previous Concrete. Norme ASTM C1701/C1701M 17a, West Conshohocken, PA, États-Unis.
- 5. Boving T, Stolt M, Augenstern J, Brosnan, B. (2008). Potential for localized groundwater contamination in a porous pavement parking lot setting in Rhode Island. Environmental Geology, 55 (3): 571582.
- 6. Brattebo B, Booth D. (2003). Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems. Water Research, 37(18): 4369-4376.
- Chopra M, Kakuturu S, Ballock C, Spence J, Wanielista M. (2010). Effect of Rejuvenation Methods on the Infiltration Rates of Pervious Concrete Pavements. Journal of Hydrologic Engineering, 15(6): 426-433.
- 8. Collins K A, Hunt W F, Hathaway J M. (2008). Hydrologic comparison of four types of permeable pavement and standard asphalt in eastern North Carolina. Journal of Hydrologic Engineering, 12(1146): 1146-1157.
- 9. Collins K A, Hunt W F, Hathaway J M. (2010). Side-by-side comparison of nitrogen species removal for four types of permeable pavement and standard asphalt in eastern North Carolina. Journal of Hydrologic Engineering, 15(6): 512-521.
- Dempsey B, Swisher D. (2003). Evaluation of porous pavement and infiltration in Centre County, PA. World Water & Environmental Resources Congress 2003 and Related Symposia, Philadelphie, Pennsylvanie, États-Unis.

- Dierkes C, Kuhlmann L, Kandasamy J, Angeis G. (2002). Pollution retention capability and maintenance of permeable pavements, Proc. 9th Int. Conf. on Urban Drainage, Global Solutions for Urban Drainage, Portland, Oregon, American Society of Civil Engineers (ASCE), Reston, VA, États-Unis.
- 12. Drake J, Bradford A, Van Seters T, MacMillan G (2012). Evaluation of Permeable Pavements in Cold Climates. Toronto and Region Conservation Authority (TRCA), Toronto, Canada, 92 p.
- 13. Drake J. (2013). Performance and operation of partial infiltration permeable pavement systems in the Ontario climate. Ph.D Thesis, University of Guelph, Guelph, ON, Canada.
- 14. EPA (2016). Storm Water Management Model Reference Manual Volume III Water Quality. US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development Water Supply and Water Resources Division, Washington, DC, États-Unis.
- 15. Ferguson B. (2005). Porous Pavements (1st ed.). Taylor & Francis, New York, NY, États-Unis. ISBN13:978-0849326707.
- Godé, B. (2018). Réfection des stationnements de la Ville de Québec, 2018 (PEC 180732) Stationnement S3028 du parc Paul-Émile-Beaulieu (530, rue Delage, Québec, QC), Québec, Canada.
- 17. González-Angullo N, Castro D, Rodríguez-Hernández J, Davies J W. (2008). Runoff infiltration to permeable paving in clogged conditions. Urban Water Journal, 5(2): 117-124.
- 18. Haselbach L, Freeman R. (2006). Vertical porosity distributions in pervious concrete pavement. ACI Materials Journal, 103(6): 452.
- Houle K, Roseen R, Ballestero T, Briggs J, Houle J. (2009). Examinations of Pervious Concrete and Porous Asphalt Pavements Performance for Stormwater Management in Northern Climates, World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers 2009, ASCE.
- 20. Houle J J, Roseen R M, Ballestero T P, Puls T A. (2013). Comparison of Maintenance Cost, Labor Demands, and System Performance for LID and Conventional Stormwater Management. Journal of Environmental Engineering, 139(7): 932-938.
- 21. Herin J, Ancelle M, Desmot E. (2020). Webinaire N°1 : les chaussées à structure réservoir.ADOPTA,[Enligne],<u>https://adopta.fr/wpcontent/uploads/2020/07/Webinaire-ADOPTA-n%C2%B01-chausse%CC%81es-a%CC%80-structure-re%CC%81servoir.pdf</u>. (Dernière consultation le 04/03/2021).
- 22. Huang J, Valeo C, He J, Chu A. (2012). Winter performance of inter-locking pavers stormwater quantity and quality. Water, 4(4): 995-2008.

- 23. Kwiatkowski M, Welker A, Traver R, Vanacore M, Ladd T. (2007). Evaluation of an infiltration best management practice utilizing pervious concrete. Journal of the American Water Resources Association, 43(5): 1208-1222.
- 24. Lee S, Kim D, Maeng S, Azam M, Lee B. (2022). Runoff reduction effects at installation of LID facilities under different climate change scenarios. Water, 14(8): 1301.
- 25. Legret M, Colandini V. (1999). Effects of a porous pavement with reservoir structure on runoff water: water quality and fate of heavy metals. Water Science and Technology, 39(2): 111-117.
- 26. Leming M, Malcom H, Tennis P. (2007). Hydrologic Design of Pervious Concrete. Portland Cement Association (PCA), Skokie, IL, États-Unis.
- 27. Maillot A, Talbot G. (2022). Courbes IDF Charlesbourg Parc-Orléan, [En ligne], <u>https://www.agrometeo.org/atlas/idf\_station/CHARLESBOURG\_PARC\_ORLEAN/Charles</u> <u>bourg%20Parc-Orl%C3%A9an/7011309/false</u>. (Dernière consultation 22/06/2022).
- 28. MDDEP et MAMROT (2011) Guide de gestion des eaux pluviales. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Québec, Canada, 386 p.
- MELCC (2022). Critères de qualité de l'eau de surface. Québec, Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, [en ligne], <u>http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/criteres\_eau/index.asp</u>. (Dernière consultation le 15/07/2022).
- 30. MTQ. (2018). Revêtements perméables et structures réservoirs. Ministère des Transports de la mobilité durable et de l'électrification des transports. Québec, Canada, 53 p.
- National Asphalt Pavement Association (NAPA). (2008). Porous Asphalt Pavements for Stormwater Management: Design, Construction, and Maintenance Guide (IS-131). Series 131, NAPA, Lanham, MD, États-Unis.
- National Concrete Pavement Technology Center (NCPTC). (2006). Mix Design Developments for Pervious Concrete in Cold Weather Climates. Iowa State University, Ames, Iowa, États-Unis.
- National Ready Mix Concrete Association (NRMCA). 2004. Freeze Thaw Resistance of Pervious Concrete. National Ready Mixed Concrete Association. Silver Spring, MD, États-Unis.
- 34. Northern Virginia Regional Commission (NVRC). (1999). Low Impact Development Supplement to the Northern Virginia BMP Handbook. Fairfax, VA, États-Unis.

- 35. Philadelphia Water Department (PWD). (2007). Philadelphia Stormwater Management Guidance Manual. Philadelphia, PA, États-Unis.
- 36. Pratt C, Mantle J, Schofield P. (1995). UK research into the performance of permeable pavement reservoir structures in controlling stormwater discharge quantity and quality. Water Science Technology, 32(1): 63-69.
- 37. Roseen R M, Ballestero T, Houle J, Briggs J F, Houle K M. (2012). Water quality and hydrologic performance of a porous asphalt pavement as a storm-water treatment strategy in a cold climate. Journal of Environmental Engineering, 138(1): 81-89.
- Roseen R, Ballestero T, Houle J, Avellaneda P, Briggs J, Wildey R. (2009). Seasonal performance variations for storm water management systems in cold climate conditions. Journal of Environmental Engineering, 135(3): 128-137.
- 39. Ryan W, Al-Rubaei A, Godecke B. (2016). A Simple Infiltration Test for Determination of Permeable Pavement Maintenance Needs. Journal of Environmental Engineering, 142(10): 06016005.
- 40. Sánchez-Mendieta C, Galán J, Martinez-Lage I. (2021). Physical and hydraulic properties of porous concrete. Sustainability, 13(9): 10562.
- 41. Schueler T, (2008). Technical support for the Bay-wide runoff reduction method. Chesapeake Stormwater Network. Baltimore, MD, États-Unis.
- 42. St. John M, Horner R. (1997). Effect of Road Shoulder Treatments on Highway Runoff Quality and Quantity, Washington State Transportation Center. University of Washington, Seattle, WA, États-Unis.
- 43. Stenmark C. (1995). An alternative road construction for stormwater management in cold climates. Water Science and Technology, 32(1): 79-84.
- 44. Stephens K. (2002). A Guidebook for Bristish Columbia. British Columbia Ministry of Water, Land and Air Protection, Vancouver, C.-B., Canada.
- 45. Thomle J. (2010). The Declining pH of Waters Exposed to Pervious Concrete. MS Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering. Washington State University, Pullman, WA, États-Unis.
- 46. Toronto and Region Conservation (TRCA). (2012). Low Impact Development Stormwater Management Planning and Design Guide. Toronto, Ontario.
- 47. United States Environmental Protection Agency (2018). Storm Water Management Model (SWMM). United States Environmental Protection Agency. [En ligne],

https://www.epa.gov/waterresearch/storm-water-management-model-swmm.

- 48. University of New Hampshire Stormwater Center (UNHSC). (2012). Biennial Report, University of New Hampshire, Durham, NH États-Unis.
- 49. University of New Hampshire Stormwater Center (UNHSC). (2009). UNHSC Design Specifications for Porous Asphalt Pavement and Infiltration Beds, [en ligne], <u>http://www.unh.edu/unhsc/sites/unh.edu.unhsc/files/pubs\_specs\_info/unhsc\_pa\_spec\_10\_09.pdf.</u> (Dernière consultation le 06/04/202<u>1</u>).
- 50. Vaillancourt C, Duchesne S, Pelletier G. (2019). Hydrologic Performance of Permeable Pavement as an Adaptive Measure in Urban Areas: Case Studies near Montreal, Canada. Journal of Hydrologic Engineering, 24(8): 05019020.
- 51. Van Seters T, Derek S. Glenn M. (2006). Performance evaluation of permeable pavement and a bioretention swale. 8th International Conference on Concrete Block Paving. San Francisco, CA, États-Unis.
- 52. Wanielista M, Chopra M. (2007). Performance Assessment of a Pervious Concrete Pavement Used as a Shoulder for an Interstate Rest Area Parking Lot. Stormwater Management Academy, University of Central Florida, Orlando, FL, États-Unis.
- 53. Wardynski B, Winston R, Hunt W. (2013). Internal water storage enhances exfiltration and thermal load reduction from permeable pavement in the North Carolina mountains. Journal of Environmental Engineering, 139(2): 187-195.
- 54. Zhang K, Huang P, Chui T. (2022). Runoff mitigation by underdrained permeable pavements in shallow groundwater environments: A field investigation. Journal of Hydrologic Engineering, 27(7): 04022011.
- 55. Zheng M, Chen W, Gao Q, Liu S, Deng C, Ma Y, Ji G. (2022). Research on the reduction performance of surface runoff pollution through permeable pavement with different structures. Water, Air, and Soil Pollution, 233(4): 147.

# 7 ANNEXES

# 7.1 Résultats des tests d'infiltration

|--|

Période	Date du test	Emplacement	Taux d'infiltration (mm/h)
		Point 1	4700
Après aménagement	7-Nov-20	Point 2	6500
		Point 3	6720
		Point 1	3163
Hiver 2021	09-Mars-21	Point 2	14658
		Point 3	11233
Été 2024 (august	08-Juin-21	Point 1	4623
Ete 2021 (avant		Point 2	10016
nettoyagej		Point 3	3163
	11-Juin-21	Point 1	4700
Ete 2021 (apres		Point 2	12036
nettoyagej		Point 3	8642
		Point 1	2850
Début hiver 2022	15-Jan-22	Point 2	11635
		Point 3	7962
Été 2022 (augus)	13-Avr-22	Point 1	1531
Ete 2022 (avant		Point 2	4452
Πεττογάξει		Point 3	728

## 7.2 Méthode de calcul du module LID de PCSWMM

Cette section présente les équations de calcul du module LID de PCSWMM. Plus de détails sont donnés dans le manuel d'utilisateur du logiciel (EPA, 2018).

$$f_{1} = i + q_{0} + \frac{d_{1}}{\Delta t} (6)$$

$$f_{2} = K_{2s} e_{x}(-HCO(\phi_{2} - \theta_{2})), \theta_{2} > \theta_{cc} (7)$$

$$f_{2} = 0, \theta_{2} \le \theta_{cc}$$

$$f_{3} = K_{3s} (8)$$

$$f_{4} = K_{4} (9)$$

$$e_{1} = \min \left[ E_{0}(t), \frac{d_{1}}{\Delta t} \right] (10)$$

$$e_{2} = \min \left[ E_{0}(t) - e_{1}, \frac{(\theta_{2} - \theta_{pf})D_{2}}{\Delta t} \right] (11)$$

$$e_{4} = \min \left[ E_{0}(t) - e_{1}, \theta_{4}D_{4} - \frac{F_{4}}{\Delta t} \right] (12)$$

$$q_{1} = \max \left[ \frac{d_{1} - D_{1}}{\Delta t}, 0 \right] (13)$$

$$q_{3} = C_{3D}(h_{3})\eta_{3D} (14)$$

$$h_{3} = 0 \quad \text{lorsque } d_{3} \le D_{3D} (15)$$

$$h_{3} = d_{3} - D_{3D} \quad \text{lorsque } D_{3D} < d_{3} < D_{3} (16)$$

$$h_{3} = (D_{3} - D_{3D}) + (\theta_{2} - \theta_{cc})/(\phi_{2} - \theta_{cc})D_{2} \quad \text{lorsque } d_{3} = D_{3} et \theta_{cc} < \theta_{2} < \phi_{2} (17)$$

 $h_3 = (D_3 - D_{3D}) + D_2 + \theta_4 D_4 / \phi_4 \text{ lorsque } d_3 = D_3 \text{ et } \theta_2 = \phi_2$  (18)

où :

d1 = hauteur d'eau emmagasinée à la surface (mm) ;

 $\theta 2$  = teneur en eau de la couche de sol (volume d'eau / volume total de sol) ;

d3 = hauteur d'eau dans la couche de stockage (mm) ;

 $\theta$ 4 = teneur en eau du matériel d'enrobé drainant (volume d'eau / volume total) ;

i = intensité des précipitations directes sur la couche de surface (mm/h) ;

q0 = ruissellement provenant des surfaces connexes (mm/h) ;

q1 = ruissellement de la couche de surface (mm/h) ;

q3 = débit sortant par le drain sous-terrain (mm/h) ;

f1 = taux d'infiltration de l'eau de la couche de surface vers la couche de l'enrobé drainant (mm/h) :

f2 = taux de percolation de l'eau de la couche de sol vers la couche de stockage (mm/h) ;

f3 = taux d'exfiltration de l'eau de la couche de stockage vers le sol en place (mm/h);

f4 = taux d'infiltration de l'eau de la couche de l'enrobé vers la couche de sol (mm/h) ;

e1 = taux d'évapotranspiration de la couche de surface (mm/h);

e2 = taux d'évapotranspiration de la couche de sol (mm/h) ;

e3 = taux d'évapotranspiration de la couche de stockage (mm/h) ;

e4 = taux d'évapotranspiration de la couche de l'enrobé (mm/h) ;

EO(t) = taux d'évapotranspiration potentiel applicable au temps t;

 $\phi$ 2 = porosité de la couche de sol (volume de vide / volume total) ;

 $\phi$ 3= indice de vide de la couche de stockage (volume de vide / volume total) ;

 $\phi$ 4 = porosité de la couche de l'enrobé (fraction) ;

D1= hauteur de berme (mm) ;

D2= épaisseur de la couche de sol (mm) ;

D3 = épaisseur de la couche de stockage (mm) ;

D3D = hauteur des ouvertures du drain au-dessus du fond de la couche de stockage (mm) ;

D4 = épaisseur de la couche de l'enrobé drainant (mm) ;

K2s = conductivité hydraulique du sol saturé (mm/h) ;

- K3s = taux d'infiltration du sol en place (mm/h);
- K4 = perméabilité de la couche de l'enrobé drainant (mm/h) ;
- $\theta cc$  = capacité capillaire ;
- $\theta pf$  = point de flétrissement ;
- *HCO* = pente de la conductivité hydraulique ;

C3D = coefficient de drain;

h3 = charge hydraulique à la hauteur du drain ;

 $\eta 3D$  = exposant du drain.