



Évaluation de la performance des ouvrages de gestion durable des eaux pluviales de la rue Sainte-Claire à Rivière-du-Loup

Mémoire

Rose Senneville

Maîtrise en génie des eaux - avec mémoire
Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

Évaluation de la performance des ouvrages de gestion durable des eaux pluviales de la rue Sainte-Claire à Rivière-du-Loup

Mémoire
Maîtrise en génie des eaux – avec mémoire

Rose Senneville

Sous la direction de :
Geneviève Pelletier, Université Laval

Sous la codirection de :
Guillaume Grégoire, Université Laval

Résumé

Les ouvrages de gestion durable des eaux pluviales (GDEP) situés sur la rue Sainte-Claire à Rivière-du-Loup, au Québec, sont étudiés selon trois volets : l'hydraulique, la qualité de l'eau et le complexe plantes/substrat. Des cellules de biorétention, du pavé perméable et des chambres souterraines de rétention constituent les ouvrages étudiés qui gèrent les eaux pluviales de la rue Sainte-Claire et de trois rues perpendiculaires. Des équipements ont été installés entre juin 2020 et octobre 2021 pour suivre l'écoulement des eaux à plusieurs endroits du site. Le pavé perméable et le bassin de rétention, en série permettent de retarder de cinq minutes à plus d'une heure le débit de pointe et de le réduire jusqu'à 90 % pour les événements enregistrés, dont la récurrence est inférieure ou égale à deux ans. Le taux d'infiltration des interstices du pavé perméable est très élevé, même en hiver, lorsqu'un entretien est réalisé, mais chute drastiquement sinon : il varie entre 29,6 et $0,3 \times 10^3$ mm/h. Les matières en suspension (MES) subissent un enlèvement médian de 78 %, allant jusqu'à 98 %, entre le ruissellement et la sortie du bassin. Le pavé perméable seul permet un enlèvement moyen de 68 % des MES. La conductivité électrique des eaux à la sortie du bassin après la période hivernale est très élevée, jusqu'à 741 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les ouvrages de GDEP n'influencent pas significativement les teneurs en azote et en phosphore totaux. Les végétaux des biorétentions présentent un taux de survie de près de 100 % et une résistance à la sécheresse, le tout sans entretien sauf pour la coupe automnale des graminées. Des taux de croissance moyens de 50 à 150 %/mois, selon l'espèce, ont été mesurés entre juin et juillet 2021.

Mots-clés : eaux pluviales, biorétention, pavé perméable, taux d'infiltration, bassin de rétention, débits, ruissellement, traitement, substrat, croissance des végétaux.

Abstract

Hydraulic, water quality, plant growth and substrate performance were studied for stormwater best management practices (BMP) installed in Rivière-du-Loup, Québec. They consist of bioretention cells, permeable pavement and underground basin which collect runoff water from Sainte-Claire Street as well as three other perpendicular streets. Water dynamic was monitored from June 2020 to October 2021. Combined action of the permeable pavement and the retention basin reduced peak flow up to 90 % and delayed it from five minutes to more than an hour, for two years and less return period rainfalls. Surface infiltration rate of permeable pavement varies from 29.6×10^3 (very high) to 0.3×10^3 mm/h, depending on maintenance operations. Total suspended solids (TSS) were removed up to 98 % from runoff to the outfall, with a median value of 78 %. Average TSS removal for permeable pavement alone was 68 %. Electrical conductivity was very high in early spring, up to $741 \mu\text{S}/\text{cm}$. BMP had no clear effect on total nitrogen and phosphorus content. Plant survival and drought resistance was high for plants located in retention cells, with minimal maintenance requirements.

Keywords: stormwater, bioretention, permeable pavement, infiltration rate, underground basin, flow, runoff, treatment, substrate, plant growth.

Table des matières

Résumé	ii
Abstract.....	iii
Table des matières	iv
Liste des tableaux	vi
Liste des figures.....	vii
Liste des acronymes.....	x
Liste des abréviations	xi
Remerciements.....	xii
Introduction	1
1. Problématique et objectifs.....	4
2. Revue de littérature.....	5
2.1 Hydraulique	5
2.2 Qualité de l'eau	8
2.3 Plantes et substrat.....	13
3. Méthodologie.....	16
3.1 Description du site.....	16
3.1.1 Mise en contexte.....	16
3.1.2 Description des composantes	17
3.1.3 Description de l'écoulement.....	19
3.2 Hydraulique	22
3.2.1 Description et disposition des équipements.....	22
3.2.2 Traitement et analyse des données	27
3.2.3 Modélisation.....	28
3.3 Qualité de l'eau	29
3.3.1 Échantillonnage	29
3.3.2 Transport, analyse et traitement des résultats	31
3.4 Plantes et substrat.....	32
3.4.1 Croissance des plantes.....	32
3.4.2 Teneur en eau du substrat.....	35
3.4.3 Température du substrat.....	36
4. Résultats et discussion	37

4.1	Hydraulique	37
4.1.1	Événements de précipitations	37
4.1.2	Bassin versant	40
4.1.3	Pressions et débits.....	42
4.1.4	Pavé perméable.....	57
4.2	Qualité de l'eau	63
4.2.1	Événements	63
4.2.2	Teneurs en MES.....	65
4.2.3	Conductivité électrique.....	72
4.2.4	Azote et phosphore totaux	74
4.3	Plantes et substrat.....	76
4.3.1	Croissance des plantes.....	77
4.3.2	Végétation dans le pavé alvéolé	90
4.3.3	Résistance des plantes et espèces spontanées	92
4.3.4	Teneur en eau du substrat	94
4.3.5	Température du substrat.....	96
	Conclusion.....	102
	Recommandations d'ingénierie	103
	Bibliographie.....	105
	Annexes.....	111
	Annexe A – Composantes du site.....	112
	Annexe B – Intrants de modélisation	113
	Annexe C – Calibration des capteurs de teneur en eau du sol.....	117
	Annexe D – Résultats de qualité de l'eau	119
	Annexe E – Mesures des plantes	121
	Annexe F – Croissance de la végétation dans le pavé alvéolé.....	136
	Annexe G – Teneur en eau du sol.....	140

Liste des tableaux

Tableau 1: Critères de qualité de l'eau de surface (MELCC, 2021a).....	10
Tableau 2: Récapitulatif des résultats de qualité de l'eau de ruissellement de sites comparables.....	11
Tableau 3: Dimensions attendues des espèces au site.....	14
Tableau 4: Méthodes d'analyse.....	31
Tableau 5: Description des mesures de plantes.....	33
Tableau 6: Caractéristiques des événements de précipitation.....	39
Tableau 7: Événements avec échantillonnage et analyse de l'eau.....	64
Tableau 8: Paramètres statistiques des résultats d'analyses.....	65
Tableau 9: ANOVA sur les plantes selon le lieu.....	89
Tableau 10: Fiche technique de la membrane Novatex 90 (tiré de Innovex, 2019).....	112
Tableau 11: Caractéristiques des aires tributaires.....	113
Tableau 12: Caractéristiques des nœuds de modélisation.....	113
Tableau 13: Caractéristiques des conduites.....	114
Tableau 14: Caractéristiques des sections d'écoulement.....	115
Tableau 15: Paramètres d'analyse.....	116
Tableau 16: Résultats d'analyses.....	119
Tableau 17: Mesure des lilas japonais.....	121
Tableau 18: Mesures des cornouillers Ivory Halo - largeur 1.....	121
Tableau 19: Mesures des cornouillers Ivory Halo - largeur 2.....	122
Tableau 20: Mesures des cornouillers Ivory Halo - hauteur.....	123
Tableau 21: Observations de la présence de fleurs sur les cornouillers Ivory Halo.....	124
Tableau 22: Mesures des agrostides à feuilles étroites - largeur 1.....	124
Tableau 23: Mesures des agrostides à feuilles étroites - largeur 2.....	125
Tableau 24: Mesures des agrostides à feuilles étroites – hauteur des tiges florales.....	126
Tableau 25: Mesures des agrostides à feuilles étroites – nombre de tiges florales.....	127
Tableau 26: Mesures des avoines vivaces Saphirsprudel - largeur 1.....	127
Tableau 27: Mesures des avoines vivaces Saphirsprudel - largeur 2.....	129
Tableau 28: Mesures des avoines vivaces Saphirsprudel – hauteur.....	130
Tableau 29: Mesures des avoines vivaces Saphirsprudel – Hauteur des tiges florales.....	132
Tableau 30: Mesures des avoines vivaces Saphirsprudel – Nombre de tiges florales.....	133

Liste des figures

Figure 1: Localisation de la rue Sainte-Claire et du milieu récepteur.....	16
Figure 2: Vue de la rue Sainte-Claire avant et après 2019, tiré de Google Maps (2015) et de Google Maps (2021)	17
Figure 3: Coupe type des biorétentions	18
Figure 4: Vue globale de la rue Sainte-Claire en mai 2021	20
Figure 5: État des végétaux après la plantation e 16 juin 2020	21
Figure 6: Vue des chambres de rétention pendant les travaux.....	21
Figure 7: Pluviomètre et son enregistreur de données	22
Figure 8: Position des équipements de mesure et composantes du réseau.....	24
Figure 9: Installation des capteurs de pression lorsqu’immergés en tout temps (à gauche) ou non (à droite) .	25
Figure 10: Positionnement du capteur de pression dans RÉ-1.....	26
Figure 11: Position de la sonde du débitmètre dans RP-1.....	26
Figure 12: Montage utilisé pour les tests d'infiltration	27
Figure 13: Lieux d'échantillonnage (adapté de Google Maps, 2021).....	30
Figure 14: Équipements d'échantillonnage de l'eau de ruissellement et de la sortie du bassin.....	31
Figure 15: Représentation de largeur 1 et largeur 2	33
Figure 16: Division des zones est et ouest	35
Figure 17: Capteurs utilisés pour la teneur volumique en eau du sol	35
Figure 18: Localisation des équipements dans les biorétentions (adapté de Google Maps, 2021)	36
Figure 19: Positionnement des événements (intensité moyenne et durée) sur une courbe IDF (adapté de Mailhot et Talbot (2011)).....	38
Figure 20: Bassin versant divisé en sous-bassins versants.....	41
Figure 21: Schéma d'écoulement	42
Figure 22: Localisation des capteurs de pression et du débitmètre selon le nom du regard où puisard dans lequel ils sont situés.....	43
Figure 23: Précipitations le 23 mai 2021.....	44
Figure 24: Pressions le 23 mai 2021	44
Figure 25: Variations de pression le 23 mai 2021.....	45
Figure 26: Variations de hauteur le 23 mai 2021	46
Figure 27: Températures le 23 mai 2021	46
Figure 28: Température en début d'événement et profondeur des capteurs par rapport à la surface de la rue	47
Figure 29: Hauteur, vitesse et débit à RP-1 le 23 mai 2021	48
Figure 30: Débits d'entrée au bassin et de sortie du site le 23 mai 2021.....	49
Figure 31: Précipitations le 11 août 2020	50
Figure 32: Variations de hauteur le 11 août 2020	51
Figure 33: Températures le 11 août 2021.....	51
Figure 34: Précipitations les 15, 16 et 17 octobre 2021	52
Figure 35: Variations de hauteur les 15, 16 et 17 octobre 2021	53
Figure 36: Hauteur, vitesse et débit à RP-1 les 16 et 17 octobre 2021	54
Figure 37: Débits à l'entrée du bassin et à la sortie du site les 16 et 17 octobre 2021	54
Figure 38: Précipitations le 31 octobre 2021	55
Figure 39: Hauteur, vitesse et débit à RP-1 le 31 octobre 2021	56

Figure 40: Débits à l'entrée du bassin et à la sortie du site le 31 octobre 2021	56
Figure 41: Test d'infiltration du 14 février 2021	57
Figure 42: Taux d'infiltration du pavé perméable	58
Figure 43: Observations qualitatives du pavé perméable	59
Figure 44: Présentation schématique approximative de la circulation (adapté de Google Maps, 2021).....	60
Figure 45: Entretien du printemps 2020: balayage et aspiration.....	61
Figure 46: État du pavé après le balayage du printemps 2020.....	62
Figure 47: Entretien du printemps 2021: balayage en surface	62
Figure 48: État du pavé après le printemps 2021	63
Figure 49: MES du ruissellement (autre donnée pour Ruis. perp. non visible sur la figure : $3,6 \times 10^3$ mg/L).....	66
Figure 50: Distribution des résultats de teneur en MES.....	67
Figure 51: Présence d'abrasifs après la fonte des neiges	68
Figure 52: Taux d'enlèvement de MES du pavé perméable et du bassin de rétention.....	69
Figure 53: Aspect visuel des échantillons de ruissellement (à gauche) et de sortie du bassin (à droite)	70
Figure 54: Teneur en MES du ruissellement par rapport au temps sec précédent et à l'intensité maximale de précipitations.....	71
Figure 55: Conductivité électrique du ruissellement et de la sortie du bassin.....	72
Figure 56: Taux d'augmentation de la conductivité électrique (non visible sur la figure : 22 000 %).....	73
Figure 57: Évolution temporelle de la conductivité électrique	74
Figure 58: Teneurs en NT et en PT du ruissellement et de la sortie du bassin (non visible sur la figure : NT Ruis. 23 mg/L)	75
Figure 59: Variation des teneurs en NT et en PT.....	76
Figure 60: Identification et localisation des graminées et des arbustes.....	77
Figure 61: État des plantes après la coupe du 15 octobre 2021.....	77
Figure 62: Circonférence du tronc des lilas japonais	78
Figure 63: Floraison du lilas japonais	79
Figure 64: Distribution des hauteurs - cornouiller Ivory Halo (30 plants mesurés).....	80
Figure 65: Distribution des aires - cornouiller Ivory Halo (30 mesures)	80
Figure 66: Hauteur et aire de certains plants – cornouiller Ivory Halo	81
Figure 67: Distribution des hauteurs - avoine vivace Saphirsprudel	82
Figure 68: Distribution des aires - avoine vivace Saphirsprudel	82
Figure 69: Hauteur et aire de certains plants – avoine vivace Saphirsprudel	83
Figure 70: Évolution de l'agrostide à travers le temps (août 2020, juin 2021 et août 2021).....	84
Figure 71: Agrostides coupés à l'intersection des rues Sainte-Claire et du Parc pour la visibilité	85
Figure 72: Distribution des hauteurs - agrostides à feuilles étroites (21 ou 24 plants mesurés).....	85
Figure 73: Distribution des aires - agrostides à feuilles étroites (21 ou 24 plants mesurés).....	86
Figure 74: Hauteur et aire de certains plants - agrostide à feuilles étroites	87
Figure 75: Nombre de tiges florales – agrostide à feuilles étroites (21 ou 24 plants mesurés).....	87
Figure 76: Croissance des plantes par espèce par mois	88
Figure 77: Taux de croissance des plantes par espèce par mois	89
Figure 78: État du pavé alvéolé le 26 mai 2021 (à gauche) et le 9 juillet 2021 (à droite)	91
Figure 79: Interprétation du logiciel Canopeo pour le pavé alvéolé le 26 mai 2021 (à gauche) et le 9 juillet 2021 (à droite)	91
Figure 80: Évolution de la végétation dans le pavé perméable	92

Figure 81: Feuilles de cornouiller (à gauche) et de lilas japonais (à droite).....	93
Figure 82: Autres végétaux ou champignons présents dans les biorétentions	94
Figure 83: Précipitations et teneurs en eau du substrat près du 23, rue Sainte-Claire.....	95
Figure 84: Température du substrat près du 17, rue Sainte-Claire et de l'air à l'aéroport	97
Figure 85: Température du substrat près du 9, rue Sainte-Claire et de l'air à l'aéroport	98
Figure 86: Précipitations et températures en septembre 2021	100
Figure 87: Relation entre les mesures des sondes et la teneur en eau du sol	118
Figure 88: Pavé alvéolé le 11 juin 2020	136
Figure 89: Pavé alvéolé le 29 septembre 2020.....	136
Figure 90: Pavé alvéolé le 26 mars 2021	137
Figure 91: Pavé alvéolé le 21 mai 2021.....	137
Figure 92: Pavé alvéolé le 8 juillet 2021	138
Figure 93: Pavé alvéolé le 9 juillet 2021	138
Figure 94: Pavé alvéolé le 15 août 2021	139
Figure 95: Pavé alvéolé le 5 novembre 2021	139
Figure 96: Teneur en eau du substrat près du 9, rue Sainte-Claire.....	140
Figure 97: Teneur en eau du substrat près du 17, rue Sainte-Claire.....	140
Figure 98: Teneur en eau du substrat près du 23, rue Sainte-Claire.....	141

Liste des acronymes

CÉ : Conductivité électrique

CEAEQ : Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec

ERNC : Environnement et ressources naturelles Canada

GDEP : Gestion durable des eaux pluviales

GEP : Gestion des eaux pluviales

IDF : Intensité, durée, fréquence

MELCC : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques

MES : Matières en suspension

MTQ : Ministère des Transports du Québec

NT : Azote total

P : Puisard

PGO : Pratique de gestion optimale

PP : Pavé perméable

PT : Phosphore total

RÉ : Regard régulateur

RP : Regard pluvial

SB : Échantillon d'eau récolté à la sortie du bassin de rétention dans le regard RÉ-1

SPP : Échantillon d'eau s'écoulant par les drains à la base du pavé perméable

Liste des abréviations

Max. : Maximal, maximum

n.d. : Non disponible

Piste multi. : Piste multifonctionnelle

Précip. : Précipitation

Ruis. Perp. : Échantillon d'eau de ruissellement en provenance des rues perpendiculaires à la rue Sainte-Claire : les rues du Parc, Dumas et Picard

Ruis. Ste.-C. : Échantillon d'eau de ruissellement en provenance de la rue Sainte-Claire

s. d. : Sans date

Taux crois. : Taux de croissance des plantes

Remerciements

Je tiens à remercier sincèrement ma directrice de maîtrise Geneviève Pelletier, qui m'a donné l'idée d'embarquer dans ce projet. Son soutien, sa disponibilité sans limite, sa franchise et ses encouragements m'ont beaucoup aidée pendant tout le cheminement. Je veux remercier également mon co-directeur Guillaume Grégoire qui m'a guidée et a répondu à plusieurs de mes questions dans un domaine inusité pour moi. Un merci particulier à Paul Lessard et à Sophie Duchesne qui ont porté un regard critique sur mon travail et m'ont conseillée lors des rencontres d'équipe. Je souligne également la présence des autres étudiants avec qui j'ai pu échanger et qui m'ont accompagnée pendant ces années : Véronique, Rachida, Jessica, Kelly, Zakaria, Emmanuel, Hadi, Khalid, Wisnie, Juliette et Samuel, ainsi que les stagiaires postdoctorales qui ont contribué à l'équipe : Diane et Negin. Merci aux stagiaires de l'équipe pour leur excellent travail et leur bonne humeur : Camille, Charles-David, Isabelle, Jaril, Nicolas, Sarah, Thomas et Yan. J'ai eu la chance d'habiter dans la belle ville de Rivière-du-Loup pendant ma maîtrise. Cela a été rendu possible grâce à l'aide de mes pairs étudiants, des stagiaires et de Geneviève que j'ai contactés à toute heure pour planifier le transport et l'analyse de mes échantillons. Le personnel de la Ville de Rivière-du-Loup m'a accueillie chaleureusement et accompagnée dans la réalisation de mon projet. Un grand merci à tout le monde du service technique qui a répondu à mes questions, qui m'a fourni un autre point de vue, qui m'a outillée correctement, qui a installé très solidement mon pluviomètre, qui est descendu dans des regards déprendre mes capteurs pris dans la glace et beaucoup plus. Je remercie particulièrement Guillaume Fournier qui me partage son expérience et répond à mes nombreuses questions avec beaucoup de générosité.

Le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada a contribué financièrement au projet de recherche Alliance en eaux pluviales. Je remercie les donateurs des bourses qui m'ont été attribuées : les fonds Marthe-et-Robert-Ménard et le Centre de recherche sur l'eau pour la bourse ESSOR et la Faculté des études supérieures et postdoctorales de l'Université Laval pour ses bourses de réussite. Merci au *Computational Hydraulics International Educational Grant Program* qui m'a permis d'accéder à une licence du logiciel PC SWMM.

En terminant, je remercie mes parents qui m'ont initiée très tôt à la science et m'ont encouragée à porter un regard critique sur les phénomènes qui m'entourent. Merci à ma sœur, mon frère, mes oncles, leur conjoint(e) et toute ma famille pour leurs conseils techniques et pour leur écoute. Merci à Philippe pour son soutien au quotidien, grâce à qui j'ai pu maintenir un équilibre de vie.

Introduction

Le développement des zones urbaines entraîne des enjeux de gestion des eaux pluviales. En effet, l'aménagement de rues et de bâtiments entraîne une augmentation des surfaces imperméables, ce qui accroît le ruissellement. Certains phénomènes qui favorisent la réduction du ruissellement, comme l'interception par la canopée, le stockage dans le sol, l'évapotranspiration, l'infiltration et plusieurs autres, sont alors beaucoup moins efficaces qu'en conditions naturelles. L'accroissement des eaux de ruissellement peut nuire aux milieux récepteurs par leur température, leur composition et leur vitesse. Le ruissellement des eaux doit être géré pour des raisons environnementales, pour éviter l'érosion et pour se conformer à la réglementation.

Historiquement, les eaux de pluie au Québec ont d'abord été gérées avec les eaux sanitaires dans les réseaux unitaires qui acheminaient le tout directement à un milieu récepteur. Par la suite, des systèmes de traitement des eaux usées ont été implantés et des nouveaux réseaux ont été construits pour séparer les eaux sanitaires et pluviales. On retrouve donc des réseaux unitaires principalement près des milieux récepteurs dans les secteurs les plus anciens. Typiquement, les villes et villages du Québec se sont développés en s'éloignant d'un centre-ville plus ancien situé près du milieu récepteur, souvent le fleuve Saint-Laurent. Les eaux pluviales des nouveaux quartiers sont donc fréquemment dirigées vers les réseaux plus âgés en bordure de cours d'eau. Ces derniers étant conçus pour un bassin versant initialement plus petit, leur capacité est généralement déjà atteinte et des débordements peuvent être observés. Une gestion des eaux pluviales doit donc être réalisée dans les nouveaux développements afin d'éviter la surcharge des réseaux existants.

Dans ce contexte et par une évolution de la réglementation, plusieurs types d'ouvrages de gestion durable des eaux pluviales (GDEP) ont été développés, par exemple des bassins de rétention souterrains. Parfois situés sous la chaussée, ils permettent de développer les secteurs en surface de manière similaire à ce qui existe depuis plusieurs décennies. Dans certaines situations, des bassins de surface sont aménagés; il s'agit de structures souvent rectangulaires et clôturées. Ces ouvrages représentent des pertes d'espace, donc de revenus pour les promoteurs. Ils occupent des emplacements qui pourraient être aménagés en espaces récréatifs pour bénéficier aux résidents et nuisent à la densification du territoire.

La réduction et le décalage des débits de pointe est un des objectifs principaux de ces ouvrages. Cela permet de limiter les débordements en aval. Au lieu d'être acheminées directement pendant la pluie, les eaux de ruissellement sont retenues et relâchées lentement vers le réseau existant, déjà très sollicité. Une réduction des vitesses d'écoulement s'observe également, diminuant la fréquence et l'intensité de l'érosion au milieu récepteur.

Au-delà des avantages hydrauliques, la GDEP peut permettre une amélioration de la qualité de l'eau, notamment par la déposition des particules rendue possible par de plus petites vitesses d'écoulement. Plusieurs paramètres peuvent être analysés pour évaluer la qualité de l'eau : sa teneur en métaux lourds, en hydrocarbures, en matières en suspension (MES), en azote, en phosphore, sa demande chimique en oxygène, etc. Ces substances peuvent être retrouvées dans les eaux de ruissellement en milieu urbain par les activités industrielles, les automobiles, l'agriculture, les activités résidentielles et autres.

De plus en plus, les municipalités implantent des ouvrages de GDEP diversifiés. L'obligation réglementaire de gestion des eaux pluviales est saisie comme une opportunité de combler d'autres usages. L'esthétisme, la diminution de la vitesse de circulation des automobiles, la lutte aux îlots de chaleur, la conservation de la biodiversité, la recharge de la nappe phréatique, la création d'habitats pour la faune et la création d'espaces verts à des fins récréatives sont des fonctions qui peuvent être remplies par les ouvrages de GDEP, en plus de la gestion hydraulique.

D'autres types d'ouvrages sont donc développés pour répondre à plusieurs de ces fonctions : des toits verts, des noues engazonnées, des tranchées drainantes, du pavé perméable et des systèmes de biorétention.

L'aménagement de cellules de biorétention est un excellent exemple. Les cellules de biorétention sont des dépressions peu profondes où le substrat et les végétaux sont aménagés pour recevoir les eaux de ruissellement. Il s'agit de structures qui peuvent fournir des bienfaits en termes hydrauliques, de qualité de l'eau, de lutte aux îlots de chaleur, de conservation de la biodiversité, de formation d'habitats, d'esthétisme et de sécurité routière. En effet, le passage de l'eau dans un substrat permet de réduire les vitesses d'écoulement et les pointes de débits, servant d'obstacle physique qui réduit l'énergie. L'aménagement de plantes dans les biorétentions réjouit généralement les usagers. Cela permet de modifier le paysage et d'embellir des secteurs.

Le climat québécois amène des incertitudes qui mènent à des craintes pour les décideurs. La résistance au changement et la volonté de maintenir des conditions actuelles nuisent au déploiement des ouvrages de GDEP au Québec, surtout considérant le manque de données et d'expertise (Drake et al., 2013). Dans le contexte de changements climatiques et de densification de la population, il n'est plus toujours adéquat de faire des réfections de rues et de tout réinstaller tel quel. De concert avec un effort plus large de conscientisation de la population, des travaux de recherche doivent être réalisés pour amener des données tangibles, concrètes et adaptées au climat régional pour permettre un développement durable de ce type d'ouvrages.

1. Problématique et objectifs

Il existe plusieurs lacunes quant aux connaissances en GDEP en climat continental froid et humide comme au Québec. Cela s'explique notamment par le caractère relativement récent de ces ouvrages au Québec et dans des climats similaires. L'effet d'un ou de plusieurs ouvrages de GDEP placés en série sur la réduction des débits de pointe n'est pas très documenté. Aussi, la performance et la durabilité de blocs de pavé perméable en périodes estivale et hivernale sont incertaines et génèrent des questionnements pour les ingénieurs et les décideurs municipaux. Dans un contexte de resserrement de la réglementation en eaux pluviales au Québec, il y a un réel besoin d'évaluer la performance des ouvrages de GDEP en termes de qualité de l'eau, notamment l'enlèvement des MES, afin de concevoir adéquatement les futurs ouvrages. L'effet sur la qualité de l'eau de la combinaison de plusieurs ouvrages de GDEP en série est peu documenté en général, encore moins en conditions hivernales au Québec. Il y a des lacunes dans la connaissance pour guider le choix des végétaux à implanter, considérant la particularité du climat et l'épandage de sels de déglacage.

Dans ce contexte, ce projet a pour objectif principal l'évaluation de la performance des ouvrages de gestion durable des eaux pluviales sur la rue Sainte-Claire à Rivière-du-Loup.

Plus particulièrement, ce projet vise à atteindre les objectifs spécifiques suivants, selon trois volets :

1. Hydraulique
 - a. Estimer l'impact des ouvrages de GDEP sur les débits de pointe;
 - b. Suivre dans le temps le taux d'infiltration du pavé perméable et formuler des recommandations relatives à son entretien.
2. Qualité de l'eau
 - a. Évaluer la conductivité électrique (CE) et les teneurs en MES, en azote et en phosphore en différents points du système et pendant toutes les saisons;
 - b. Identifier et quantifier l'impact des ouvrages sur les paramètres de qualité de l'eau.
3. Plantes et substrat
 - a. Suivre la croissance des plantes disposées dans les biorétentions;
 - b. Suivre et analyser l'écoulement de l'eau et la température dans le substrat.

2. Revue de littérature

Tel que mentionné à la section précédente, il existe plusieurs lacunes aux connaissances. Dans cette section, les constats d'études scientifiques réalisées pour des installations et des zones climatiques aussi semblables que possibles, mais souvent distinctes, sont présentés.

2.1 Hydraulique

Tout d'abord, pour le volet hydraulique, le suivi et la collecte de données en eaux pluviales présente certains enjeux, notamment en lien avec l'accessibilité et le caractère aléatoire des événements de pluie. Fletcher et al. (2021) ont énoncé certains postulats clés pour effectuer un suivi adéquat des ouvrages de GDEP dont le comportement hydraulique et la configuration sont complexes : (1) les ouvrages doivent être conçus pour permettre et faciliter l'installation d'équipements de suivi, sinon adaptés ou réaménagés; (2) une bonne compréhension du bilan hydrique est cruciale pour comprendre la performance hydraulique, de qualité de l'eau et de maintenance à long terme; et (3) le suivi des ouvrages de GDEP nécessite des techniques et des équipements particuliers pour s'adapter aux particularités des sites. Par exemple, le choix d'un équipement de mesure du débit doit considérer le niveau de précision souhaité, la composition de l'eau, l'espace disponible, la résistance aux débris, etc.

Lors de la conception, le choix des ouvrages à implanter pour atteindre les critères hydrauliques est une étape clé. Le Guide de gestion des eaux pluviales (ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC), s. d.) propose une classification des pratiques de gestion optimale (PGO) : les bassins de rétention, les marais artificiels, les systèmes avec végétation, les systèmes avec infiltration, les systèmes de filtration et d'autres méthodes influant les mécanismes hydrodynamiques à vortex. MELCC (s. d.) présente les principaux types d'aménagement connus, mais il existe d'autres méthodes de gestion. Des méthodes de contrôle à la source ou des stratégies de développement différentes sont en essor. En ce sens, Peterson et al. (2021) se sont intéressés à d'autres types de GDEP en proposant des alternatives comme la restauration des plaines inondables en région rurale. Des analyses de cycles de vie, de coûts et d'études des impacts des changements climatiques ont été réalisées sur des sites en Pennsylvanie, aux États-Unis, pour comparer la performance économique et environnementale de plusieurs options de GDEP : l'implantation de bassins de rétention souterrains ou de surface, l'installation de pavé perméable ou la restauration des

plaines inondables (Peterson et al., 2021). Les chercheurs ont démontré que la restauration des plaines inondables constitue la meilleure option au niveau des coûts, de l'impact environnemental et de la pérennité des ouvrages, tant que le sol n'est pas contaminé.

Malheureusement, l'occupation des terres en bordure de cours d'eau permet rarement la restauration des plaines inondables en milieu urbain. D'autres options sont alors choisies pour gérer les eaux de pluie. C'est le cas du marché public de Longueuil, au Québec, qui intègre plusieurs types de PGO disposées en série. Brodeur-Doucet et al. (2021) se sont intéressés aux trois chaînes de PGO de ce site : (1) des cellules de biorétention suivies d'un bassin à retenue permanente, (2) une tranchée drainante suivie d'un bassin sec et (3) une tranchée drainante suivie d'un bassin sec suivi d'un bassin à retenue permanente. Leurs principaux constats relatifs à l'hydraulique sont les suivants : les cellules de biorétention seules permettent en moyenne une réduction du débit de pointe de 95 % et un décalage de 52 minutes respectivement, la tranchée drainante retarde le débit de pointe de 30 à 45 minutes, la tranchée drainante combinée au bassin sec retarde le débit de pointe de 40 à 50 minutes et le bassin à retenue permanente, en aval de l'une ou l'autre des chaînes de traitement, permet d'atteindre des délais totaux de 120 à 240 minutes (Brodeur-Doucet et al., 2021).

La documentation relative aux aspects hydrauliques spécifiquement pour des bassins souterrains en eaux pluviales est limitée. Soleno (2021) présente certains projets réalisés au Québec avec des chambres souterraines de rétention : le remplacement d'un bassin à ciel ouvert pour récupérer de l'espace de stationnement dans une cour industrielle à Laval, l'aménagement de quatre bassins de rétention sous un futur parc à Brossard et l'aménagement de bassins de rétention pour un nouveau développement à Sainte-Julie.

Le pavé perméable est un autre exemple d'ouvrage de GDEP pour lequel la performance et le vieillissement est peu documenté dans un climat semblable à celui du Québec. L'évolution du taux d'infiltration de surface dans le temps est incertaine, surtout si on s'intéresse à toute la vie utile du pavé. Drake et al. (2013) ont effectué une revue des données actuelles relatives au pavé perméable et ont défini plusieurs éléments manquants à la connaissance pour permettre aux décideurs d'utiliser le pavé perméable avec la même confiance que les aménagements traditionnels. Les données relatives à l'analyse du cycle de vie ainsi qu'aux coûts d'installation et d'entretien ne sont pas assez nombreuses et crédibles selon les chercheurs. Drake et al. (2013) ont soulevé aussi que les études actuelles concernent principalement des sites locaux, alors que les impacts à grande échelle devraient

être étudiés. Les pavés perméables peuvent être catégorisés en deux types : ceux dont le revêtement lui-même est poreux et ceux composés de blocs imperméables entre lesquels des interstices perméables sont conçus pour capter l'eau. Le pavé perméable *Inflo*, présent sur le site à l'étude et présenté dans les prochaines sections, est un exemple de ce deuxième type (Techo-Bloc, 2018). Selon la fiche technique du fabricant, ce pavé perméable a un taux d'infiltration théorique de 21 000 mm/h à sa surface (Techo-Bloc, 2018). Le taux d'infiltration à la surface ne permet pas à lui seul de réaliser les calculs de conception pour le dimensionnement ou de simuler l'écoulement par modélisation. En effet, il faut considérer le patron de dispersion de l'eau en surface, les matériaux sous-jacents au pavé, la nature du sol, la hauteur de la nappe phréatique, etc. (Tirpak et al., 2021). Dans ce contexte, Tirpak et al. (2021) se sont intéressés à la réduction du volume, à la gestion du débit de pointe et au temps de réponse d'une zone de pavé perméable de 470 m². Le site est situé en Ohio, aux États-Unis, dans un climat continental humide (Hufty, 1976), donc le même type de climat que le site de Rivière-du-Loup. Tirpak et al. (2021) ont représenté le site dans le logiciel Storm Water Management Model (SWMM) avant la construction (zone imperméable) et ont comparé les résultats de modélisation avec des paramètres mesurés au site construit. Ils ont montré que l'intensité des débits de pointe subit une diminution médiane de 75 %, un décalage médian de 29 minutes et une réduction du volume de 69 % (Tirpak et al., 2021). D'autres études, prenant place principalement aux États-Unis, se sont intéressées à ces paramètres. Des réductions de débit de pointe variant entre 60 et 100 % ont été observées, de même que des réductions de volume de 16 à 100 % (Bean et al., 2007; Braswell et al., 2018; Collins et al., 2008; Drake et al., 2014; Fassman et Blackbourn, 2020; Wardynski et al., 2013 et Winston et al., 2016). Vaillancourt et al. (2019) se sont intéressées spécifiquement aux taux d'infiltration et aux performances hydrauliques du pavé perméable de cinq sites au Québec situés dans des stationnements ou des chemins d'accès âgés de 2 à 5 ans. Les taux d'infiltration mesurés varient entre 121 et 23 121 mm/h, pour une moyenne de 4 044 mm/h, sans diminution en hiver (Vaillancourt et al., 2019). Aussi, un modèle calibré et des mesures prises au site ont permis d'évaluer la réduction du ruissellement entre 26 à 98 % et le décalage du débit de pointe de 4 minutes à 4 h 42 (Vaillancourt et al., 2019). Huang et al. (2016) ont aussi suivi les taux d'infiltration de surfaces de pavé perméable dans des conditions hivernales, à Calgary au Canada, mais sont arrivés à des constats légèrement différents. À l'inverse des sites étudiés par Vaillancourt et al. (2019), il y a eu épandage de sable en période hivernale sur les trois surfaces de pavé perméables étudiées à Calgary. Huang et al. (2016) ont constaté que les périodes d'épandage de sable entraînent des réductions majeures des taux

d'infiltration. Lors du premier hiver suivant l'installation du pavé, l'épandage de sable a causé une diminution de 93 % du taux d'infiltration initial (Huang et al., 2016). Les performances hydrauliques du pavé perméable sont donc très variées et dépendent de multiples paramètres : l'intensité des événements de pluie, le colmatage du pavé perméable, le type de sol, la configuration du site, etc.

Il peut donc y avoir une évolution temporelle des taux d'infiltration en surface, donc de la performance, par l'accumulation de particules dans les pores des interstices du pavé perméable. Les mesures d'entretien et de maintenance du pavé perméable sont variées. Winston et al. (2016) ont étudié différentes techniques : (1) l'enlèvement manuel des deux premiers centimètres de matériel dans les interstices, (2) l'aspiration par un camion vacuum, (3) le nettoyage avec un jet d'eau sous pression, (4) le fraisage et (5) le nettoyage par un balai mécanique. Les sites étudiés sont localisés en Suède et aux États-Unis. Leur âge, leur conception et leur entretien sont variés. L'option (1) n'augmente pas significativement les taux d'infiltration si des particules fines sont déposées plus en profondeur (Winston et al., 2016). Le nettoyage par balai mécanique s'avère moins avantageux que la combinaison du nettoyage au jet d'eau sous pression et du vacuum selon Winston et al. (2016). Surtout, Winston et al. (2016) constatent que des entretiens idéaux ne peuvent pas compenser une construction ou une conception déficiente. Huang et al. (2016) ont mesuré une augmentation du taux d'infiltration de près de 60 % par un nettoyage à jet d'eau sous pression au site de Calgary, présenté précédemment.

2.2 Qualité de l'eau

Cette section présente certaines informations disponibles relatives aux sources, aux processus et aux teneurs des paramètres analysés dans la présente étude : les MES, l'azote total, le phosphore total et la conductivité électrique.

Les MES sont issues de plusieurs sources, organiques ou inorganiques, anthropiques ou naturelles. Epps et al. (2021) s'intéressent aux facteurs qui influencent les teneurs en MES et de certains contaminants dans l'eau de ruissellement par l'étude de trois sites au Tennessee (États-Unis) dont la superficie des bassins versants varie entre 1,8 et 671 ha et de 25 à 36 % de perméabilité. Selon Epps et al. (2021), les teneurs en MES et autres contaminants des eaux de ruissellement dépendent principalement de la composition du bassin versant, qui serait le facteur d'influence principal. Le type de pluie aurait également un impact sur la proportion du bassin versant qui contribue au ruissellement.

Les conditions (temps sec, pluie) des périodes précédant la pluie auraient également un fort impact sur les teneurs en MES du ruissellement (Epps et al., 2021).

La conductivité électrique de l'eau dépend de nombreux facteurs : la présence de sels, la teneur en matière organique, la température, etc. (Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ), 2015). La conductivité électrique est principalement analysée pour l'eau souterraine, il n'y a pas de critère relatif à la conductivité électrique dans la réglementation québécoise relative aux eaux pluviales, ni pour l'eau potable ou les eaux usées, selon les documents consultés : le Code de conception d'un système de gestion des eaux pluviales admissible à une déclaration de conformité, le Règlement sur l'encadrement d'activités en fonction de leur impact sur l'environnement, le Règlement sur les ouvrages municipaux d'assainissement des eaux usées, le Règlement sur les aqueducs et égouts privés, les Critères de qualité de l'eau de surface, le Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection et le Règlement sur la qualité de l'eau potable (MELCC, 2021a). Les études scientifiques s'intéressant à la conductivité électrique des eaux pluviales sont rares, probablement, tel que mentionné, en raison des multiples facteurs qui l'influencent et du fait qu'il s'agit d'un paramètre surtout utilisé en eaux souterraines. Kim et al. (2012) ont effectué un suivi de la conductivité électrique de l'eau d'un lac, mais c'était dans le but de développer un modèle pour prédire la teneur en azote dissout. Ils ont établi que la conductivité électrique et la turbidité prédisent adéquatement la teneur en azote dissout et les apports en azote dans l'eau de ruissellement à la suite d'un événement de précipitations (Kim et al., 2012). Les chercheurs ont constaté que l'étude de la variation de la conductivité électrique pourrait permettre de détecter une contamination de l'eau.

Les sources de phosphore dans l'eau peuvent être d'origine anthropique ou naturelle, par lessivage des roches, par érosion ou par décomposition de la matière organique par exemple. Les sources de phosphore associées aux activités résidentielles sont définies et quantifiées par Rose-Tremblay (2013) qui a mené une étude des pratiques des résidents du Québec. L'ajout d'engrais et l'utilisation de savons pour le nettoyage extérieur, des voitures notamment, seraient les principales sources anthropiques de phosphore par des activités résidentielles. Bien que les activités agricoles constituent une source majeure et reconnue de phosphore pour plusieurs bassins versants, il est pertinent de noter que les activités résidentielles ont également un impact sur les teneurs en phosphore des eaux de ruissellement. Statistique Canada (2021) révèle que 51 % des ménages québécois affirment avoir appliqué des engrais chimiques ou organiques sur leur terrain en 2019, dont l'application a été réalisée

par un membre du ménage dans la plupart des cas. Rose-Tremblay (2013) soulève que l'application d'engrais par les citoyens (et non par des professionnels) résulte souvent en l'application d'une grande quantité ponctuelle, plutôt que plusieurs petites applications, ce qui rendrait plus propice le ruissellement du phosphore. Néanmoins, les engrais à gazon disponibles sur le marché contiennent généralement peu ou pas de phosphore : l'impact n'est donc pas comparable à celui des activités agricoles à plus grande échelle.

Plusieurs processus de transport et de traitement sont impliqués dans la gestion des eaux pluviales. Le MELCC (s. d.) identifie quelques-uns des processus impliqués, qui sont physiques, chimiques ou biologiques : la décantation, la flottation, la sorption au sol, la précipitation dans l'eau, l'assimilation biologique, la sorption par des algues, la transformation par des bactéries et l'assimilation par des plantes. Yan et al. (2011) ont démontré qu'une bonne partie des charges polluantes contenues dans les eaux pluviales se trouvent fixées sur des particules solides en suspension, qui ont la capacité de décanter lorsque les vitesses d'écoulement sont limitées. Ce constat est établi par la modélisation en trois dimensions, validée par des tests dans un bassin pilote (Yan et al., 2011). Beaudet et al. (2008) ont précisé les modes de transport du phosphore. Les principaux facteurs d'influence du transport du phosphore sont les conditions climatiques, les propriétés des sols, le réseau hydrographique et d'autres paramètres spécifiques à l'agriculture (Beaudet et al., 2008).

Le MELCC (2021a) définit certains critères de qualité de l'eau de surface pour la protection de la vie aquatique d'eau douce relatifs à l'azote (modifiés en 2021) et au phosphore, présentés au Tableau 1.

Tableau 1: Critères de qualité de l'eau de surface (MELCC, 2021a)

Paramètre	Valeurs aiguës à l'effluent	Critères de toxicité aiguë	Critères de toxicité chronique
Azote total (mg/L)	34*	17*	1,9*
Phosphore total (mg/L)	Aucun critère	Aucun critère	0,01 à 0,03 ou < 50 % d'augmentation

*Ce critère varie en fonction du pH et de la température; les valeurs sont indiquées pour un pH de 7,0 et une température de 20 °C à titre indicatif.

Les concentrations en MES, en azote total et en phosphore total ainsi que la conductivité électrique varient grandement selon le site, la position dans la chaîne de traitement et le temps. Pitt et al. (2004) reprennent des résultats d'analyses réalisées sur des eaux de ruissellement provenant de plusieurs endroits aux États-Unis. La variabilité du type d'événement de pluie, des aires tributaires, des activités humaines, etc. limite les comparaisons possibles entre sites. Les résultats d'analyses pour ces multiples sites sont présentés au Tableau 2, en plus des résultats d'autres études scientifiques. Pour le même site du marché public de Longueuil décrit à la section « Hydraulique », Brodeur-Doucet et al. (2021) ont évalués des teneurs en MES des eaux de ruissellement de 4 à 238 mg/L, pour une moyenne de 63 mg/L, des teneurs en phosphore de <0,03 à 0,80 mg/L (moyenne : 0,29 mg/L) et des teneurs en azote de <0,3 à 2,5 mg/L (moyenne : 1,5 mg/L). Selon Brodeur-Doucet et al. (2021), l'enlèvement moyen de ces paramètres par le bassin sec aménagé sur ce site est évalués à : 164 % (MES), 322 % (phosphore) et 10 % (azote). Winston et al. (2020) ont étudié les performances d'une chaîne de traitement composée de pavé perméable (270 m²) suivi d'un bassin de rétention souterrain (11,9 m³) donc un site dont la composition est relativement similaire au site à l'étude dans le présent mémoire (présenté aux prochaines sections). Les blocs de pavé sont imperméables et leurs interstices sont perméables. Ses drains de fondation sont reliés au bassin souterrain. Il reçoit les eaux de ruissellement d'un bassin versant de 465 m² imperméable à 100 % (Winston et al., 2020). Un enlèvement moyen de 99,5 % des MES, de 59 % de l'azote total et de 78 % du phosphore ont été mesurés par les chercheurs entre les eaux de ruissellement et la sortie du site, qu'ils ont attribué aux réactions chimiques, à la filtration et à la sédimentation.

Tableau 2: Récapitulatif des résultats de qualité de l'eau de ruissellement de sites comparables

Paramètre	Gamme de valeurs	Moyenne	Lieu	Source
MES (mg/L)	4 à 238	63	Stationnement, Québec	Brodeur-Doucet et al. (2021)
	27 à 560	71	Secteur résidentiel, Québec	Carpenter et al. (2014)
	-	65 (médiane)	n. d.	Clary et al. (2020)

Paramètre	Gamme de valeurs	Moyenne	Lieu	Source
	5 à 5 000	49 (médiane)	991 observations de sites résidentiels, États-Unis	Pitt et al. (2004)
	41,2 à 3 025	450	Stationnement commercial, Ohio, États-Unis	Winston et al. (2020)
PT (mg/L)	<0,03 à 0,80	0,29	Stationnement, Québec	Brodeur-Doucet et al. (2021)
	-	0,25 (médiane)	n. d.	Clary et al. (2020)
	0,01 à 100	96,9 (médiane)	963 observations de sites résidentiels, États-Unis	Pitt et al. (2004)
	0,03 à 0,93	0,29	Stationnement commercial, Ohio, États-Unis	Winston et al. (2020)
NT (mg/L)	<0,3 à 2,5	1,5	Stationnement, Québec	Brodeur-Doucet et al. (2021)
	-	1,24 (médiane)	n. d.	Clary et al. (2020)
	0,008 à 50	1,4 (médiane)	7 observations de sites résidentiels, États-Unis	Pitt et al. (2004)
	0,77 à 5,34	2,00	Stationnement commercial, Ohio, États-Unis	Winston et al. (2020)
CE (μ S/cm)	n.d.	96,5 (médiane)	106 observations de sites résidentiels, États-Unis	Pitt et al. (2004)

Note : la mention Québec désigne la province de Québec, pour différentes villes et municipalités.

Liu et al. (2015) ont évalué la performance d'ouvrages de GDEP à l'échelle d'un bassin versant situé en Indiana aux États-Unis dont l'occupation du sol est principalement résidentielle, mais aussi commerciale et industrielle. Les coûts et les performances de traitement de plusieurs types d'ouvrages ont été évalués d'après une compilation des études antérieures et par modélisation. Selon le scénario, les gammes d'enlèvement varient entre 0,5 et 34 % pour l'azote total, 0,3 à 47 % pour le phosphore

total et 0,6 à 54 % pour les MES et il est établi que les noues engazonnées présentent la meilleure performance par rapport à leur coût (Liu et al., 2015). Cependant, il n'y a pas eu de calibration du modèle avec des données de qualité de l'eau récoltées au site.

2.3 Plantes et substrat

Plusieurs volets relatifs aux plantes et au substrat sont considérés dans un contexte de gestion de l'eau. Une norme nationale pour la conception des systèmes de biorétention a été publiée récemment (Groupe CSA, 2019). Les critères généraux définis par cette norme sont le traitement des eaux pluviales, la diminution du volume d'eau de ruissellement destinée au milieu récepteur et l'atténuation du débit de pointe (Groupe CSA, 2019).

Pour atteindre ces critères, un choix de plantes adéquat doit être réalisé, basé sur plusieurs facteurs. Cagelais (2014) énonce cinq fonctions pour guider le choix des plantes dans les biorétentions au Québec : la capacité à traiter les eaux de pluie, la capacité à réduire les volumes d'eau et les débits de pointe, la tolérance aux conditions des zones de biorétention en milieu urbain et l'amélioration de la qualité ornementale. Par une revue des études réalisées avec différentes espèces, cet auteur a déterminé que les espèces les plus performantes pour traiter les polluants, pour réduire les volumes d'eau et les débits de pointe et pour résister aux variations de teneur en eau du sol sont généralement celles dont la croissance est rapide, ayant une grande biomasse, un réseau racinaire profond et occupant une grande superficie du sol (Cagelais, 2014). Selon cette même étude, la présence de plantes dans les biorétentions n'aurait pas d'effet positif sur l'enlèvement des sels de déglçage et des pathogènes (indiqués par *Escherichia coli*). Concernant ce même sujet, Stuber (2012) évalue la capacité de certaines espèces d'arbres disposés dans des biorétentions à traiter les eaux de ruissellement. Il est établi que l'espèce est un facteur significatif pour prédire la concentration en nutriments dans les cellules de biorétentions (Stuber, 2012). Le choix des végétaux devrait donc être un paramètre de conception considéré avec la même importance que le volume ou le type de substrat lors de la conception. Le choix des plantes des biorétentions situées à Longueuil, dans un climat similaire à celui de Rivière-du-Loup (climat continental humide), a été basé sur les critères suivants : la tolérance à la sécheresse, à la chaleur, aux inondations temporaires, à la pollution, aux sels de déglçage et au gel ainsi que leur type et période de floraison (Brodeur-Doucet, 2018). Sur ce même site, le substrat utilisé a les caractéristiques granulométriques suivantes : <10 % de gravier (> 2mm), 65 à 75 % de sable (50 µm à 2 mm), 13 à 30 % de limon (2 à 50 µm) et 5 à 12 % d'argile (<2 µm).

Une étude menée par Yuan et Dunnett (2018) a évalué la réponse de plusieurs espèces de végétaux à des cycles d'inondation et de sécheresse. Les tests simulent une journée d'inondation, suivi de quatre jours de sécheresse. Ce protocole est intéressant à analyser puisqu'il s'approche des conditions générales moyennes au Québec où de la pluie est observée environ aux trois jours. En revanche, les conditions critiques pour la survie des plantes correspondent plutôt à des sécheresses prolongées (quelques semaines sans précipitation) qui ne sont pas simulées dans l'étude, mais qui surviennent généralement chaque année au Québec. Il est déterminé, dans l'étude de Yuan et Dunnett (2018), que la majorité des espèces choisies ont atteint une croissance optimale et ne montrent pas de signes de stress.

Il existe certaines références spécifiques aux espèces du site à l'étude. Bailey et al. (1997) recommandent un arrosage journalier des cornouillers, mais sans mouiller le feuillage. Cette recommandation n'est pas réaliste dans un contexte d'entretien réalisé par une municipalité. Ils recommandent également la coupe annuelle des branches et des feuilles mortes. Wenyan et al. (2011) affirment que le cornouiller a une très grande résistance à la sécheresse par une expérience simulant les conditions de bordure d'autoroute.

Tel que décrit à la prochaine section, quatre espèces de végétaux sont implantées sur le site à l'étude. Les hauteurs attendues pour ces végétaux varient d'une source à l'autre. Ces valeurs ne sont pas nécessairement applicables au climat local et ne sont pas issues de publications scientifiques, provenant parfois des fiches techniques de fournisseurs.

Tableau 3: Dimensions attendues des espèces au site

Plante	Hauteur (m)	Largeur (m)	Source
Lilas japonais, <i>Syringa reticulata</i>	8,0	4,0	Hydro-Québec (s. d.)
	7,0	6,0	Jardin2m (s. d.)
	7,0	5,5	Gadenia (s. d.)
Cornouiller Ivory Halo, <i>Cornus alba</i>	1,8	1,8	Jardin2m (s. d.)
	2,0	1,5	Jasmin (s. d.)
	2,0	2,0	Hydro-Québec (s. d.)
Avoine vivace Saphirsprudel,	0,6 à 1,5	0,3 à 0,6	Gadenia (s. d.)
	0,6	0,6	Jardin2m (s. d.)

Plante	Hauteur (m)	Largeur (m)	Source
<i>Helictotrichon sempervirens</i> 'Saphirsprudel'			
Agrostide à feuilles étroites, <i>Calamagrostis acutiflora</i> 'Karl Foerster'	1,5	0,6	Jardin2m (s. d.)
	0,9 à 1,8	0,3 à 0,6	Gadenia (s. d.)

Des données issues d'études scientifiques qui ont suivi et étudié la croissance et la résistance de plusieurs végétaux dans des biorétentions sont donc disponibles. Cependant, il existe très peu de données sur la performance des espèces au Québec. Considérant l'essor de l'implantation des systèmes de biorétention au Québec, les décideurs municipaux se questionnent et recherchent activement ce type d'information. Ces données sont cruciales pour la conception et la construction d'infrastructures pérennes et efficaces.

La mesure de la croissance des plantes peut également s'effectuer par d'autres moyens. L'application mobile Canopeo permet d'évaluer la surface de canopée par la quantification des pixels verts détectés. Patrignani et Ochsner (2015) évaluent à 90 % le niveau de précision de Canopeo par rapport au logiciel SamplePoint reconnu dans le domaine. SamplePoint a été développé en 2004 pour analyser une grande quantité d'images aériennes, par pixel (SamplePoint, 2018) comme le logiciel Canopeo.

3. Méthodologie

Une description du site à l'étude est réalisée, suivie de la méthodologie employée pour obtenir des résultats selon les trois volets : hydraulique, qualité de l'eau et plantes et substrat.

3.1 Description du site

3.1.1 Mise en contexte

Le site à l'étude est constitué d'un tronçon de 230 m de la rue Sainte-Claire à Rivière-du-Loup. Il s'agit d'une rue résidentielle relativement peu fréquentée. La position de la rue par rapport au réseau municipal est illustrée à la Figure 1.

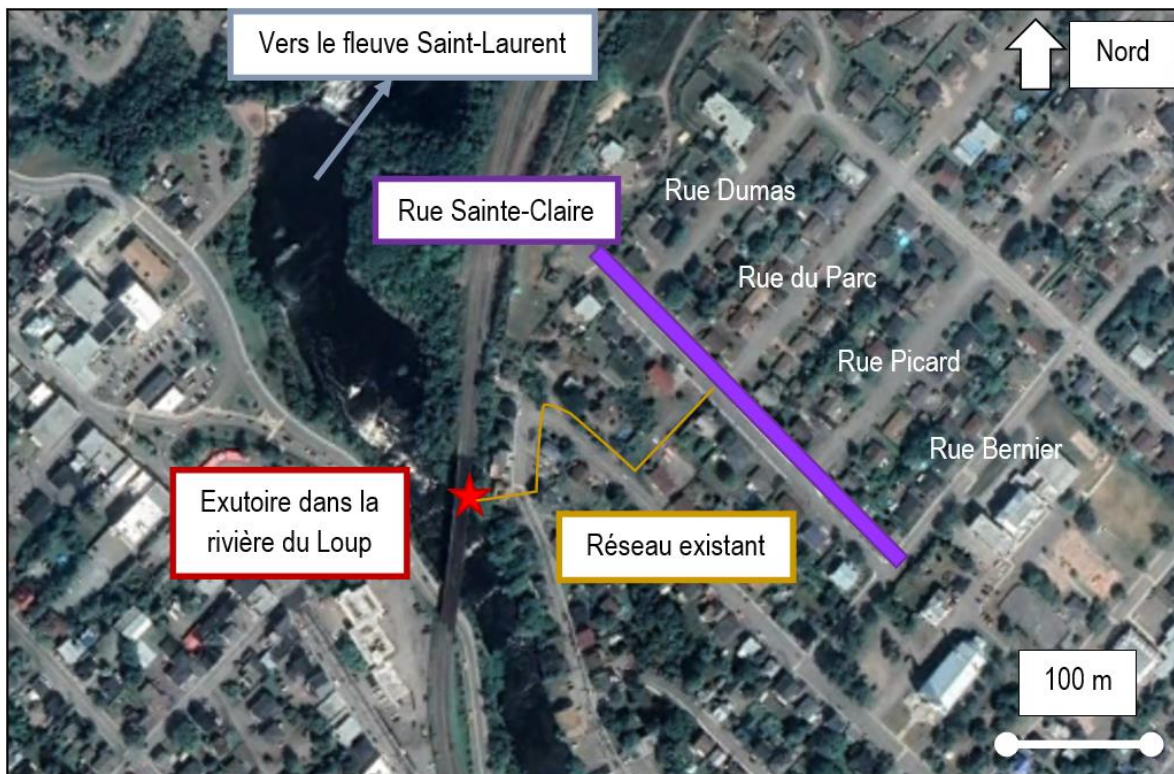


Figure 1: Localisation de la rue Sainte-Claire et du milieu récepteur

Avant les travaux de réfection, il s'agissait d'une rue très large, fortement imperméable et desservie par un réseau unitaire. Certains événements de pluie entraînaient alors des débordements d'eaux usées au milieu récepteur, la rivière du Loup, identifiée à la Figure 1. Des travaux ont été réalisés en 2019, consistant en l'implantation d'un réseau de collecte des eaux sanitaires, la réfection du réseau

de distribution de l'eau potable et l'ajout d'un système de collecte et de traitement des eaux pluviales composé : (1) de cellules de biorétention, (2) de bandes de pavé perméable et (3) de chambres souterraines de rétention. Sous ces structures, le sol naturel est composé principalement de schiste concassé dont les taux d'infiltration sont variés. La Figure 2 présente une vue du site avant et après les travaux sur laquelle la très grande surface de rue imperméable est notable (image de gauche, avant les travaux).



Figure 2: Vue de la rue Sainte-Claire avant et après 2019, tiré de Google Maps (2015) et de Google Maps (2021)

3.1.2 Description des composantes

Les cellules de biorétention prennent la forme d'une bande longitudinale d'une largeur d'un peu plus de 2,5 m située sur toute la longueur du côté impair de la rue, du côté nord-est, entre les voies de roulement et la piste multifonctionnelle, totalisant près de 350 m². Elles sont enveloppées d'une membrane géotextile non tissée Novatex 90 dont les caractéristiques sont présentées à l'Annexe A. Aucun drain ni lien hydraulique direct avec les autres ouvrages n'est présent. La majorité des travaux a eu lieu à la fin de l'été 2019 et les végétaux ont été plantés à la mi-juin 2020. La Figure 3 présente schématiquement la coupe type des cellules de biorétention.

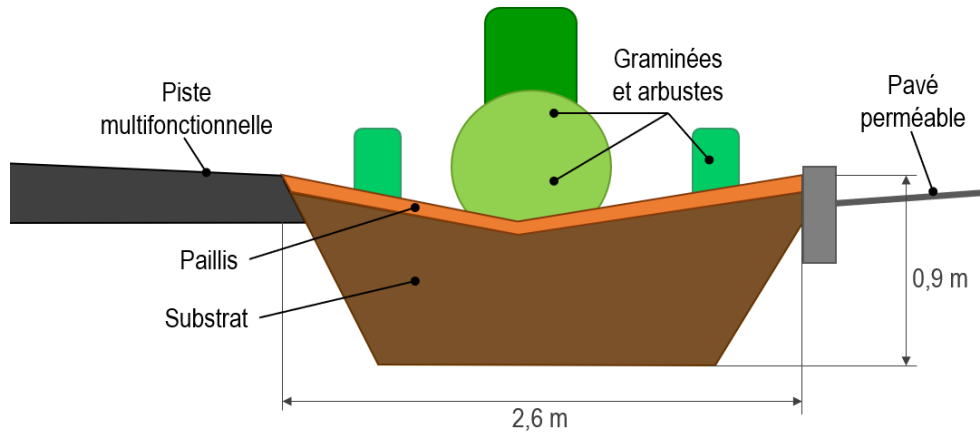


Figure 3: Coupe type des biorétentions

Le site est composé également de deux bandes de pavé perméable d'une largeur d'un mètre situées de part et d'autre de la rue, totalisant 402 m². Il s'agit du pavé Inflo par Techo-Bloc® dont les interstices sont comblés de pierre nette d'un diamètre de 2,5 à 10 mm. Ces blocs reposent sur de la pierre nette d'un diamètre de 40 à 80 mm, entourée d'une membrane géotextile. Au fond de ces bassins de pierre nette se trouvent des conduites perforées servant de drain menant à des puisards. Tous les puisards sont aménagés pour obtenir un écart de 300 mm entre la conduite de sortie et le fond, servant de trappes à sédiments. Il y a une petite zone où du pavé alvéolé a été installé, à la même position que la cellule de biorétention sur la Figure 3. Le matériel sous-jacent n'est pas conçu pour l'infiltration. À cet endroit, l'eau ruisselle pour atteindre un puisard en bordure de rue.

En aval des puisards et du pavé perméable se trouvent trois rangées de chambres souterraines de rétention Hydrostor HS75 de Soleno en forme d'arche. Ces 66 chambres totalisent un volume de 222 m³. Sous les chambres se trouvent une géogrille, de la pierre nette concassée de 19 à 50 mm et des drains perforés. En amont du bassin se trouvent deux unités de prétraitement, dans les regards d'entrée au bassin (RP-8 et RP-15 illustrés à la Figure 22). Un décalage de 1200 mm est aménagé entre le fond et la conduite de sortie de ces regards, qui sont respectivement d'un diamètre de 1650 mm et 1220 mm. Dans le regard en aval du bassin se trouve un mur orifice permettant le passage du débit de récurrence 50 ans et un déversoir d'urgence, le tout menant au réseau pluvial existant et à la rivière du Loup.

3.1.3 Description de l'écoulement

Des choix de conception ont été réalisés afin de diriger l'eau vers un certain type d'ouvrage selon sa provenance. Il est possible de diviser le bassin versant en trois sous-bassins :

1. Rues perpendiculaires

Il existe trois rues adjacentes dont les eaux de ruissellement se dirigent vers la rue Sainte-Claire : les rues du Parc, Dumas et Picard. Ces rues sont caractérisées par une pente moyenne assez forte, une largeur importante (15 m en moyenne) et l'absence de bordures pour certains tronçons. Le ruissellement en provenance de ces rues est capté directement par des puisards, puis acheminé au bassin de rétention.

2. Rue Sainte-Claire

Cette rue est formée en couronne, donc le ruissellement est dirigé de part et d'autre de la rue pour être capté par les interstices du pavé perméable. Dans le cas où le débit de ruissellement dépasse la capacité du pavé perméable, l'eau excédentaire est captée par des puisards situés à intervalles réguliers. L'eau captée par le pavé perméable peut soit (1) s'infiltrer dans le sol et recharger la nappe phréatique ou (2) être évacuée par les drains vers des puisards menant au bassin de rétention.

3. Terrains privés

Les précipitations qui tombent sur les terrains privés des citoyens ont d'abord la possibilité de s'infiltrer dans le sol : il y a beaucoup de zones perméables. Autrement, du côté pair de la rue, l'eau des terrains privés est captée par le pavé perméable ou par les puisards comme pour l'eau provenant de la rue Sainte-Claire. Du côté impair de la rue, l'eau s'écoule sur la piste multifonctionnelle, puis vers les cellules de biorétention où il peut y avoir infiltration dans le sol et recharge de la nappe phréatique. L'eau infiltrée dans les biorétentions pourrait circuler horizontalement dans le sol et éventuellement être captée par les drains du pavé perméable, puis circuler dans le bassin. Pour un événement peu fréquent, il pourrait y avoir débordement des biorétentions vers le pavé perméable et les puisards si le débit de ruissellement dépassait la capacité d'infiltration dans le sol et que les biorétentions étaient saturées. Cette situation n'a pas été observée jusqu'à maintenant.

La Figure 21 de la section 4 présente schématiquement et en détails l'écoulement.

Dans toutes les situations, l'eau de ruissellement qui ne reste pas dans les aspérités de surface s'infiltre dans le sol ou rejoint le réseau de conduites et passe dans le bassin de rétention. Ceci est vrai à l'exception du ruissellement d'une zone de 0,03 ha qui est capté par le puisard à l'extrémité nord-ouest du site dont l'aval est directement lié au réseau existant. La Figure 4 présente une vue globale de la rue Sainte-Claire.

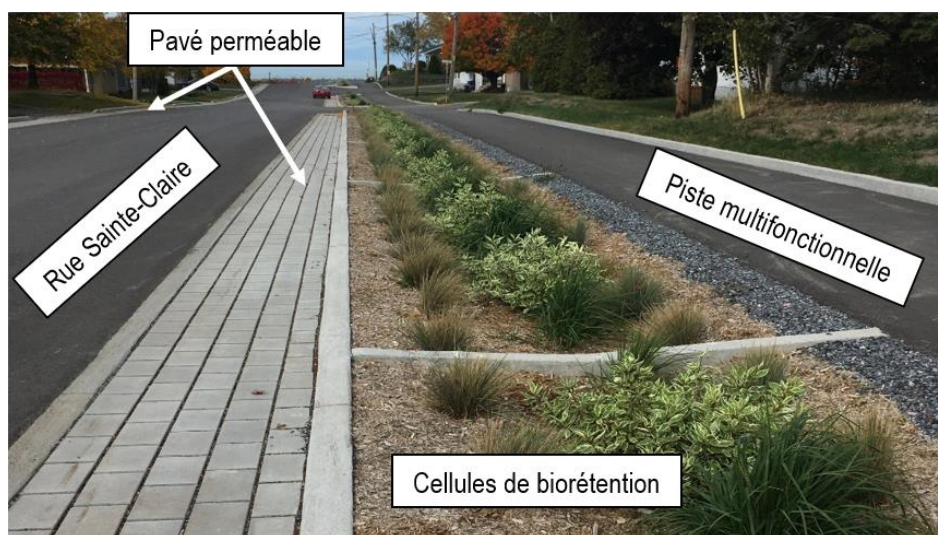


Figure 4: Vue globale de la rue Sainte-Claire en mai 2021

De la gauche vers la droite, on observe sur la Figure 4 : la bande de pavé perméable du côté pair de la rue, la surface de roulement de la rue Sainte-Claire, la bande de pavé perméable du côté impair de la rue, les cellules de biorétention et la piste multifonctionnelle.

Les espèces de végétaux suivantes sont installées dans les biorétentions : (1) le lilas japonais, *Syringa reticulata*; (2) le cornouiller Ivory Halo, *Cornus alba*; (3) l'agrostide à feuilles étroites, *Calamagrostis acutiflora* 'Karl Foerster' et (4) l'avoine vivace Saphirsprudel, *Helictotrichon sempervirens* 'Saphirsprudel'. La Figure 5 présente le calibre des plants directement après la plantation, le 16 juin 2020. Les lilas japonais sont mis en évidence par des cercles dans l'image de droite pour faciliter la visualisation.



Figure 5: État des végétaux après la plantation e 16 juin 2020

Les trois séries de chambres de rétention se trouvent sous la rue, le pavé perméable et la biorétention pour tout le tronçon entre les rues Dumas et du Parc. La Figure 6 permet de visualiser une partie des chambres de rétention pendant les travaux. L'entrée située au bas à droite de la figure est raccordée au regard RP-8 (localisé à la Figure 21).



Figure 6: Vue des chambres de rétention pendant les travaux

À titre de référence, le regard visible dans la partie gauche de la figure est situé vis-à-vis la bande de pavé perméable du côté impair de la rue.

3.2 Hydraulique

Des équipements ont été installés pour obtenir des données de précipitations, de hauteur d'eau, de température et de vitesse. Ces données ont ensuite été traitées tel que décrit ci-dessous.

3.2.1 Description et disposition des équipements

Un pluviomètre chauffant à auget basculant d'un diamètre de 200 mm (*TR-525-W2 Rainfall Sensor Texas Electronics*) a été installé à moins de 20 m du centre de la rue Sainte-Claire. Il n'y avait aucun obstacle dans le rayon d'influence du pluviomètre. Il y avait basculement de l'auget et enregistrement chaque 0,2 mm de hauteur de précipitation. Le pluviomètre et son module d'enregistrement de données sont illustrés à la Figure 7. Pour les périodes où les données n'étaient pas disponibles pour ce pluviomètre, les données de la station météorologique la plus proche ont été utilisées (Environnement et ressources naturelles Canada (ERNC), 2021). Il s'agit de la station située à l'aéroport de Rivière-du-Loup, à 9,4 km du site à l'étude.



Figure 7: Pluviomètre et son enregistreur de données

Des sondes *HOBO Water Level Logger U20L* mesuraient la pression et la température dans différents regards et puisards du site, notamment aux entrées et à la sortie du bassin. L'une des sondes a été placée sur l'un des échelons supérieurs d'un regard pour obtenir la pression atmosphérique. Un débitmètre hauteur vitesse Teledyne ISCO 2150 a été placé dans un regard directement en amont du raccordement au réseau existant. Cet appareil permet une gamme de mesure des hauteurs de 0,010 à 3,05 m avec une précision de $\pm 0,003$ m et il mesure des vitesses à partir d'une hauteur d'eau de

0,025 m, entre -1,5 et 6,1 m/s avec une précision de $\pm 0,03$ m/s (± 2 % au-delà de 1,5 m/s) (Teledyne ISCO, 2017). La Figure 8 présente schématiquement la disposition des équipements de mesure par rapport aux éléments du réseau, ainsi que la superficie des aires tributaires par puisard. Sur cette figure, la signification des notations est la suivante : PP (pavé perméable), P (puisard), RP (regard pluvial), RÉ (regard régulateur) et les autres lettres correspondent aux points cardinaux.

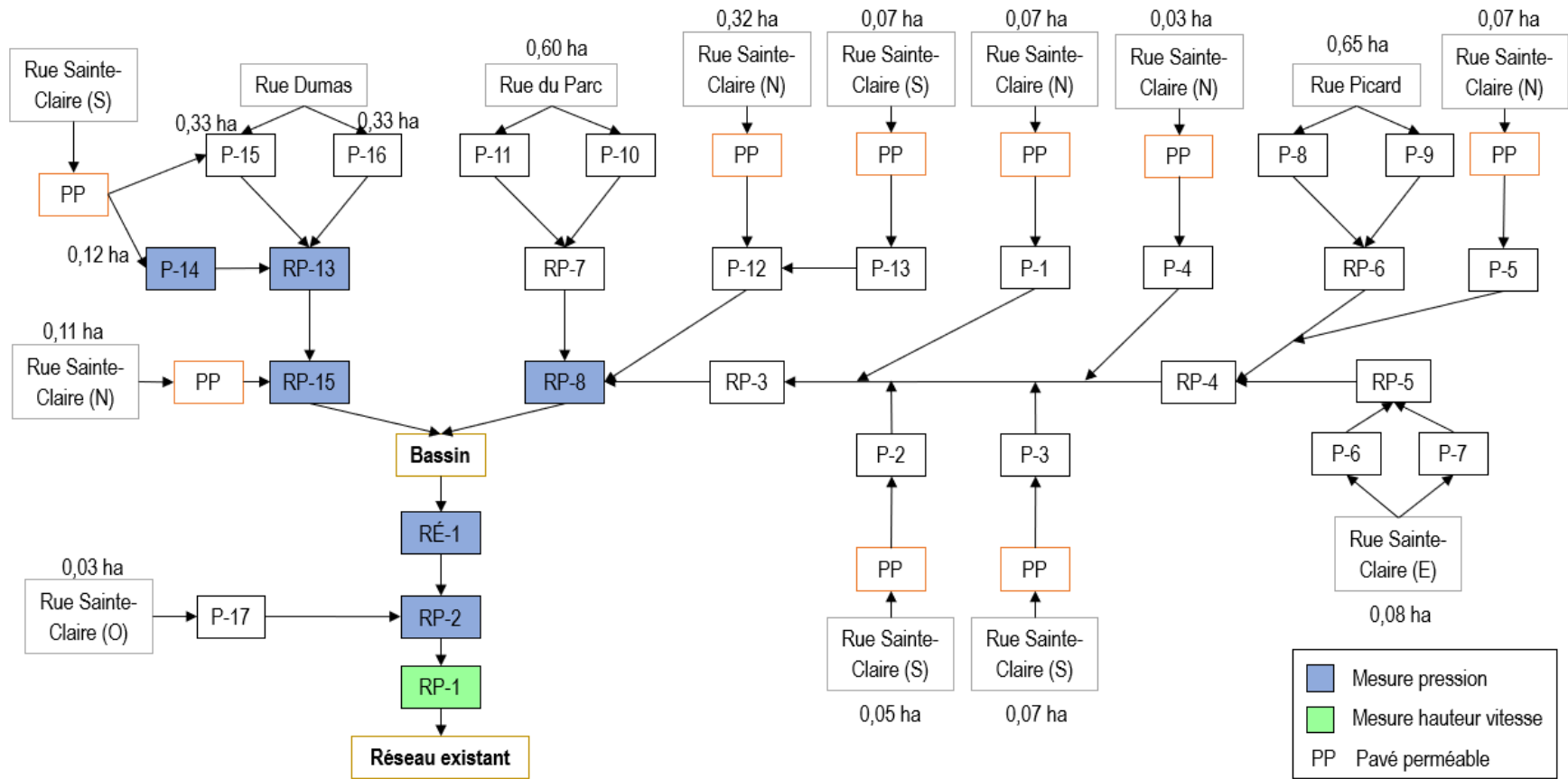


Figure 8: Position des équipements de mesure et composants du réseau

Tel qu'illustré à la Figure 8, des mesures de pression ont été réalisées aux regards ou puisards d'entrée du bassin (RP-15 et RP-8), là où il y a une accumulation permanente d'eau en raison de la hauteur de la conduite de sortie. Les capteurs étaient donc toujours submergés. Pour ces situations, les capteurs étaient maintenus immobiles dans une conduite perforée de PVC fixée sur une dalle déposée au fond (Figure 9, image de gauche). Pour les autres lieux où il n'y a pas d'accumulation permanente d'eau, les capteurs étaient fixés à des ancrages vissés directement au fond des regards, de manière à capter de très faibles hauteurs d'eau et à limiter l'obstruction de l'écoulement (Figure 9, image de droite).



Figure 9: Installation des capteurs de pression lorsqu'immergés en tout temps (à gauche) ou non (à droite)

Le regard de sortie du bassin, RÉ-1, est muni d'un mur orifice. Le capteur est disposé dans cet orifice, mais pas complètement à sa base, tel qu'illustré à la Figure 10. Les très faibles variations de hauteur d'eau n'y étaient pas captées.



Figure 10: Positionnement du capteur de pression dans RE-1

La position exacte des sondes a été déterminée par les relevés GPS du fond des regards et l'épaisseur des équipements qui maintiennent les sondes.

La sonde du débitmètre a été fixée au radier de la conduite d'entrée du regard RP-1 à l'aide d'un arceau métallique (Figure 11). Le module de stockage des données et la batterie ont été positionnés sur l'échelon supérieur du regard.



Figure 11: Position de la sonde du débitmètre dans RP-1

La sonde a été nettoyée périodiquement pour enlever les dépôts qui auraient pu s'y accumuler. Idéalement, la sonde aurait été fixée plus profondément dans la conduite afin de mesurer un écoulement plus stable sans l'effet de la sortie dans le regard. Cela n'a pas été possible pour des raisons opérationnelles.

Les essais d'infiltration réalisés à la surface du pavé perméable et les taux d'infiltration calculés suivent les exigences de la méthode standard C1781/C1781M – 18 (American Society for Testing and Materials (ASTM), 2018). La Figure 12 illustre l'arceau de 300 mm fixé au pavé par du mastic à plomberie. Un premier mouillage a été effectué en versant 3,60 kg d'eau dans l'arceau, en maintenant la hauteur d'eau entre 10 et 15 mm. Ensuite, selon les résultats du premier mouillage, 3,60 ou 18,00 kg d'eau ont été versés de la même manière dans l'arceau en chronométrant le temps requis pour l'infiltration totale. Le taux d'infiltration a ensuite été calculé à partir du diamètre de l'arceau, du volume d'eau infiltré et du temps requis. La fixation de l'arceau au pavé n'était pas toujours étanche. En effet, un volume d'eau considérable s'échappait latéralement par les interstices, surestimant le taux d'infiltration. Cette erreur est négligeable pour les taux d'infiltration plus élevés, mais devient significative quand le taux d'infiltration est sous 500 mm/h environ.



Figure 12: Montage utilisé pour les tests d'infiltration

Des tests ont été réalisés à trois emplacements précis. Un maximum d'un essai a été réalisé à chaque emplacement pour une journée donnée, conformément avec la méthode (ASTM, 2018). Les essais ont été réalisés aux mêmes endroits d'une période à l'autre. L'eau utilisée lors des tests d'infiltration provenait du réseau de distribution d'eau potable.

3.2.2 Traitement et analyse des données

Les données de précipitations ont été générées par le pluviomètre par tranche de deux minutes, avec une précision de 0,2 mm. Une division des données en événements distincts a été réalisée selon

plusieurs paramètres. D'abord, une hauteur totale minimale de 5 mm a été considérée pour constituer un événement. Il s'agit de la limite observée pour que le ruissellement commence sur l'ensemble du site. Cependant, certains échantillons d'eau ont été récoltés lors de pluies de moins de 5 mm : cela s'explique par le fait que le ruissellement commence généralement avant dans les rues perpendiculaires, par leur forte pente et leur bassin versant assez imperméable. Du ruissellement est parfois observé à ces endroits après seulement environ 3 mm de précipitations. Le deuxième critère définit la période minimale de temps sec entre deux événements. L'objectif est de décréter le début d'un nouvel événement s'il n'y a plus d'impacts significatifs de l'événement précédent. La période minimale varie selon la durée et l'intensité moyenne de l'événement précédent. Le début d'un nouvel événement est défini s'il y a absence d'écoulement significatif dans le réseau. Concrètement, des observations ont été réalisées sur le site et les données de pression et de débit ont permis de fixer ce critère à environ six heures pour un événement modéré.

Les données de pression ont été corrigées selon la pression atmosphérique. Des variations de hauteur ont été calculées à partir des variations de pression selon l'équation 1 :

$$h = \frac{p_i - p_{atm}}{g * \rho} = (p_i - p_{atm}) \frac{10^3 \text{ N/m}^2}{\text{kPa}} * \frac{\text{kg}}{9,807 \text{ N}} * \frac{\text{m}^3}{999,498 \text{ kg}} \quad (1)$$

Où h est la hauteur d'eau au-dessus de la sonde en mètres, p_i et p_{atm} les pressions au point i et dans l'air en kPa. La hauteur dépend donc, en plus des pressions mesurées, de l'accélération gravitationnelle g et de la masse volumique de l'eau ρ . Une température de 12°C est considérée en tout temps pour déterminer la masse volumique de l'eau.

Les données de hauteur, de vitesse et de débit fournies par le débitmètre ont été analysées afin de repérer et corriger les éventuelles irrégularités. En effet, une chute drastique de la vitesse, accompagnée par une augmentation progressive de la hauteur pourrait être due à une obstruction qui bloquerait l'écoulement. Cela s'observe plus souvent dans les réseaux sanitaires.

3.2.3 Modélisation

Une modélisation du site a été réalisée dans le logiciel *Storm Water Management Model (SWMM)* (Rossman, 2004) de la *United States Environmental Protection Agency*. Les intrants de modélisation ont été déterminés selon les plans tels que construits, sinon par des estimations ou des valeurs

empiriques (Annexe B). Les recommandations du manuel de référence du logiciel ont été considérées (EPA, 2017). Les bassins de pierre nette sous le pavé perméable ont été modélisés comme des unités de stockage, en considérant une porosité de 40%. Cette porosité a été déterminée par l'analyse des matériaux préalable aux travaux. La variabilité spatiale des taux d'infiltrations du schiste concassé n'a pas été représentée et a été considérée uniforme. Les eaux de ruissellement de la rue Sainte-Claire sont dirigées vers la surface du pavé perméable où elles sont soit captées par les interstices ou ruissellent vers les puisards directement. Cette interaction est complexe et varie notamment selon la vitesse d'écoulement, la position d'entrée et le colmatage du pavé perméable.

Beaucoup de phénomènes physiques relatifs au pavé perméable et au bassin de rétention souterrain n'ont pas été représentés de manière très fidèle aux phénomènes réels. Ce sont donc seulement les débits modélisés en amont du bassin de rétention qui ont été utilisés pour les analyses. En effet, SWMM représente assez bien les mouvements de l'eau en surface, particulièrement sur les surfaces imperméables.

3.3 Qualité de l'eau

Les résultats de qualité de l'eau ont été obtenus par l'analyse d'échantillons d'eau prélevés en différents points du site.

3.3.1 Échantillonnage

Tous les échantillons sont composés de prélèvements réalisés sur toute la durée de la pluie, sauf mention contraire. À chaque pas de temps, une quantité d'eau jugée approximativement proportionnelle au débit était récoltée. Un échantillon composite a ensuite été formé du mélange de tous les prélèvements réalisés en un lieu. Tel qu'illustré à la Figure 13, l'eau a été prélevée à plusieurs points de la chaîne de traitement :

- L'eau de ruissellement de surface a été récoltée directement à l'amont des grilles de puisards (Figure 14). Elle provenait soit de la rue Sainte-Claire (désigné Ruis. Ste-C.), soit des rues perpendiculaires à la rue Sainte-Claire : les rues du Parc, Dumas et Picard (désigné Ruis. perp.). Les échantillons nommés Ruis. correspondent au mélange proportionnel des échantillons Ruis. Ste-C. et Ruis. perp.

- L'eau à la sortie du pavé perméable a été récoltée à l'aval des drains du pavé perméable (désignée SPP). Ces échantillons étaient composés de l'eau excédentaire accumulée dans le bassin de pierre nette sous le pavé, qui ne percole pas dans le sol et vers la nappe phréatique. Il n'y a pas eu d'échantillonnage pour l'eau qui est captée par le pavé perméable et percole jusqu'au sol naturel, plus en profondeur, puisqu'il n'y avait pas d'accès.
- L'eau à la sortie du bassin de rétention (désignée SB) a été récoltée dans le regard de sortie RÉ-1, à la base du mur orifice. L'eau s'écoulant dans ce regard provient majoritairement des drains situés à la base du bassin de rétention, mais aussi de la conduite de sortie du bassin de rétention.

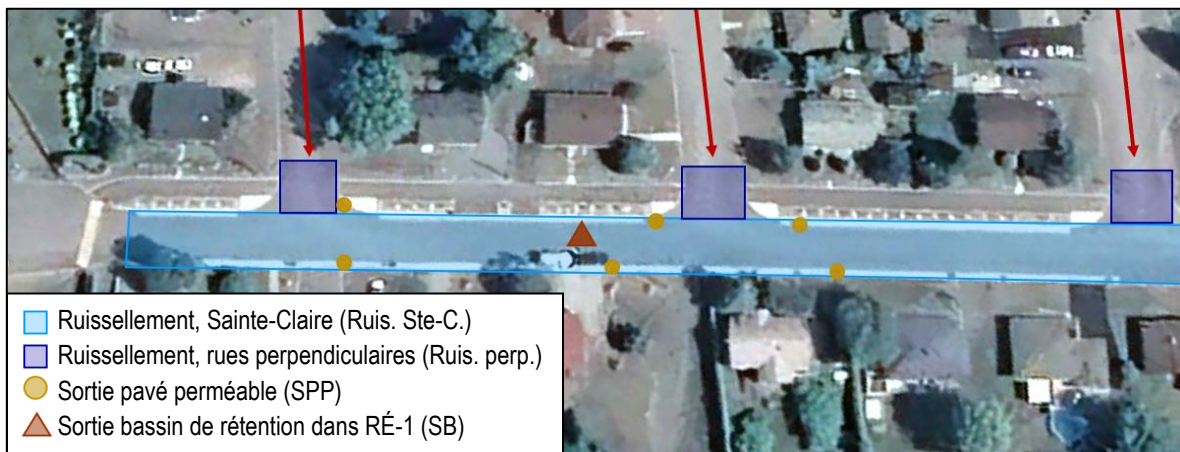


Figure 13: Lieux d'échantillonnage (adapté de Google Maps, 2021)

Les eaux de ruissellement ont été récoltées par une plaque de métal aux rebords pliés servant d'entonnoir (image de gauche sur la Figure 14). Afin d'atteindre les eaux sortant des drains du pavé perméable et du bassin, une perche avec une bouteille à son extrémité a été utilisée pour atteindre le fond des regards ou des puisards (image de droite sur la Figure 14).



Figure 14: Équipements d'échantillonnage de l'eau de ruissellement et de la sortie du bassin

Grâce à la configuration du site, aucune eau stagnante n'a été récoltée. Bien qu'il y ait accumulation d'eau permanente dans plusieurs puisards, une hauteur de chute suffisante entre la sortie des drains du pavé perméable et la surface de l'eau permet de récolter seulement l'eau provenant des drains. Il n'y a pas accumulation d'eau dans le regard de sortie du bassin RÉ-1, c'est donc l'eau en mouvement qui est récoltée dans la cunette.

3.3.2 Transport, analyse et traitement des résultats

Les échantillons composites récoltés à Rivière-du-Loup ont été transportés vers les laboratoires de l'Université Laval dans des glacières où la température était maintenue à environ 4 °C. Les analyses ont ensuite été réalisées selon les méthodes standard du CEAEQ indiquées au Tableau 4 et dans les délais prescrits.

Tableau 4: Méthodes d'analyse

Paramètre	Méthode
MES	MA. 100 – S.T. 1.1 (CEAEQ, 2017)
Conductivité électrique	MA. 115 – Cond. 1.1 (CEAEQ, 2015)
Azote total	MA. 303 – Nutriments (CEAEQ, 2015)
Phosphore total	MA. 300 – NTPT 2.0 (CEAEQ, 2014)

À partir des résultats obtenus, des efficacités d'enlèvement ont été calculées selon l'équation 2.

$$\text{Enlèvement} = \frac{C_{\text{entrée}} - C_{\text{sortie}}}{C_{\text{initiale}}} * 100 \% \quad (2)$$

Où $C_{\text{entrée}}$ représente la concentration à l'entrée et C_{sortie} la concentration à la sortie, exprimées dans les mêmes unités.

L'efficacité d'enlèvement du bassin ont été calculés en considérant que $C_{\text{entrée}}$ est la concentration des eaux de ruissellement et que C_{sortie} est la concentration des eaux à la sortie du bassin. Pour le calcul d'enlèvement du pavé perméable, les concentrations des eaux de ruissellement et des eaux à la sortie du pavé perméable ont été utilisées.

Le coefficient de corrélation, c , entre deux séries de données, notées x et y , est calculé selon l'équation 3, où \bar{x} et \bar{y} sont respectivement les moyennes de x et y :

$$c = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

3.4 Plantes et substrat

Trois types de données relatives aux plantes et au substrat ont été récoltées et analysées : la croissance des plantes, la teneur en eau du substrat et la température du substrat.

3.4.1 Croissance des plantes

La croissance des plantes a été suivie par la mesure mensuelle de certains plants en période estivale. Des mesures ont été réalisées en août et septembre 2020 ainsi qu'en juin, juillet, août et septembre 2021. La hauteur du plant a été mesurée, de même que le quantité et la hauteur des tiges florales s'il y a lieu. Le terme largeur 1 est utilisé pour signifier la largeur horizontale du plant à son point le plus large et le terme largeur 2 correspond à la largeur horizontale du plant perpendiculaire à largeur 1. La Figure 15 illustre schématiquement largeur 1 et largeur 2.

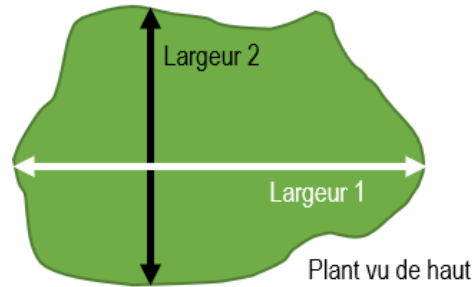


Figure 15: Représentation de largeur 1 et largeur 2

Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un ruban à mesurer. Il y a une incertitude sur les données de largeur et de hauteur due à l'effet du vent qui déplace les tiges et les branches, entraînant un effet de contraction ou d'étirement des plants. Le nombre de tiges florales a été compté manuellement. Lorsqu'il semblait y avoir plus de 100 tiges florales par plant, une séparation en quatre quarts a été réalisée par une approximation visuelle, puis la quantité de tiges florales a été comptée seulement dans un quart, puis multipliée par quatre. Le Tableau 5 présente le type et la quantité de mesures récoltées selon l'espèce.

Tableau 5: Description des mesures de plantes

Espèce	Type de plante	Nombre de plants total	Nombre de plants mesurés	Type de mesure
Lilas japonais, <i>Syringa reticulata</i>	Arbre	5	5	Circonférence du tronc à 1,2 m du sol
Cornouiller Ivory Halo, <i>Cornus alba</i>	Arbuste	30	30	Hauteur, largeur 1 et largeur 2
Avoine vivace Saphirsprudel, <i>Helictotrichon sempervirens</i> 'Saphirsprudel'	Graminée	212	54	Hauteur, hauteur des tiges florales, nombre de tiges florales, largeur 1 et largeur 2
Agrostide à feuilles étroites, <i>Calamagrostis acutiflora</i> 'Karl Foerster'	Graminée	72	24 (ou 21)	

À partir des données de largeur 1 et largeur 2, une aire approximative a été calculée par l'équation 4 (ellipse) :

$$Aire = \frac{\text{largeur 1}}{2} * \frac{\text{largeur 2}}{2} * \pi \quad (4)$$

Des analyses statistiques ont été réalisées sur les données de hauteur et d'aire afin de déterminer la moyenne, la médiane et les 1^{er} et 3^e quantiles. La croissance mensuelle a été calculée entre chaque période de mesure selon l'équation 5 :

$$Crois. = \frac{\text{dimension}_{t_2} - \text{dimension}_{t_1}}{t_2 - t_1} * 30,5 \text{ jours/mois} \quad (5)$$

Où *dimension* est la hauteur du plant ou la circonférence du tronc au moment t_i . Des taux de croissance mensuelle ont également été calculés selon l'équation 6 :

$$Taux \text{ crois.} = \frac{(\text{dimension}_{t_2} - \text{dimension}_{t_1}) / \text{dimension}_{t_2}}{t_2 - t_1} * 30,5 \frac{\text{jours}}{\text{mois}} * 100 \% \quad (6)$$

La moyenne par espèce par mois a ensuite été calculée.

Une analyse de la variance (ANOVA) à un facteur a été réalisée afin de déterminer s'il existe une différence significative, pour un intervalle de confiance de 95 %, entre la hauteur des plants situés dans la moitié est ou ouest de la rue, soit de part et d'autre de la rue du Parc tel qu'illustré à la Figure 16. Pour cette analyse, les mesures de hauteurs les plus récentes ont été utilisées, soit celles du 28 septembre 2021.

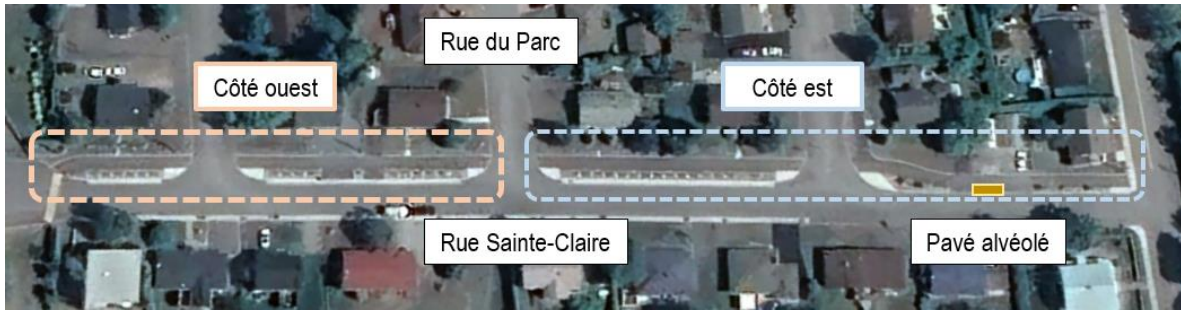


Figure 16: Division des zones est et ouest

Lors des mesures mensuelles, différents autres éléments ont été notés et quantifiés, dont : la présence de fleurs, la présence d'insectes, la présence d'espèces spontanées et les traces de maladies.

La croissance de la végétation dans la zone de pavé alvéolé, identifiée à la Figure 16, a été suivie à travers le temps. Il y a eu prise de photos au même emplacement à différents moments. Ces images ont ensuite été analysées par le logiciel Canopeo qui évalue la surface du couvert végétal par la détection des pixels verts (Patrignani et Ochsner, 2015).

3.4.2 Teneur en eau du substrat

Des capteurs mesurant la teneur volumique en eau du sol ont été installés à trois profondeurs différentes en trois lieux dans les biorétentions. Il s'agit de *10HS Soil Moisture Sensors*, qui mesurent la constante diélectrique entre deux fourches (Figure 17).



Figure 17: Capteurs utilisés pour la teneur volumique en eau du sol

Ces capteurs ont été calibrés et vérifiés avec le substrat du site selon la procédure décrite à l'Annexe C. La position de chaque capteur est présentée à la Figure 18, où les chiffres représentent les numéros civiques à proximité sur la rue Sainte-Claire.



Figure 18: Localisation des équipements dans les biorétentions (adapté de Google Maps, 2021)

Les capteurs ont été placés, pour chaque lieu, à des profondeurs de 10 cm (sous la couche de paillis), de 35 cm (dans le terreau) et de 60 cm (près de la limite entre le terreau et le sol naturel ou les chambres de rétention). Les élévations du sol pour chaque lieu sont de : 115,6 m (#23), 113,5 m (#17) et 113,2 m (#9). Un intervalle de 30 minutes a été fixé entre chaque prise de mesure.

3.4.3 Température du substrat

Des capteurs de température ont également été placés dans les biorétentions aux emplacements indiqués à la Figure 18. À chaque endroit, deux capteurs ont été placés à deux profondeurs : l'un à la base d'un cornouiller à la surface du paillis et l'autre à 50 cm dans le sol. Avant la période de feuillaison du cornouiller, le capteur en surface était exposé au rayonnement solaire. Les capteurs ont été placés dans le sol non remanié par une incision horizontale.

4. Résultats et discussion

Les résultats sont présentés par thème, d'abord pour l'hydraulique, ensuite la qualité de l'eau et enfin les plantes et le substrat.

4.1 Hydraulique

Dans cette section, les caractéristiques des événements de précipitations sont analysées. La délimitation et la composition des bassins versant sont ensuite présentées selon l'écoulement réel au site, suivie d'une analyse des résultats de pressions et de débits. Les paramètres hydrauliques spécifiques au pavé perméable sont ensuite discutés.

4.1.1 Événements de précipitations

La Figure 19 présente l'intensité et la durée des événements de pluie mesurés lors de la période à l'étude. Ils sont localisés sur la courbe intensité-durée-fréquence (IDF) de la station de Saint-Bruno-de-Kamouraska (Mailhot et Talbot, 2011)¹, située à environ 40 km du site à l'étude.

¹ « Les données de précipitations nécessaires au calcul des courbes intensité, durée et fréquence proviennent du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs ainsi que d'Environnement Canada. »
« La méthode de calcul utilisée a été développée par l'équipe de M. Alain Mailhot, professeur au Centre Eau Terre Environnement de l'Institut national de la recherche scientifique suite à des travaux financés par Ouranos, le Fonds vert et Ressources naturelles Canada. » (Mailhot et Talbot, 2011).

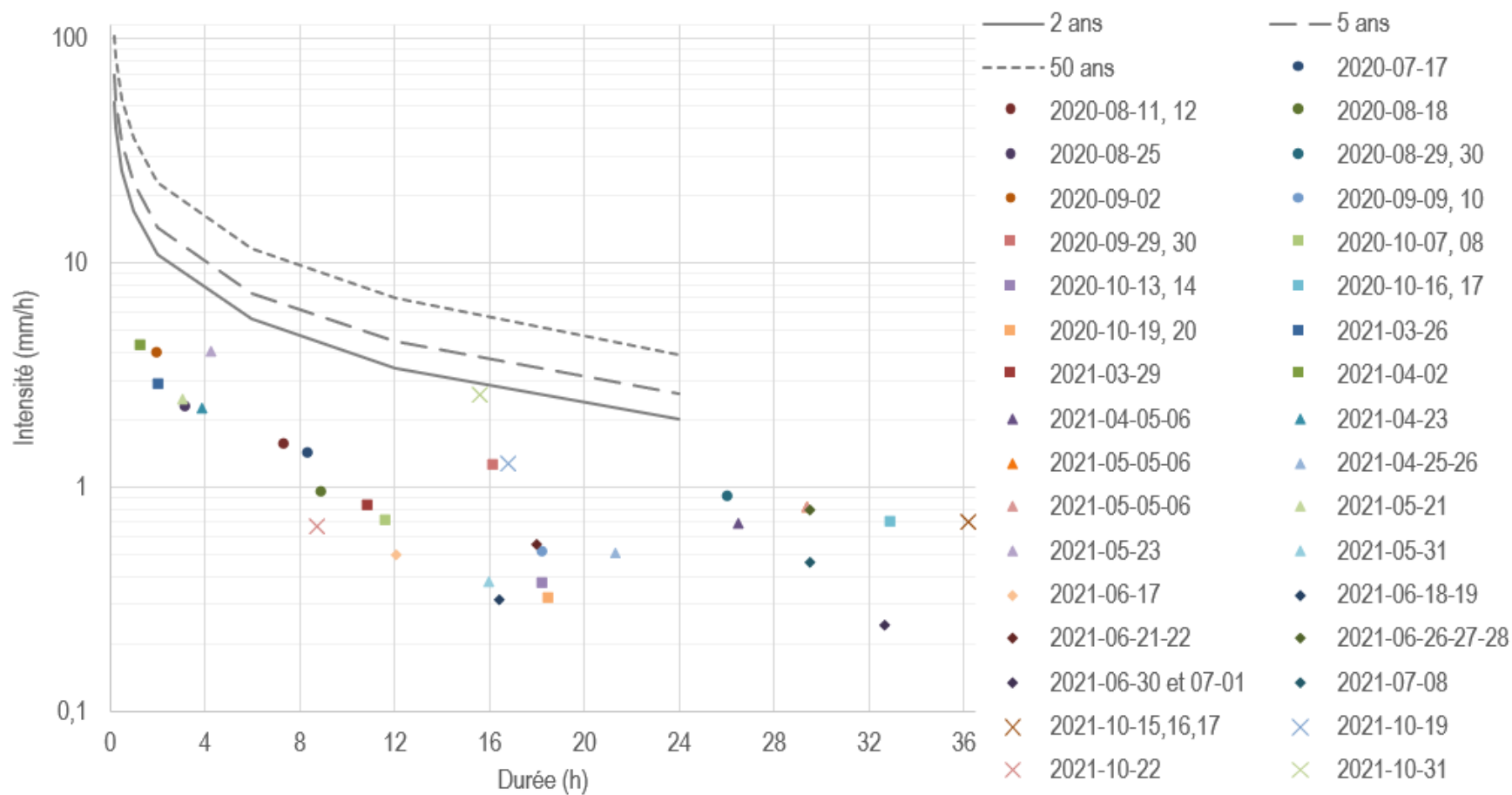


Figure 19: Positionnement des événements (intensité et durée) sur une courbe IDF (adapté de Mailhot et Talbot (2011))

Le Tableau 6 présente les caractéristiques des événements identifiés à la Figure 19. La récurrence est déterminée selon la combinaison de durée et d'intensité qui s'approche le plus des courbes de la Figure 19.

Tableau 6: Caractéristiques des événements de précipitation

Date	Durée (h)	Hauteur de précip. (mm)	Intensité max. sur 5 minutes (mm/h)	Intensité moyenne (mm/h)	Récurrence
2020-07-17	6,1	8,4	12,0	1,4	< 2 ans
2020-08-11, 2020-08-12	7,4	11,4	69,6	1,5	≈ 2 ans (durée 5 min)
2020-08-18	9,0	8,4	7,2	0,9	< 2 ans
2020-08-25	3,3	7,4	33,6	2,3	< 2 ans
2020-08-29, 2020-08-30	26,1	23,6	7,2	0,9	< 2 ans
2020-09-02	2,0	7,8	19,2	3,9	< 2 ans
2020-09-09, 2020-09-10	18,2	9,2	7,2	0,5	< 2 ans
2020-09-29, 2020-09-30	16,3	20,2	19,2	1,2	< 2 ans
2020-10-07, 2020-10-08	11,7	8,2	9,6	0,7	< 2 ans
2020-10-13, 2020-10-14	18,3	6,8	4,8	0,4	< 2 ans
2020-10-16, 2020-10-17	33,0	22,6	4,8	0,7	< 2 ans
2020-10-19, 2020-10-20	18,6	5,8	4,8	0,3	< 2 ans
2021-03-26	2,1	6,0	4,8	2,9	< 2 ans
2021-03-29	11,0	9,0	2,4	0,8	< 2 ans
2021-04-02	1,4	5,6	9,6	4,1	< 2 ans
2021-04-05, 2021-04-06	26,5	18,0	7,2	0,7	< 2 ans
2021-04-23	3,9	8,8	14,4	2,3	< 2 ans
2021-04-25, 2021-04-26	21,3	10,8	7,2	0,5	< 2 ans
2021-05-05, 2021-05-06	29,4	24,2	4,8	0,8	< 2 ans
2021-05-21	3,1	7,6	24,0	2,5	< 2 ans
2021-05-23	4,3	17,2	9,6	4,0	< 2 ans

Date	Durée (h)	Hauteur de précip. (mm)	Intensité max. sur 5 minutes (mm/h)	Intensité moyenne (mm/h)	Récurrence
2021-05-31	16,0	6,0	4,8	0,4	< 2 ans
2021-06-17	12,1	6,0	60,0	0,5	< 2 ans
2021-06-18, 2021-06-19	16,5	5,2	7,2	0,3	< 2 ans
2021-06-21- 2021-06-22	18,0	10,0	26,4	0,6	< 2 ans
2021-06-26 au 2021-06- 28	29,5	23,0	4,8	0,8	< 2 ans
2021-06-30, 2021-07-01	32,7	8,0	2,4	0,2	< 2 ans
2021-07-08	29,5	13,8	2,4	0,5	< 2 ans
2021-10-15 au 2021-10- 17	36,1	25,0	21,6	0,7	< 2 ans
2021-10-19	16,8	21,4	7,2	1,3	< 2 ans
2021-10-22	8,7	5,8	7,2	0,7	< 2 ans
2021-10-31	15,6	40,2	16,8	2,6	≈ 2 ans (durée 6 h)

Parmi les événements présentés au Tableau 7, celui du 31 octobre 2021 atteint 5,7 mm/h pendant six heures, soit au-delà de 5,6 mm/h, qui correspond à une période de retour de 2 ans. Une intensité de 42,0 mm/h pendant dix minutes est atteinte le 11 août 2020, s'approchant d'une période de retour de 2 ans, qui est de 52,0 mm/h.

4.1.2 Bassin versant

Le bassin versant du site à l'étude est d'une superficie totale de 2,86 ha. Des sous-bassins ont été formés selon le parcours de l'eau sur le site, présentés à la Figure 20.



Figure 20: Bassin versant divisé en sous-bassins versants

Le bassin versant du site à l'étude est constitué en majeure partie des rues Dumas, du Parc et Picard (en marron sur la Figure 20) pour lesquelles l'imperméabilité est modérée (rues, entrées pavées et certaines toitures). Les eaux de ruissellement de ces rues sont captées par des puisards aux intersections avec la rue Sainte-Claire, puis dirigées vers le bassin de rétention. Les eaux des zones identifiées en vert sur la Figure 20, soit une partie de la piste multifonctionnelle et les terrains du côté nord de la rue Sainte-Claire, sont dirigées vers les cellules de biorétention. Il s'agit de surfaces majoritairement perméables (76 %), dont les eaux sont toutes dirigées vers les biorétentions (100 % perméable). Les eaux de la rue Sainte-Claire, des terrains du côté sud et des extrémités de la piste multifonctionnelle sont dirigées vers le pavé perméable. Ces zones, identifiées en brun sur la Figure 20, sont très imperméables, à 72 %. En pratique, une partie des eaux de ce sous-bassin est captée directement par les puisards, donc l'ensemble n'est pas dirigé vers des surfaces perméables (pavé perméable). La Figure 21 présente schématiquement le cheminement de l'eau du site à l'étude.

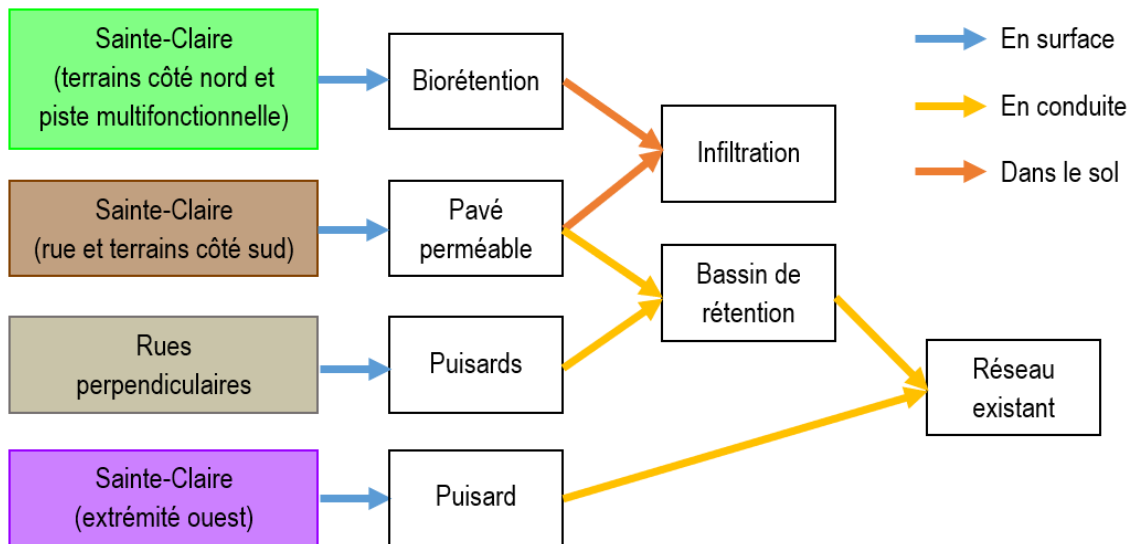


Figure 21: Schéma d'écoulement

Des observations au site lors des précipitations permettent de confirmer la délimitation des aires tributaires, qui ont été considérées ensuite pour l'interprétation des valeurs mesurées et la modélisation.

4.1.3 Pressions et débits

Les données relatives à certains événements sont présentées et leur comportement hydraulique est analysé. Les événements choisis sont typiques ou exceptionnels et sont associés notamment à de fortes intensités ou à une grande durée de pluie. Une présentation plus détaillée de l'événement du 23 mai 2021 est réalisée pour présenter des tendances générales observées pour la majorité des événements. Les biorétentions ne sont pas discutées dans cette section. En effet, pour tous les événements mesurés, il n'y a eu aucun débordement des biorétentions vers le reste du système. Il n'y a donc aucun lien hydraulique considéré entre les biorétentions et le reste du site. En réalité, tel que discuté précédemment, l'infiltration d'eau dans le sol sous les biorétentions pourrait avoir un effet sur le taux d'infiltration sous le pavé perméable, qui est directement adjacent. Cet effet n'a pas été considéré et la modélisation a été réalisée en excluant complètement les biorétentions et leur aire tributaire, considérées indépendantes. Il n'y a pas eu de mesure du débit (ni de la qualité de l'eau) de l'effluent des biorétentions en raison de l'absence de drain de sortie ou d'accès pour la collecte d'eau. Cependant, les variations de teneur en eau sont étudiées et présentées plus loin dans cette section.

Le débitmètre situé à la sortie du site dans le regard RP-1 (localisé à la Figure 8) fournit des valeurs de hauteur, de vitesse et de débit. Le modèle SWMM a été utilisé pour estimer des débits d'entrée dans le bassin de rétention pour les événements mesurés. Ces débits ont été comparés aux débits mesurés dans RP-1, l'aval du site, pour calculer des taux de réduction du débit de pointe. Pour plusieurs événements de faible hauteur ou de faible intensité de précipitations, le débit à la sortie est très faible ou nul, souvent imperceptible par le débitmètre ($< 0,1$ L/s). En effet, une bonne portion des eaux peut être captée par le pavé perméable ou les biorétentions, puis infiltrée dans le sol. Dans ces situations, la réduction du débit de pointe est près de 100 %. Les événements étudiés sont ceux pour lesquels des débits ont été observés à RP-1, au lien avec le réseau récepteur.

La localisation des capteurs de pression et du débitmètre est présentée à la Figure 22 selon le nom du regard (RP-X ou RÉ-X) ou du puisard (P-X) correspondant. L'encadré pointillé représente le bassin de rétention souterrain. Il existe des conduites en amont de RP-13 et de RP-8 (desservant tout le reste du bassin versant) qui ne sont pas représentées sur la figure. Il est pertinent de noter que RP-15 reçoit exclusivement les eaux de RP-13 et en provenance des drains sous les surfaces de pavé perméable adjacentes.



Figure 22: Localisation des capteurs de pression et du débitmètre selon le nom du regard où puisard dans lequel ils sont situés

Un débitmètre est donc situé dans le regard RP-2 et des capteurs de pression dans tous les autres points de la Figure 22.

4.1.3.1 Événement du 23 mai 2021

La Figure 23 et la Figure 24 présentent respectivement les précipitations et les pressions, d'après les mesures des équipements localisés sur la Figure 22 pour l'événement du 23 mai 2021.

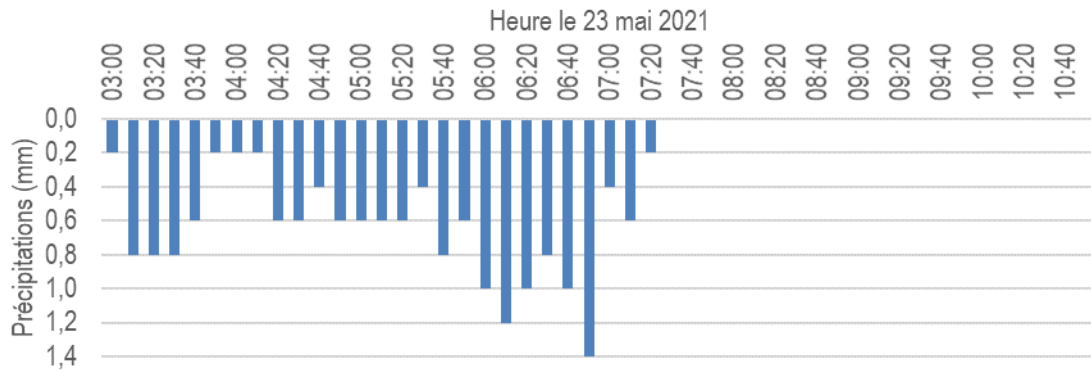


Figure 23: Précipitations le 23 mai 2021

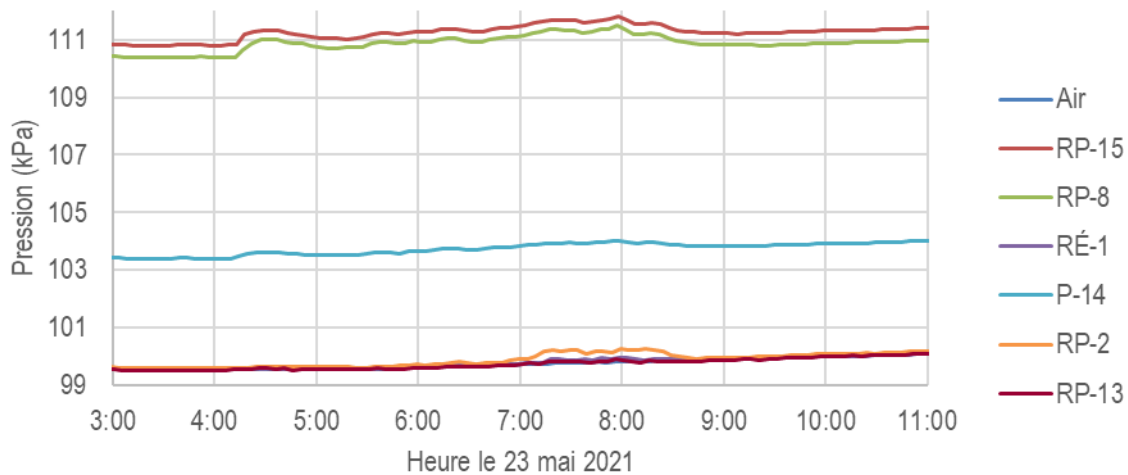


Figure 24: Pressions le 23 mai 2021

Les pressions absolues illustrées à la Figure 24 témoignent du positionnement des sondes. En effet, il est possible de constater que les pressions mesurées par les sondes placées à RÉ-1, à RP-2 et à RP-13 s'approchent de la pression atmosphérique. L'eau atteint ces dernières seulement lorsqu'il y a un écoulement, à l'inverse de RP-15, RP-8 et P-14 où il y a une retenue d'eau permanente. Ces valeurs de pression sont présentées à titre indicatif seulement. En effet, ce sont les variations de pression, par

rapport au début de l'événement et corrigées avec la pression atmosphérique, qui ont été considérées dans les analyses. Les calculs réalisés sont présentés dans la méthodologie. Les variations de pression sont présentées à la Figure 25.

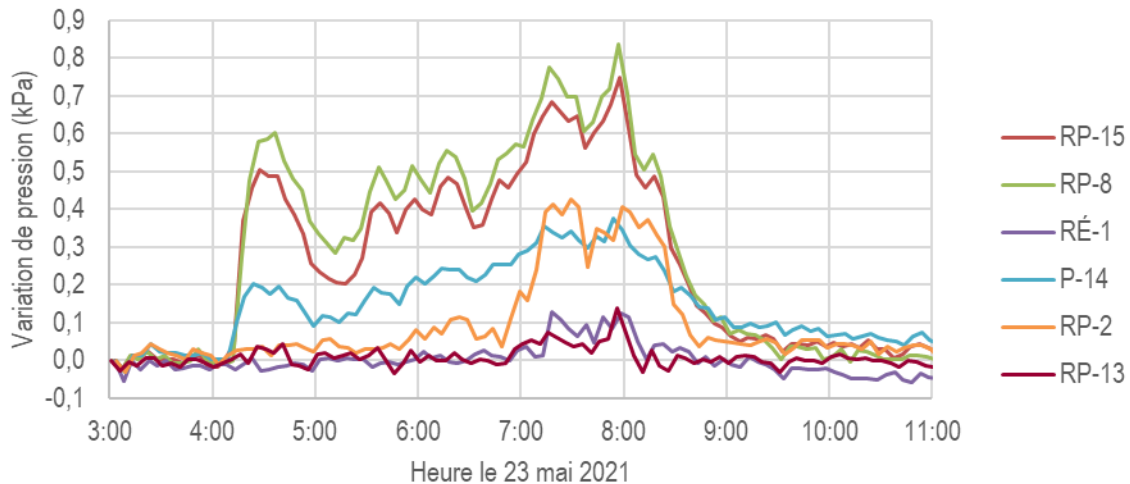


Figure 25: Variations de pression le 23 mai 2021

L'observation combinée de la Figure 23 et de la Figure 25 permet d'associer clairement les pointes de débit aux pointes de précipitations, avec un certain décalage. Les plus grandes variations de pression ont été observées aux points RP-15 et RP-8. Cela est conforme aux attentes, puisqu'il s'agit des entrées du bassin qui reçoivent les eaux de tout le bassin versant. Une pointe en début d'événement est également observée à P-14, dont le sous-bassin versant est assez imperméable. Une augmentation de la pression en fin d'événement est observée à RP-2, le point le plus en aval. On aurait pu s'attendre à ce que la pression au point RÉ-1 varie de manière similaire à celle observée à RP-2. Cependant, le positionnement du capteur à RÉ-1 (Figure 10), pas directement au fond du regard, a pour effet de sous-estimer les variations de pression par rapport aux autres points de mesure. La Figure 26 présente les variations de hauteur calculées à partir des pressions.

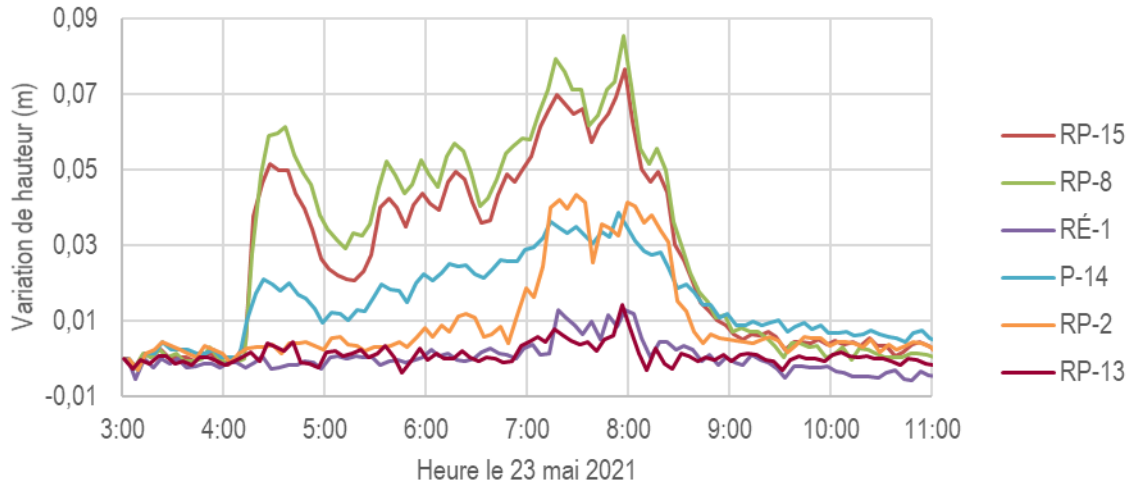


Figure 26: Variations de hauteur le 23 mai 2021

La Figure 27 présente les températures de l'eau ou de l'air aux différents points de mesure de la pression.

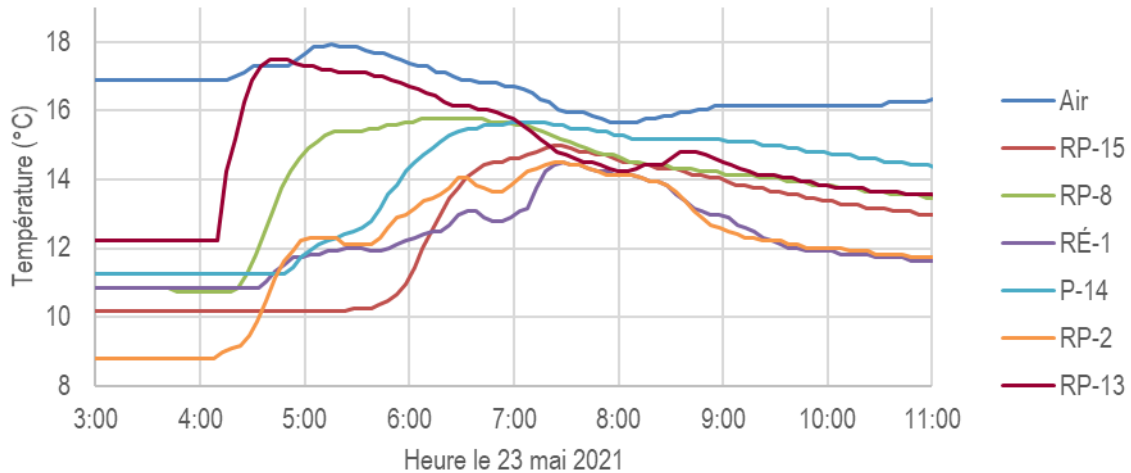


Figure 27: Températures le 23 mai 2021

Il est pertinent de noter que la température mesurée par le capteur Air sur la Figure 27 ne correspond pas à la température ambiante ressentie par un piéton qui marcherait sur le trottoir. Il s'agit de la température dans le regard RP-13 au niveau de l'échelon supérieur, à 0,615 m sous la surface de la rue. En période estivale, la température de l'air est généralement supérieure à la surface, par rapport à la température dans les regards ou dans les puisards, en profondeur dans le sol. En début d'événement, l'eau ruisselle sur des surfaces chauffées par le soleil ou l'air ambiant. Cela est très perceptible même dans le cas de l'événement du 23 mai 2021 pour lequel le ruissellement commence

avant le lever du soleil (4h51). Des augmentations de la température ont été observées lorsque l'eau de pluie atteignait les capteurs. Le capteur RP-13 est celui qui subit la variation de température la plus brusque et la plus élevée, tel qu'attendu. Il s'agit d'un capteur préalablement dans l'air qui reçoit presque directement les eaux de ruissellement de plusieurs surfaces imperméables chaudes (rues, entrées privées, etc.). Les variations sont moins brusques pour RP-8, RP-15 et P-14 : la température augmente progressivement en raison du mélange de l'arrivée d'eau plus chaude avec les eaux plutôt tièdes accumulées dans le regard ou le puisard. Le passage dans le bassin de rétention semble avoir un effet sur la température : les températures sont généralement inférieures pour les capteurs en aval, RÉ-1 et RP-2. Cela pourrait s'expliquer par le relativement long temps de contact avec la pierre nette tiède avant l'atteinte des drains du bassin de rétention et le contact avec l'air.

La température initiale mesurée par les capteurs varie grandement selon le capteur. La Figure 28 présente la température initiale le 23 mai 2021 à 03:00 (avant la pluie) par rapport à la profondeur du capteur.

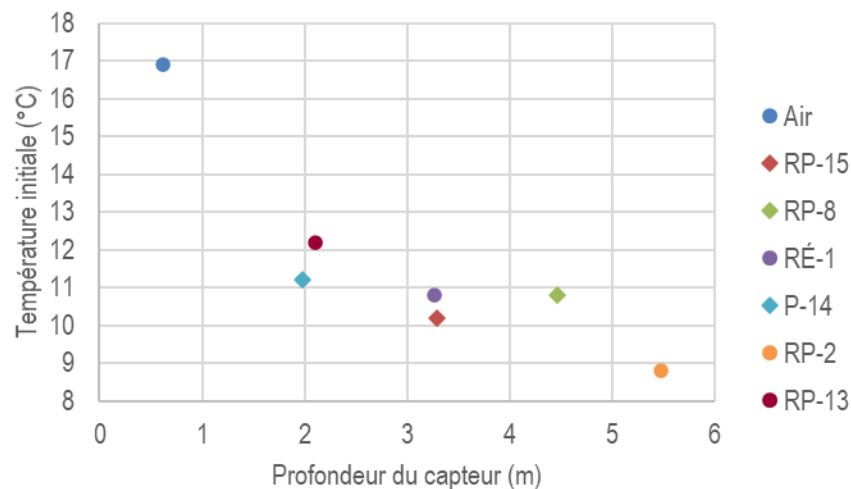


Figure 28: Température en début d'événement et profondeur des capteurs par rapport à la surface de la rue

Les capteurs submergés sont indiqués par des losanges sur la Figure 28. Il est possible de noter que la température en temps sec et la profondeur des capteurs sont reliées. Le coefficient de corrélation entre ces données est de -0.85, ce qui représente une corrélation assez forte.

La Figure 29 présente les données du débitmètre lors de l'événement du 23 mai 2021, dont les précipitations sont illustrées à la Figure 23.

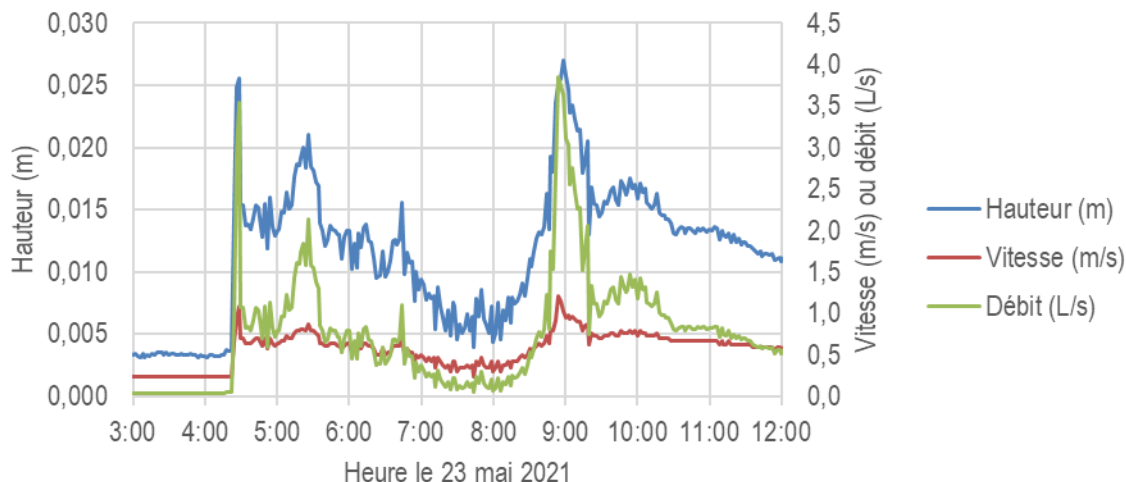


Figure 29: Hauteur, vitesse et débit à RP-1 le 23 mai 2021

Le fonctionnement du débitmètre dépend de particules présentes dans l'eau qui réfléchissent les ondes émises par l'appareil. Il est donc possible que les lectures soient moins fiables lors du passage d'eaux moins chargées. Bien que les eaux à la sortie du bassin de rétention aient des teneurs en MES souvent très faibles, une partie des eaux passant à RP-1 provient directement du regard P-17 et ne subit aucun traitement (illustré à la Figure 8). Cet apport en eau plus chargée favorise la lecture correcte du débitmètre. Néanmoins, le temps de concentration de P-17 est beaucoup plus faible que celui du reste du site; donc, en fin d'événements survient une période où les eaux sont très peu chargées. Considérant le tout, il est jugé que l'évaluation des pointes de débit est suffisamment précise pour être considérée dans les analyses, alors que les débits des périodes entre les débits de pointe ne sont pas considérés. Pour l'événement du 23 mai 2021, un écart est observé entre les variations de hauteur de RP-2 sur la Figure 26 et la hauteur mesurée par le débitmètre à RP-1 (Figure 29), même si ces deux points sont physiquement très près. Cela pourrait s'expliquer par la forte pente séparant les deux points (5,6 %) et par l'erreur potentielle de mesure du débitmètre lorsque les eaux sont peu chargées, de 07:00 à 08:00 et après 10:00, entre les pointes de précipitations.

La Figure 30 présente le débit d'entrée au bassin (RP-8 combiné avec RP-15) déterminé par modélisation sur SWMM, selon les paramètres de l'Annexe B, et le débit de sortie du site mesuré par le débitmètre (RP-1). Tel que mentionné dans la méthodologie, la représentation du comportement du pavé perméable dans SWMM n'est pas toujours très représentative de la réalité. La courbe *Entrée bassin* doit donc être considérée avec une certaine réserve.

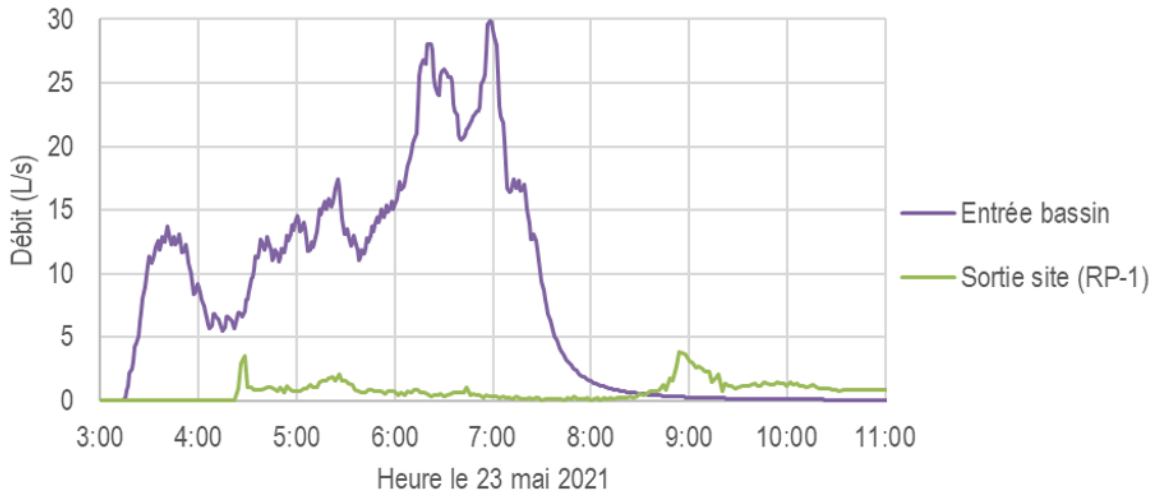


Figure 30: Débits d'entrée au bassin et de sortie du site le 23 mai 2021

Le débit de pointe à l'entrée du bassin est de 30 L/s à 06:59, alors que le débit de pointe à la sortie est de 4 L/s à 08:54. Cela correspond à une réduction de 87 % et à un décalage de 115 minutes, près de deux heures.

Il faut porter un regard critique sur les valeurs de débit d'entrée au bassin. Il y a potentiellement une surestimation du débit par la représentation inexacte de l'effet du pavé perméable, qui tamponne probablement plus les pointes de débit. En effet, la dynamique d'écoulement dans le pavé perméable est complexe et n'est pas parfaitement représentée dans le modèle. Le tout considéré, la réduction de 87 % du débit de pointe représente l'effet combiné du pavé perméable et du bassin de rétention. En effet, le modèle SWMM représente adéquatement les précipitations et le ruissellement. Un projet de doctorat relatif à la représentation de l'écoulement des eaux pluviales par des modèles SWMM est en cours présentement. Il porte entre autres sur le site de la rue Sainte-Claire à Rivière-du-Loup. Ce projet permettra d'évaluer plus en détails la qualité de la représentation des phénomènes physiques par modélisation, ce qui ne constitue pas un objectif principal du présent projet.

Pour l'événement du 23 mai 2021, la modélisation révèle qu'il n'y a pas eu de mise en charge du réseau ni d'inondation, ce qui est conforme aux attentes considérant que le niveau de service de conception est de 50 ans. Le volume maximal noté dans le bassin de rétention serait de 11 % de sa capacité totale. Sur les 17,2 mm de pluie, il y aurait eu 7,8 mm infiltrés dans le sol selon le modèle (intrants présentés à l'Annexe B). Ce haut taux d'infiltration témoigne de l'effet du pavé perméable, combiné aux zones perméables des terrains privés.

4.1.3.2 Événement des 11 et 12 août 2020

L'événement des 11 et 12 août 2020, illustré à la Figure 31, est caractérisé par une très forte intensité de pluie en début d'événement, s'approchant de l'intensité de récurrence 2 ans pour une durée de cinq minutes.

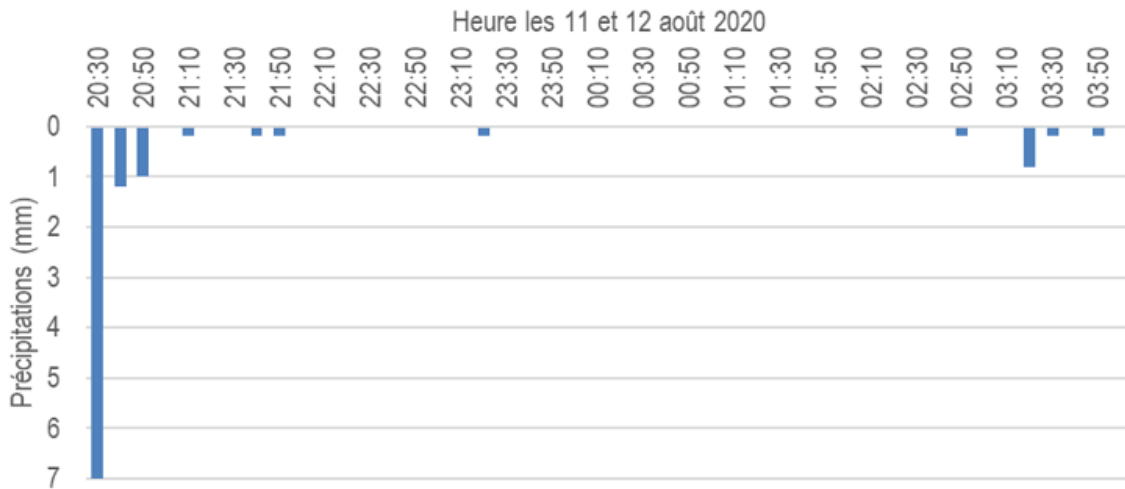


Figure 31: Précipitations le 11 août 2020

La Figure 31 met en évidence la très forte pointe de pluie à 20:30, alors que la Figure 32 et la Figure 33 montrent les variations de hauteur et de température correspondantes. Les données de P-14 ne sont pas présentées en raison d'une défaillance de l'équipement. Aussi, les capteurs à RP-2 et RP-13 reposaient alors sur des dalles de béton à une certaine hauteur du fond; les valeurs fournies ne sont donc pas précises à de faibles hauteurs d'eau.

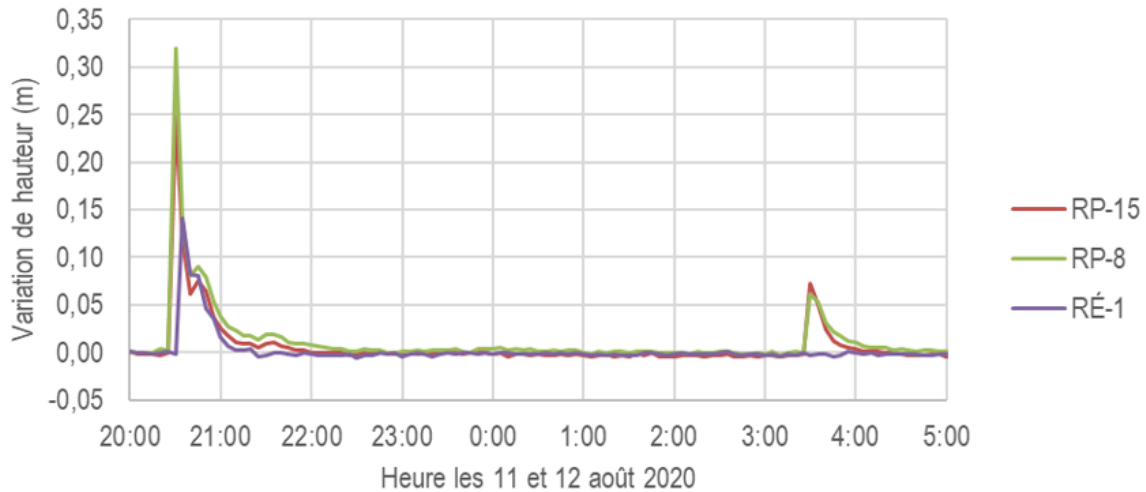


Figure 32: Variations de hauteur le 11 août 2020

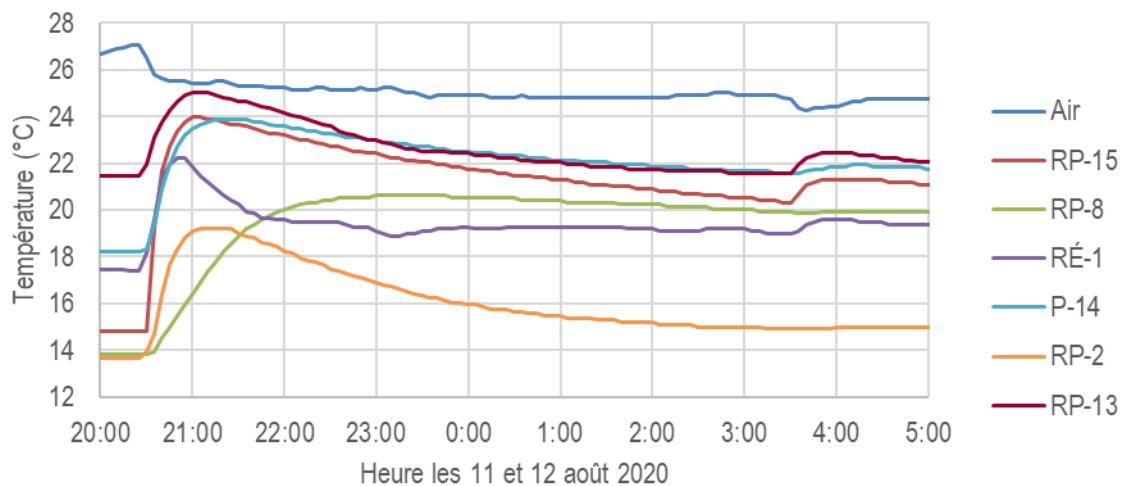


Figure 33: Températures le 11 août 2021

L'effet des précipitations très intenses est visible par des variations brusques et fortes de la hauteur et de la température. Il est possible de noter la réaction très rapide des variations de hauteur. En effet, les augmentations surviennent dans les cinq minutes suivant le début de la pluie.

Des données de débit à la sortie du site ne sont pas disponibles pour cet événement. Néanmoins, la Figure 32 illustre que la variation de hauteur à RÉ-1, la sortie du bassin, est beaucoup plus faible que celle aux deux entrées, RP-8 et RP-15. Le bassin de rétention semble avoir un effet sur le débit même

lors d'événements très intenses. Cependant, il y a un décalage de seulement cinq minutes entre les variations de hauteur maximales à l'entrée et à la sortie du bassin.

4.1.3.3 Événement des 15, 16 et 17 octobre 2021

Cet événement est le plus long enregistré lors de la prise de mesures. Il atteint une durée de 36 heures et une hauteur de précipitations de 25 mm. Les précipitations sont présentées à la Figure 34.

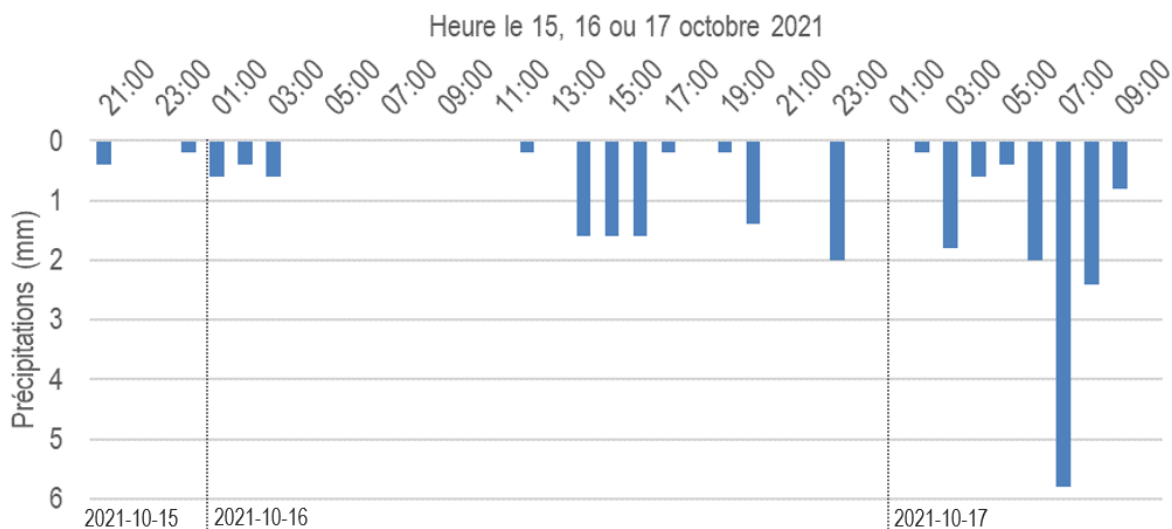


Figure 34: Précipitations les 15, 16 et 17 octobre 2021

La pluie commence doucement tard le 15 octobre 2021, puis se poursuit pour atteindre une pointe à 07:00 le 17. Cet événement se démarque de celui du 23 mai 2021 pour lequel une forte pointe est observée en début d'événement. Les variations de hauteur présentées à la Figure 35 sont cohérentes avec les données de précipitations.

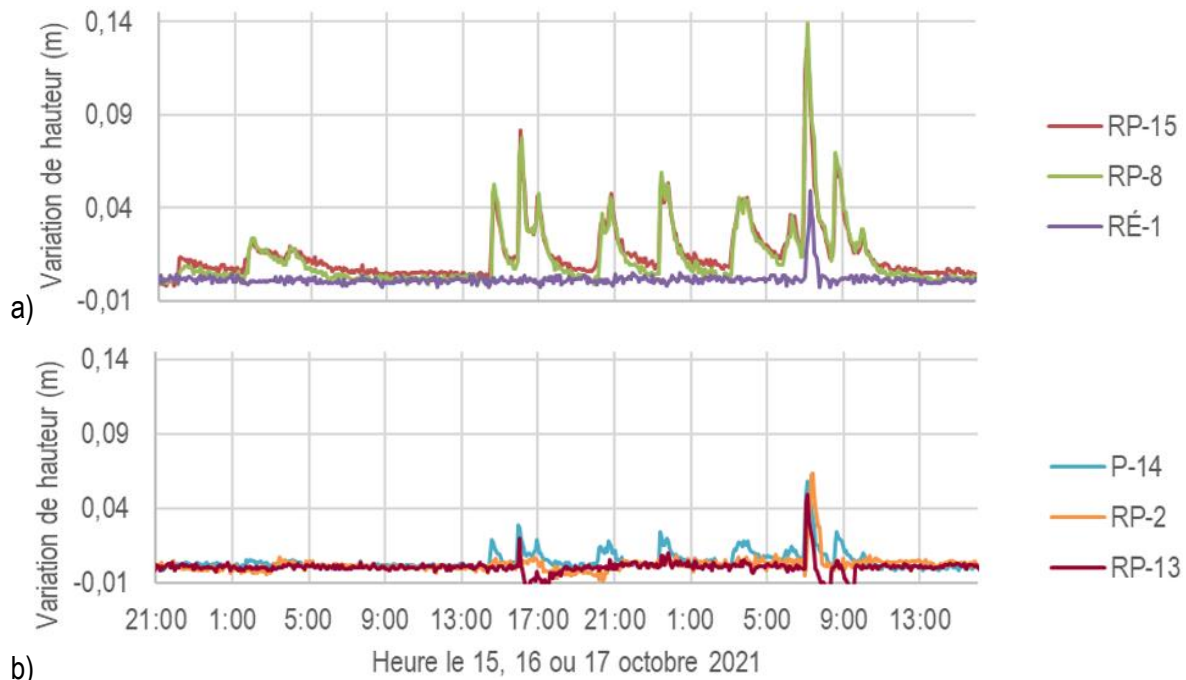


Figure 35: Variations de hauteur les 15, 16 et 17 octobre 2021

La Figure 35a) met en évidence que les variations de hauteur dans les regards d'entrée (RP-8 et RP-15) sont beaucoup plus importantes que celles dans l'orifice en aval du bassin (RÉ-1). Il n'y a pas de variation perceptible de la hauteur dans l'orifice de sortie avant la pointe de précipitations vers 07:00 le 17 octobre. Il y a certaines variations négatives à la Figure 35b) pour le capteur RP-13. Ce regard reçoit notamment les eaux des puisards au bout de la rue Dumas. Ces eaux peuvent transporter des débris comme des feuilles ou des branches. Il est probable qu'un débris obstruait partiellement le capteur en début d'événement, donc la pression initiale a été surestimée. Les variations négatives de hauteur correspondraient aux mesures quand le débris a été emporté par le courant après la première pointe de débit.

Les mesures du débitmètre à la sortie du site sont présentées à la Figure 36.

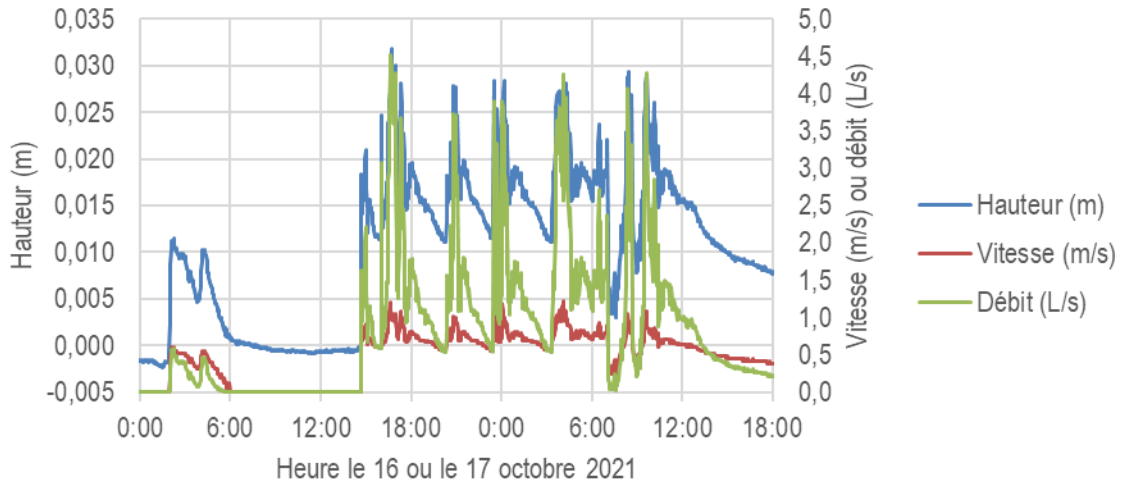


Figure 36: Hauteur, vitesse et débit à RP-1 les 16 et 17 octobre 2021

Il est pertinent de porter attention aux axes verticaux de la Figure 36 : celui de gauche est relatif à la hauteur présentée en bleu et celui de droite à la vitesse et au débit, respectivement en rouge et en vert. Les valeurs légèrement négatives de hauteur sont dues à l'incertitude des mesures de $\pm 0,003$ m (Teledyne ISCO, 2017). Le débit à l'entrée du bassin (résultats de simulation) et à sa sortie (débitmètre) sont comparés à la Figure 35.

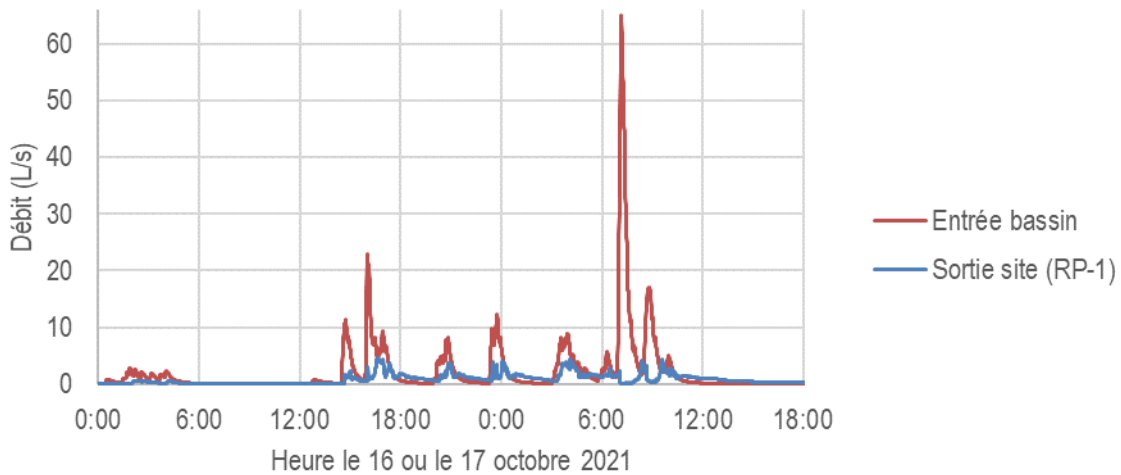


Figure 37: Débits à l'entrée du bassin et à la sortie du site les 16 et 17 octobre 2021

Il y a une réduction majeure du débit de pointe, illustrée à la Figure 37, due à l'effet combiné du pavé perméable et du bassin de rétention, tel que discuté précédemment. Le débit maximal à l'entrée, de

65 L/s, est observé à 07:09 le 17 octobre alors que le débit maximal correspondant à la sortie du site est de 4 L/s, observé à 08:22.

4.1.3.4 Événement du 31 octobre 2021

Cet événement est le seul qui atteint une intensité de pluie ayant une période de retour de deux ans, pour une durée de six heures. La Figure 38 présente les précipitations.

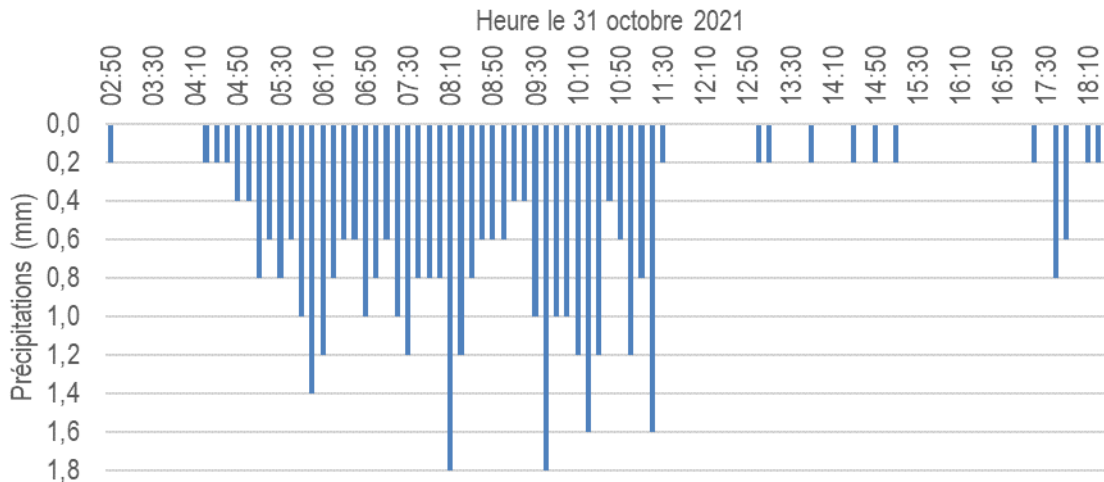


Figure 38: Précipitations le 31 octobre 2021

La Figure 38 met en évidence qu'une quantité significative de pluie est tombée de manière soutenue, en continu de 04:20 à 11:30. Il s'agit du type d'événement qui amène de grands volumes d'eau pluviale dans le réseau. Les données de pression ne sont pas disponibles pour cet événement en raison du dépassement de la capacité de stockage de données des équipements de mesure. La Figure 39 présente les mesures du débitmètre à RP-1 et la Figure 40 reprend les débits du débitmètre avec les résultats de modélisation à l'entrée.

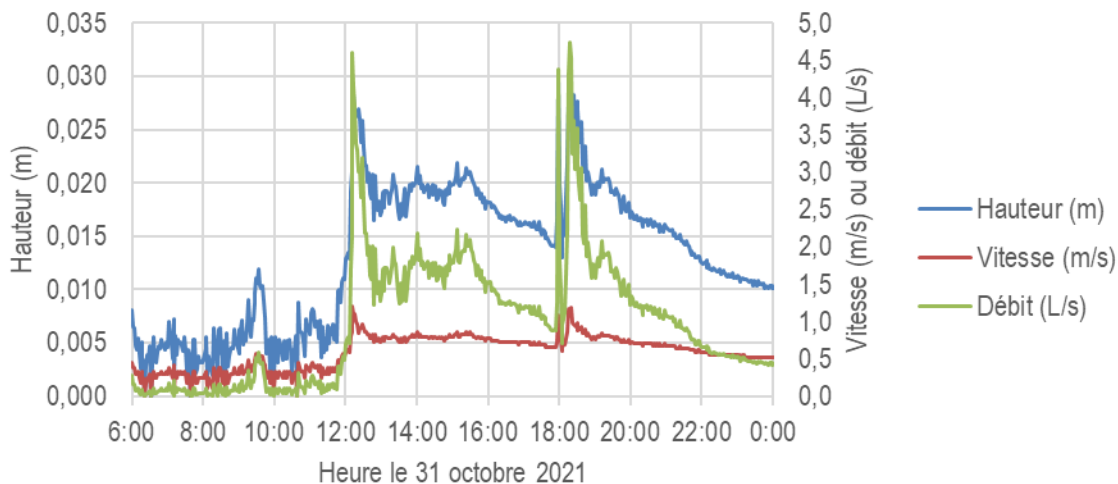


Figure 39: Hauteur, vitesse et débit à RP-1 le 31 octobre 2021

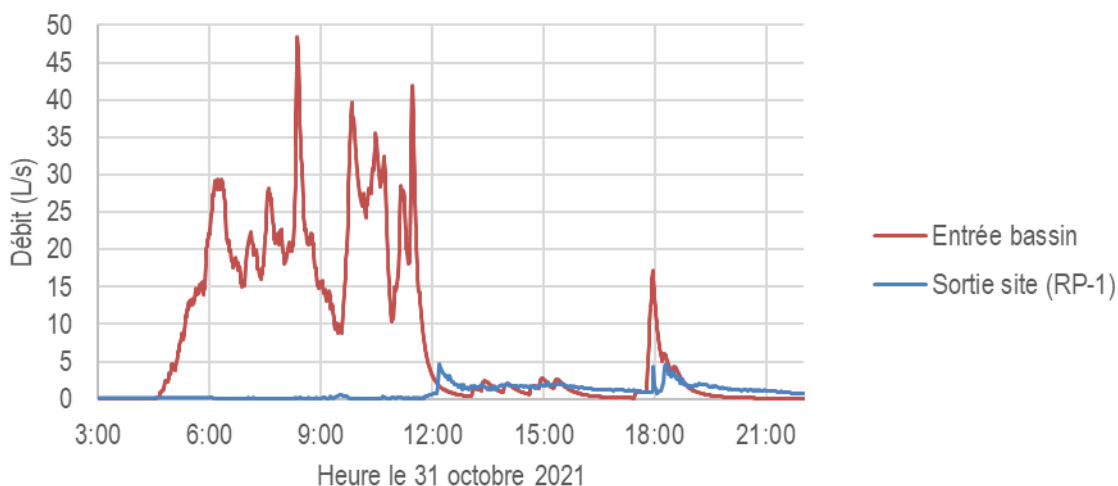


Figure 40: Débits à l'entrée du bassin et à la sortie du site le 31 octobre 2021

Les lectures du débitmètre semblent incohérentes pour cet événement. Les points observés à 12:12 et à 18:20 sont de la même amplitude, alors que les précipitations sont plus importantes lors des premières heures. Aussi, il semble improbable qu'aucune variation significative de débit ne soit observée entre 04:00 et 08:00.

Les données de hauteurs pour les événements mesurés montrent qu'il y a un décalage entre la pointe de précipitations et la pointe de débit de sortie au bassin de plus d'une heure, sauf dans le cas

d'événements très intenses. Une diminution très forte du débit de pointe (près de 90%) est estimée pour plusieurs événements. Néanmoins, l'incertitude de la qualité de la mesure du débitmètre dans l'eau claire et la difficulté à reproduire adéquatement le comportement hydraulique du pavé perméable et du bassin de rétention nuisent à ces estimations. Pour une zone de pavé perméable légèrement plus grande (470 m² par rapport à 402 m²), Tirpak et al. (2021) obtiennent une réduction médiane de 75 % du débit de pointe et un délai médian de 29 min entre les débits de pointe, en comparaison avec un site sans ouvrage de GDEP. Il est donc possible que le pavé perméable sur la rue Sainte-Claire contribue grandement aux résultats mesurés relatifs à l'intensité et au décalage des débits de pointe.

4.1.4 Pavé perméable

Cette section présente l'évolution du taux d'infiltration à la surface du pavé perméable. Il est important de faire la distinction entre l'infiltration à la surface du pavé perméable, qui se fait par les interstices entre les blocs, et l'infiltration profonde vers la nappe phréatique qui se fait à la base des bassins de pierre nette sous-jacents au pavé perméable. Cette dernière n'est pas mesurée dans le cadre de ce projet. La Figure 41 illustre l'un des tests réalisés.



Figure 41: Test d'infiltration du 14 février 2021

Les résultats des tests d'infiltration sont présentés à la Figure 42. L'ASTM (2018) énonce que des variations moyennes de 19 % sont observées dans les résultats à un même emplacement. Les

conditions du terrain et les limites de la méthode amènent une incertitude sur les résultats. La difficulté à verser l'eau uniformément et les fuites à la base de l'arceau en sont des exemples.

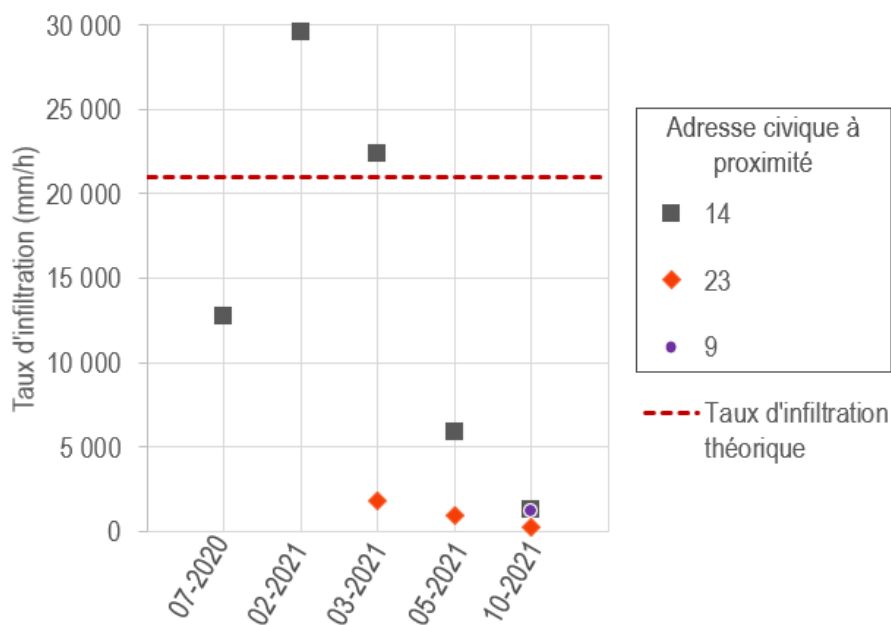


Figure 42: Taux d'infiltration du pavé perméable

Il n'y a pas de diminution marquée du taux d'infiltration lors des tests effectués en temps froid : le taux d'infiltration le plus élevé a été mesuré le 14 février 2021 alors que la température était de $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cela est cohérent avec les observations de Vaillancourt et al. (2019), qui ne constatent pas de diminution du taux d'infiltration en hiver pour les cinq surfaces de pavé étudiées.

Il y a une grande variabilité spatiale et temporelle des taux d'infiltration du pavé. La faible quantité de points de mesure ne permet pas de poser des constats clairs, à part la diminution claire du taux d'infiltration à partir du printemps 2021. Huang et al. (2016) ont noté également cette tendance, soit une diminution des taux d'infiltration au cours de l'hiver, et l'associent à l'épandage de sable.

Il y a eu de très nombreuses observations qualitatives visant à noter le comportement du pavé lors des événements de pluie. La Figure 43 présente certains exemples d'observations réalisées. Les images a) et b) de la Figure 43 correspondent à des surfaces dont les interstices sont partiellement colmatés. L'infiltration est efficace dans les zones plus sombres, qui ne sont pas immergées d'eau. Lors des événements de pluie en 2020, les interstices n'étaient jamais immergés : leur capacité d'infiltration était supérieure au débit de ruissellement. Quoique peu visible sur la Figure 43 c), du ruissellement a été

noté à la surface du pavé près de la bordure pour l'ensemble des événements observés en 2021, révélant un faible taux d'infiltration. Enfin, des accumulations d'eau en surface ont été observées jusqu'à 12 heures après la pluie dans certaines zones, comme illustré à la Figure 43d).



Figure 43: Observations qualitatives du pavé perméable

Certaines tendances sont donc notées et commentées à cette section, basées sur les résultats des tests d'infiltration, mais surtout sur les observations au site. Pour ce qui est de la variabilité spatiale, des observations en temps de pluie révèlent que la bande de pavé perméable du côté impair de la rue est plus souvent recouverte d'eau que celle du côté pair, indiquant un taux d'infiltration inférieur. Cela est cohérent avec les observations de la Figure 42. L'hypothèse la plus probable pour expliquer cet écart serait en lien avec le déneigement. En effet, la neige en provenance de la rue et de la piste multifonctionnelle est accumulée du côté impair de la rue, vis-à-vis le pavé perméable et les biorétentions. Lors de la fonte, il y aurait déposition d'abrasifs, de sels de déglacage et des autres

particules emportées avec la neige dans les interstices du pavé perméable, accélérant le colmatage. Une autre tendance est observée au site : les bandes de pavé perméable plus au nord-ouest de la rue (numéros civiques inférieurs) seraient moins colmatées que celles plus près de la rue Bernier, à l'extrémité sud-est. En considérant l'hypothèse que la circulation automobile génère des apports en sédiments qui peuvent contribuer à colmater le pavé, cette variation pourrait s'expliquer par la différence de circulation entre les tronçons. La Figure 44 présente le niveau de circulation par la taille des flèches, estimé par des observations au site.



Figure 44: Présentation schématique approximative de la circulation (adapté de Google Maps, 2021)

L'extrémité nord-ouest (à gauche sur l'image) est une route sans issue au bout de laquelle se trouve un parc. La rue située à droite sur l'image mène au centre-ville, alors que les rues Dumas, du Parc et Picard (les trois rues perpendiculaires à Sainte-Claire) desservent seulement des rues résidentielles qui ne sont pas utilisées pour le transit. La circulation est donc plus forte plus à droite.

Il y a présence de quelques entrées non pavées à proximité du pavé perméable. On peut supposer que ce serait un facteur qui favorise le transport de petites particules qui colmateraient le pavé perméable. Cependant, dans ces zones, le pavé n'est pas significativement plus colmaté qu'ailleurs.

La présence d'arbres libérant des graines, des fleurs et des feuilles est aussi identifiée comme facteur potentiel pour le colmatage, mais rien n'indique qu'il s'agisse d'un facteur significatif. Lors de l'été 2021, il y a eu croissance de végétaux dans les interstices du pavé perméable. Ce facteur n'a pas été étudié, mais pourrait avoir des effets sur le taux d'infiltration à long terme.

Pour analyser les résultats de la Figure 42, il est primordial de comprendre les entretiens qui ont été réalisés aux printemps 2020 et 2021 :

- Printemps 2020 : balayage et aspiration en profondeur, puis ajout de pierre nette d'un diamètre contrôlé (Figure 45 et Figure 46);
- Printemps 2021 : balayage en surface, avec les brosses rotatives seulement et sans aspiration (Figure 47).

L'entretien différent du printemps 2021 a été réalisé intentionnellement pour étudier l'effet d'un entretien moins en profondeur.



Figure 45: Entretien du printemps 2020: balayage et aspiration



Figure 46: État du pavé après le balayage du printemps 2020

Il y a eu enlèvement en profondeur des particules accumulées dans les interstices au printemps 2020, au point où les tenons et mortaises des blocs étaient visibles.



Figure 47: Entretien du printemps 2021: balayage en surface

Les taux d'infiltration ont drastiquement chuté après la fonte des neiges en 2021. Il y a eu colmatage presque total des interstices du pavé. Cela a eu pour effet de faire ruisseler les eaux directement vers les puisards, sans passer par le pavé perméable. La Figure 48 illustre l'état du pavé après le printemps 2021.



Figure 48: État du pavé après le printemps 2021

L'opération du printemps 2021 est semblable à une situation étudiée par Winston et al. (2016), qui ont démontré que l'enlèvement superficiel n'est pas réellement efficace lorsque des particules fines sont déposées plus en profondeur. Toute une variété de particules se trouve dans les interstices, surtout des particules fines sous la surface. Cela n'est absolument pas souhaitable et nuit fortement à la performance du pavé perméable.

Le pavé perméable peut donc atteindre des taux d'infiltration très performants, même l'hiver, tant qu'un entretien annuel en profondeur est réalisé.

4.2 Qualité de l'eau

Les résultats d'analyses de qualité de l'eau sont présentés et discutés par paramètre aux sections suivantes. L'ensemble des résultats est présenté au Tableau 16 de l'Annexe D.

4.2.1 Événements

Le Tableau 7 présente les événements pour lesquels des échantillons ont été récoltés et analysés, selon le paramètre : les matières en suspension (MES), l'azote total (NT), le phosphore total (PT) et la conductivité électrique (CÉ) Les lieux désignent le type d'eau échantillonnée : Ruis. Ste-C. ou perp. : ruissellement de la rue Sainte-Claire (Ste-C.) ou des rues perpendiculaires (Ruis. perp.), SPP : sortie du pavé perméable et SB : sortie du bassin de rétention. Entre quatre et 20 échantillons ont été prélevés à chaque lieu à chaque événement pour former des échantillons composites.

Tableau 7: Événements avec échantillonnage et analyse de l'eau

Date	Temps sec précédent (jours)	Intensité max. sur 5 min (mm/h)	Lieux	Paramètres analysés
Avant construction				
2019-06-27	9*	1,0 (sur 1 h)*	Ruis.	MES, NT, PT
2019-07-12	5*	2,7 (sur 1 h)*	Ruis.	MES, NT, PT
2019-07-14	1*	1,7 (sur 1 h)*	Ruis.	MES, NT, PT
2019-07-16	2*	3,1 (sur 1 h)*	Ruis.	MES
Après construction				
2020-06-24	17*	4,8 (sur 1 h)*	Ruis., SB	MES, NT
2020-07-28	2,3	4,8	Ruis., SPP, SB	MES
2020-08-04	7,4	2,4	Ruis., SB	MES
2020-10-17	1,8	4,8	Ruis., SPP, SB	MES
2021-03-26	15,0	4,8	Ruis., SB	MES, CÉ
2021-05-05	8,6	4,8	Ruis., SB	MES, CÉ
2021-05-21	15,1	24,0	Ruis., Ruis. Ste-C., Ruis. perp., SPP, SB	MES, CÉ, NT
2021-05-31	7,8	4,8	Ruis., SB	MES, CÉ, NT
2021-06-14	8,8	2,4	Ruis., SB	MES, CÉ, NT, PT
2021-06-21	2,3	26,4	Ruis., SPP, SB	MES, CÉ, NT
2021-06-27	4,5	4,8	Ruis., SB	MES
2021-07-08	7,0	2,4	Ruis., SB	MES, NT, PT
2021-07-16	1,5*	3,7 (sur 1 h)*	Ruis., Ruis. Ste-C., Ruis. perp., SB	MES, CÉ
2021-08-03	3,5*	3,3 (sur 1 h)*	Ruis., Ruis. Ste-C., Ruis. perp., SB	MES, CÉ
2021-09-08	1,6*	8,8 (sur 1 h)*	Ruis., Ruis. Ste-C., Ruis. perp., SB	MES
2021-09-18	1,9*	5,6 (sur 1 h)*	Ruis., Ruis. Ste-C., Ruis. perp., SB	MES, CÉ, NT
2021-10-16	13,0	21,6	Ruis., Ruis. Ste-C., Ruis. perp., SB	MES, CÉ
2021-10-22	2,4	7,2	Ruis., Ruis. Ste-C., Ruis. perp., SB	MES, NT

*D'après les données du pluviomètre de l'aéroport de Rivière-du-Loup (ERNC, 2021), situé à Notre-Dame-du-Portage, à 8,5 km de la rue Sainte-Claire.

L'absence d'échantillon à SPP indique qu'il n'y a pas eu d'écoulement dans les drains du pavé perméable. Le changement de la méthode d'entretien des interstices du pavé perméable en 2021 a entraîné une diminution de la quantité d'eau infiltrée à sa surface, donc généralement pas suffisamment

d'eau dans la pierre nette pour permettre le captage par les drains. C'est pourquoi il y a peu d'échantillons pour SPP à partir de mai 2021.

Certains paramètres statistiques relatifs aux résultats de qualité de l'eau sont présentés au Tableau 8, puis discutés aux sections suivantes. Taille éch. représente le nombre d'échantillons disponibles pour le calcul. L'étendue représente la longueur de l'intervalle dans lequel se situent les valeurs : la différence entre la valeur supérieure et la valeur inférieure.

Tableau 8: Paramètres statistiques des résultats d'analyses

Paramètre	MES (10 ³ mg/L)	CÉ (μS/cm)	NT (mg/L)	PT (mg/L)
Ruis.				
Taille éch.	22	9	10	12
Étendue	1,99	27	21	2,14
Écart-type	0,48	11	7,33	0,67
Médiane	0,19	40	2,60	0,49
Moyenne	0,34	36	5,53	0,70
SPP				
Taille éch.	4	1	2	1
Étendue	0,89	-	0,73	-
Écart-type	0,43	-	-	-
Médiane	0,11	80	-	0,75
Moyenne	0,30	80	0,37	0,75
SB				
Taille éch.	18	10	7	9
Étendue	0,80	694	4,97	2,34
Écart-type	0,19	233	1,90	0,76
Médiane	0,04	234	3,00	0,23
Moyenne	0,11	304	2,84	0,54

4.2.2 Teneurs en MES

Dans les diagrammes en boîte du présent rapport, la croix représente la moyenne, les bordures et le centre de la boîte représentent respectivement le 1^{er} quartile, le 3^e quartile et la médiane. Les barres aux extrémités sont les 5^e et 95^e percentiles.

Il y a une forte variabilité des teneurs en MES du ruissellement moyen pour l'ensemble du site (moyenne de Ruis. Ste-C. et Ruis. perp.), qui se situent entre 0,01 et 1,99 x 10³ mg/L pour les

événements échantillonnés. En considérant séparément le ruissellement selon la rue dont il provient, des valeurs entre 0,01 et $3,60 \times 10^3$ mg/L ont été observées. Cette valeur maximale provient des rues perpendiculaires. La Figure 49 permet de différencier les teneurs en MES selon la provenance du ruissellement pour sept événements de pluie.

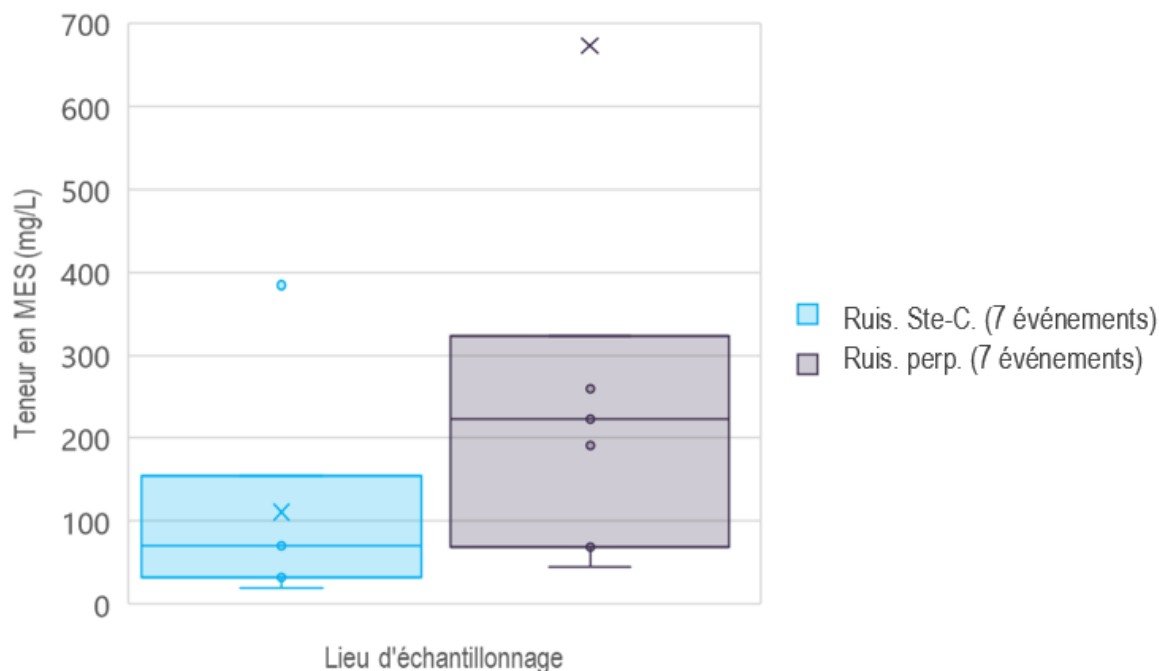


Figure 49: MES du ruissellement (autre donnée pour Ruis. perp. non visible sur la figure : $3,6 \times 10^3$ mg/L)

Pour un même événement, la teneur en MES du ruissellement provenant des rues perpendiculaires est en moyenne 3,8 fois plus élevée que la teneur en MES du ruissellement de la rue Sainte-Claire. Cela est conforme aux attentes : la pente et les aires tributaires des rues perpendiculaires sont significativement plus élevées que celles de la rue Sainte-Claire. De surcroît, la composition des aires tributaires est différente. Les rues perpendiculaires reçoivent les eaux de ruissellement des terrains privés, pouvant être relativement chargées en raison, entre autres, de la présence de feuilles, de rognures de gazon, de sédiments des entrées non pavées, etc. Sur la rue Sainte-Claire, le ruissellement des terrains privés d'un côté de la rue est acheminé vers les cellules de biorétention, donc il n'influence pas Ruis. Ste-C. Cela est cohérent avec les constats d'Epps et al. (2021), qui affirment que la disposition et la configuration des aires tributaires est un facteur d'influence majeur sur les teneurs en MES.

La Figure 50 présente la distribution des résultats de MES pour le ruissellement, la sortie du pavé perméable et la sortie du bassin.

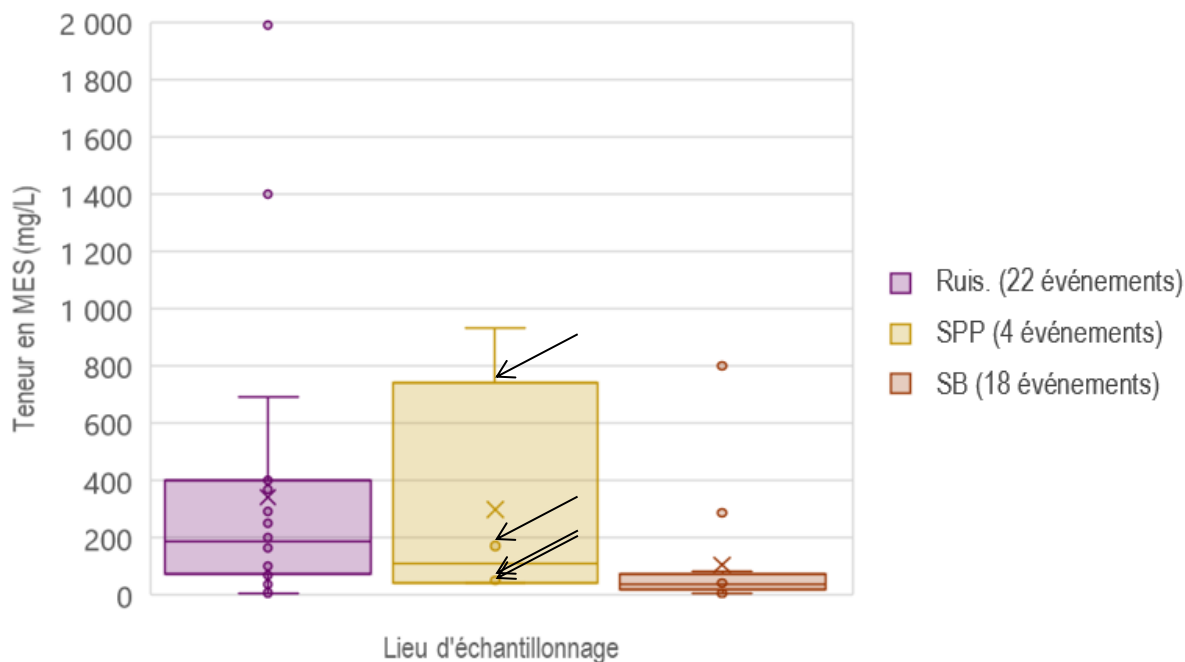


Figure 50: Distribution des résultats de teneur en MES

Une attention particulière doit être portée au nombre d'échantillons par lieu présenté sur la Figure 50. À première vue, la teneur en MES à SPP semble plus élevée que celle du ruissellement, mais ce n'est jamais le cas. Puisqu'il y a seulement 4 données à la sortie du pavé perméable (SPP), la valeur maximale et la valeur minimale correspondent aux bordures de la boîte, soit le 1^{er} et le 3^e quartile. Les flèches indiquent les points servant à tracer la figure. Pour un même événement, la valeur de SPP est toujours inférieure à celle du ruissellement. Les teneurs en MES du ruissellement sont très variables et complexes à comparer d'un site à l'autre et pour plusieurs événements. Néanmoins les teneurs en MES du ruissellement présentées à la Figure 50 sont généralement dans la gamme présentée au Tableau 2.

Des observations au site permettent d'identifier les principales sources de MES. Il s'agit de matières organiques : des feuilles, des graines ou d'autres morceaux provenant des multiples arbres présents sur le bassin versant, des rognures d'herbe issues de la tonte des terrains privés, de la terre végétale et du paillis lessivés des terrains privés des rues perpendiculaires et autres. La matière inorganique

qui entraîne une charge en MES des eaux de ruissellement est composée, entre autres, de fines particules pouvant provenir des courants atmosphériques, de roches ou de poussières entraînées par la circulation automobile et de particules lessivées des entrées non pavées. Avant tout, les abrasifs étendus pendant toute la période hivernale représentent un apport majeur en sédiments. Les abrasifs sont composés de roc ou de pierre concassée et leur granularité est incluse dans le fuseau granulométrique AB-5 (MTQ, 2021), donc d'un diamètre supérieur à 1,25 mm et inférieur à 8 mm. L'ampleur de la présence des abrasifs sur le site au printemps est présentée à la Figure 51.



Figure 51: Présence d'abrasifs après la fonte des neiges

La Figure 51 présente une vue du côté impair de la rue Sainte-Claire, à l'intersection avec la rue du Parc. Pendant l'hiver, la neige est poussée majoritairement du côté impair de la rue, au-dessus des biorétentions et du pavé perméable. La neige tombée sur la piste multifonctionnelle est poussée vers les biorétentions. Il y a donc une accumulation majeure d'abrasifs dans ces zones, particulièrement dans les cellules de biorétention, dans lesquelles l'abrasif n'est pas déplacé par le ruissellement, ni capté lors des opérations de balayage.

Les teneurs en MES à SPP et à SB sont comparées à Ruis. pour déterminer les taux d'enlèvement présentés à la Figure 52.

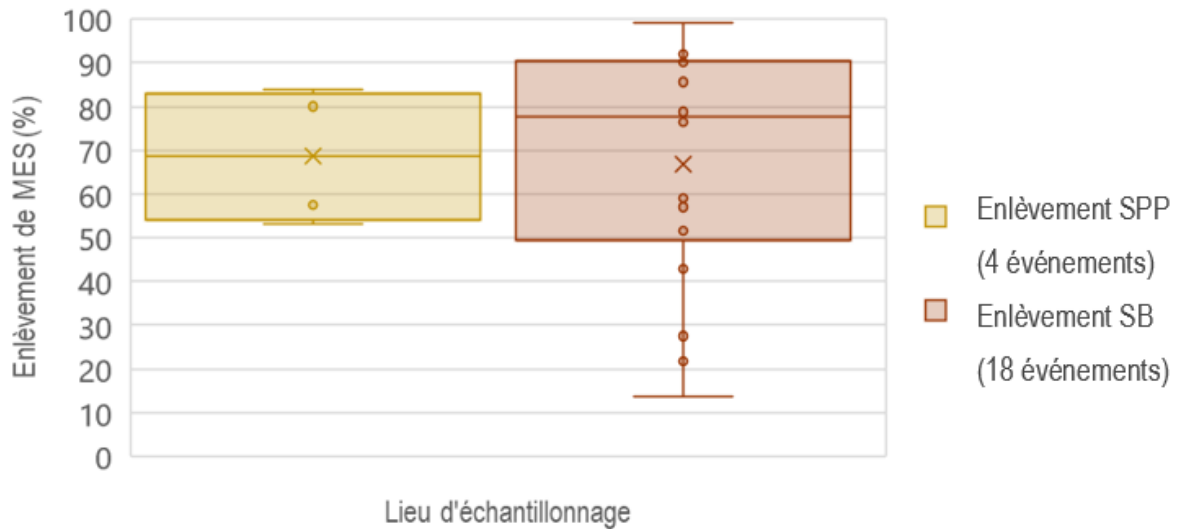


Figure 52: Taux d'enlèvement de MES du pavé perméable et du bassin de rétention

Les taux d'enlèvement des MES sont très élevés, même lors des événements de fortes pluies comme le 21 mai 2021. Les taux d'enlèvement les plus bas, sous 40 %, correspondent à des événements pour lesquels la teneur en MES du ruissellement est déjà assez faible. Les résultats détaillés par événement peuvent être consultés à l'Annexe D. Le pavé perméable permet à lui seul d'atteindre des taux d'enlèvement très élevés. Le colmatage des interstices du pavé perméable pourrait augmenter la charge à traiter par le bassin de rétention puisqu'il jouerait un rôle moins important dans l'enlèvement des MES. Un entretien régulier du pavé perméable semble essentiel pour éviter le remplissage en sédiments prématuré du bassin de rétention, qui est plus difficilement accessible pour le nettoyage. Le fait que le pavé perméable, les trappes à sédiments aux entrées du bassin et le bassin de rétention soient disposés en série a assurément un effet positif pour la déposition des particules et l'enlèvement des MES en général. La Figure 53 présente l'aspect visuel des échantillons prélevés le 5 mai 2021.

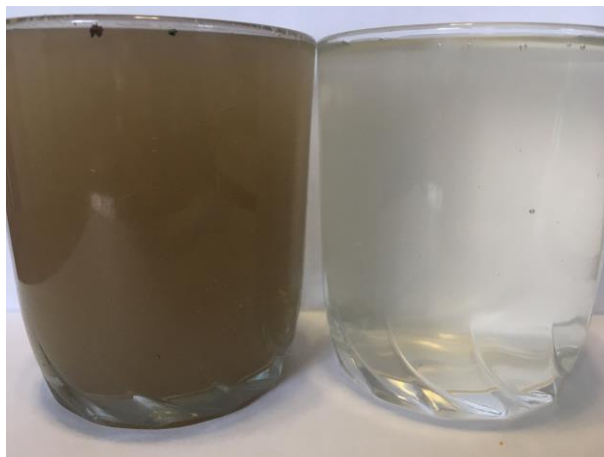


Figure 53: Aspect visuel des échantillons de ruissellement (à gauche) et de sortie du bassin (à droite)

Les teneurs en MES des échantillons présentés à la Figure 53 sont de $0,40 \times 10^3$ mg/L et de $0,06 \times 10^3$ mg/L, représentant un enlèvement de 86 %. Une amélioration de l'aspect visuel est clairement visible sur cette figure.

La teneur en MES du ruissellement est analysée selon le temps sec précédent et l'intensité maximale de précipitations, tel qu'illustré à la Figure 54. Il est attendu que les MES augmentent avec la durée de temps sec précédent. En effet, une plus longue période favorise la déposition de matières comme des sédiments emportés par les véhicules, les morceaux de végétaux, les dépôts et autres. Il est supposé que ces matières soient plus propices d'être emportées si la vitesse de ruissellement est plus grande, donc si l'intensité maximale de précipitations est plus élevée.

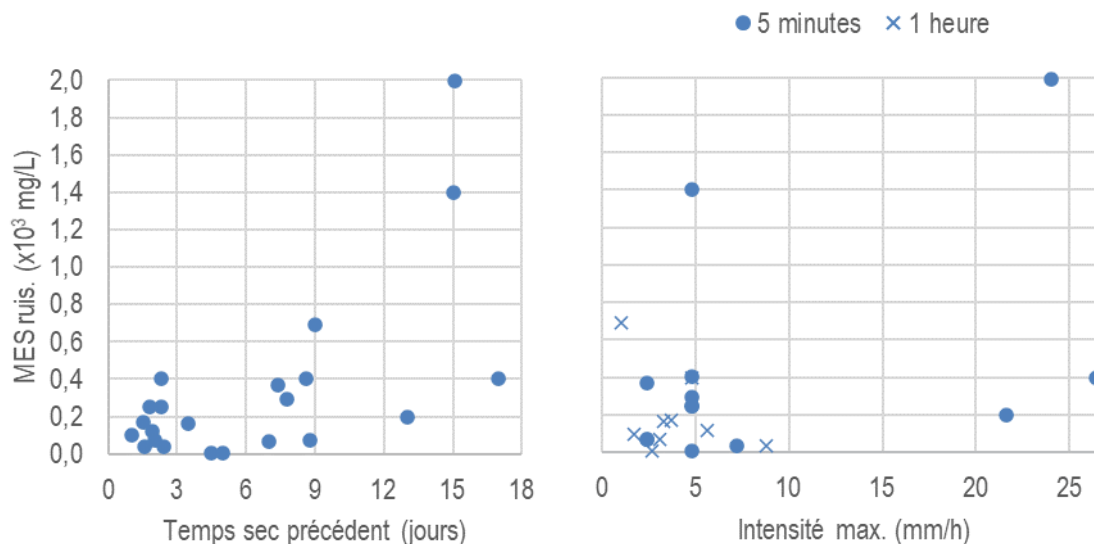


Figure 54: Teneur en MES du ruissellement par rapport au temps sec précédent et à l'intensité maximale de précipitations

Chaque point sur la figure représente un des 22 événements de pluie pour lequel il y a eu analyse des MES du ruissellement. Dans la partie de droite, les croix représentent les intensités maximales sur une heure mesurées à l'aéroport de Rivière-du-Loup à Notre-Dame-du-Portage (ERNC, 2021), alors que les cercles sont des intensités maximales sur cinq minutes mesurées sur la rue Sainte-Claire. Puisque l'intervalle de mesure est plus long, il est donc prévisible que les croix soient généralement inférieures aux cercles et doivent être analysées séparément.

Les coefficients de corrélation entre la teneur en MES du ruissellement et le temps sec précédent ou l'intensité maximale de précipitations sont respectivement de 0,65 et de 0,42. La taille de l'échantillon limite la précision des analyses. Néanmoins, il est possible de conclure que le temps sec antécédent et l'intensité maximale de précipitations affectent partiellement les MES, mais d'autres facteurs sont à considérer. Cela est cohérent avec les observations de la Figure 54 : les MES augmentent généralement avec ces deux paramètres, mais pas nécessairement. Ces constats révèlent que la teneur en MES dépend également d'une combinaison d'autres facteurs qui ne sont pas pris en compte ici. La saison pourrait avoir un impact, par la présence accrue d'abrasifs en hiver et au printemps ou la grande quantité de feuilles mortes en automne.

4.2.3 Conductivité électrique

La CÉ est analysée dans le but d'estimer l'impact des sels de déglacage étendu en période hivernale et leurs mouvements dans les ouvrages au fil du temps. Une CÉ plus élevée témoignerait potentiellement d'une concentration plus élevée en sels de déglacage. Cependant, d'autres paramètres ont un grand impact sur la CÉ des échantillons. La matière organique conduit peu, donc une plus forte teneur en matières organiques entraîne une conductivité électrique plus faible (CEAEQ, 2015). La présence d'autres sels minéraux ou la température influencent également la CÉ (CEAEQ, 2015).

Il est soupçonné qu'il y a accumulation de sels de déglacage dans les ouvrages au printemps, qui seraient relargués au cours de l'été. Les activités de balayage en captent une partie, mais sont réalisées tard au printemps, après plusieurs événements de pluie. Les sels peuvent donc être emportés par le ruissellement vers les ouvrages souterrains : dans les renforcements de cunette au fond des puisards, dans les bassins de pierre nette sous le pavé perméable et dans le bassin de rétention.

La Figure 55 présente la CÉ des échantillons d'eau de ruissellement et à la sortie du bassin. Les analyses de CÉ ont débuté après l'hiver 2020-2021, donc aucune donnée n'est disponible à la sortie du PP, où il n'y a pas eu d'écoulement.

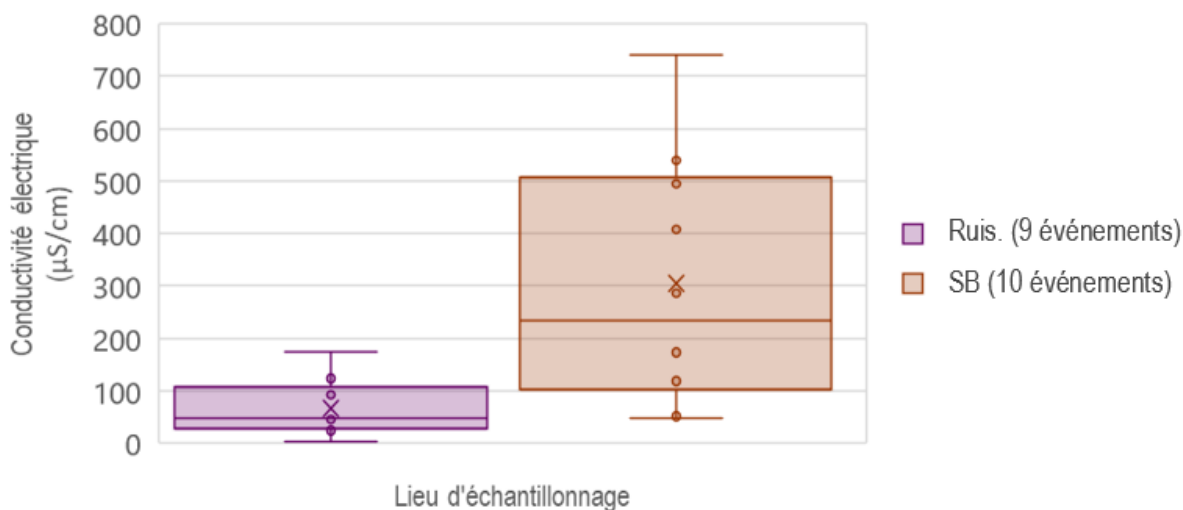


Figure 55: Conductivité électrique du ruissellement et de la sortie du bassin

La conductivité électrique à la sortie du bassin dépasse les valeurs attendues pour un secteur résidentiel (Pitt et al., 2004). Cependant, ces références issues des États-Unis ne sont pas

nécessairement représentatives du site de Rivière-du-Loup, où il y a épandage massif de sels de déglacage. Kim et al. (2012) considèrent qu'il est préférable d'évaluer les variations de conductivité électrique pour détecter un signe de contamination, plutôt que de comparer les valeurs d'un site à l'autre. La Figure 56 présente les taux d'augmentation de la conductivité électrique entre le ruissellement et la sortie du bassin.

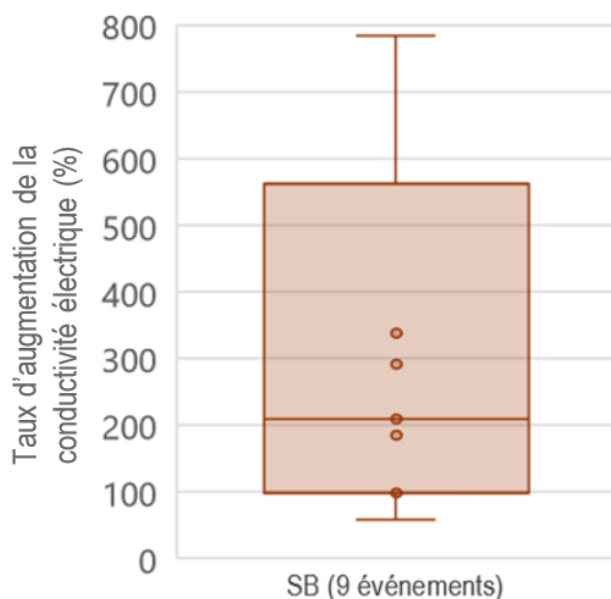


Figure 56: Taux d'augmentation de la conductivité électrique (non visible sur la figure : 22 000 %)

Il y a une augmentation très évidente de la CÉ en aval du bassin de rétention. Il n'est pas possible de l'attribuer uniquement au relargage de sels de déglacage potentiellement accumulés dans le bassin en grande quantité. En effet, l'eau en aval du bassin contient beaucoup moins de MES, selon les résultats discutés précédemment. La teneur en matière organique n'a pas été analysée. On pourrait supposer que la teneur en matière organique aurait diminué également à la sortie du bassin. Par conséquent, au moins une partie de l'augmentation de la CÉ pourrait être attribuée à ce facteur. La Figure 57 présente la CÉ du ruissellement et de la sortie du bassin à travers le temps.

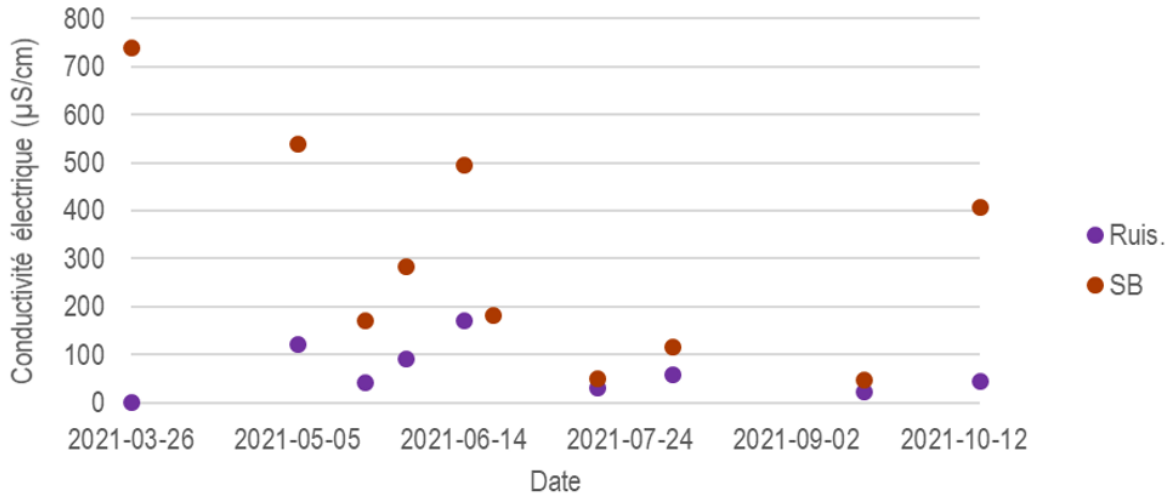


Figure 57: Évolution temporelle de la conductivité électrique

La Figure 57 semble confirmer l'hypothèse énoncée, les concentrations sont généralement de moins en moins élevées à travers le temps (à l'exception de SB le 12 octobre 2021). Les valeurs maximales de CÉ sont observées avant le mois de juillet, donc au printemps ou en début d'été. Le coefficient de corrélation entre les CÉ à la sortie du bassin et le temps est de -0,54, ce qui représente une faible corrélation. Cela s'explique par les autres facteurs qui influencent probablement les teneurs en CE, notamment l'intensité de précipitations.

Il n'est donc pas possible de conclure dans quelle mesure l'augmentation de la CÉ est attribuable aux sels de déglacage. Toutefois, il y a assurément une majeure partie des sels de déglacage qui est emportée par ruissellement et déversée au milieu récepteur, sans connaître la distribution temporelle du phénomène.

4.2.4 Azote et phosphore totaux

Les teneurs en NT et en PT de l'eau de ruissellement et de la sortie du bassin sont présentées à la Figure 58.

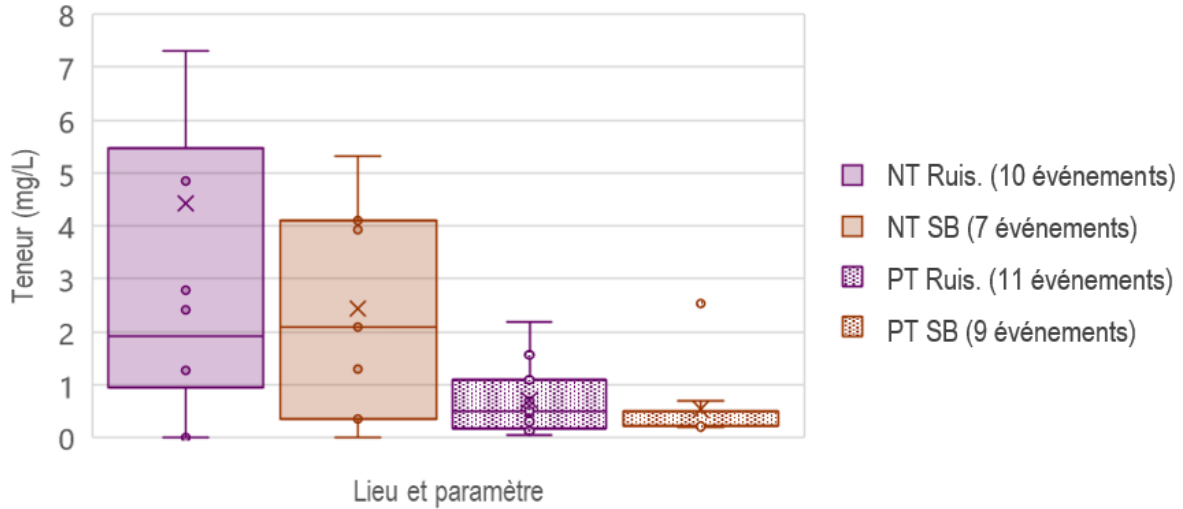


Figure 58: Teneurs en NT et en PT du ruissellement et de la sortie du bassin (non visible sur la figure : NT Ruis. 23 mg/L)

Les teneurs en azote et en phosphore sont plutôt basses par rapport à Pitt et al. (2004). Cependant, pour la plupart des événements, les teneurs en azote et en phosphore dépassent les critères de toxicité chronique pour la protection de la vie aquatique fixés respectivement à 1,9 mg/L et à 0,03 mg/L (MELCC, 2021a), énoncés au Tableau 1. Il faut noter que ces critères de toxicité ne s'appliquent pas aux lieux d'échantillonnage, mais plutôt aux milieux récepteurs. L'observation de la Figure 58 permet de constater qu'il semble y avoir une diminution des teneurs en NT et en PT entre l'entrée (le ruissellement) et la sortie. La teneur moyenne en NT et en PT diminue entre le ruissellement et la sortie du bassin. Cependant, l'observation des données par événement démontre qu'il n'y a pas systématiquement un enlèvement : la Figure 59 présente la variation des teneurs en NT et en PT entre les eaux de ruissellement et la sortie du bassin pour l'ensemble des événements.

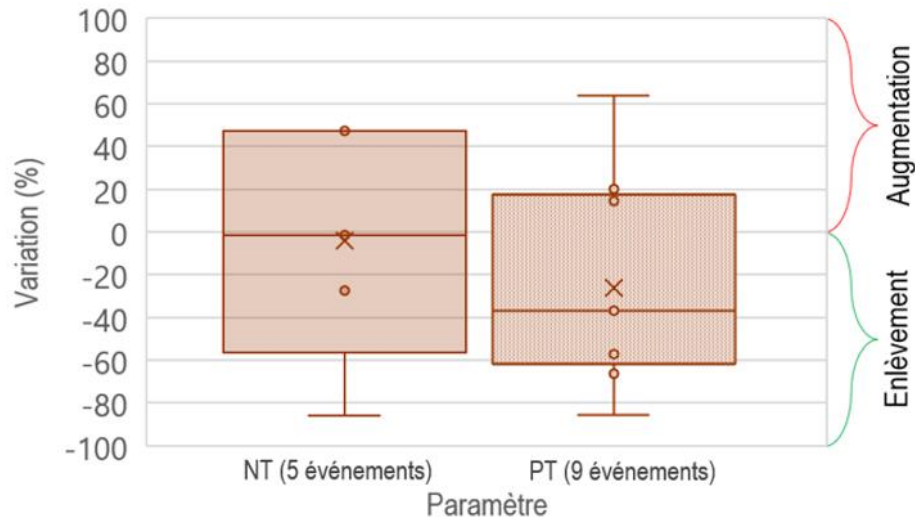


Figure 59: Variation des teneurs en NT et en PT

Il n'y a pas de diminution ou d'augmentation claire de la teneur en NT : il y a une grande variation entre les événements. La petite taille de l'échantillon ne permet pas de faire des constats clairs. La teneur en PT des événements échantillonnés montre une diminution moyenne de 26 % et médiane de 36 %. L'enlèvement de l'azote et du phosphore particuliers est favorisé par les lieux où il peut y avoir une déposition des particules : les interstices du pavé perméable, les bassins d'accumulation à la base des puisards ou des regards, les bassins de pierre nette sous le pavé perméable et le bassin de rétention.

Il est important de noter que le NT ou le PT contenu dans les eaux de ruissellement qui s'infiltrent dans le sol, sous le pavé perméable ou les biorétentions, constitue une charge qui ne sera pas déversée directement au milieu récepteur à l'exutoire pluvial. Néanmoins, ces eaux peuvent s'y rendre indirectement et contaminer les eaux souterraines au passage.

Enfin, il est établi que les ouvrages de GDEP de la rue Sainte-Claire permettent définitivement un enlèvement des MES. Les variations de CÉ pourraient indiquer le relargage de sels de déglacage, mais pas exclusivement. Il n'y a pas d'effet clair sur les teneurs en NT et en PT, qui varient selon l'événement.

4.3 Plantes et substrat

Cette section présente les résultats et analyses relatifs aux suivis de croissance des plantes, à la teneur en eau et à la température du substrat.

4.3.1 Croissance des plantes

Les mesures de plantes réalisées entre août 2020 et septembre 2021 sont présentées à l'Annexe E. La Figure 60 identifie visuellement les espèces de plantes et présente le patron de disposition qui est répété sur presque l'ensemble du site.

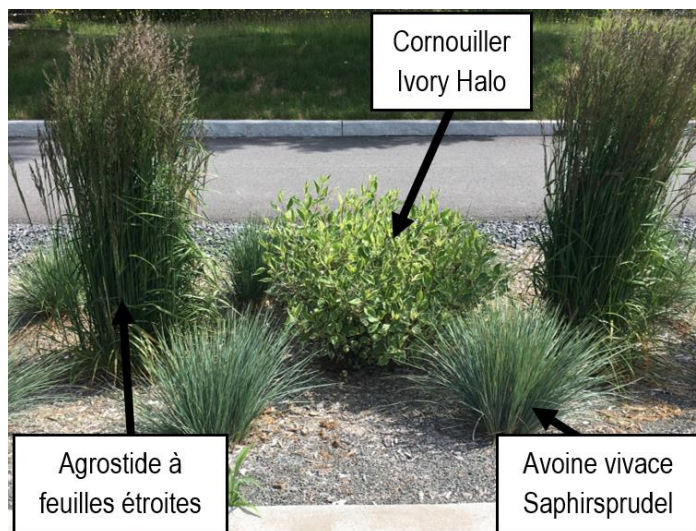


Figure 60: Identification et localisation des graminées et des arbustes

La Figure 61 présente les biorétentions après la coupe des graminées et des arbustes du 15 octobre 2021. Une coupe similaire a été réalisée à l'automne 2020.



Figure 61: État des plantes après la coupe du 15 octobre 2021

Annuellement, les graminées sont coupées à la base du plant et les cornouillers sont taillés en demi-sphères.

La croissance des plantes est présentée par espèce aux prochaines sections.

4.3.1.1 Lilas japonais

La circonférence du tronc des lilas japonais à travers le temps est présentée à la Figure 62. Chaque courbe représente un arbre numéroté de 1 à 5.

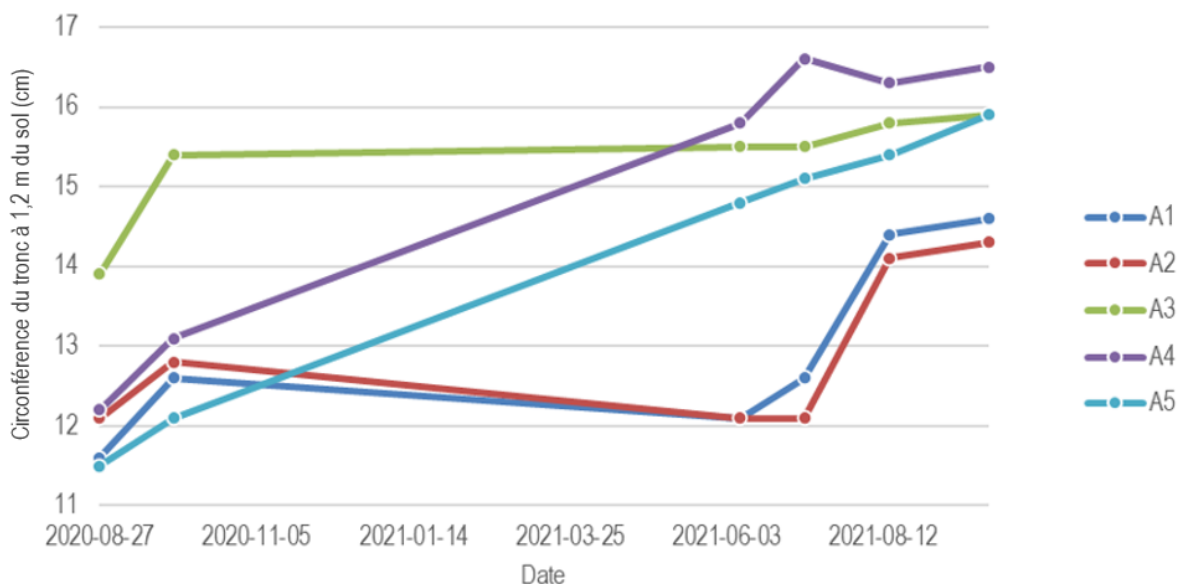


Figure 62: Circonférence du tronc des lilas japonais

À première vue, il semble y avoir des incongruités dans la Figure 62 : la circonférence d'un même arbre diminue parfois d'un mois à l'autre. Cela est probablement relié à la précision de la mesure. La circonférence mesurée est précise à ± 0.1 cm, mais il y a une incertitude plus grande sur la mesure du 1,2 m à partir du sol. Le point de référence au sol peut varier de quelques centimètres en raison de l'irrégularité du paillis ou du tassement du sol d'une saison à l'autre. Puisqu'il y a plusieurs nœuds dans le tronc, une variation d'élévation de quelques centimètres peut augmenter ou diminuer grandement la circonférence mesurée.

La faible quantité d'arbres et la courte période de mesure limite la précision des constats. Néanmoins, des taux de croissance moyens mensuels de la circonférence de 4 % et de 0,5 cm/mois sont notés.

La Figure 63 présente le lilas japonais en période de floraison.



Figure 63: Floraison du lilas japonais

La qualité esthétique des lilas japonais en période de floraison a été mentionnée à plusieurs reprises par les résidents et par d'autres usagers de la rue.

4.3.1.2 Cornouiller Ivory Halo

Les hauteurs et les aires des cornouillers Ivory Halo sont présentées à la Figure 64 et à la Figure 65. Il est pertinent de noter que les arbustes ont été taillés en demi-sphères (hauteur de 20 cm et aire de 0,5 m²) à l'automne, donc entre les mesures du 29 septembre 2020 et du 9 juin 2021. Une claire augmentation de la hauteur et de l'aire est observée à travers le temps.

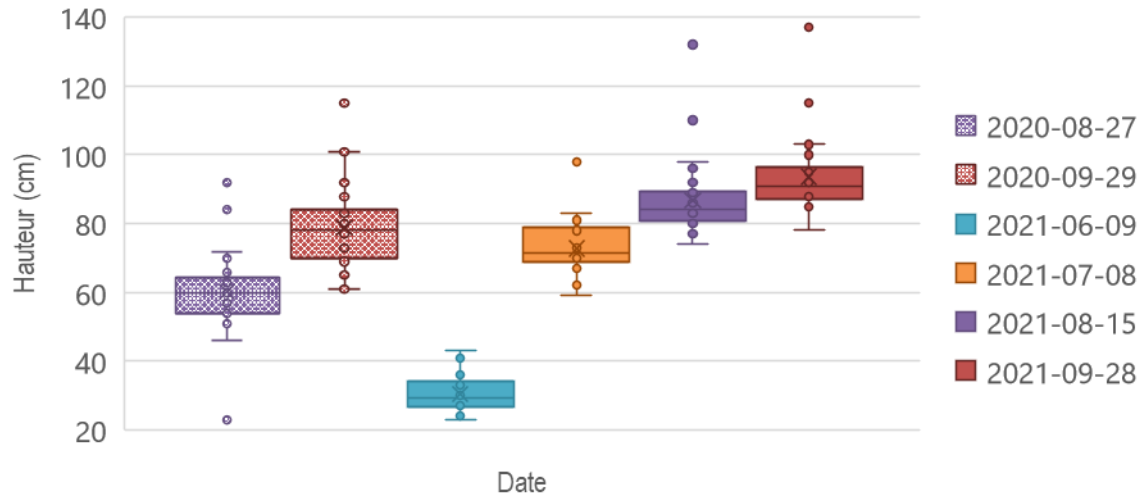


Figure 64: Distribution des hauteurs - cornouiller Ivory Halo (30 plants mesurés)

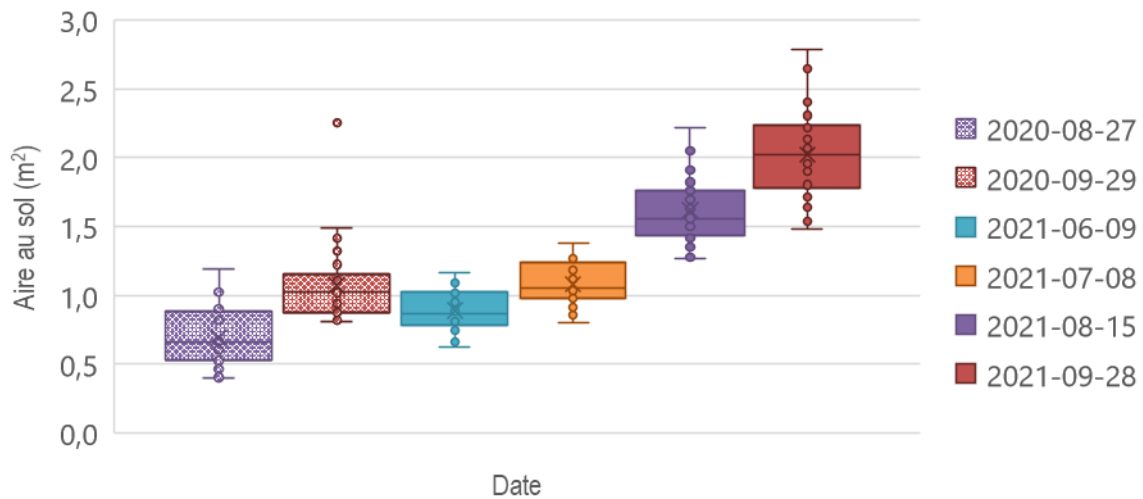


Figure 65: Distribution des aires - cornouiller Ivory Halo (30 mesures)

Ces figures illustrent qu'il y a une croissance notable des plants de cornouillers pendant la période estivale, particulièrement en 2021 en raison de la plus longue période de croissance. En effet, ils ont été mis en place seulement en cours d'été 2020. La Figure 64 met en évidence que la majorité des plants atteint environ la même hauteur (faible variance), sauf pour quelques-uns qui sont plus grands. La Figure 66 présente l'évolution de la hauteur et de l'aire de certains plants : le C13 (typique), le C23 (le plus grand) et le C29 (parmi les plus petits).

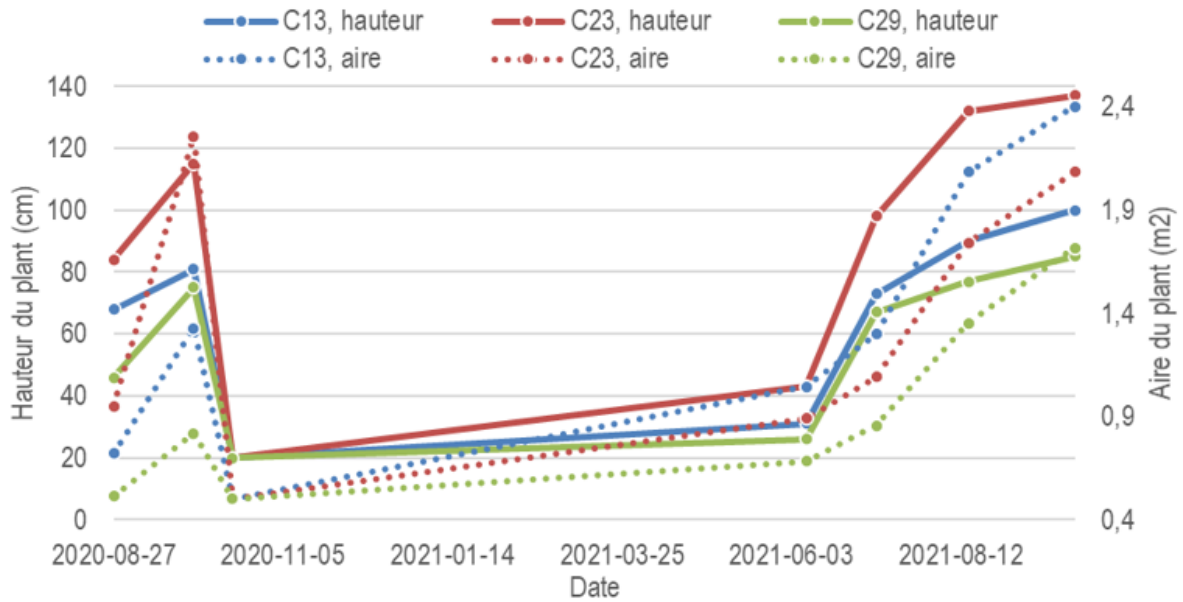


Figure 66: Hauteur et aire de certains plants – cornouiller Ivory Halo

La Figure 66 met en évidence que les hauteurs et les aires des cornouillers présentent de grandes variations entre les plants. La hauteur attendue à maturité est de 2,0 m (Hydro-Québec, s. d.); considérant que les plants sont coupés très courts chaque année, il n'est pas surprenant qu'aucun n'atteigne cette valeur. Tous les individus atteignent une hauteur et une aire qui permettent de bien garnir l'espace qui leur est attribué.

4.3.1.3 Avoine vivace *Saphirsprudel*

Les hauteurs et les aires des plants d'avoine sont présentées à la Figure 67 et à la Figure 68.

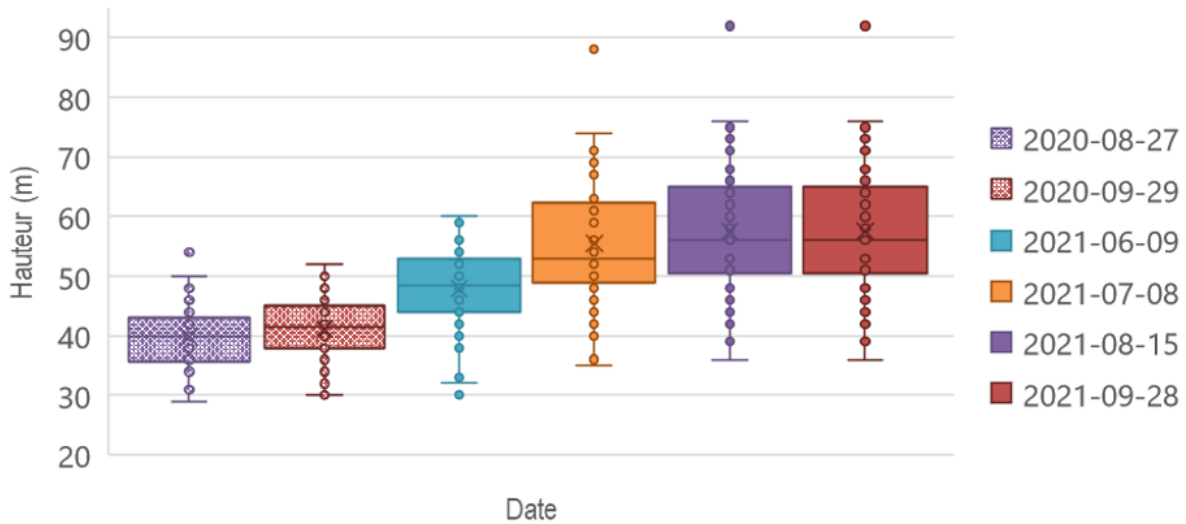


Figure 67: Distribution des hauteurs - avoine vivace Saphirsprudel

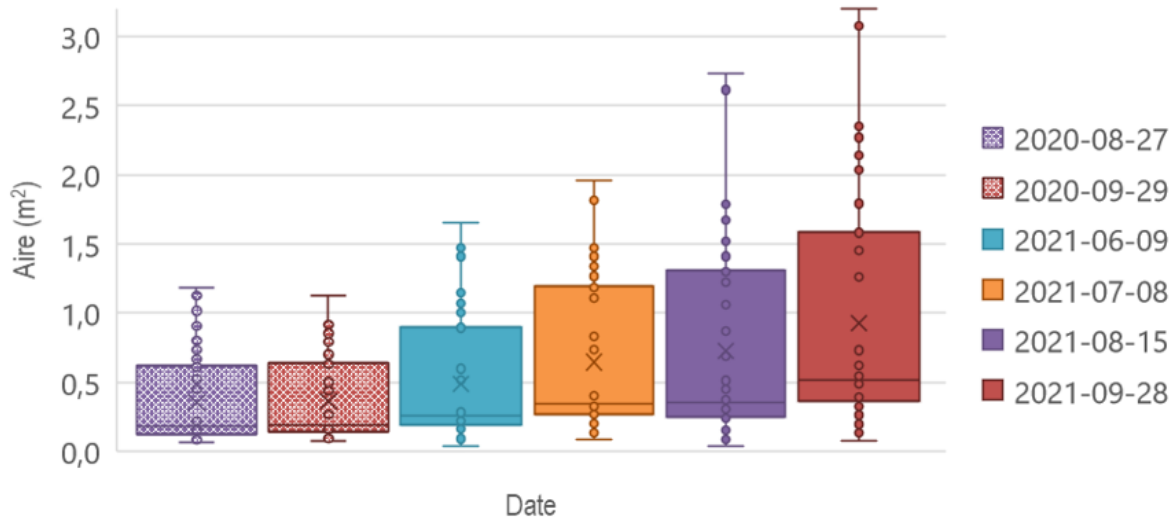


Figure 68: Distribution des aires - avoine vivace Saphirsprudel

Les plants ont été coupés à l'automne pour atteindre une hauteur de 1 cm et une aire d'environ 0,1 m². Les plants d'avoine ont atteint en 2021 des hauteurs et des aires très supérieures à 2020 (plantation en juin 2020). Cela pourrait indiquer que cette espèce requiert une période de croissance plus longue pour atteindre son envergure attendue. Il est intéressant de constater qu'il y a une grande variabilité de l'aire des plants. Certains demeurent plutôt étroits, alors que d'autres s'élargissent, indépendamment de leur hauteur, comme illustré à la Figure 69.

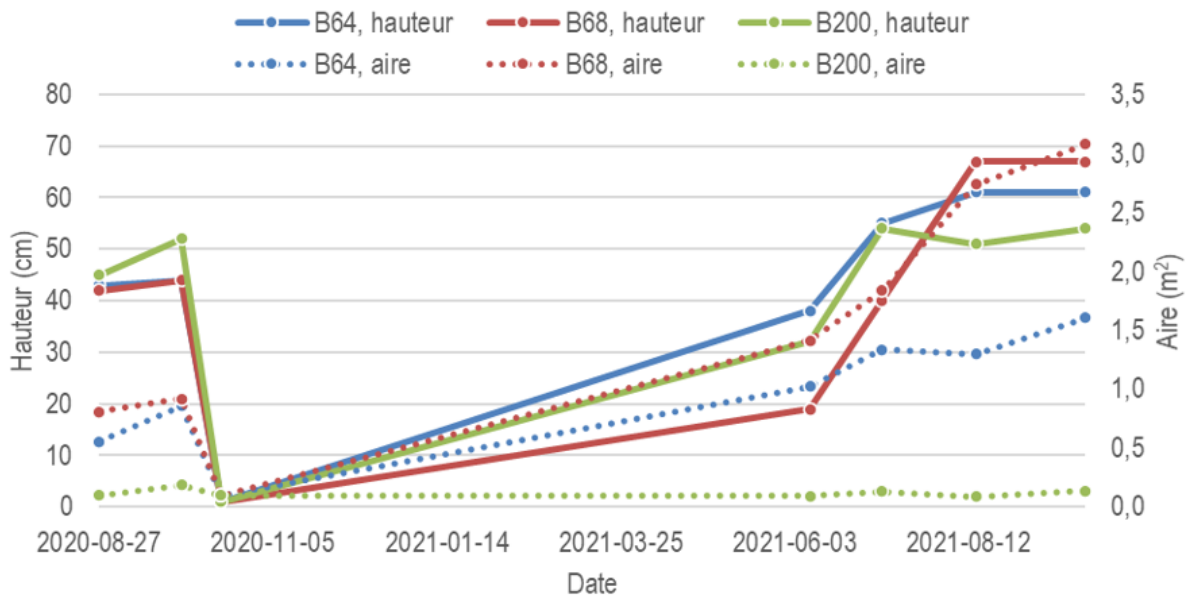


Figure 69: Hauteur et aire de certains plants – avoine vivace Saphirsprudel

Le plant B64 est illustré en bleu sur la Figure 69; son aire est près de la médiane par rapport à tous les autres plants. Les plants B68 et B200 ont respectivement l'aire la plus élevée et la plus faible en 2021. Leur hauteur n'est pas particulièrement élevée par rapport aux autres plants. La croissance semble stagner après le mois d'août 2021. Cela est cohérent avec les diminutions de température de l'air. Les dimensions des plants à l'automne s'approchent des envergures attendues.

4.3.1.4 Agrostide à feuilles étroites

Des mesures de certains plants d'agrostide ont été réalisées de la même manière que pour les autres espèces. Les agrostides atteignent les hauteurs les plus élevées, hormis les arbres, dans les biorétentions. La Figure 70 présente, de gauche à droite, l'agrostide en août 2020, en juin 2021 et en août 2021.



Figure 70: Évolution de l'agrostide à travers le temps (août 2020, juin 2021 et août 2021)

Bien que ce paramètre ne soit pas évalué dans le cadre de ce projet, les variations de textures et de couleurs, allant du vert aux reflets mauves, puis au doré, semblent constituer un bénéfice esthétique majeur pour le paysage de la rue.

Au cours de l'été 2021, en raison de revendications des citoyens du secteur, certains plants ont été coupés. En effet, il a été jugé que les trois premiers plants de part et d'autre des rues Dumas, du Parc et Picard nuisent à la visibilité des automobilistes lors du virage. Ils seront remplacés par une autre espèce de graminée de plus petite envergure qui permet d'assurer un triangle de visibilité adéquat.



Figure 71: Agrostides coupés à l'intersection des rues Sainte-Claire et du Parc pour la visibilité

La Figure 72 et la Figure 73 présentent respectivement les hauteurs et les aires des agrostides à travers le temps. Vingt-quatre plants ont été mesurés, sauf en août et en septembre 2021 où trois d'entre eux ont été retirés. La taille annuelle a été réalisée entre les mesures de septembre 2020 et de juin 2021. La hauteur de tous les plants était alors de 1 cm et leur aire de 0,2 m² à l'automne 2020.

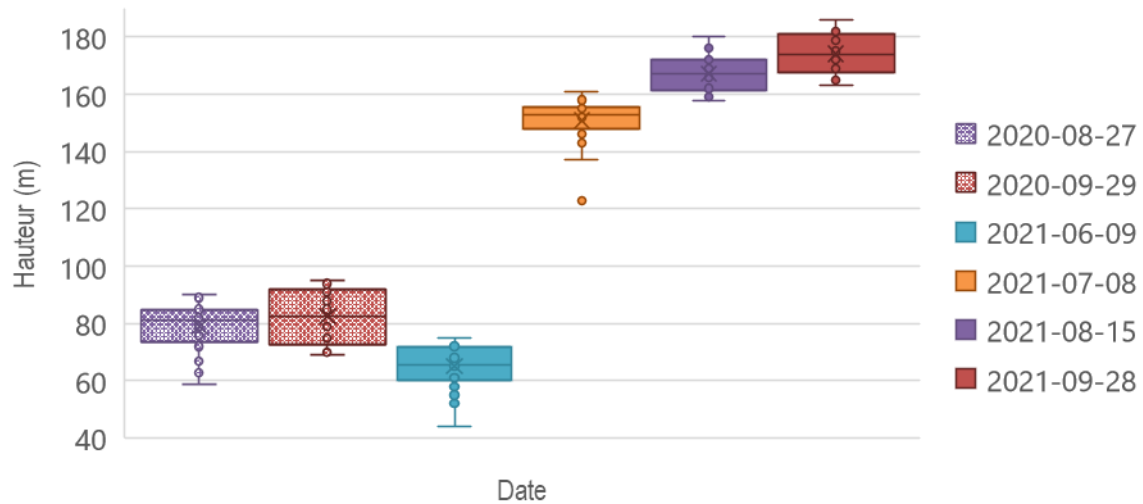


Figure 72: Distribution des hauteurs - agrostides à feuilles étroites (21 ou 24 plants mesurés)

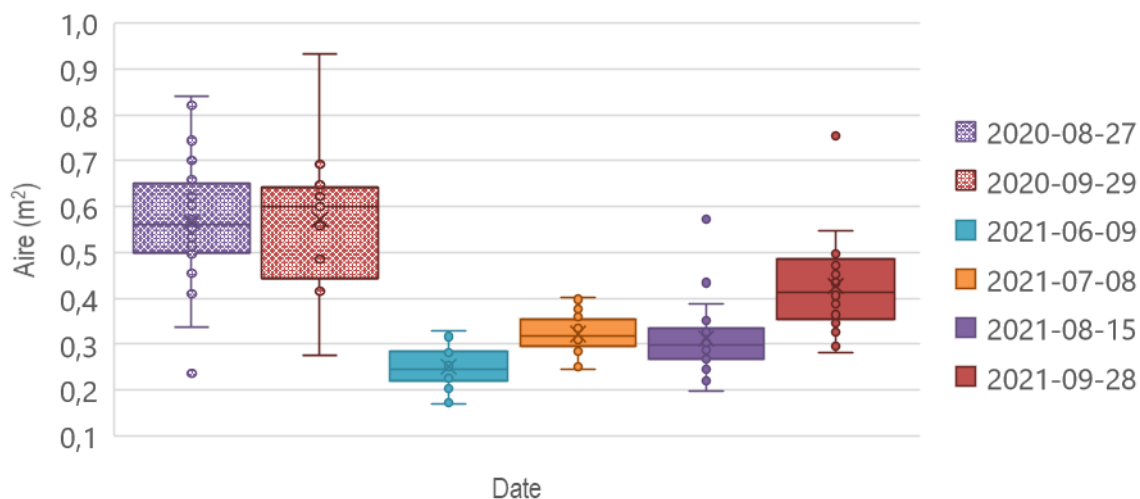


Figure 73: Distribution des aires - agrostides à feuilles étroites (21 ou 24 plants mesurés)

La Figure 72 met en évidence qu'il y a une très grande uniformité des hauteurs des agrostides et une forte croissance de juin à juillet 2021. En effet, les 1^{er} et 3^e quartiles sont situés très près les uns des autres à chaque période de mesure. La Figure 72 et la Figure 73 mettent en évidence que les agrostides étaient généralement plus larges, mais moins hautes en 2020, par rapport à 2021 où des plants plus étroits et plus hauts se sont développés. Une légère diminution des aires moyenne et médiane est observée entre juillet et août 2021. Tel que discuté dans la méthodologie, il est possible que cette variation ne représente pas une réelle diminution des aires, mais plutôt l'impact des conditions climatiques lors de la mesure. En effet, le vent entraîne une déformation du plant qui peut mener à une sous-estimation de l'aire. La Figure 74 présente l'évolution temporelle des hauteurs et des aires de certains plants.

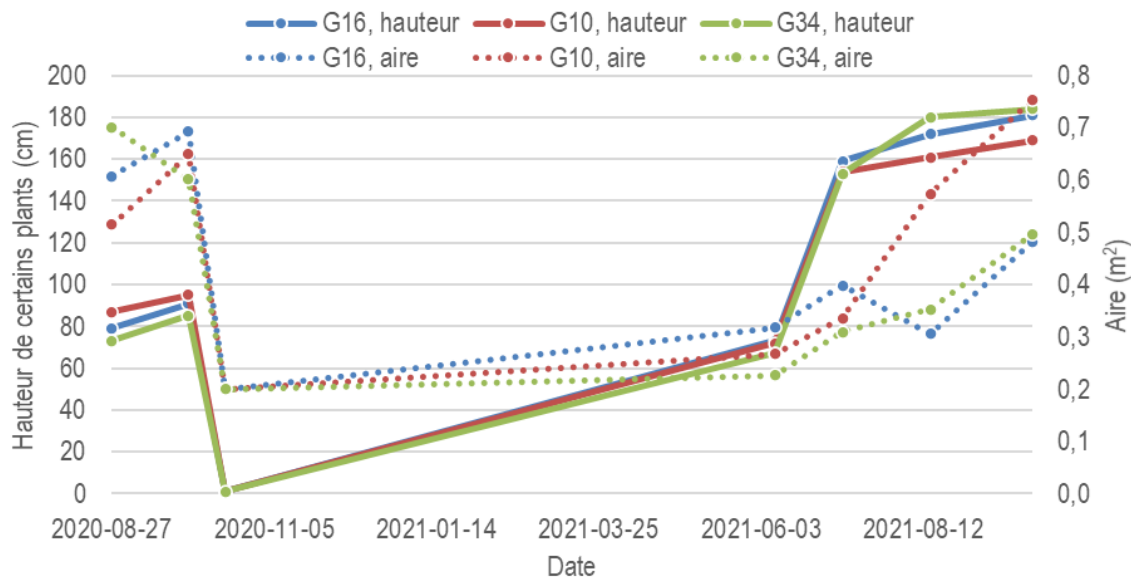


Figure 74: Hauteur et aire de certains plants - agrostide à feuilles étroites

La hauteur et l'aire du plant G16 sont typiques et s'approchent de la médiane de tous les plants à chaque pas de temps. Le plant G10 est parmi les plus hauts en 2020 et le plus court en 2021. À l'inverse, le plant G34 est plutôt court par rapport à la moyenne en 2020 et le plus haut en 2021. La Figure 74 confirme qu'il y a une très grande uniformité des hauteurs des plants. L'aire est plus variée d'un plant à l'autre. La Figure 75 présente le nombre de tiges florales par plant.

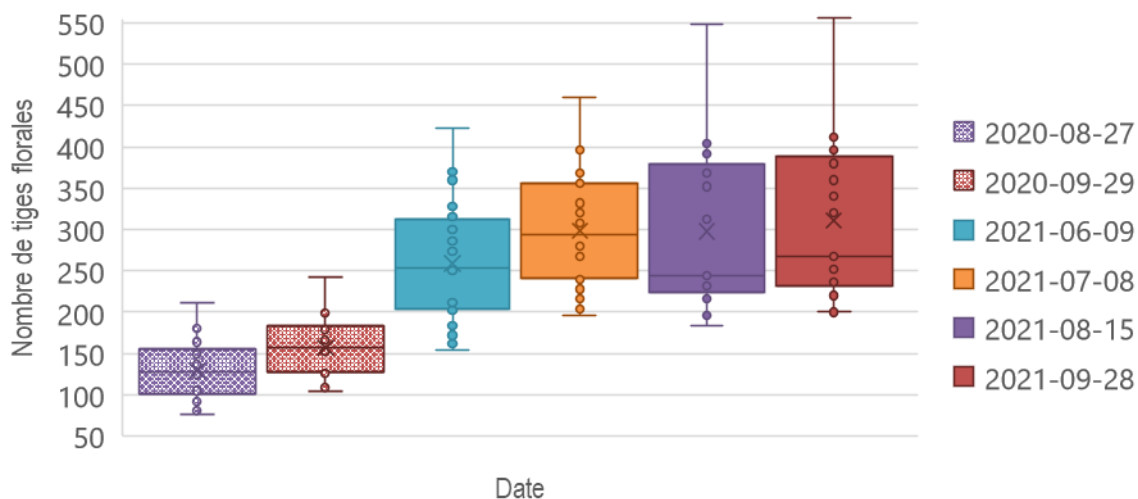


Figure 75: Nombre de tiges florales – agrostide à feuilles étroites (21 ou 24 plants mesurés)

Il y a une légère augmentation du nombre moyen de tiges florales avec le temps. Ces augmentations sont minimales par rapport aux augmentations de hauteur ou d'aire, ce qui est cohérent aux attentes.

4.3.1.5 Taux de croissance

La Figure 76 présente les taux de variation de la circonférence du tronc des lilas japonais ou de la hauteur du plant pour les autres espèces.

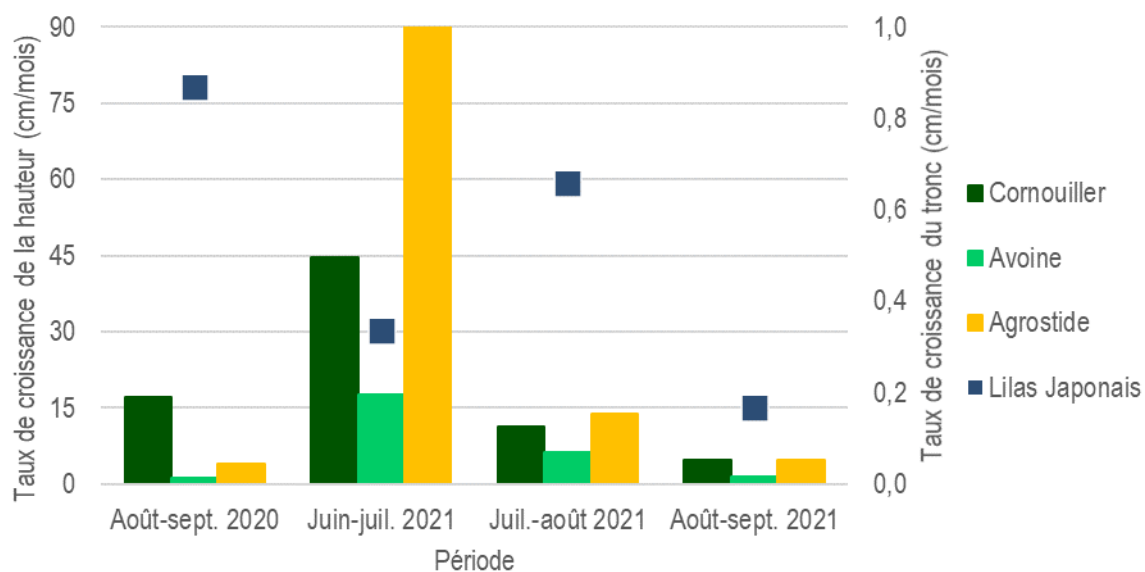


Figure 76: Croissance des plantes par espèce par mois

La Figure 76 reprend les valeurs des figures précédentes et exprime des taux de croissance absolus par mois. La Figure 77 illustre ces mêmes progressions, mais exprimées en proportion de la hauteur ou de la circonférence.

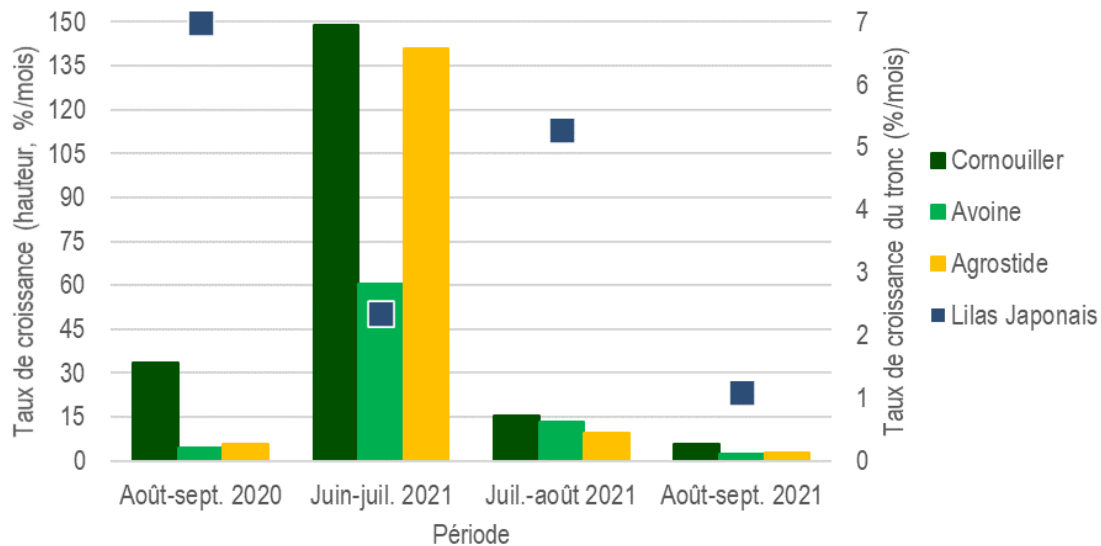


Figure 77: Taux de croissance des plantes par espèce par mois

Parmi les mois mesurés, les taux de croissance atteignent leur maximum dans la période de juin à juillet 2021.

4.3.1.6 Impact de la position

Les plants situés plus au nord-ouest sont à des élévations plus faibles et davantage exposés aux vents du nord en provenance du fleuve Saint-Laurent. Une analyse de la variance à un facteur a été réalisée entre les plants situés de part et d'autre de la rue du Parc (centre approximatif de la rue Sainte-Claire) pour déterminer s'il y a une différence significative dans leur croissance. Les plus récentes mesures de hauteur ont été utilisées. Le Tableau 9 présente les résultats.

Tableau 9: ANOVA sur les plantes selon le lieu

Espèce	Position	Nombre de plants	Hauteur moyenne (cm)	Variance de la hauteur (cm ²)	Probabilité
Cornouiller Ivory Halo	Nord-ouest	14	94	181	0,92
	Sud-est	16	94	75	
Agrostide à feuilles étroites	Nord-ouest	11	172	43	0,24

Espèce	Position	Nombre de plants	Hauteur moyenne (cm)	Variance de la hauteur (cm ²)	Probabilité
	Sud-est	10	176	55	
Avoine vivace Saphirsprudel	Nord-ouest	27	60	140	0,07
	Sud-est	27	55	83	

Il faut considérer que la petite taille des échantillons limite la précision des analyses. Pour les trois espèces (cornouiller, avoine et agrostide), il n'y a pas de différence significative entre la hauteur des plants situés d'un côté ou de l'autre de la rue du Parc. La plus grande différence est observée pour l'agrostide, mais son facteur n'atteint pas le seuil significatif d'après l'intervalle de confiance de 95 % choisi.

Considérant que le site est relativement petit (environ 200 mètres de longueur) et qu'il n'y a pas de différence significative d'apport d'eau ou d'ensoleillement, ces résultats sont cohérents. Une analyse similaire pourrait être réalisée sur des sites plus vastes ou pour lesquels les biorétentions sont associées à des aires tributaires significativement différentes les unes des autres.

4.3.2 Végétation dans le pavé alvéolé

Le pavé alvéolé est installé dans une petite zone du site. Il repose sur des matériaux semblables à ce qui se trouve sous la chaussée. Il n'a pas été conçu spécifiquement pour l'infiltration d'eau dans le sol. Aucune plante n'a été semée dans ses interstices. Les blocs de pavé représentent une bonne proportion de la surface globale du pavé alvéolé et peuvent être chauffés par les rayons solaires et entraîner un assèchement du substrat. Malgré tout, il y a eu croissance de petits végétaux, quantifiée par la proportion de pixels verts sur une image de sa surface. Des photos du pavé à travers le temps sont présentées à l'Annexe F. La Figure 78 et la Figure 79 présentent le pavé alvéolé et l'interprétation du logiciel Canopeo le 26 mai 2021 et le 9 juillet 2021.



Figure 78: État du pavé alvéolé le 26 mai 2021 (à gauche) et le 9 juillet 2021 (à droite)

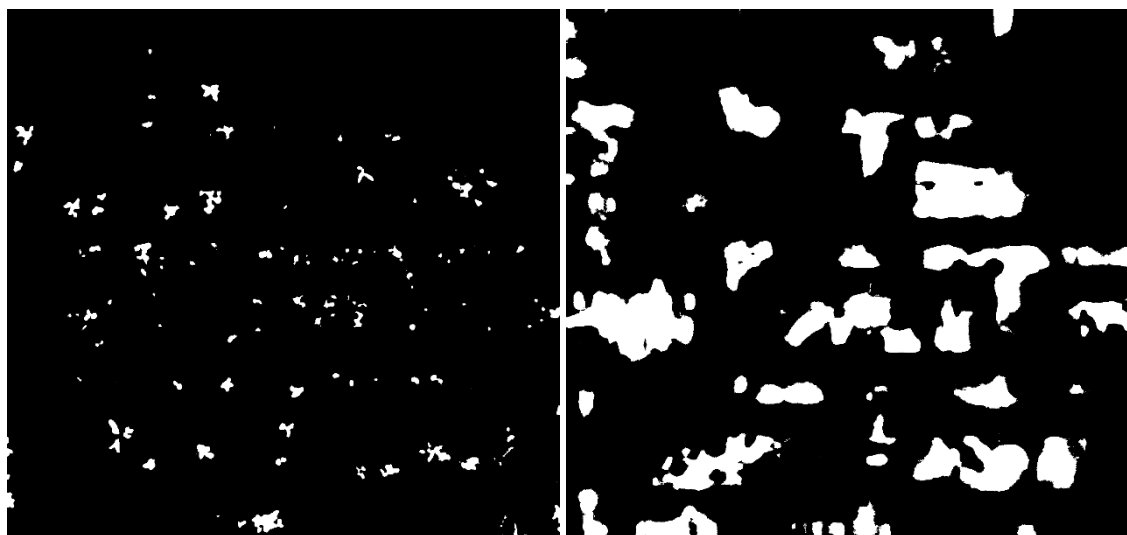


Figure 79: Interprétation du logiciel Canopeo pour le pavé alvéolé le 26 mai 2021 (à gauche) et le 9 juillet 2021 (à droite)

Les résultats du logiciel Canopeo sont cohérents avec l'observation des figures : de petites zones de végétation sont observées le 26 mai 2021, alors que de plus larges plants sont présents le 9 juillet 2021. Le logiciel Canopeo a associé des proportions de couvert végétal (pixels verts) selon les photos prises à travers le temps, présentées à la Figure 80.

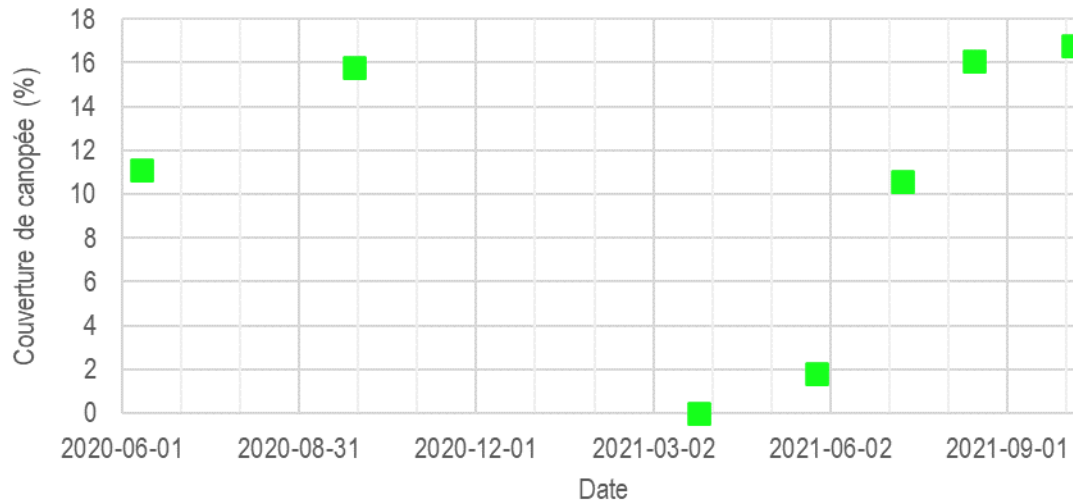


Figure 80: Évolution de la végétation dans le pavé perméable

Considérant l'absence d'expectative quant à la croissance de végétaux dans le pavé alvéolé, les résultats sont assez satisfaisants. En revanche, il y a un potentiel d'implantation d'espèces non désirées, comme des espèces envahissantes ou de l'herbe à poux. En 2020 et en 2021, la végétation couvre à terme environ 16 % de la surface. Considérant que les interstices représentent 38 % de la surface, cela correspond à près de la moitié de la surface disponible sans considérer les blocs, tel qu'illustré à la Figure 95 de l'Annexe F.

4.3.3 Résistance des plantes et espèces spontanées

Parmi tous les végétaux plantés au site, il n'y a eu aucune mortalité à l'exception d'un plant d'avoine, peu après la plantation. Toutes les espèces ont résisté à la période hivernale 2020-2021, malgré la faible présence de neige, et à une longue période chaude et sans précipitations en août 2021.

La Figure 81 illustre certaines feuilles affectées par des maladies ou la présence d'insectes. Cela ne semble pas avoir eu d'impact sur la survie ou la croissance des plants touchés.



Figure 81: Feuilles de cornouiller (à gauche) et de lilas japonais (à droite)

Hormis les cas présentés à la Figure 81, presque aucun plant ne présente des traces semblables. La faune du site ne semble pas avoir d'effet nuisible sur les végétaux.

À quelques endroits dans les biorétentions, la croissance d'espèces spontanées a été notée. Ces espèces ont été observées principalement le long de la bordure ou à la base d'un plant existant. Le paillis a donc un effet notable pour limiter la croissance des autres végétaux dans les biorétentions. La Figure 82 présente quelques exemples de végétaux ou de champignons qui se sont développés dans les biorétentions sans intervention humaine.



Figure 82: Autres végétaux ou champignons présents dans les biorétentions

Ces croissances spontanées ont un effet positif sur la biodiversité. Cependant, elles seront probablement retirées par la Ville lors de l'entretien annuel, à la demande des citoyens du secteur. À plus grande échelle, il semble primordial de questionner les standards esthétiques actuels en opposition avec la conservation de la biodiversité et l'établissement d'espèces spontanées, potentiellement mieux adaptées au climat. Cela soulève un enjeu qui dépasse le cadre de ce mémoire.

4.3.4 Teneur en eau du substrat

Contrairement à ce qu'on pourrait penser, les plantes situées dans les biorétentions doivent avant tout avoir une grande résistance à la sécheresse. En effet, le substrat est conçu pour avoir une conductivité hydraulique très élevée donc le sol ne conserve pas nécessairement son humidité. L'annexe G présente les résultats de teneur en eau du sol pour les trois lieux, identifiés à la Figure 18.

Entre le 15 août et le 4 septembre 2021, il y a eu seulement 2,3 mm de pluie (aucun ruissellement) et les températures maximales journalières étaient généralement entre 20 et 30 °C. Cela a eu pour effet de diminuer considérablement la teneur en eau du sol sur une relativement longue période. Les précipitations et les teneurs en eau du substrat dans la biorétention près du 23, rue Sainte-Claire sont illustrées à la Figure 83. Les précipitations sont présentées par tranche de huit heures pour permettre une meilleure visualisation.

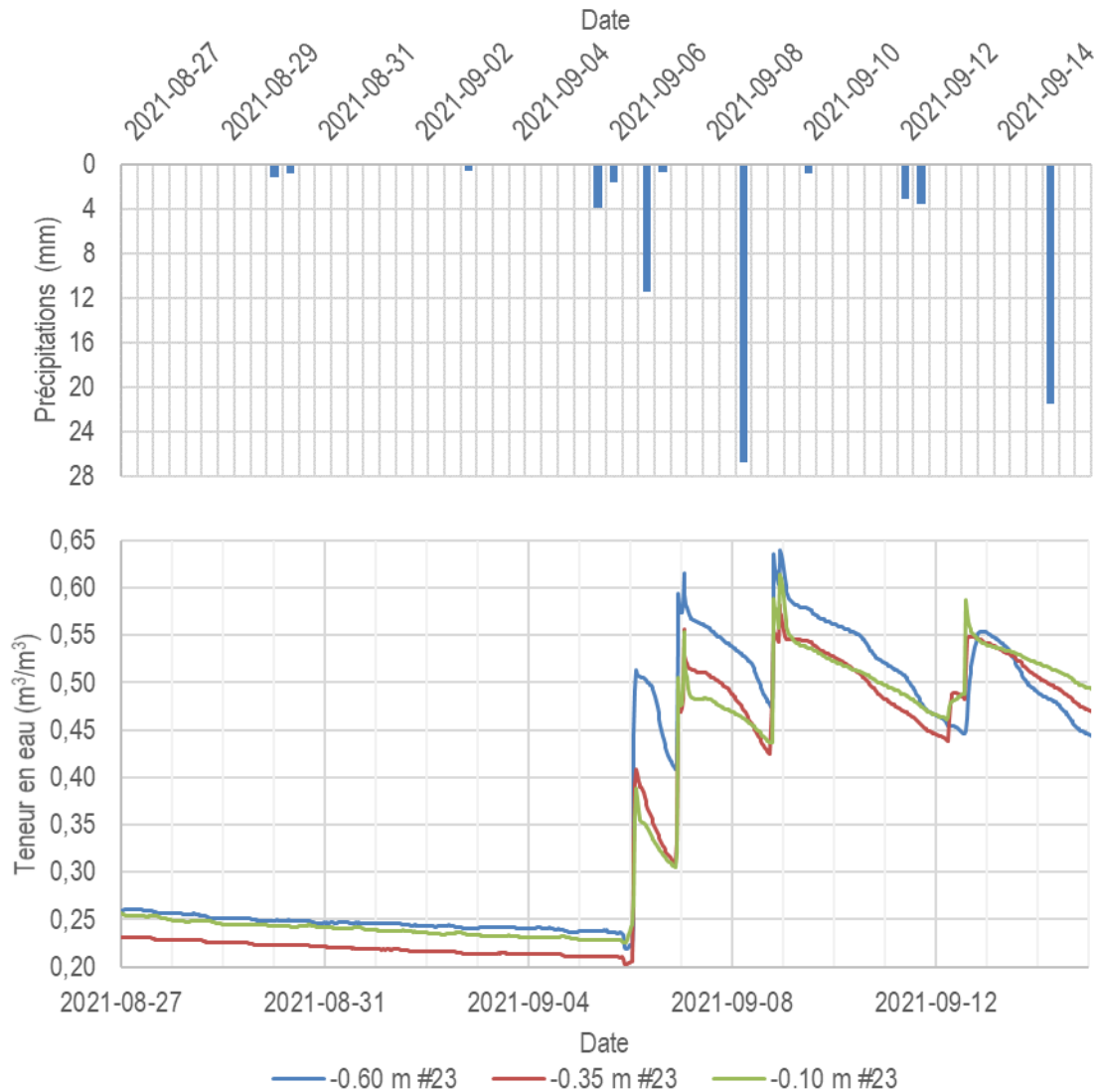


Figure 83: Précipitations et teneurs en eau du substrat près du 23, rue Sainte-Claire

À la suite de la longue période sans précipitation, le substrat atteint une teneur en eau entre 20 et 25 %, selon la profondeur. Cela est significativement plus bas que le reste de la période étudiée. Pour la première moitié de la figure, le capteur le plus profond, en bleu, est celui dont la teneur en eau est la plus élevée. Il est possible qu'après la percolation de l'excédent d'eau, les pores s'assèchent progressivement, de la surface vers le fond. Le capteur près de la surface a une teneur en eau supérieure à celui au centre en temps sec. Cela pourrait être l'effet du paillis disposé en surface. Aussi, la majorité des racines est située près de l'élévation du capteur du centre, il y a donc potentiellement plus d'eau puisée par les plantes dans cette zone.

La pluie du 6 septembre 2021 a eu un effet majeur sur les teneurs en eau du sol, particulièrement au niveau du capteur le plus au fond. Le capteur le plus profond se situe près de la couche de pierre nette. Il y a un bris de conductivité hydraulique entre le substrat et la pierre nette. C'est probablement un effet de nappe perchée : l'eau est retenue par capillarité dans le substrat au-dessus de la pierre nette. L'accumulation d'eau est favorisée dans la couche de pierre nette, ce qui explique pourquoi la teneur en eau mesurée par le capteur le plus profond varie différemment des autres. Cela est cohérent avec les dynamiques d'écoulement expliquées par Li et al. (2013). Il pourrait également y avoir un mouvement d'eau souterraine percolant dans le schiste fracturé potentiellement en provenance des bassins de pierre nette sous le pavé perméable.

L'événement du 7 septembre 2021 a eu un effet similaire à celui du 6 septembre. Les teneurs ont varié d'environ 25 % à environ 40 ou 50 % le 6 septembre et de 30 ou 40 % à 55 ou 65 % le 7 septembre. Les données de précipitations présentées à la Figure 83 proviennent de la station la plus près (ERNC). Les précipitations réelles sur la rue Sainte-Claire sont différentes : cela explique certains décalages ou incongruités sur la figure.

L'intervalle d'enregistrements des données était fixé à 30 minutes. Il serait pertinent de réduire cette valeur pour mieux comprendre la dynamique d'écoulement à court terme pendant une pluie. Le décalage et la vitesse des mouvements d'eau pourraient être évalués.

4.3.5 Température du substrat

Les températures enregistrées par les capteurs situés dans le substrat et à sa surface ainsi que les températures de l'air à l'aéroport de Notre-Dame-du-Portage (ERNC, 2021) sont présentées à la Figure 84 et à la Figure 85.

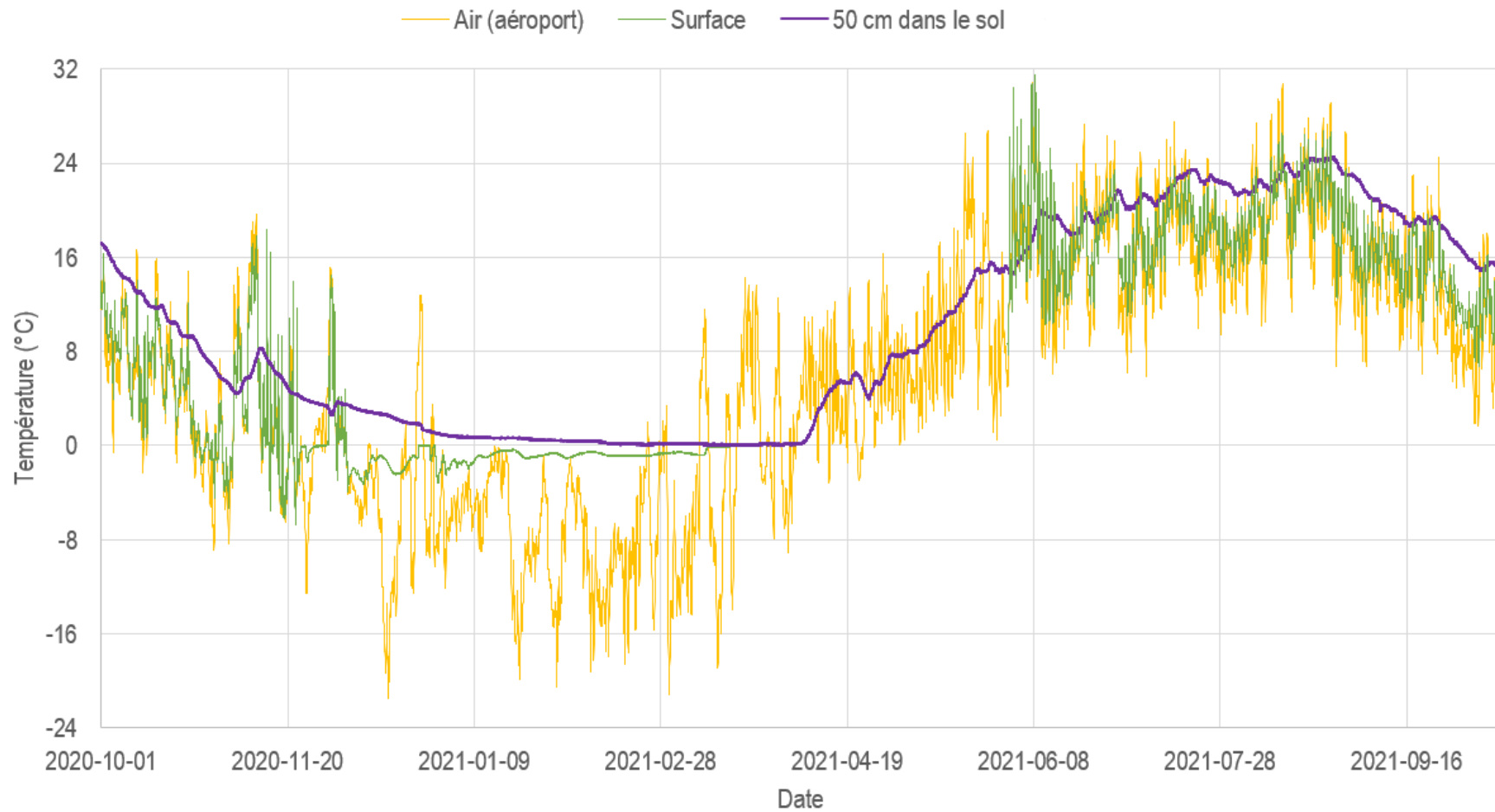


Figure 84: Température du substrat près du 17, rue Sainte-Claire et de l'air à l'aéroport

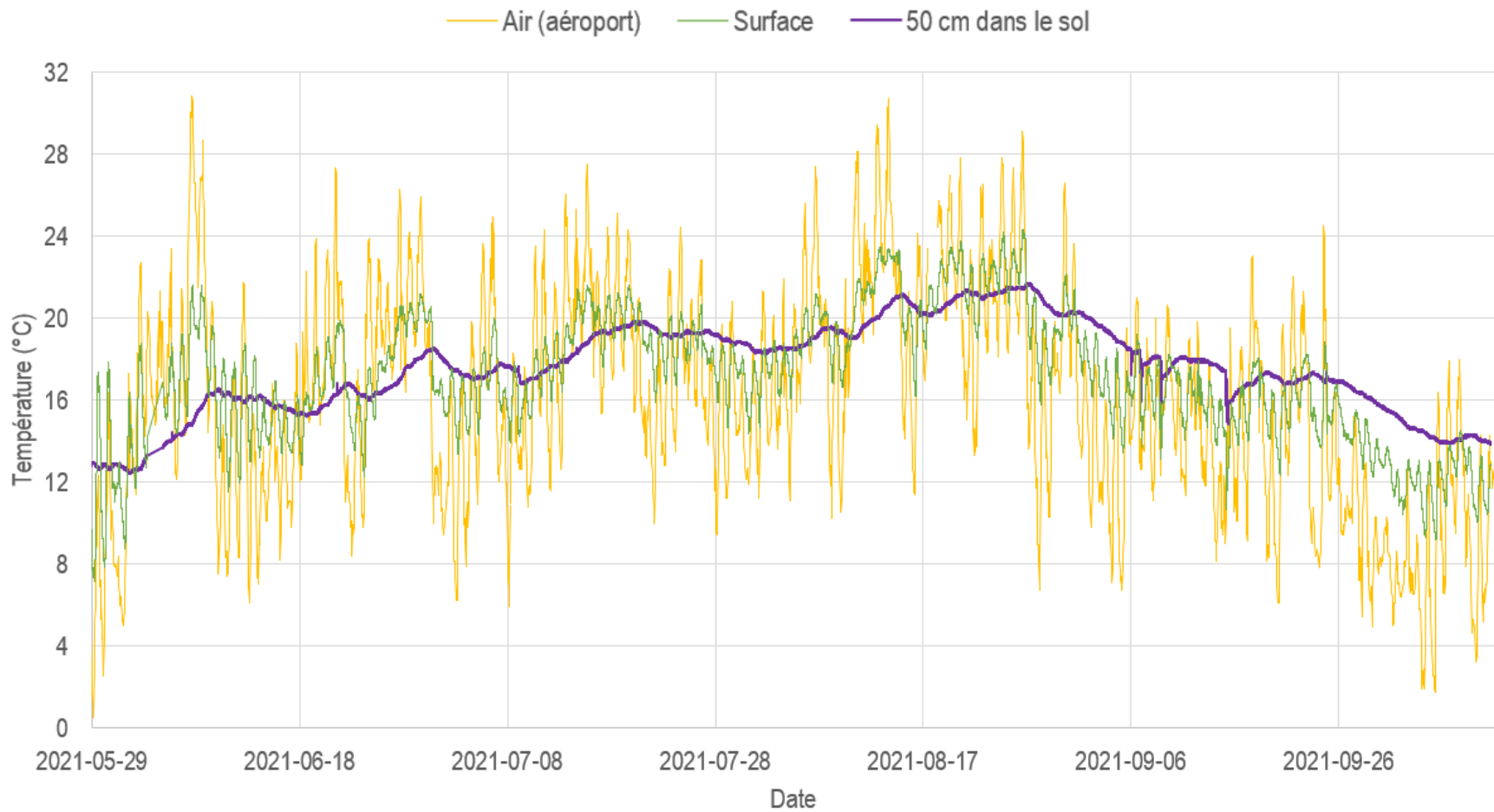


Figure 85: Température du substrat près du 9, rue Sainte-Claire et de l'air à l'aéroport

La tendance générale des résultats des capteurs situés près du 23 et du 9, rue Sainte-Claire est similaire.

Conformément aux attentes et pour des raisons évidentes, les capteurs situés dans le sol subissent des variations de température beaucoup moins prononcées que ceux à la surface. Puisque les capteurs de surface sont placés à la base de cornouillers, on observe des variations journalières plus marquées avant la période de feuillaison, surtout avant la mi-mai. La température à la surface du sol, lorsque le feuillage des cornouillers est établi, subit des variations journalières d'environ 5 °C en période estivale.

La température minimale atteinte par les capteurs dans le sol est de 0,00 °C les 17 et 18 mars 2021. Pour les capteurs situés à la surface du sol, la température minimale est de -6,70 °C le 22 novembre. C'est cohérent puisque cela correspond au début du temps froid avant la présence d'un épais couvert de neige.

Certaines variations relativement brusques de la température du sol sont observées, notamment en septembre, tel que présenté à la Figure 86. Les précipitations sont présentées par tranche de six heures pour permettre une meilleure visualisation.

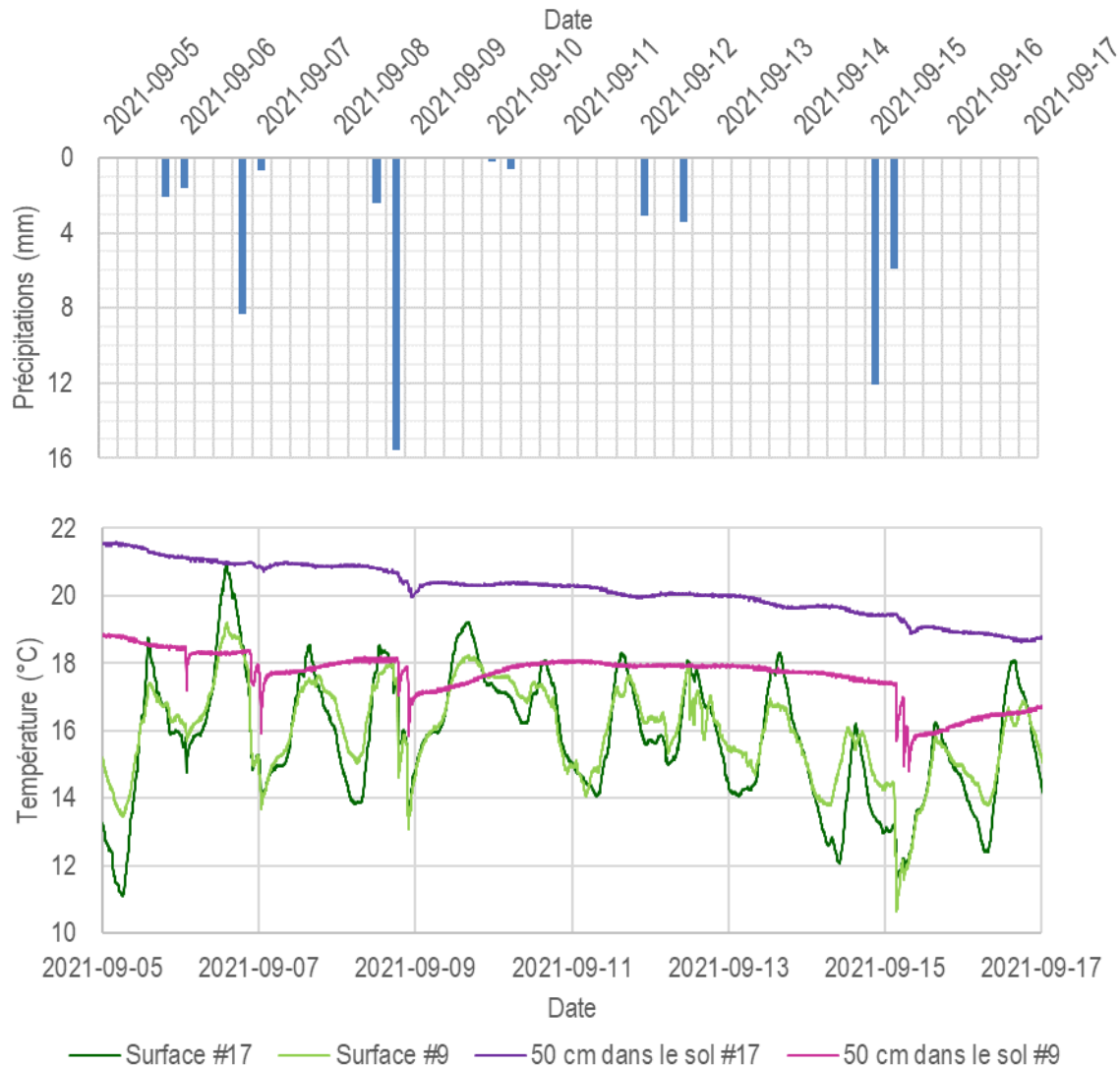


Figure 86: Précipitations et températures en septembre 2021

Les diminutions de températures à 50 cm dans le sol sont directement reliées aux événements de pluie, tel qu'illustré à la Figure 86. Un délai de moins d'une heure est observé entre le début des précipitations et le début des variations de température dans le sol. Ce phénomène s'observe particulièrement bien en septembre puisque les températures de l'air ont commencé à chuter, alors que la température du sol est encore élevée. En été, la température des précipitations peut s'approcher des températures du sol, selon le moment de la journée.

Une variation de près de 3 °C est observée entre les deux capteurs situés à 50 cm dans le sol. Cela peut s'expliquer par la compaction ou la disposition du sol, qui varie probablement localement. La température est plus faible et les variations sont plus intenses pour le capteur #9 (en rose sur la Figure

86). Il y a probablement un chemin préférentiel, par la disposition du sol ou des racines, qui favorise les échanges hydrauliques et thermiques.

Conclusion

La performance des ouvrages de GDEP sur la rue Sainte-Claire à Rivière-du-Loup a été évaluée selon les volets hydraulique, de qualité de l'eau et des plantes et du substrat. Globalement, les ouvrages de la rue Sainte-Claire sont innovants dans le contexte et sont très appréciés de la population. Leur pérennité peut être assurée avec un entretien minimal.

Des variations de hauteurs d'eau correspondant aux pointes de précipitations sont observées aux regards instrumentés du site. La modélisation dans le logiciel SWMM permet de modéliser adéquatement le ruissellement et le comportement hydraulique en surface. En revanche, la complexité du pavé perméable et du bassin de rétention n'est pas bien représentée dans le modèle. Il y a une forte diminution des débits entre le ruissellement et la sortie du site, approchant 90 % selon l'événement. Un long décalage, plus d'une heure, est généralement observé entre les pointes à l'entrée et à la sortie du bassin, sauf pour un événement de courte durée dont l'intensité approche la période de retour 2 ans.

Les ouvrages de GDEP ont un effet clair de réduction des MES, en moyenne de 67 % pour les événements étudiés. L'enlèvement des MES est très clair, même par l'action seule du pavé perméable, qui permet d'enlever en moyenne 69 % des MES par rapport à la teneur des eaux de ruissellement. La CÉ augmente drastiquement en aval du bassin, potentiellement par l'effet combiné de la diminution de la teneur en matière organique peu conductrice et du relargage de sels de déglacage accumulés dans le réseau. La CÉ moyenne à l'entrée est de 66 $\mu\text{S}/\text{cm}$ par rapport à 304 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à la sortie du bassin. Une diminution moyenne de la teneur en PT de 26 % est observée entre le ruissellement et la sortie du bassin, mais des augmentations sont observées pour le tiers des événements. La teneur en NT varie significativement pour chaque événement : il y a soit des augmentations très marquées, soit des diminutions tout aussi intenses.

Le lilas japonais, le cornouiller Ivory Halo, l'avoine vivace Saphirsprudel et l'agrostide à feuilles étroites présentent un taux de survie presque parfait au site après 18 mois et une forte résistance à la sécheresse. L'entretien minimal réalisé (coupe des graminées à l'automne) est suffisant et adéquat pour assurer leur croissance, sans arrosage ou ajout d'engrais. La qualité esthétique des végétaux est notée par les résidents et les passants, notamment la floraison du lilas japonais et la dorure de

l'agrostide à l'automne. Leurs taux de croissance moyens par espèce varient entre 17 et 90 cm/mois de juin à juillet 2021, correspondant à des taux de croissance relatifs de 60 à 150 % de la hauteur.

La teneur en eau du sol varie rapidement en réponse aux précipitations. En temps sec, des valeurs minimales de près de 20 % ($0,2 \text{ m}^3/\text{m}^3$) sont mesurées. La teneur en eau est plus grande en profondeur que près de la surface en temps sec. Des augmentations de 15 à 20 % sont observées pour des événements de pluie de plus de 10 mm, atteignant des teneurs en eau allant jusqu'à 70 %. Des recherches futures avec un pas de temps d'enregistrement plus fin que 30 minutes permettraient de mieux comprendre les mouvements de l'eau dans le substrat. La température du sol n'est jamais inférieure à $0,00 \text{ }^\circ\text{C}$ à une profondeur de 50 cm dans le substrat. À cette profondeur, il n'y a pas de variations rapides de température, sauf lors d'événements de précipitations pour lesquels la température des eaux de ruissellement est significativement différente de la température du sol. Dans ces situations, des variations jusqu'à près de $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ sont mesurées. La température à la surface du sol, à l'ombre, subit des variations journalières d'environ $5 \text{ }^\circ\text{C}$ en période estivale.

Recommandations d'ingénierie

Les observations et analyses mènent à formuler certaines recommandations d'ingénierie pour la conception de futurs sites :

1. L'aménagement d'un accès et d'un drain à la base des cellules de biorétention permettant de collecter l'eau et de mesurer des débits permettrait de mieux étudier son efficacité hydraulique et de traitement de l'eau.
2. L'installation d'un géotextile, en contournant les arbres et arbustes, sur la surface des biorétentions en période hivernale, tel que réalisé sur certaines plates-bandes ailleurs, permettrait d'atténuer la très forte accumulation d'abrasifs dans le substrat et limiterait la contamination par les sels de déglçage. Cela assurerait la qualité de la composition du substrat à long terme.
3. Un regard d'accès directement dans les chambres de rétention permettrait l'inspection et l'entretien. La quantité de particules accumulées, donc le volume utile, pourrait être quantifiée et le passage d'un équipement de récurage ou de vacuum pourrait permettre le nettoyage par aspiration ou le rinçage à contrecourant.

4. Un entretien annuel du pavé perméable doit impérativement être réalisé chaque printemps pour assurer un taux d'infiltration minimal : aspiration complète des particules dans les interstices et ajout de pierre nette de diamètre contrôlé.
5. Les drains sous le pavé perméable peuvent être positionnés plus haut pour favoriser l'accumulation et l'infiltration d'eau à plus long terme.
6. L'installation de pavé alvéolé peut être réalisée sans matériel drainant sous-jacent : cela permet un verdissement du paysage, mais sans infiltration significative de l'eau de ruissellement.
7. L'ensemble des eaux du bassin versant pourrait être dirigé vers des ouvrages de GDEP, des biorétentions par exemple.

Bibliographie

- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2018). Standard test method for surface infiltration rate of permeable unit pavement systems. C1781/C1781M – 18. 10.1520/C1781_C1781M-18
- Bailey, K. R. et Brown, E. A. (1997). *Growing and maintaining healthy dogwoods*. Forestry report R8-FR-14. https://www.fs-usda.gov/acces.bibl.ulaval.ca/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb5447378.pdf
- Bean, E. Z., Hunt, W. F., et Bidelspach, D. A. (2007). Evaluation of four permeable pavement sites in eastern North Carolina for runoff reduction and water quality impacts. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(6), 583-592. 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:6(583)
- Beaudet, P., Beaudin, I., Michaud, A. et Giroux, M. (2008). Le transport du phosphore. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. http://crebsl.com/documents/pdf/algues_bleu-vert/agriculteurs/EVC020.pdf
- Braswell, A. S., Winston, R. J., et Hunt, W. F. (2018). Hydrologic and water quality performance of permeable pavement with internal water storage over a clay soil in Durham, North Carolina. *Journal of Environmental Management*, 224, 277-287. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.040>
- Brodeur-Doucet, C. (2018). *Évaluation de la performance de pratiques de gestion optimales installées en série : le cas du marché public de Longueuil* [mémoire de maîtrise, Université Laval]. CorpusUL. <http://hdl.handle.net/20.500.11794/31904>
- Brodeur-Doucet, C., Pineau, B., Corriveau-Gascon, J., Arjoon, D., Lessard, P., Pelletier, G. et Duchesne, S. (2021). Seasonal hydrological and water quality performance of individual and in-series stormwater infrastructures as treatment trains in cold climate. *Water Quality Research Journal*, 56(4). 10.2166/wqrj.2021.026
- Cagelais, C. (2014). *Améliorer les performances des zones de biorétention par le choix des végétaux* [essai de maîtrise, Université de Sherbrooke]. Savoirs UdeS. <http://hdl.handle.net/11143/7088>
- Carpenter, J. F., Vallet, B., Pelletier, G., Lessard, P. et Vanrolleghem, P. A. (2014). Pollutant removal efficiency of a retrofitted stormwater detention pond. *Water Quality Research Journal of Canada* 49(2):124-134. 10.2166/wqrjc.2013.020

- CEAEQ. (2014). *Détermination de l'azote total Kjeldahl et du phosphore total : digestion acide – méthode colorimétrique automatisée.* Méthodes d'analyses. <https://www.ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/pdf/MA300NTPT20.pdf>
- CEAEQ. (2015). *Détermination de l'azote total, des nitrites, des nitrates et de l'azote ammoniacal dans l'eau : méthode colorimétrique automatisée.* Méthodes d'analyses. <https://www.ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/pdf/MA303Nutriments.pdf>
- CEAEQ. (2015). *Détermination de la conductivité : méthode électrométrique.* Méthodes d'analyses. <https://www.ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/pdf/MA115Cond11.pdf>
- CEAEQ. (2017). *Détermination des solides totaux et des solides totaux volatils : méthode gravimétrique.* Méthodes d'analyses. <https://www.ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/pdf/MA100ST11.pdf>
- Clary, J., Jones, J., Leisenring, M., Hobson, P. et Strecker, E. (2020). *International stormwater BMP database 2020 summary statistics.* The Water Research Foundation. <https://www.waterrf.org/system/files/resource/2021-04/DRPT-4968.pdf>
- Collins, K. A., Hunt, W. F., et Hathaway, J. M. (2008). Hydrologic comparison of four types of permeable pavement and standard asphalt in eastern North Carolina. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(12), 1146-1157. 10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:12(1146)
- Drake, J., Bradford, A. et Marsalek, J. (2013). Review of environmental performance of permeable pavement systems: state of the knowledge. *Water Quality Research Journal*, 48(3), 203-222. <https://doi.org/10.2166/wqrjc.2013.055>
- Drake, J., Bradford, A., et Van Seters, T. (2014). Hydrologic performance of three partial-infiltration permeable pavements in a cold climate over low permeability soil. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(9). 04014016. 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000943
- Environnement et ressources naturelles Canada. (2021). *Données historiques.* https://climat.meteo.gc.ca/historical_data/search_historic_data_f.html
- EPA. (2017). *SWMM reference manual volume II – Hydraulics.* <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>

- Epps, T. H. et Hathaway, J. M. (2021). Inter-event water quality variability and intra-event pollutant dynamics in context of effective impervious area. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 7(4). 10.1061/JSWBAY.0000953
- Fassman, E. A., et Blackbourn, S. (2010). Urban runoff mitigation by a permeable pavement system over impermeable soils. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(6), 475-485. 10.1061/ASCEHE.1943-5584.0000238
- Fletcher, T. D., Bertrand-Krajewski, J.-L., Bonneau, J., Burns, M. J., Poelsma, P. J. et Thom, J. K. (2021). Measuring the water balance in stormwater control measures. Dans *Metrology in urban drainage and stormwater management: Plug and pray* (1^{ère} éd., vol. 1, p. 105-134). IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781789060119>
- Gardenia. (s. d.). *Syringa reticulata Ivory Silk*. <https://www.gardenia.net/plant/syringa-reticulata-ivory-silk>
- Google Maps. (2015). *Rue Sainte-Claire, Rivière-du-Loup, Québec, Street view*. <https://www.google.com.br/maps>
- Google Maps. (2021). *Rue Sainte-Claire, Rivière-du-Loup, Québec, Street view*. <https://www.google.com.br/maps>
- Groupe CSA. (2019). *Conception des systèmes de biorétention*. CSA W200:18 Norme nationale du Canada. <https://www.scc.ca/en/standardsdb/standards/29759>
- Huang, J., Valeo, C., He, J. et Chu, A. (2016). Three types of permeable pavements in cold climates: Hydraulic and environmental performance. *Journal of Environmental Engineering*, 142(6), [https://doi-org.acces.bibl.ulaval.ca/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001085](https://doi-org.acces.bibl.ulaval.ca/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001085)
- Huffy, A. (1976). *Introduction à la climatologie*. Presses Universitaires de France.
- Hydro-Québec. (s. d.). *Outil Choisir le bon arbre ou arbuste*. <https://arbres.hydroquebec.com/recherche-arbres-arbustes>
- Innovex. (2017). *Fiche technique géotextile non-tissé Novatex 90*. Géotextiles. <https://innovex.ca/wp-content/uploads/novatex-90.pdf>
- Jardin2m. (s. d.). *Cornus alba "Ivory Halo"*. <https://www.jardin2m.com/vegetaux/fiche/14786/arbustes/cornus-alba-ivory-halo-cornouiller/>
- Jasmin. (s. d.). *Cornus alba Ivory halo*. <https://jardinjasmin.com/catalogue/product.php?ProductID=149>

- Kim, J., Nagano, Y. et Furumai, H. (2012). Runoff load estimation of particulate and dissolved nitrogen in Lake Inba watershed using continuous monitoring data on turbidity and electric conductivity. *Water Science and Technology*, 66(5), 1015-1021. 10.2166/wst.2012.275
- Li, X., Chang, S. X. et Salifu, K. F. (2013). Soil texture and layering effects on water and salt dynamics in the presence of a water table: a review. *Environmental Reviews*, 22(1). <https://doi-org.acces.bibl.ulaval.ca/10.1139/er-2013-0035>
- Lui, Y., Bralts, V. F. et Engel, B. A. (2015). Evaluating the effectiveness of management practices on hydrology and water quality at watershed scale with a rainfall-runoff model. *Science of The Total Environment*, 511, 298-308. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.12.077>
- Mailhot, A. et Talbot, G. (2011). *Courbes IDF – St Bruno Kamouraska*. Agrométéo Québec. https://www.agrometeo.org/index.php/atlas/idf_station/ST_BRUNO_KAMOURASKA/St-Bruno%20Kamouraska/7056922
- MELCC. (2021a). *Critères de qualité de l'eau de surface*. https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/criteres_eau/index.asp
- MELCC. (2021b). *Eau*. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/inter.htm>
- MELCC. (s. d.). *Guide de gestion des eaux pluviales*. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/pluviales/guide.htm>
- Ministère des Transports du Québec. (2021). Tome VII – Matériaux. Chapitre 14, norme 14 401. http://www3.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/produits/ouvrage_rouvier/normes/norme3.fr.html
- Patrignani, A. et Ochsner, T.E. (2015). Canopeo: A powerful new tool for measuring fractional green canopy cover. *Agronomy Journal*, 107(6), 2312-2320. <https://doi.org/10.2134/agronj15.0150>
- Peterson, L. A., Awerbuch, P. et Spatari, A. (2021). Environmental and economic implications of stormwater management alternatives in rural development. *Journal of Industrial Ecology*, 25(4). 1076-1088. <https://doi-org.acces.bibl.ulaval.ca/10.1111/jiec.13098>
- Pitt, R., Maestre, A. et Morquecho, R. (2004). *The National Stormwater Quality Database version 1.1*. University of Alabama. <http://rpitt.eng.ua.edu/Research/ms4/Paper/Mainms4paper.html>
- Rose-Tremblay, A. (2013). *Élaboration d'un calculateur d'émissions de phosphore pour les citoyens* [essai de maîtrise, Université de Sherbrooke]. Savoirs UdeS. <http://hdl.handle.net/11143/7438>
- Rossman, L. A. (2004). *Storm water management model user's manual version 5.0*. U.S. Environmental Protection Agency. EPA/600/R-05/040.
- SamplePoint. (2018). *Image analysis software for natural resources*. <https://www.samplepoint.org/>

- Soleno. (2021). *Nos projets : Bassin de rétention souterrain de type HydroStor*. <https://soleno.com/projets/12-bassin-de-retention-souterrain-de-type-hydrostor/>
- Statistique Canada. (2021). *Tableau 38-10-0052-01 Utilisation d'engrais et de pesticides*. <https://doi.org/10.25318/3810005201-fra>.
- Stuber, J. C. (2012). *Evaluation of three plant species for stormwater treatment in bioretention basins* [thèse de doctorat, Michigan State University]. MSU Libraries. <https://d.lib.msu.edu/etd/1586>
- Techo-Bloc. (2018). *Inflo. Pavés perméables*. https://www.techo-bloc.com/globalassets/inriver/resources/inflo_specqc.pdf
- Teledyne ISCO. (2017). *2150EX Area velocity flow module - Installation and operation guide*. <https://www.teledyneisco.com/en-us/waterandwastewater/Flow%20Meter%20Documents/Manuals/2150EX%20Area%20Flow%20Module%20User%20Manual.pdf>
- Tirpak, R.A., Winston, R. J., Feliciano, M., Dorsey, J. D. et Epps, T. H. (2021). Impacts of permeable interlocking concrete pavement on the runoff hydrograph: Volume reduction, peak flow mitigation, and extension of lag times. *Hydrological Processes*, 35(4). <https://doi-org.acces.bibl.ulaval.ca/10.1002/hyp.14167>
- Vaillancourt, C., Duchesne, S. et 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). 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001812
- Wardynski, B. J., Winston, R. J., et Hunt, W. F. (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. 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000626
- Wenyuan, X., Long, S. et Liqiang, M. (2011). Adaptability of cornus alba seedling under drought stress in highway greening. *Applied Mechanics and Materials*, 90, 3262-3267. 10.4028/www.scientific.net/AMM.90-93.3262
- Winston, R. J., Al-Rubaei, A. M., Blecken, G. T., Viklander, M., et Hunt, W. F. (2016). Maintenance measures for preservation and recovery of permeable pavement surface infiltration rate—The effects of street sweeping, vacuum cleaning, high pressure washing, and milling. *Journal of Environmental Management*, 169, 132– 144. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.12.026>

- Winston, R. J., Arend, K., Dorsey, J. D. et Hunt, W. F. (2020). Water quality performance of a permeable pavement and stormwater harvesting treatment train stormwater control measure. *Blue-Green Systems* 2(1), 91–111. doi:10.2166/bgs.2020.914
- Yan, H., Bertrand-Krajewski, J.-L., et Lipeme Kouyi, G. (2011). Modélisation numérique 3D des écoulements turbulents à surface libre chargés en polluants particulaires dans un bassin de retenue-décantation des eaux pluviales. *La Houille Blanche*, 5, 40-44. <https://doi-org.acces.bibl.ulaval.ca/10.1051/lhb/2011051>
- Yuan, J. et Dunnett, N. (2018). Plant selection for rain gardens: Response to simulated cyclical flooding of 15 perennial species. *Urban Forestry & Urban Greening*, 35, 57-65. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.08.005>.

Annexes

Liste des annexes

Annexe A – Composantes du site.....	112
Annexe B – Intrants de modélisation	113
Annexe C – Calibration des capteurs de teneur en eau du sol.....	117
Annexe D – Résultats de qualité de l'eau	119
Annexe E – Mesures des plantes	121
Annexe F – Croissance de la végétation dans le pavé alvéolé.....	136
Annexe G – Teneur en eau du sol.....	140

Annexe A – Composantes du site

Le Tableau 10 présente les caractéristiques de la membrane géotextile entourant les cellules de biorétention.

Tableau 10: Fiche technique de la membrane Novatex 90 (tiré de Innovex, 2019)

Propriétés	Essai	Unités	Valeur
Polymère	-	-	100 % polypropylène
Construction	-	-	Aiguilleté à fibres courtes
Épaisseur	ASTM D-5199	Mm	1,3
Résistance à la traction	CAN 148.1-7.3	N	550
Élongation à la rupture	CAN 148.1-7.3	%	50-100
Résistance à la déchirure	CAN 4.2-12.2	N	250
Permittivité	CAN 148.1-4	s ⁻¹	1,7
Perméabilité	CAN 148.1-4	cm/s	0,25
Ouverture des pores (FOS)	CAN 148.1-10	µm	150
Résistance aux UV	ASTM D-4355	%	70

Les caractéristiques techniques des blocs de pavé perméable sont présentées dans Techo-Bloc (2018).

Annexe B – Intrants de modélisation

Les intrants de modélisation sont présentés aux tableaux de cette section. Les termes sont indiqués en anglais pour correspondre avec les attributs du logiciel SWMM.

Tableau 11: Caractéristiques des aires tributaires

Name	Area (ha)	Width (m)	%Imperv	%Slope	Rain Gage	Outlet
DumasP1516	0,66	70	50	0,50	PLUV1	P-1516
ParcP1011	0,60	78	49	0,50	PLUV1	P-1011
Picard-P89	0,65	80	50	0,50	PLUV1	P-8-9
STEC-P12	0,12	27	72	0,50	PLUV1	PP-P-1-2
STEC-P1213	0,11	26	72	0,50	PLUV1	PP-P-1213
STEC-P14	0,13	17	72	0,50	PLUV1	PP-P-14
STEC-P17	0,03	8	46	0,50	PLUV1	P-17
STEC-P34	0,10	24	72	0,50	PLUV1	PP-P-3-4
STEC-P5	0,07	18	69	0,50	PLUV1	PP-P-5
STEC-P67	0,08	27	70	0,50	PLUV1	P-6-7
STEC-RP15	0,11	19	44	0,50	PLUV1	PP-RP-15

Tableau 12: Caractéristiques des nœuds de modélisation

Name	Type	Elev (m)	Depth (m)
P-1011	JUNCTION	110,79	1,98
P-1-2	JUNCTION	110,45	1,98
P-1213	JUNCTION	110,10	1,98
P-14	JUNCTION	110,00	1,98
P-1516	JUNCTION	109,74	1,98
P-17	JUNCTION	109,47	1,98
P-3-4	JUNCTION	112,64	1,98
P-5	JUNCTION	113,09	1,98
P-6-7	JUNCTION	112,92	1,98
P-8-9	JUNCTION	112,78	1,98
RÉ-1	JUNCTION	109,61	3,25
RP-1	JUNCTION	105,34	5,36
RP-13	JUNCTION	110,09	2,08
RP-15	JUNCTION	108,84	3,29
RP-2	JUNCTION	108,22	6,71
RP-3	JUNCTION	110,66	3,50
RP-4	JUNCTION	112,89	2,95
RP-5	JUNCTION	113,22	2,34
RP-6	JUNCTION	113,07	2,19
RP-7	JUNCTION	111,09	3,15

Name	Type	Elev (m)	Depth (m)
RP-8	JUNCTION	109,28	4,44
RP-9	JUNCTION	108,95	3,87
Racc,réseau	OUTFALL	101,00	0,38
BASSIN	STORAGE	109,74	0,76
PP-P-1-2	STORAGE	111,00	1,00
PP-P-1213	STORAGE	111,11	1,00
PP-P-14	STORAGE	110,88	1,00
PP-P-3-4	STORAGE	113,24	1,00
PP-P-5	STORAGE	113,96	1,00
PP-RP-15	STORAGE	110,24	1,00

Tableau 13: Caractéristiques des conduites

Name	From node	To node	Length (m)	%Slope	Roughness
BASSIN-RÉ1	BASSIN	RÉ-1	2	4,30	0,013
P1011-RP7	P-1011	RP-7	6	0,05	0,013
P1213-RP8	P-1213	RP-8	12	1,42	0,013
P12-RP3	P-1-2	RP-3	8	1,14	0,013
P14-RP13	P-14	RP-13	10	0,05	0,013
P1516-RP13	P-1516	RP-13	14	0,53	0,013
P17-RP9	P-17	RP-9	95	1,14	0,013
P34-RP4	P-3-4	RP-4	7	0,77	0,013
P5-RP4	P-5	RP-4	9	5,61	0,013
P67-RP5	P-6-7	RP-5	4	0,05	0,013
P89-RP6	P-8-9	RP-6	13	0,05	0,013
PPP12	PP-P-1-2	P-1-2	1	10,05	0,013
PPP1213	PP-P-1213	P-1213	1	6,21	0,013
PPP14	PP-P-14	P-14	1	10,15	0,013
PPP34	PP-P-3-4	P-3-4	1	5,41	0,013
PPP5	PP-P-5	P-5	1	10,15	0,013
PPRP15	PP-RP-15	RP-15	1	10,15	0,013
RÉ1-RP9	RÉ-1	RP-9	3	13,11	0,013
RP13-RP15	RP-13	RP-15	5	1,06	0,013
RP15-BASSIN	RP-15	BASSIN	1,4	0,93	0,013
RP1-RAC	RP-1	Racc,réseau	23	19,24	0,013
RP2-RP1	RP-2	RP-1	19	3,57	0,013
RP3-RP8	RP-3	RP-8	13	0,99	0,013
RP4-RP3	RP-4	RP-3	70	2,02	0,013
RP5-RP4	RP-5	RP-4	38	0,87	0,013
RP6-RP4	RP-6	RP-4	23	0,82	0,013

Name	From node	To node	Length (m)	%Slope	Roughness
RP7-RP8	RP-7	RP-8	10	1,80	0,013
RP8-BASSIN	RP-8	BASSIN	13	1,85	0,013
RP9-RP2	RP-9	RP-2	19	3,89	0,013

Tableau 14: Caractéristiques des sections d'écoulement

Conduit	Shape	Depth (m)	Area	Hyd. rad. (m)	Width (m)	Full flow (L/s)
BASSIN-RÉ1	CIRCULAR	0,45	0,16	0,11	0,450	591,52
P1011-RP7	CIRCULAR	0,20	0,03	0,05	0,200	7,33
P1213-RP8	CIRCULAR	0,30	0,07	0,07	0,300	115,11
P12-RP3	CIRCULAR	0,30	0,07	0,07	0,300	103,14
P14-RP13	CIRCULAR	0,20	0,03	0,05	0,200	7,33
P1516-RP13	CIRCULAR	0,38	0,11	0,09	0,380	127,48
P17-RP9	CIRCULAR	0,25	0,05	0,06	0,250	63,44
P34-RP4	CIRCULAR	0,30	0,07	0,07	0,300	84,94
P5-RP4	CIRCULAR	0,30	0,07	0,07	0,300	229,03
P67-RP5	CIRCULAR	0,30	0,07	0,07	0,300	21,62
P89-RP6	CIRCULAR	0,30	0,07	0,07	0,300	22,44
PPP12	CIRCULAR	0,15	0,02	0,04	0,150	48,28
PPP1213	CIRCULAR	0,15	0,02	0,04	0,150	37,96
PPP14	CIRCULAR	0,15	0,02	0,04	0,150	48,53
PPP34	CIRCULAR	0,15	0,02	0,04	0,150	35,42
PPP5	CIRCULAR	0,15	0,02	0,04	0,150	48,53
PPRP15	CIRCULAR	0,15	0,02	0,04	0,150	48,53
RÉ1-RP9	CIRCULAR	0,38	0,11	0,09	0,380	634,9
RP13-RP15	CIRCULAR	0,38	0,11	0,09	0,380	180,53
RP15-BASSIN	CIRCULAR	0,38	0,11	0,09	0,380	168,97
RP1-RAC	CIRCULAR	0,38	0,11	0,09	0,380	769,06
RP2-RP1	CIRCULAR	0,38	0,11	0,09	0,380	331,33
RP3-RP8	CIRCULAR	0,38	0,11	0,09	0,380	174,67
RP4-RP3	CIRCULAR	0,30	0,07	0,07	0,300	137,46
RP5-RP4	CIRCULAR	0,30	0,07	0,07	0,300	90,39
RP6-RP4	CIRCULAR	0,30	0,07	0,07	0,300	87,43
RP7-RP8	CIRCULAR	0,30	0,07	0,07	0,300	129,76
RP8-BASSIN	CIRCULAR	0,38	0,11	0,09	0,380	238,26
RP9-RP2	CIRCULAR	0,38	0,11	0,09	0,380	345,93

Tableau 15: Paramètres d'analyse

Paramètre	Valeur
<i>Rainfall/Runoff</i>	YES
<i>RDII</i>	NO
<i>Snowmelt</i>	NO
<i>Groundwater</i>	NO
<i>Flow Routing</i>	YES
<i>Ponding Allowed</i>	NO
<i>Water Quality</i>	NO
<i>Infiltration Method</i>	HORTON
<i>Flow Routing Method</i>	DYNWAVE
<i>Surcharge Method</i>	EXTRAN
<i>Starting Date</i>	01/01/2021 00:00:00
<i>Ending Date</i>	01/02/2021 00:00:00
<i>Antecedent Dry Days</i>	0,0
<i>Report Time Step</i>	00:01:00
<i>Wet Time Step</i>	00:00:30
<i>Dry Time Step</i>	00:00:30
<i>Routing Time Step</i>	5,00 sec
<i>Variable Time Step</i>	YES
<i>Maximum Trials</i>	8
<i>Number of Threads</i>	2
<i>Head Tolerance</i>	0,0015 m

Annexe C – Calibration des capteurs de teneur en eau du sol

Cette section décrit la procédure réalisée pour calibrer les capteurs *10HS Soil Moisture Sensor*.

1. Récolter un échantillon de 1 L de substrat du site à l'étude.
2. Peser un contenant vide de 1 L allant au four. Noter la masse $M_{contenant}$.
3. Placer l'échantillon de sol dans le contenant.
4. Verser de l'eau dans le contenant et enlever l'excédent (contenant inversé avec textile pour retenir le sol, mais permettre l'égouttage).
5. Peser le contenant. Noter la masse M_1 .
6. Placer un à un tous les capteurs à tester dans le contenant, le plus au milieu possible de l'échantillon de sol. Brancher le capteur à un ordinateur et noter la lecture instantanée fournie par la fonction *Scan* du logiciel ECH2O Utility. Cela correspond à la capacité au champ (CC).
7. Placer l'échantillon de sol dans un endroit sec et aéré.
8. À plusieurs reprises pendant quelques heures ou quelques jours, peser le contenant, noter la masse M_i et noter la lecture instantanée du capteur. Placer successivement chaque capteur à tester pour obtenir une mesure pour chacun.
9. Lorsque le sol est complètement sec, peser le contenant, noter la masse M_f et noter la lecture instantanée de chaque capteur. Si requis, placer le contenant au four à basse température pour atteindre des conditions de sol complètement sec.
10. Effectuer les calculs suivants :
 - a. Masse du sol (sec) : $M_{sol} = M_f - M_{contenant}$
 - b. Teneur en eau du sol θ au temps i : $\theta_i = (M_i - M_f) / M_{sol}$
 - c. Masse d'eau retenue par le sol à CC : $M_{CC} = M_f - M_1$
 - d. Teneur en eau du sol θ à capacité au champ : $\theta_{CC} = (M_1 - M_f) / M_{sol}$
11. Déterminer la corrélation entre les lectures instantanées fournies par le capteur (mV) et les teneurs en eau θ calculées à partir des masses.

La corrélation entre la teneur en eau calculée à partir des masses et les mesures des sondes pour le substrat des biorétentions de la rue Sainte-Claire est présentée à la Figure 87. Pour une même teneur en eau, les différents points correspondent aux résultats pour différents capteurs.

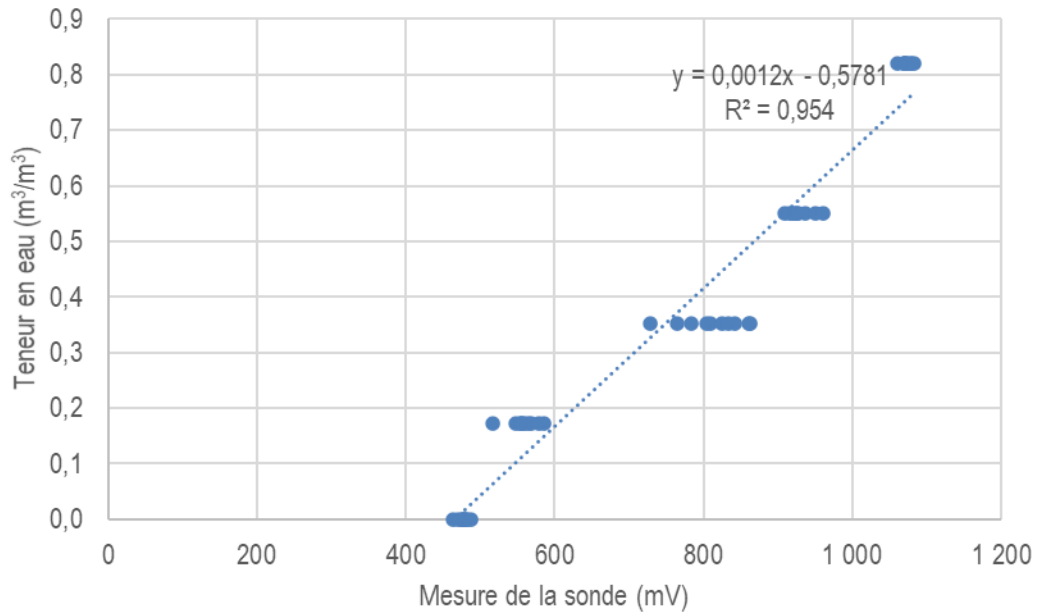


Figure 87: Relation entre les mesures des sondes et la teneur en eau du sol

L'équation utilisée pour convertir les mesures des sondes en teneur en eau est donc :

$$Teneur\ en\ eau = 0,0012 * mesure\ sonde - 0,5781$$

Il existe une certaine variabilité d'une sonde à l'autre, mais le niveau de précision est jugé suffisant pour la présente application.

Annexe D – Résultats de qualité de l'eau

Le Tableau 16 présente l'ensemble des résultats d'analyses des échantillons pour tous les paramètres.

Tableau 16: Résultats d'analyses

Date	Lieu	MES (10 ³ mg/L)	CÉ (µS/cm)	NT (mg/L)	PT (mg/L)
2019-06-27	Ruis.	0,69	-	22,93	>1,5
2019-07-12	Ruis.	0,01	-	<5	0,06
2019-07-14	Ruis.	0,10	-	4,84	0,31
2019-07-16	Ruis.	0,07	-	-	-
2020-06-24	Ruis.	0,40	-	2,78	2,20
	SB	0,29	-	4,10	2,53
2020-07-28	Ruis.	0,25	-	-	-
	SPP	0,04	-	-	-
	SB	0,02	-	-	-
2020-08-04	Ruis.	0,37	-	-	-
	SB	0,03	-	-	-
2020-10-17	Ruis.	0,25	-	-	-
	SPP	0,05	-	-	-
	SB	0,02	-	-	-
2021-03-26	Ruis.	1,40	3	-	-
	SB	0,80	741	-	-
2021-05-05	Ruis.	0,40	123	-	-
	SB	0,06	540	-	-
2021-05-21	Ruis.	1,99	44	<0,02	1,10
	Ruis. Ste-C.	0,38	40	<0,02	1,45
	Ruis. perp.	3,60	48	<0,02	0,75
	SPP	0,93	80	<0,02	0,75
	SB	0,29	173	<0,02	0,70
2021-05-31	Ruis.	0,29	92	1,41	0,37
	SB	0,003	285	2,08	0,24
2021-06-14	Ruis.	0,07	174	7,32	1,57
	SB	0,01	495	5,31	0,23
2021-06-21	Ruis.	0,40	-	1,27	-
	SPP	0,17	-	0,73	-
	SB	0,06	184	-	-
2021-06-27	Ruis.	0,01	-	-	-
	SB	0,01	-	-	-
2021-07-08	Ruis.	0,07	-	2,42	0,65
	SB	0,03	-	0,34	0,22

Date	Lieu	MES (10 ³ mg/L)	CÉ (μS/cm)	NT (mg/L)	PT (mg/L)
2021-07-16	Ruis.	0,17	32	-	0,18
	Ruis. Ste-C.	0,15	45	-	0,20
	Ruis. perp.	0,19	19	-	0,16
	SB	0,08	51	-	0,21
2021-08-03	Ruis.	0,17	60	-	0,49
	Ruis. Ste-C.	0,07	31	-	0,14
	Ruis. perp.	0,26	88	-	0,84
	SB	0,07	118	-	0,21
2021-09-08	Ruis.	0,04	-	-	-
	Ruis. Ste-C.	0,04	-	-	-
	Ruis. perp.	0,07	-	-	-
	SB	0,03	-	-	-
2021-09-18	Ruis.	0,12	24	1,31	0,12
	Ruis. Ste-C.	0,02	20	1,22	0,10
	Ruis. perp.	0,22	28	1,40	0,14
	SB	0,06	47	1,29	0,20
2021-10-16	Ruis.	0,20	46	-	0,70
	Ruis. Ste-C.	0,08	46	1,06	1,00
	Ruis. perp.	0,32	46	1,81	0,40
	SB	0,04	408	3,92	0,32
2021-10-22	Ruis.	0,04	-	-	-
	Ruis. Ste-C.	0,04	-	-	-
	Ruis. perp.	0,03	-	-	-
	SB	0,01	-	-	-

Annexe E – Mesures des plantes

Les dimensions par plant par date sont présentées aux tableaux de cette annexe.

Tableau 17: Mesure des lilas japonais

ID plant	Circonférence du tronc à 1,2 m de hauteur (cm)					
	2020-08-27	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
A1	11,6	12,6	12,1	12,6	14,4	14,6
A2	12,1	12,8	12,1	12,1	14,1	14,3
A3	13,9	15,4	15,5	15,5	15,8	15,9
A4	12,2	13,1	15,8	16,6	16,3	16,5
A5	11,5	12,1	14,8	15,1	15,4	15,9

Tableau 18: Mesures des cornouillers Ivory Halo - largeur 1

ID plant	Largeur 1 (cm)					
	2020-08-27	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
C1	85	105	123	128	173	186
C2	114	127	111	119	146	155
C3	76	115	116	121	144	151
C4	102	124	123	131	148	154
C5	111	140	126	132	154	160
C6	127	142	104	116	154	160
C7	101	123	120	125	148	160
C8	85	119	113	118	158	165
C9	130	131	123	133	158	167
C10	106	147	114	129	164	167
C11	93	118	112	122	135	138
C12	107	127	112	119	154	158
C13	102	133	128	138	167	181
C14	110	128	117	130	163	178
C15	93	119	124	131	160	171
C16	84	118	116	129	157	163
C17	79	115	103	109	157	168
C18	102	125	103	118	139	148
C19	105	139	126	136	165	177
C20	119	127	118	126	149	161
C21	107	132	101	114	137	143
C22	124	123	114	129	179	186
C23	114	182	108	124	150	160
C24	91	124	102	112	141	157

ID plant	Largeur 1 (cm)					
	2020-08-27	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
C25	94	112	101	113	134	148
C26	89	111	96	110	138	147
C27	115	119	104	119	142	158
C28	98	115	105	121	128	144
C29	96	112	99	105	139	155
C30	89	118	102	111	142	154

Tableau 19: Mesures des cornouillers Ivory Halo - largeur 2

ID plant	Largeur 2 (cm)					
	2020-08-27	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
C1	72	102	111	123	125	181
C2	105	125	103	115	128	156
C3	68	90	104	118	138	152
C4	81	114	115	123	147	159
C5	83	98	103	112	135	169
C6	120	134	99	114	129	170
C7	60	100	94	106	129	156
C8	60	114	89	105	123	163
C9	105	103	121	132	143	169
C10	105	123	92	106	129	177
C11	76	95	89	102	120	137
C12	98	87	97	111	143	167
C13	90	127	104	120	159	169
C14	105	105	115	125	142	165
C15	92	94	109	124	145	166
C16	80	106	107	117	155	169
C17	75	106	99	107	143	172
C18	69	104	102	108	132	142
C19	101	122	110	122	158	176
C20	98	123	107	114	128	156
C21	82	109	94	109	132	142
C22	105	110	114	126	158	191
C23	106	158	105	112	148	166
C24	74	105	87	101	123	154
C25	84	107	98	112	122	141
C26	77	101	88	104	128	143
C27	67	89	94	100	137	149
C28	87	97	98	103	127	136

ID plant	Largeur 2 (cm)					
	2020-08-27	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
C29	68	93	88	104	124	141
C30	76	93	78	92	137	151

Tableau 20: Mesures des cornouillers Ivory Halo - hauteur

ID plant	Hauteur (cm)					
	2020-08-27	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
C1	92	101	35	80	110	115
C2	60	75	25	64	74	78
C3	59	61	27	69	81	88
C4	62	70	28	71	88	96
C5	64	79	41	81	80	90
C6	23	84	30	73	80	85
C7	63	70	28	70	88	92
C8	70	101	26	68	88	94
C9	64	88	31	73	83	88
C10	62	71	30	72	82	87
C11	70	84	23	59	84	95
C12	57	70	27	69	89	93
C13	68	81	31	73	90	100
C14	61	77	33	79	92	102
C15	72	83	35	80	84	90
C16	57	89	32	73	98	103
C17	59	82	29	71	81	87
C18	60	69	26	67	78	85
C19	53	79	34	78	83	93
C20	66	80	36	79	81	88
C21	54	71	35	79	84	92
C22	63	92	36	83	96	103
C23	84	115	43	98	132	137
C24	52	61	33	72	86	96
C25	51	70	28	70	90	97
C26	54	65	24	62	84	89
C27	52	70	27	69	82	90
C28	55	73	29	71	79	87
C29	46	75	26	67	77	85
C30	57	79	25	64	78	86

Tableau 21: Observations de la présence de fleurs sur les cornouillers Ivory Halo

ID plant	Présence de fleurs					
	2020-08-27	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
C1	Oui, avec pétales	Non	Non	Non	Non	Non
C2	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C3	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C4	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C5	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C6	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C7	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C8	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C9	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C10	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C11	Oui, bourgeons	Non	Non	Non	Non	Non
C12	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C13	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C14	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C15	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C16	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C17	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C18	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C19	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C20	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C21	Oui, pétales	Non	Non	Non	Non	Non
C22	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C23	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C24	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C25	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C26	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C27	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C28	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C29	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C30	Non	Non	Non	Non	Non	Non

Tableau 22: Mesures des agrostides à feuilles étroites - largeur 1

ID plant	Largeur 1 (cm)					
	2020-08-27	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
G4	95	110	69	75	79	83
G7	72	70	51	59	74	87

ID plant	Largeur 1 (cm)					
	2020-08-27	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
G10	82	95	62	69	88	97
G13	105	98	65	74	64	79
G16	90	98	71	78	67	83
G19	105	100	65	76	66	72
G22	104	90	59	66	64	68
G25	100	87	67	72	65	79
G28	110	89	61	68	62	75
G31	77	79	54	61	59	66
G34	95	88	64	69	67	79
G37	95	92	71	74	68	79
G40	90	83	47	57	62	72
G43	89	88	60	69	65	77
G46	66	89	58	64	68	81
G49	109	80	56	67	70	86
G52	103	98	60	66	57	66
G55	91	70	59	65	64	76
G58	78	88	65	74	72	85
G51	92	95	65	73	57	70
G64	113	106	64	69	54	66
G67	81	98	62	70	59	73
G70	101	102	59	66	68	80
G73	87	93	60	64	55	61

Tableau 23: Mesures des agrostides à feuilles étroites - largeur 2

ID plant	Largeur 2 (cm)					
	2020-08-27	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
G4	74	108	53	61	70	78
G7	42	50	43	53	67	80
G10	80	87	55	62	83	99
G13	80	63	62	67	63	70
G16	86	90	57	65	58	74
G19	70	78	55	62	63	69
G22	103	88	47	55	56	64
G25	70	63	48	53	58	73
G28	95	80	50	61	62	69
G31	68	67	50	53	58	63
G34	94	87	45	57	67	80
G37	70	83	59	65	63	76

ID plant	Largeur 2 (cm)					
	2020-08-27	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
G40	88	75	46	56	59	70
G43	78	71	48	59	58	64
G46	65	86	52	59	55	66
G49	87	70	50	62	65	76
G52	82	79	43	55	55	68
G55	80	66	55	59	51	61
G58	67	50	62	69	58	73
G51	63	60	46	56	53	63
G64	68	75	57	63	52	57
G67	78	90	49	58	58	66
G70	79	72	56	61	61	67
G73	78	85	56	59	46	59

Tableau 24: Mesures des agrostides à feuilles étroites – hauteur des tiges florales

ID plant	Hauteur des tiges florales (cm)					
	2020-08-27	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
G4	74	108	53	61	70	78
G7	42	50	43	53	67	80
G10	80	87	55	62	83	99
G13	80	63	62	67	63	70
G16	86	90	57	65	58	74
G19	70	78	55	62	63	69
G22	103	88	47	55	56	64
G25	70	63	48	53	58	73
G28	95	80	50	61	62	69
G31	68	67	50	53	58	63
G34	94	87	45	57	67	80
G37	70	83	59	65	63	76
G40	88	75	46	56	59	70
G43	78	71	48	59	58	64
G46	65	86	52	59	55	66
G49	87	70	50	62	65	76
G52	82	79	43	55	55	68
G55	80	66	55	59	51	61
G58	67	50	62	69	58	73
G51	63	60	46	56	53	63
G64	68	75	57	63	52	57
G67	78	90	49	58	58	66

ID plant	Hauteur des tiges florales (cm)					
	2020-08-27	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
G70	79	72	56	61	61	67
G73	78	85	56	59	46	59

Tableau 25: Mesures des agrostides à feuilles étroites – nombre de tiges florales

ID plant	Nombre de tiges florales				
	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
G4	242	422	460	-	-
G7	173	286	320	368	380
G10	186	316	368	548	556
G13	176	292	332	352	364
G16	160	256	308	316	340
G19	175	286	316	392	412
G22	131	212	244	312	320
G25	135	212	268	352	360
G28	153	250	276	244	256
G31	116	184	240	240	268
G34	134	216	268	396	404
G37	203	360	396	-	-
G40	179	300	356	-	-
G43	115	172	216	404	420
G46	109	162	196	216	220
G49	199	336	364	240	268
G52	167	274	312	392	396
G55	135	210	244	196	200
G58	187	328	356	196	200
G51	152	252	280	184	200
G64	126	202	228	200	228
G67	206	370	396	232	244
G70	113	162	208	244	252
G73	104	154	204	232	236

Tableau 26: Mesures des avoines vivaces Saphirsprudel - largeur 1

ID plant	Largeur 1 (cm)					
	2020-08-27	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
B4	49	42	41	49	69	74
B8	54	52	58	70	67	70
B12	52	49	59	68	80	85
B16	56	45	56	65	67	69

ID plant	Largeur 1 (cm)					
	2020-08-27	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
B20	72	52	73	80	99	103
B24	60	63	74	82	78	85
B28	52	56	56	62	65	66
B32	58	62	46	54	60	66
B36	57	57	67	72	83	84
B40	46	53	50	55	66	68
B44	50	50	55	64	78	84
B48	65	48	70	78	76	83
B52	67	57	63	72	70	70
B56	45	54	58	64	72	76
B60	50	67	70	78	84	87
B64	52	58	69	76	70	73
B68	64	65	67	79	99	99
B72	52	46	58	69	77	84
B76	49	57	49	58	68	68
B80	48	52	59	65	85	92
B84	61	60	68	76	94	94
B88	44	62	50	62	63	64
B92	60	43	65	70	69	69
B96	46	52	72	77	88	90
B100	56	48	62	70	77	80
B104	67	48	64	74	68	74
B108	70	54	58	70	79	86
B112	49	54	53	60	63	70
B116	59	44	67	73	68	71
B120	42	43	69	75	67	71
B124	46	61	64	72	65	69
B128	44	65	59	66	49	50
B132	50	57	63	69	55	56
B136	46	38	60	71	66	67
B140	54	54	58	68	70	71
B144	39	35	61	73	82	85
B148	44	36	69	78	93	95
B152	52	46	65	76	88	95
B156	44	54	44	52	48	49
B160	46	44	62	72	65	66
B164	35	52	60	69	56	57
B168	42	59	58	67	63	69
B172	39	67	58	66	48	53

ID plant	Largeur 1 (cm)					
	2020-08-27	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
B176	44	54	64	74	88	89
B180	50	58	63	68	70	72
B184	47	47	48	56	52	54
B188	69	73	64	75	72	74
B192	59	52	46	53	55	56
B196	60	47	61	69	76	79
B200	45	53	43	53	39	39
B204	60	57	63	73	78	78
B208	33	57	32	39	50	51
B212	42	43	53	64	30	33
B216	45	54	63	71	61	65

Tableau 27: Mesures des avoines vivaces Saphirsprudel - largeur 2

ID plant	Largeur 2 (cm)					
	2020-08-27	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
B4	48	38	40	48	49	70
B8	42	49	55	67	67	67
B12	51	48	57	66	71	87
B16	53	31	51	60	58	73
B20	50	43	72	78	84	99
B24	54	48	64	71	74	85
B28	41	45	51	57	62	70
B32	44	58	44	49	46	61
B36	34	38	51	60	69	86
B40	31	51	38	48	65	68
B44	41	43	53	59	58	81
B48	58	37	67	74	70	79
B52	43	53	52	64	69	74
B56	37	37	52	63	64	75
B60	39	43	52	57	68	86
B64	34	47	47	56	59	70
B68	40	45	67	74	88	99
B72	40	32	49	60	64	77
B76	46	46	43	52	63	74
B80	29	48	48	56	68	87
B84	52	57	62	74	93	99
B88	42	59	44	51	42	65
B92	32	42	52	62	55	75

ID plant	Largeur 2 (cm)					
	2020-08-27	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
B96	44	51	59	70	82	91
B100	47	46	53	62	54	81
B104	40	48	50	56	58	75
B108	44	43	51	58	49	80
B112	32	44	53	58	54	66
B116	40	39	43	55	54	71
B120	31	29	35	46	52	69
B124	40	39	62	71	64	67
B128	33	43	43	53	48	54
B132	41	44	33	42	44	58
B136	44	31	44	52	58	73
B140	44	39	56	65	68	71
B144	36	34	57	65	73	82
B148	35	28	60	66	70	99
B152	39	34	48	55	72	91
B156	29	34	39	50	43	51
B160	39	29	48	53	55	71
B164	34	40	42	50	55	59
B168	30	36	37	49	38	70
B172	28	56	38	48	31	48
B176	33	42	32	44	65	89
B180	46	30	55	60	58	70
B184	37	33	36	47	38	52
B188	40	50	39	49	45	76
B192	33	37	32	38	38	58
B196	48	38	59	69	65	83
B200	28	44	27	32	28	44
B204	38	29	55	63	56	79
B208	27	42	17	28	39	52
B212	31	30	43	53	18	31
B216	33	31	36	46	33	68

Tableau 28: Mesures des avoines vivaces Saphirsprudel – hauteur

ID plant	Hauteur (cm)					
	2020-08-27	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
B4	40	43	37	49	53	56
B8	39	38	33	54	50	51
B12	34	30	29	52	49	51

ID plant	Hauteur (cm)					
	2020-08-27	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
B16	38	48	19	30	35	39
B20	46	40	27	44	48	48
B24	36	45	26	42	42	45
B28	40	38	37	48	61	61
B32	42	34	32	47	51	52
B36	32	35	22	38	43	47
B40	47	34	47	60	67	67
B44	40	45	31	54	64	65
B48	47	36	19	40	49	53
B52	35	34	31	46	46	49
B56	35	39	36	49	54	57
B60	42	44	36	53	88	92
B64	43	44	38	55	61	61
B68	42	44	19	40	67	67
B72	40	41	36	51	56	58
B76	50	42	39	57	72	76
B80	44	46	27	48	74	75
B84	54	48	31	51	70	73
B88	31	40	27	41	51	52
B92	32	30	28	43	61	63
B96	35	39	22	41	61	65
B100	41	37	33	56	67	68
B104	39	42	29	50	54	56
B108	45	38	30	52	72	76
B112	43	39	31	42	56	59
B116	35	44	35	52	56	60
B120	36	32	34	47	68	69
B124	39	38	40	51	54	57
B128	35	41	35	56	59	62
B132	43	49	28	51	52	56
B136	35	42	21	33	43	44
B140	41	35	38	49	61	64
B144	34	50	24	41	44	44
B148	43	31	31	53	69	73
B152	34	46	46	59	63	66
B156	36	40	31	44	46	46
B160	38	42	35	46	50	51
B164	29	44	19	32	36	36
B168	40	35	28	45	49	49

ID plant	Hauteur (cm)					
	2020-08-27	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
B172	36	40	41	55	49	49
B176	43	49	36	49	62	63
B180	37	44	25	48	49	52
B184	42	48	25	44	51	51
B188	39	43	36	49	51	52
B192	43	48	33	46	51	52
B196	45	41	24	44	53	57
B200	45	52	32	54	51	54
B204	48	45	37	54	71	71
B208	44	40	25	44	49	52
B212	40	42	36	59	40	42
B216	39	49	31	48	49	49

Tableau 29: Mesures des avoines vivaces Saphirsprudel – Hauteur des tiges florales

ID plant	Hauteur des tiges florales (cm)					
	2020-08-27	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
B4	-	-	-	-	-	-
B8	-	77	-	-	-	-
B12	76	-	-	-	-	-
B16	-	-	-	-	-	-
B20	83	53	-	-	-	-
B24	61	74	-	127	-	-
B28	54	-	-	-	-	-
B32	-	-	-	94	-	-
B36	-	45	-	-	-	-
B40	51	76	-	-	-	-
B44	42	50	-	-	-	-
B48	-	-	-	-	-	-
B52	38	-	-	-	-	-
B56	41	66	-	-	-	-
B60	40	-	-	-	-	-
B64	-	-	-	-	-	-
B68	52	-	-	-	-	-
B72	66	57	-	-	-	-
B76	-	74	-	-	-	-
B80	73	91	-	-	-	-
B84	-	-	-	-	-	-
B88	68	60	-	-	-	-

ID plant	Hauteur des tiges florales (cm)					
	2020-08-27	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
B92	71	51	-	-	-	-
B96	-	-	-	-	-	-
B100	-	-	-	-	-	-
B104	77	-	-	-	-	-
B108	54	-	-	-	-	-
B112	69	64	-	-	-	-
B116	80	88	-	-	-	-
B120	66	-	-	-	-	-
B124	83	-	-	-	-	-
B128	-	-	-	-	-	-
B132	70	-	-	-	-	-
B136	-	-	-	-	-	-
B140	-	-	-	-	-	-
B144	70	48	-	-	-	-
B148	68	-	-	-	-	-
B152	-	63	-	-	-	-
B156	-	80	-	-	-	-
B160	-	-	-	-	-	-
B164	76	72	-	-	-	-
B168	-	55	-	-	-	-
B172	76	-	-	-	-	-
B176	-	70	-	-	-	-
B180	-	63	-	-	-	-
B184	-	-	-	-	-	-
B188	-	-	-	-	-	-
B192	70	-	-	-	-	-
B196	68	-	-	-	-	-
B200	-	-	-	-	-	-
B204	-	-	-	-	-	-
B208	-	49	-	-	-	-
B212	-	-	-	-	-	-
B216	-	-	-	-	-	-

Tableau 30: Mesures des avoines vivaces Saphirsprudel – Nombre de tiges florales

ID plant	Nombre de tiges florales (cm)					
	2020-08-27	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
B4	0	0	0	0	0	0
B8	0	3	0	0	0	0

ID plant	Nombre de tiges florales (cm)					
	2020-08-27	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
B12	6	0	0	0	0	0
B16	0	0	0	0	0	0
B20	3	1	0	0	0	0
B24	5	3	0	17	0	0
B28	3	0	0	0	0	0
B32	0	0	0	1	0	0
B36	0	1	0	0	0	0
B40	2	6	0	0	0	0
B44	1	2	0	0	0	0
B48	0	0	0	0	0	0
B52	1	0	0	0	0	0
B56	1	3	0	0	0	0
B60	2	0	0	0	0	0
B64	0	0	0	0	0	0
B68	4	0	0	0	0	0
B72	1	1	0	0	0	0
B76	0	3	0	0	0	0
B80	3	7	0	0	0	0
B84	0	0	0	0	0	0
B88	6	1	0	0	0	0
B92	5	1	0	0	0	0
B96	0	0	0	0	0	0
B100	0	0	0	0	0	0
B104	4	0	0	0	0	0
B108	1	0	0	0	0	0
B112	1	2	0	0	0	0
B116	9	14	0	0	0	0
B120	1	0	0	0	0	0
B124	2	0	0	0	0	0
B128	0	0	0	0	0	0
B132	17	0	0	0	0	0
B136	0	0	0	0	0	0
B140	0	0	0	0	0	0
B144	1	1	0	0	0	0
B148	2	0	0	0	0	0
B152	0	2	0	0	0	0
B156	0	3	0	0	0	0
B160	0	0	0	0	0	0
B164	4	2	0	0	0	0

ID plant	Nombre de tiges florales (cm)					
	2020-08-27	2020-09-29	2021-06-09	2021-07-08	2021-08-15	2021-09-28
B168	0	2	0	0	0	0
B172	2	0	0	0	0	0
B176	0	5	0	0	0	0
B180	0	9	0	0	0	0
B184	0	0	0	0	0	0
B188	0	0	0	0	0	0
B192	5	0	0	0	0	0
B196	2	0	0	0	0	0
B200	0	0	0	0	0	0
B204	0	0	0	0	0	0
B208	0	1	0	0	0	0
B212	0	0	0	0	0	0
B216	0	0	0	0	0	0

Annexe F – Croissance de la végétation dans le pavé alvéolé

Les figures de cette section présentent le pavé alvéolé à différents moments.



Figure 88: Pavé alvéolé le 11 juin 2020



Figure 89: Pavé alvéolé le 29 septembre 2020



Figure 90: Pavé alvéolé le 26 mars 2021



Figure 91: Pavé alvéolé le 21 mai 2021



Figure 92: Pavé alvéolé le 8 juillet 2021



Figure 93: Pavé alvéolé le 9 juillet 2021



Figure 94: Pavé alvéolé le 15 août 2021



Figure 95: Pavé alvéolé le 5 novembre 2021

Annexe G – Teneur en eau du sol

Les figures de cette section présentent la teneur en eau du sol à divers emplacements.

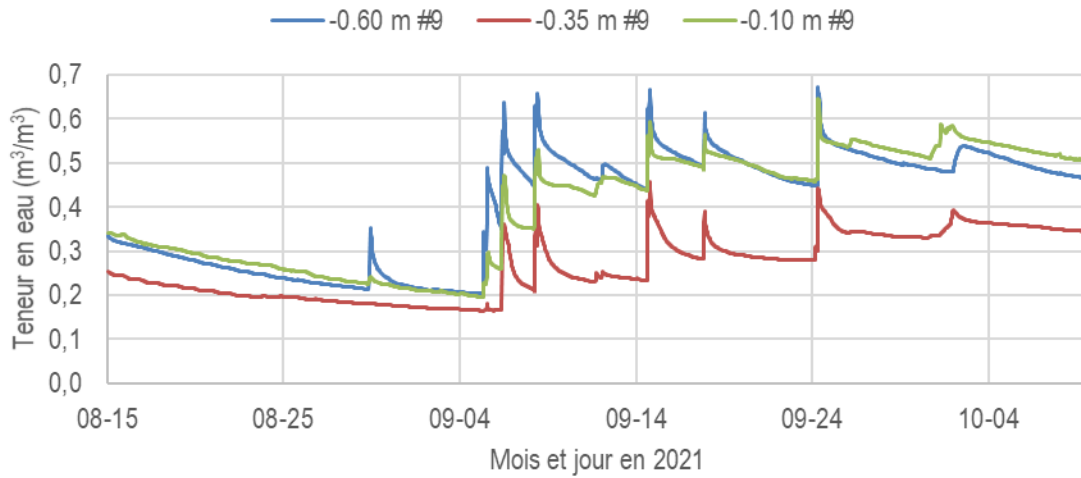


Figure 96: Teneur en eau du substrat près du 9, rue Sainte-Claire

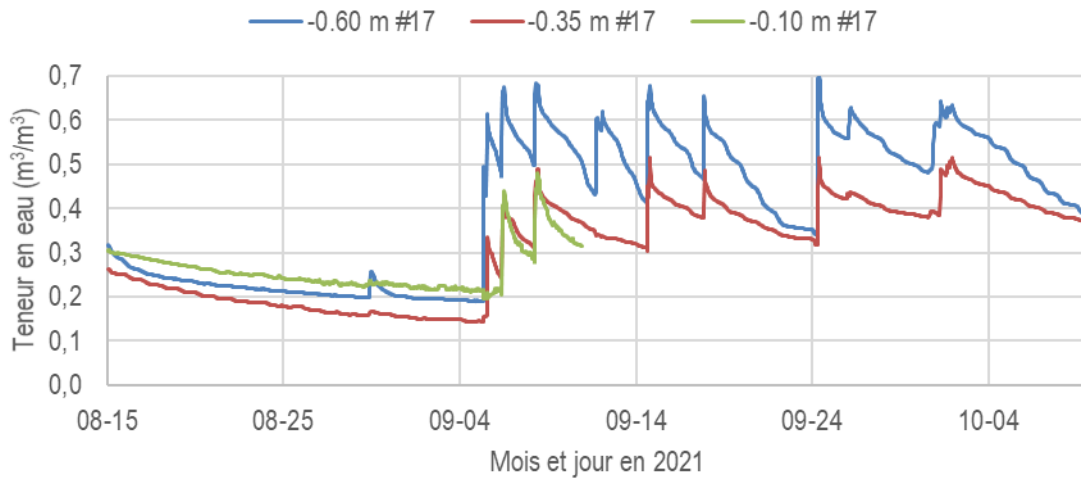


Figure 97: Teneur en eau du substrat près du 17, rue Sainte-Claire

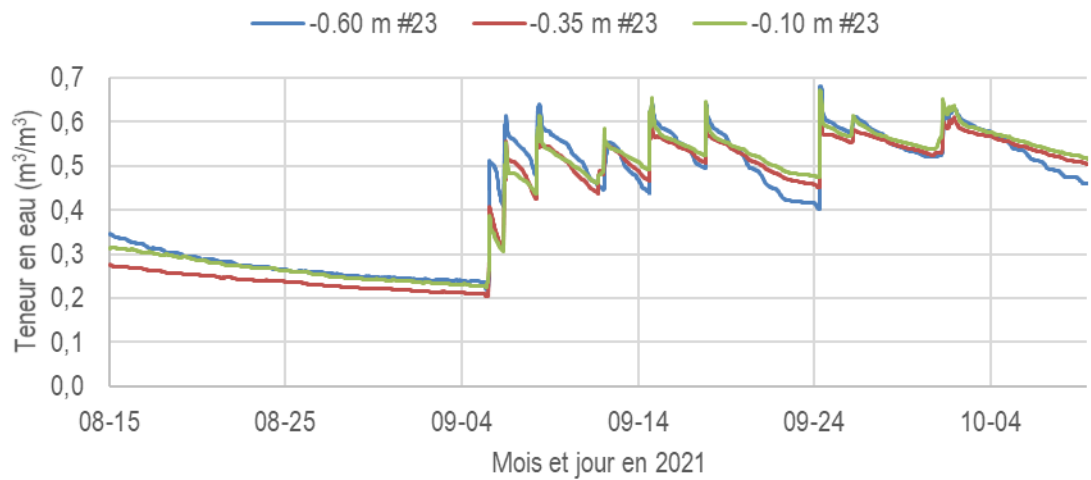


Figure 98: Teneur en eau du substrat près du 23, rue Sainte-Claire