

Centre Eau Terre Environnement

**Dimensionnement, installation et entretien des ouvrages
phytotechnologiques pour améliorer la performance environnementale
des bâtiments : le cas du Carrefour de l'eau**

Par

Maha Boushabi

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

Jury d'évaluation

Président du jury et examinateur interne

Jacob Stolle
INRS

Examineur externe

Stéphanie Pellerin
Université de Montréal

Directrice de recherche

Louise Hénault-Ethier
INRS

Co-directrice de recherche

Sophie Duchesne
INRS

REMERCIEMENTS

Je tiens d’abord à exprimer ma plus profonde gratitude à ma directrice de recherche, Louise Hénault-Ethier, qui m’a offert l’opportunité de me plonger dans un sujet aussi captivant que stimulant. Son accompagnement et ses conseils avisés ont été essentiels pour traverser chaque étape de ma maîtrise, et son soutien constant a grandement enrichi mon parcours académique. À ses côtés, ma codirectrice, Sophie Duchesne, m’a également énormément épaulée ; son expertise et son écoute m’ont permis de surmonter les défis de cette recherche et d’approfondir mes connaissances de manière significative.

Je remercie aussi chaleureusement l’assistante de ma directrice, Aliyeh Rasooli Zadeh, dont l’aide précieuse et le dévouement ont été particulièrement importants lors de ma dernière session, prenant le relais avec efficacité et bienveillance.

Je tiens tout d’abord à exprimer ma gratitude envers le Carrefour de l’eau et 2 Degrés pour le financement de ma bourse d’étude, notamment via un partenariat Mitacs. Ma reconnaissance s’étend également à Franck Cueller, dont les commentaires sur la section économique ont été précieux, ainsi qu’à tous les partenaires du Carrefour de l’eau pour les informations essentielles à la concrétisation de ce projet. Enfin, je remercie chaleureusement la Société Québécoise de Phytotechnologies, qui m’a accueillie en stage, m’a offert l’opportunité de développer cette recherche de manière approfondie, et m’a également accordé une bourse de soutien avec Mitacs.

Un remerciement sincère va aussi aux experts, notamment Mélodie Desmarais, Christian Dufresne et Sixtine Hauchard, qui ont généreusement partagé leur savoir et leurs perspectives dans le cadre d’entrevues semi-dirigées, contribuant ainsi à enrichir cette étude d’un point de vue pratique et théorique.

Je remercie l’Institut National de la Recherche Scientifique (INRS), pour avoir fourni un cadre académique et scientifique où cette recherche a pu s’épanouir.

Enfin, mes plus sincères remerciements vont à mes parents, sans qui ce parcours n’aurait jamais été possible. Leur soutien indéfectible et leur foi en moi ont été un pilier tout au long de ce cheminement.

À toutes ces personnes et institutions, je dédie cette réussite avec la plus profonde reconnaissance.

RÉSUMÉ

Le projet du Carrefour de l'eau illustre comment l'intégration de cellules de biorétention, de murs et de toitures végétalisés peut améliorer la performance environnementale des bâtiments. En favorisant l'infiltration et l'évapotranspiration, ces technologies permettent de gérer efficacement les volumes d'eau reçus, à savoir les précipitations solides et liquides, réduisant ainsi les impacts environnementaux et renforçant la résilience urbaine face aux changements climatiques. Ce projet vise à rassembler divers acteurs aux intérêts complémentaires autour des enjeux d'économie circulaire et de gestion durable des ressources en eau. Le Carrefour de l'eau hébergera un système industriel capable de desservir de l'eau recyclée aux organisations industrielles et mettra à profit l'intelligence collective des entreprises, des groupes de chercheurs et de la communauté.

Cette étude vise à émettre des recommandations et des critères visant à améliorer la gestion de l'eau dans le cadre bâti en évaluant qualitativement et quantitativement diverses phytotechnologies et en s'attardant à l'étude de cas du Carrefour de l'eau. L'objectif principal est d'établir des critères de dimensionnement, de conception et d'entretien pour des phytotechnologies efficaces pour gérer différentes formes d'eau, telles que les eaux pluviales, de ruissellement et de surface. Pour atteindre cet objectif, l'étude a suivi la méthodologie décrite ici-bas.

Tout d'abord, une caractérisation hydrologique et climatologique appuyée par des notions de géologie, d'hydrogéologie et de biophysique de la zone du projet a été réalisée. Cette étape a permis de comprendre le contexte environnemental et de déterminer les meilleures stratégies pour l'installation des phytotechnologies. Ensuite, des données météorologiques pertinentes ont été collectées et analysées pour estimer les précipitations futures. Ces données incluaient des précipitations solides et liquides ainsi que des températures, obtenues auprès d'Environnement et Changement Climatique Canada. Une régression linéaire des précipitations par saison a été réalisée pour identifier les tendances climatiques et prévoir la quantité d'eau à gérer.

Les phytotechnologies choisies pour ce projet incluent des cellules de biorétention, des murs végétalisés et des toitures végétalisées. Ces infrastructures ont été sélectionnées en fonction de leur capacité à gérer efficacement les eaux pluviales dans le cadre bâti. L'étude met en évidence l'importance de l'infiltration et de l'évapotranspiration pour déterminer la quantité d'eau retenue par les phytotechnologies. L'infiltration permet à l'eau de pénétrer le sol et les couches de substrat des phytotechnologies, réduisant ainsi le ruissellement de surface. L'évapotranspiration, quant à elle, joue un rôle crucial en absorbant et en évaporant l'eau par les plantes, contribuant à la réduction des volumes d'eau de surface.

L'estimation de la quantité d'eau retenue par ces infrastructures phytotechnologiques est une étape clé de l'étude. Cette estimation prend en compte l'infiltration et l'évapotranspiration des végétaux sélectionnés. Les résultats de cette recherche contribueront à l'élaboration de nouvelles normes pour une gestion durable et circulaire de l'eau en milieu urbain. En particulier, ils serviront de base pour le développement d'une norme "Net Zéro Eau" pour les constructions futures, adaptées aux changements climatiques. Cette étude offre ainsi un point de départ crucial pour de futures recherches dans le domaine de la gestion durable de l'eau.

Le système de gestion de l'eau du Carrefour de l'eau, tel que proposé dans cette étude, montre une bonne performance hydrique. Les phytotechnologies absorbent la totalité des précipitations. Cette gestion des eaux est assurée principalement par les cellules de biorétention, qui peuvent infiltrer un volume de 49 325 m³/an et qui peuvent assurer une évapotranspiration de 153 m³/an.

Les toitures végétalisées, couvrant 5 440 m², permettent des économies importantes en termes d'énergie et de gestion des eaux pluviales. Sur 50 ans, ces économies pourraient atteindre 8 269 456 CAD pour l'énergie et 1 889 284 CAD pour la gestion des eaux pluviales, en prenant en compte un taux d'inflation de 2 %.

En plus de leurs avantages en gestion de l'eau, les toitures végétalisées réduisent les émissions de CO₂ de 38 %, absorbant environ 79 424 kg de CO₂ par an tout en libérant 57 084 kg d'O₂. Elles contribuent à améliorer la qualité de l'air et réduisent la température extérieure des murs de 10,5°C en été, tout en offrant une isolation thermique accrue en hiver.

En somme, cette étude non seulement propose des solutions pratiques pour une meilleure gestion de l'eau, mais elle pave également la voie à de nouvelles normes de construction et de gestion de l'eau, contribuant à un avenir urbain plus durable et résilient.

ABSTRACT

This study investigates the optimization of water management within urban built environments through the use of various phytotechnologies. The primary aim is to identify the most efficient methods for managing stormwater, runoff, surface water, and groundwater. This involves both qualitative and quantitative evaluations.

The project focuses on a detailed analysis of the geological, hydrogeological, and biophysical characteristics of the targeted area. It also includes the collection and synthesis of meteorological data, such as precipitation and temperature, to project future water trends. Using linear regression, the study examines seasonal precipitation patterns to estimate the volume of water that the chosen phytotechnologies will need to manage.

The selected phytotechnologies, namely bioretention cells, green walls, and green roofs, were chosen for their superior performance in urban water management. Key factors in assessing these technologies include infiltration and evapotranspiration, which are essential in determining their water retention capabilities. Infiltration helps water seep into the soil and substrate, reducing runoff, while evapotranspiration through plants aids in decreasing surface water volumes.

A precise estimate of the water retention potential of these systems was conducted, factoring in the infiltration and evapotranspiration rates of the chosen plants. These results will contribute to developing new standards for sustainable urban water management, including a potential "net zero water" standard for future buildings, addressing climate change challenges. This study lays the groundwork for further research and practical applications in sustainable water management.

The “Carrefour de l’eau” project serves as a practical example of how bioretention cells, green walls, and green roofs can be integrated to improve the environmental performance of buildings. By enhancing infiltration and evapotranspiration, these systems effectively manage water volumes, mitigate environmental impacts, and boost urban resilience to climate change. Additionally, the project aims to bring together various stakeholders to support the circular economy and sustainable water resource management. It will feature an industrial system providing recycled water to high-consumption industrial users, leveraging the collective intelligence of businesses, researchers, and the community.

The water management system at the “Carrefour de l’eau” demonstrates strong hydric performance. The phytotechnologies absorb the entirety of precipitation. Water management is primarily ensured by bioretention cells, which infiltrate 49 325 m³ per year and enable an evapotranspiration rate of 153 m³ per year.

Green roofs, covering 5 440 m², generate significant savings in energy and stormwater management. Over 50 years, these savings could amount to CAD 8 269 456 in energy costs and CAD 1 889 284 in stormwater management costs, assuming an annual inflation rate of 2%.

In addition to their water management benefits, green roofs reduce CO₂ emissions by 38%, absorbing around 79,424 kg of CO₂ annually while releasing 57,084 kg of O₂. They contribute to improving air quality and reduce the exterior wall temperature by 10.5°C in summer, while also providing increased thermal insulation in winter.

In essence, this study offers practical solutions for enhancing water management in urban areas and sets the stage for new standards in construction and water management, contributing to a more sustainable and resilient urban future.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ.....	iv
ABSTRACT	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	xii
LISTE DES FIGURES	xiv
1. INTRODUCTION.....	17
1.1. MISE EN CONTEXTE	17
1.2. REVUE DE LITTÉRATURE.....	22
1.2.1. Bénéfices du projet	22
1.2.2. Conditions climatologiques de la zone d'étude	22
1.2.3. Infrastructures grises.....	23
1.2.3.1. Réutilisation des eaux dans les bâtiments.....	24
1.2.3.2. Réservoirs d'eau souterrains	25
1.2.4. Phytotechnologies à mettre en place au Carrefour de l'eau.....	25
1.2.4.1. Toitures végétalisées.....	26
1.2.4.2. Murs végétalisés	30
1.2.4.3. Cellules de biorétention	32
1.2.5. Entretien des phytotechnologies	36
1.2.5.1. Toitures végétalisées.....	37
1.2.5.2. Murs végétalisés	47
1.2.5.3. Cellules de biorétentions.....	51
1.3. PROBLÉMATIQUE.....	55
1.4. OBJECTIFS DE RECHERCHE.....	55
2. MÉTHODOLOGIE	57
2.1. Choix des phytotechnologies pertinentes	57
2.2. Détermination du bassin versant et caractérisation des eaux de surface	58
2.3. Étude climatologique de la zone d'étude.....	58
2.3.1. Données disponibles	58
2.3.2. Traitement des données	59
2.3.3. Régression linéaire	60
2.4. Étude de faisabilité	60
2.4.1. Étude technique, économique et réglementaire	60
2.4.2. Évapotranspiration.....	61

2.4.3. Dimensionnement des phytotechnologies	61
Toitures végétalisées.....	61
Murs végétalisés	62
Cellules de biorétention.....	62
3. DÉTERMINATION DU BASSIN VERSANT ET CARACTÉRISATION DES EAUX DE SURFACE DE LA ZONE D'ÉTUDE	64
3.1. Bassin versant de la rivière Saint-Charles	64
3.1. Les eaux de surface.....	66
3.1.1. Rivière des Hurons	66
3.1.2. Rivière Jaune	67
3.1.3. Rivière Nelson	68
3.1.4. Lac Saint-Charles	70
3.1.5. Fleuve Saint-Laurent	72
3.2. Élévation des sites par rapport au niveau de la mer et de la nappe phréatique.....	73
3.3. Caractérisation biophysique et géologique du sol	75
3.4. Couverture végétale et forestière	78
4. ÉTUDE CLIMATOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE	82
4.1. Régression linéaire	82
4.1.1. Précipitations liquides par saison	82
4.1.2. Précipitations solides par saison	83
4.1.3. Températures	84
4.2. Estimation des précipitations et températures futures	85
4.3. Analyse des précipitations journalières et évapotranspiration.....	86
5. ÉTUDE DE FAISABILITÉ ET PLANIFICATION DE L'IMPLANTATION DES PHYTOTECHNOLOGIES	89
5.1. Toitures végétalisées.....	89
5.1.1. Étude technique	89
5.1.1.1. Types de toitures végétalisées.....	89
5.1.1.2. Choix des végétaux.....	91
5.1.1.3. Structure de la toiture	94
5.1.1.4. Système de drainage et d'irrigation.....	95
5.1.1.5. Choix du substrat	99
5.1.2. Étude économique	100
5.1.2.1. Toits extensifs	101
5.1.2.2. Toits intensifs.....	104

5.1.3.	Évapotranspiration.....	105
5.1.4.	Dimensionnement.....	106
5.1.4.1.	Capacité de production de légumes	107
5.1.4.2.	Humidité moyenne et exportation d'eau	108
5.2.	Murs végétalisés	108
5.2.1.	Étude technique	108
5.2.1.1.	Façades vertes.....	108
5.2.1.2.	Murs vivants	112
5.2.2.	Étude économique	113
5.2.3.	Évapotranspiration.....	115
5.3.	Cellules de biorétention	115
5.3.1.	Étude technique	115
5.3.1.1.	Choix des végétaux.....	115
5.3.1.2.	Substrat	117
5.3.2.	Étude économique	118
5.3.3.	Dimensionnement.....	120
5.3.4.	Infiltration et évapotranspiration	122
6.	BILAN HYDRIQUE	126
6.1.	Entrées d'eau.....	126
6.2.	Infiltration et évapotranspiration	126
6.2.1.	Toitures végétalisées.....	126
6.2.2.	Murs végétalisés	127
6.2.3.	Cellules de biorétention	128
6.3.	Bilan hydrique du Carrefour de l'eau	129
7.	RETOMBÉES ÉCONOMIQUES DES PHYTOTECHNOLOGIES CHOISIES	131
7.1.	Toitures végétalisées.....	132
7.1.1.	Coût total de l'installation et de l'entretien	132
7.1.2.	Économies d'énergie	132
7.1.3.	Réduction des coûts de la gestion des eaux pluviales.....	134
7.1.4.	Retour sur investissement.....	136
7.2.	Murs végétalisés	136
7.2.1.	Coût total de l'installation et de l'entretien	136
7.2.2.	Économie d'énergie.....	137
7.2.3.	Réduction des coûts de la gestion des eaux pluviales.....	138
7.2.4.	Retour sur investissement.....	139

7.3.	Cellules de biorétention	139
7.3.1.	Coût total de l'installation et de l'entretien	139
7.3.2.	Réduction des coûts de la gestion des eaux pluviales.....	141
7.3.3.	Amélioration de la qualité de l'eau.....	142
7.3.4.	Durabilité et co-bénéfices	143
8.	LIMITES DE L'ÉTUDE.....	145
9.	CONCLUSIONS	147
	BIBLIOGRAPHIE	150
	ANNEXE.....	162

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Coefficients de ruissellement selon les types de toits (Ville de Québec, 2017).....	28
Tableau 2 : Exemples d'exigences en matière de quantité d'eau infiltrée par les biorétentions (Collerette & Roy, 2023).....	35
Tableau 3 : Entretien des végétaux d'un toit végétalisé au fil des saisons (SQP, 2024).....	45
Tableau 4 : Entretien de l'infrastructure d'un toit végétalisé (SQP, 2024).....	46
Tableau 5 : Résumé des tâches d'entretien des végétaux par saison.....	46
Tableau 6 : Résumé des tâches d'entretien de l'infrastructure.....	47
Tableau 7 : Épaisseur et description des matériaux des séquences stratigraphiques des pompages (MELCCFP, s.d.)	77
Tableau 8 : Estimations des précipitations et températures saisonnières.....	86
Tableau 9 : Calcul de l'évapotranspiration mensuelle de l'année 2011.....	87
Tableau 10 : Classification des toitures végétalisées et leurs principaux attributs (Berardi et al., 2014).....	90
Tableau 11 : Études de terrain sur l'agriculture sur les toits (modifié de Harada et al., 2017)	93
Tableau 12 : Études antérieures axées sur les toitures végétalisées extensives (Ulubeyli & Arslan, 2017)..	101
Tableau 13 : Paramètres économiques des toitures végétalisées extensives (TVE) (Ulubeyli & Arslan, 2017)	103
Tableau 14 : Comparaison des coûts de l'installation d'une cellule de biorétention : Hong Kong, Seattle et Singapour (Tan & Wang, 2023; Vijayaraghavan et al., 2021)	119
Tableau 15 : Taux d'infiltration typiques (Ministère de l'Environnement, s.d.)	123
Tableau 16 : Bilan hydrique prenant en compte les murs et les toitures végétalisés du bâtiment du Carrefour de l'eau	129
Tableau 17 : Bilan hydrique de l'eau gérée par les cellules de biorétention du bâtiment du Carrefour de l'eau	130
Tableau 18 : Économies totales (CAD) d'énergies des toitures végétalisées sur 50 ans	133
Tableau 19 : Économies totales (CAD) de la réduction des coûts de la gestion des eaux pluviales des toitures végétalisées sur 50 ans.....	135
Tableau 20 : Économies totales (CAD) d'énergies des murs végétalisés sur 50 ans.....	138
Tableau 21 : Économies totales (CAD) des coûts de la gestion des eaux pluviales des murs végétalisés sur 50 ans.....	139
Tableau 22 : Résultats de la régression linéaire des précipitations liquides en automne sur 143 ans.....	162
Tableau 23 : Résultats de la régression linéaire des précipitations liquides en hiver sur 140 ans	163
Tableau 24 : Résultats de la régression linéaire des précipitations liquides au printemps sur 142 ans	163
Tableau 25 : Résultats de la régression linéaire des précipitations liquides en été sur 142 ans.....	164

Tableau 26 : Résultats de la régression linéaire des précipitations solides en automne sur 144 ans	165
Tableau 27 : Résultats de la régression linéaire des précipitations solides en hiver sur 143 ans.....	166
Tableau 28 : Résultats de la régression linéaire des précipitations solide en printemps sur 143 ans	167
Tableau 29 : Résultats de la régression linéaire des températures en automne sur 40 ans	168
Tableau 30 : Résultats de la régression linéaire des températures hivernales sur 40 ans	169
Tableau 31 : Résultats de la régression linéaire des températures printanières sur 40 ans	170
Tableau 32 : Résultats de la régression linéaire des températures estivales sur 40 ans	171
Tableau 33 : Estimation des précipitations liquides en automne jusqu'à 2075	172
Tableau 34 : Estimation des précipitations liquides en hiver jusqu'à 2075	173
Tableau 35 : Estimation des précipitations liquides en printemps jusqu'à 2075	173
Tableau 36 : Estimation des précipitations liquides en été jusqu'à 2075	174
Tableau 37 : Estimation des précipitations solides en automne jusqu'à 2075	174
Tableau 38 : Estimation des précipitations solides en hiver jusqu'à 2075	175
Tableau 39 : Estimation des précipitations solides au printemps jusqu'à 2075	175
Tableau 40 : Estimation des températures en automne jusqu'à 2075.....	176
Tableau 41 : Estimation des températures en hiver jusqu'à 2075	176
Tableau 42 : Estimation des températures au printemps jusqu'à 2075	177
Tableau 43 : Estimation des températures en été jusqu'à 2075	177

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Les deux sites pressentis pour le Carrefour de l'eau.....	18
Figure 2 : Image du futur Carrefour de l'eau réalisée par Patriarche Architectures	19
Figure 3 : Localisation de la station météorologique et des deux sites retenus pour le Carrefour de l'eau.....	23
Figure 4 : Les trois phytotechnologies choisies dans le cadre du projet du Carrefour de l'eau	26
Figure 5 : Contraintes générales des toitures végétalisées selon la perspective du public (Vijayaraghavan, 2016)	30
Figure 6 : Catégories et sous-catégories des murs végétalisés (adapté de Manso et Castro-Gomes, 2015)....	31
Figure 7 : Matrice FFOM pour les systèmes verticaux verts (Ascione et al., 2020)	32
Figure 8 : Les sous-bassins versants du bassin-versant de la rivière Saint-Charles (APEL, 2014).....	65
Figure 9 : Bassin versant de la rivière des Hurons (Agiro, 2021)	67
Figure 10 : Bassin versant de la rivière Jaune (Agiro, 2021)	68
Figure 11 : Bassin versant de la rivière Nelson (APEL, 2014).....	69
Figure 12 : Localisation du lac Saint-Charles (Salou, 2009).....	71
Figure 13 : Système du Saint-Laurent avec ses portions fluviales (Kingston à Québec) et estuariennes (Québec à Pointe-des-Monts) en A) et la sous-division entre estuaire moyen (Québec à Tadoussac) et maritime (Tadoussac à Pointe-des-Monts) en B) (Villeneuve, 2020)	72
Figure 14 : Courbes de niveau représentant l'élévation des sites du Carrefour de l'eau par rapport au niveau de la mer, carte élaborée à l'aide du logiciel QGIS basée sur les données du Gouvernement du Québec (2024)	73
Figure 15 : Altitude du niveau de la nappe phréatique de la station 05097002 (Ministère de l'Environnement, s.d.)	75
Figure 16 : Localisations des puits de forages faits par le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP, s.d.).....	76
Figure 17 : Découpage géologique de la zone d'étude, carte élaborée à l'aide du logiciel QGIS sur la base des données provenant du Gouvernement du Québec (2024).....	78
Figure 18 : Couvert forestier de la zone d'étude carte élaborée à l'aide du logiciel QGIS sur la base des données provenant du Gouvernement du Québec (2024).....	79
Figure 19 : Couvert végétal de la zone d'étude carte élaborée à l'aide du logiciel QGIS basé sur des données provenant du Gouvernement du Québec (2024).....	80
Figure 20 : Régression linéaire des précipitations liquides sur 145 ans	82
Figure 21 : Régression linéaire des précipitations solides, exprimées en équivalent en eau, sur 145 ans.....	83
Figure 22 : Régression linéaire des températures moyennes saisonnières sur 40 ans	85
Figure 23 : Résistance thermique d'une même toiture verte avec différentes plantes : Sedum, Vinca et Ryegrass (tiré de Berardi et al., 2014).....	91

Figure 24 : Éléments de base de toute toiture végétalisée (Bruxelles Environnement, s.d)	94
Figure 25 : Étapes de l'installation du système de drainage et d'irrigation (tiré de Pirouz et al., 2023).....	97
Figure 26 : Couches de la nouvelle toiture végétalisée (tiré de Pirouz et al., 2023)	98
Figure 27 : Détails de toutes les couches : (1) mousse de polystyrène; (2) tube en PVC ; (3) filtre multicouche ; (4) 1 cm de mousse de polystyrène; (5) membrane d'étanchéité ; (6) couche barrière racinaire ; (7) milieux de sol ; (8) filtres de vidange (Pirouz et al., 2023)	98
Figure 28 : Détails de la sortie du tube en forme de U inversé pour le retrait de l'eau supplémentaire et de l'entrée pour le remplir : (3) filtres multicouches ; (2) réseau de conduites ; (9) sortie du tube en forme de U inversé ; (10) entrée (Pirouz et al., 2023)	99
Figure 29 : Détails du réseau de canalisations sur un toit en pente (Pirouz et al., 2023)	99
Figure 30 : Caractéristiques de libération d'humidité du Rooflite, du loam argilo-limoneux, du loam limoneux et du loam sableux. La teneur volumétrique en eau de chaque échantillon à saturation est tracée à 0,1 kPa (Harada et al., 2017)	100
Figure 31 : Coûts d'installation (€/m ²) des toitures végétalisées extensives, semi-intensives et intensives (Bianchini & Hewage, 2012b; Carter & Keeler, 2008; Gsa, 2011; MacMullan et al., 2009; Mahdiyar et al., 2016; Manso et al., 2021; Niu et al., 2010; Peck et al., 1999; Peng & Jim, 2015; Peri et al., 2012; Perini & Rosasco, 2016; Sproul et al., 2014; William et al., 2016)	104
Figure 32 : Coûts d'exploitation et d'entretien (€/m ² /an) des toitures végétalisées extensives, semi-intensives et intensives (Acks et al., 2006; Bianchini & Hewage, 2012b; Claus & Rousseau, 2012; Evans, 2008; Gsa, 2011; Manso et al., 2021; Peri et al., 2012; Perini & Rosasco, 2016; Rotterdam, 2008; Sproul et al., 2014).....	105
Figure 32 : Schémas de façades vertes : (a) façade verte directe ; (b) façade verte indirecte (Addo-Bankas et al., 2021).....	109
Figure 33 : Coût d'installation (CAD/m ²) des murs végétalisés (Manso et al., 2021; Perini & Rosasco, 2013; Riley, 2017; Teotónio et al., 2018).....	114
Figure 34 : Coût d'exploitation et d'entretien (CAD/m ² /an) des murs végétalisés (Manso et al., 2021; Perini & Rosasco, 2013, 2016)	114
Figure 36 : Système de biorétention (Vijayaraghavan et al., 2021).....	115
Figure 37 : Caractéristiques souhaitées de la végétation pour la biorétention (Vijayaraghavan et al., 2021) 116	
Figure 38 : Liste des végétaux pouvant être utilisés dans les biorétentions (SQP, 2018).....	117
Figure 39 : Caractéristiques du substrat des cellules de biorétention	118
Figure 40 : Taux d'infiltration en fonction du rapport entre le sable et les agrégats* (Sittisom et al., 2022) 124	
Figure 41 : Intensité énergétique en fonction de la superficie des bâtiments (BOMA, 2020).....	131
Figure 42 : Aperçu schématique des mécanismes de refroidissement et de leurs paramètres déterminants (Stec et al., 2005)	137

Figure 43 : Diagramme des entrées et sorties d'eau du Carrefour de l'eau en prenant en compte les phytotechnologies mises en place.....	149
---	-----

1. INTRODUCTION

1.1.MISE EN CONTEXTE

Les changements climatiques perturbent le cycle hydrologique partout sur la planète, forçant les collectivités à se doter d'infrastructures adaptées tant aux précipitations abondantes qu'aux sécheresses plus fréquentes Mukherjee et al. (2018). À cela s'ajoute la pénurie d'eau qui touche plus de 40 % de la population mondiale (Nations Unies, s.d). D'ici 2050, au moins un quart de la population mondiale devrait vivre dans des pays souffrant d'une pénurie chronique d'eau douce (Nations Unies, s.d). De ce fait, les sources d'eau alternatives qui permettent la réutilisation et le recyclage de l'eau font partie des stratégies visant à accroître l'efficacité et la sécurité de l'utilisation de l'eau (Wanjiru et al., 2017).

Dans ce sens, l'utilisation des phytotechnologies pour la gestion de l'eau représente une approche innovante et durable face aux défis croissants liés à la gestion des ressources hydriques (Agrahari & Kumar, 2024; Dominici, 2021; Erickson & Pidlisnyuk, 2021). Ces technologies reposent sur l'utilisation de végétaux pour traiter, purifier et gérer l'eau, en exploitant leurs capacités naturelles d'absorption, de filtration et de régulation des eaux pluviales (SQP, 2014, 2015, 2016, 2018, 2019, 2022). Elles offrent une alternative écologique aux systèmes traditionnels, contribuant à la réduction du ruissellement, à l'amélioration de la qualité de l'eau et à la conservation des écosystèmes aquatiques. Dans un contexte de changements climatiques et de pression accrue sur les infrastructures urbaines, les phytotechnologies apparaissent comme des solutions prometteuses pour assurer une gestion durable et résiliente de l'eau, tout en favorisant la biodiversité et la revitalisation des espaces urbains (Newton et al., 2023).

Le projet du Carrefour de l'eau est un projet planifié dans la Ville de Québec, qui a pour objectif la création d'un lieu unique regroupant des acteurs aux intérêts différents et complémentaires, impliquant les enjeux d'économie circulaire et de gestion durable des ressources en eau. Le Carrefour de l'eau hébergera, entre autres, un système industriel pouvant desservir une eau recyclée aux organisations qui consomment une grande quantité d'eau potable à des fins industrielles. En plus, il viendra mettre à profit l'intelligence collective des entreprises, des groupes de chercheurs et de la collectivité. Cela sera assuré par le partage des espaces communs, l'accès à des laboratoires spécialisés favorisant la recherche et le développement et des activités de mobilisation des connaissances et de sensibilisation pour relever les défis liés à l'utilisation responsable de l'eau. En plus, en vue d'améliorer la qualité de vie pour tous, le projet du Carrefour de l'eau proposera des espaces extérieurs sur le thème de l'eau. Le projet comprendra les six volets suivants : i) une usine de recyclage d'eaux usées et de distribution d'eau potable, ii) un centre d'interprétation et de sensibilisation pour le grand public, iii) un incubateur d'entreprises spécialisées dans le secteur de l'eau et des technologies propres, iv) des locaux et des laboratoires, v) un banc d'essai et vi) un pôle immobilier spécialisé en eau (Joyal & Souffez,

2023). Deux sites ont été retenus pour le projet (Figure 1). La Figure 2 montre une image du futur bâtiment réalisée par Patriarches Architectures.



Figure 1 : Les deux sites pressentis pour le Carrefour de l'eau

Le premier site a été choisi sur la base de la facilité d'accès routiers et du transport en commun ainsi que de la possibilité d'y réaliser des activités extérieures. En plus, le terrain est déjà décontaminé; il est également proche de plusieurs commerces suscitant de l'attraction. Le deuxième site est situé près de l'usine d'épuration des eaux usées de la Ville de Québec et de la plage de la Baie de Beauport, un site hautement fréquenté par le grand public, facilitant l'accessibilité du futur espace muséal du Carrefour de l'eau.



Figure 2 : Image du futur Carrefour de l'eau réalisée par Patriarche Architectures

Les phytotechnologies englobent un ensemble de solutions écologiques utilisant des plantes pour améliorer la gestion de l'eau, la qualité de l'air et l'efficacité énergétique des bâtiments, à savoir : les murs et toitures végétalisés, les haies brise-vent, les cellules de biorétention, la stabilisation des pentes, la phytoremédiation et les marais filtrants. Ces technologies jouent un rôle clé dans la régulation des flux hydriques en favorisant l'infiltration, la rétention et l'évapotranspiration des eaux de pluie. En plus de réduire les risques d'inondation, elles contribuent à la séquestration du CO₂, à la production d'oxygène, à l'amélioration du confort thermique, et offrent un refuge à la biodiversité. Les toitures et murs végétalisés, qui en sont des exemples, offrent une isolation naturelle, réduisent les îlots de chaleur urbains et prolongent la durée de vie des infrastructures en protégeant les surfaces contre les variations extrêmes de température.

Le bâtiment du Carrefour de l'eau disposera d'une superficie totale de 18 965 m², avec une superficie totale de toiture de 6 800 m². Au sein de cette surface, un taux de végétalisation de 80 % est prévu, soit 5 440 m². Ce pourcentage a été établi pour répondre aux objectifs environnementaux du projet, notamment la réduction du ruissellement des eaux pluviales, l'amélioration de la performance thermique du bâtiment et la contribution à la biodiversité locale. La répartition des toitures végétalisées a été pensée pour maximiser les avantages écologiques tout en tenant compte des contraintes techniques, structurelles et budgétaires. Les toitures extensives représenteront 40 % de la surface végétalisée (2 176 m²), car elles sont adaptées aux zones nécessitant une faible capacité structurelle et un entretien minimal. Les toitures intensives, couvrant 60 % de cette surface (3 264 m²), offriront davantage de possibilités d'aménagement et d'interactions humaines, comme des jardins accessibles ou des espaces récréatifs. Toutefois, cette répartition reste à valider par des analyses

plus poussées, notamment en comparant divers scénarios de proportion entre toitures extensives et intensives en fonction des coûts, des bénéfices environnementaux et des contraintes spécifiques du projet.

En ce qui concerne les murs, leur superficie totale est d'environ 8 500 m², dont 20 % (1 700 m²) seront végétalisés. Pour ces murs, nous utiliserons une épaisseur standard de substrat d'environ 10 cm, soit un total de 170 m³ de substrat.

Le Carrefour de l'eau sera situé tout en aval du bassin versant de la rivière Saint-Charles, dans une zone stratégique où convergent les flux hydriques de toute la région. Cette position en aval fait du Carrefour un point névralgique pour l'ensemble du bassin versant, puisqu'il est à la fois le récepteur des eaux provenant des divers affluents et le lieu où les impacts cumulés des activités en amont se manifestent le plus fortement.

Ce document explore en détail les aspects essentiels à la réalisation du Carrefour de l'eau. Tout d'abord, l'analyse du bassin versant de la rivière Saint-Charles et la caractérisation biophysique et géologique du sol permettent de comprendre les interactions hydrologiques et environnementales du site (Chapitre 3). Ces données sont cruciales pour concevoir des infrastructures adaptées aux conditions locales. Ensuite, l'étude climatologique de la zone du projet, incluant l'estimation des précipitations futures et l'analyse des données climatiques, constitue une base solide pour prévoir les impacts du changement climatique sur le projet (Chapitre 4). Cette étude est primordiale pour garantir que les infrastructures mises en place seront résilientes face aux variations climatiques à long terme. L'étude de faisabilité et la planification de l'implantation des phytotechnologies, incluant les toitures végétalisées, les murs végétalisés et les cellules de biorétention, permettent de définir les solutions techniques, économiques et réglementaires les plus adaptées pour le projet est ensuite présentée (Chapitre 5). Ceci est essentiel pour assurer la durabilité environnementale et la viabilité économique du Carrefour de l'eau, dont le bilan hydrique est présenté au Chapitre 6. Enfin, l'analyse des retombées économiques des phytotechnologies choisies offre une perspective claire sur les avantages financiers à long terme pour la communauté et les parties prenantes, justifiant ainsi l'investissement dans des solutions innovantes et durables (Chapitre 7).

Il faut savoir que la consommation moyenne d'eau par jour et par habitant est de 400 litres au Québec (McGill, 2024). Environ 65 % de cette consommation se fait dans la salle de bain : douche et bain (35 %) et chasse d'eau (30 %). Pour un bâtiment industriel et scientifique comme le Carrefour de l'eau, l'hypothèse de travail retenue est de 115,8 l d'eau par jour et par usager, correspondant à environ 30% de la consommation résidentielle (approximativement le volume de chasse d'eau quotidienne). Cette consommation élevée souligne l'importance de mettre en place des stratégies de gestion de l'eau innovantes et durables, particulièrement dans un projet comme le Carrefour de l'eau. En optimisant l'utilisation des ressources hydriques, notamment par la

récupération et le traitement des eaux pluviales, ainsi que par l'intégration de phytotechnologies, il est possible de réduire la pression sur les réseaux municipaux et de limiter le gaspillage. De plus, en adoptant une approche exemplaire en matière de gestion de l'eau, le bâtiment peut servir de modèle pour d'autres infrastructures industrielles et scientifiques, favorisant ainsi une transition vers une utilisation plus responsable de cette ressource essentielle.

1.2. REVUE DE LITTÉRATURE

1.2.1. Bénéfices du projet

La conception du Carrefour de l'eau vise à favoriser les retombées environnementales, sociales et économiques pour la Ville de Québec. Il permettra principalement de renforcer la dynamique de la zone fluviale tout en s'assurant de l'intégration de plusieurs parties prenantes, à savoir principalement : les entreprises en recherche et développement, le secteur des études supérieures, les organismes publics soumis aux normes et aux politiques sur la gestion de l'eau et les organismes participant à la gestion durable de l'eau. Socialement parlant, le projet peut être considéré comme une occasion pour redéfinir ou réaffirmer la relation qui unit les quartiers à proximité du fleuve Saint-Laurent et le rapport de la population avec l'eau. Déjà, le Conseil régional de l'environnement de la Capitale-Nationale (MDDEP & CRE Laurentides) a récemment lancé son programme « Québec, ville éponge », visant à intégrer ce concept dans le paysage urbain pour aider la Capitale-Nationale à faire face à diverses problématiques liées à l'urbanisation (Association des architectes paysagistes du Québec, 2020). Ce projet contribuera au rayonnement de Québec comme ville aquaresponsable ; c'est une opportunité qui pourra faire de la ville une potentielle « capitale mondiale de l'eau », consciente de la valeur de l'eau qui l'entoure et de l'importance de sa préservation au bénéfice de la population actuelle et des générations futures.

1.2.2. Conditions climatologiques de la zone d'étude

Dans le cadre de cette étude, il est important de quantifier les précipitations qui vont tomber sur le Carrefour de l'eau et son terrain durant la durée de vie utile du bâtiment, dans le but d'étudier l'efficacité des phytotechnologies et des infrastructures grises à mettre en place pour optimiser la gestion de cette eau. Dans ce sens, il faut collecter une base de données des précipitations liquides et solides de la zone.

Les données présentées dans cette section ont été collectées de la station météorologique Lauzon (voir Chapitre 4), soit la station à proximité ayant les séries de données les plus complètes (section 1.4.1). Elle est située sur la rive sud du Saint-Laurent (46.8 lat., -71.1 long.), à une distance d'à peu près 8 et 9 km des deux sites potentiels du Carrefour de l'eau (Figure 3). Ces données ont été récupérées du site web d'Environnement et Changement climatique Canada.

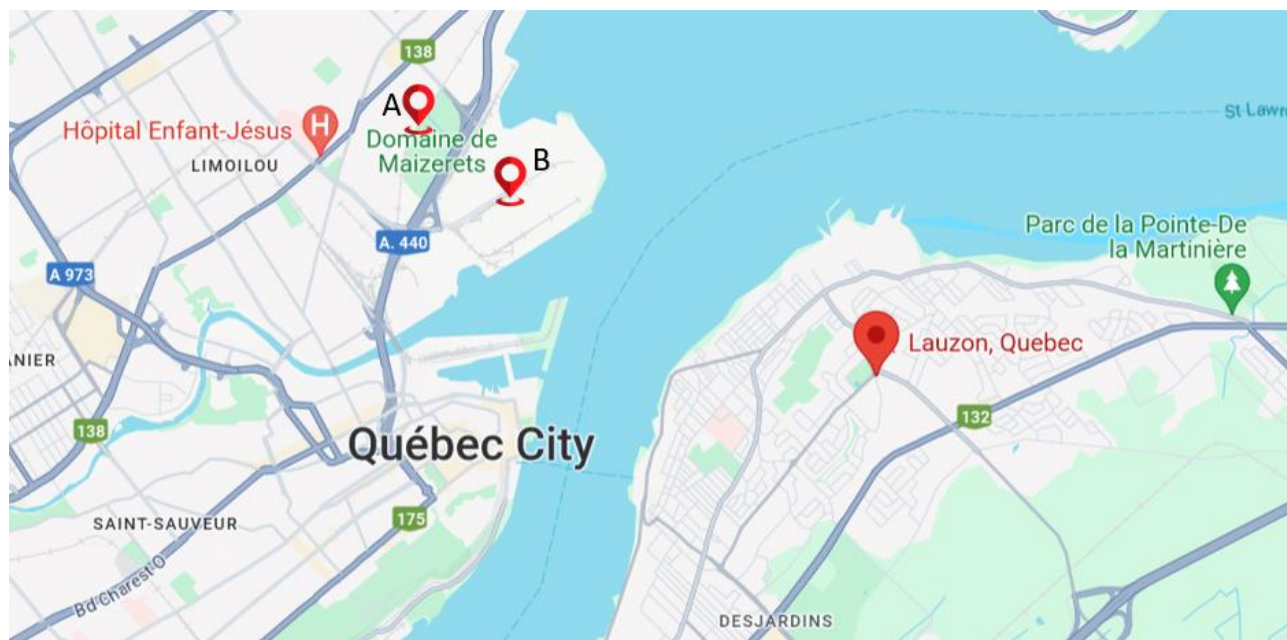


Figure 3 : Localisation de la station météorologique et des deux sites retenus pour le Carrefour de l'eau

1.2.3. Infrastructures grises

Pendant longtemps, la gestion de l'eau en milieu urbain s'est concentrée sur une évacuation rapide des eaux, avec l'encaissement des cours d'eau naturels pour accélérer leur écoulement et limiter les débordements. Cette approche reposait essentiellement sur des infrastructures grises, telles que les conduites d'eaux usées, les réseaux pluviaux et les chaussées qui les surmontent (Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines, 2020). Cependant, bien que ces infrastructures aient été efficaces pour répondre aux besoins immédiats, elles montrent aujourd'hui leurs limites dans un contexte de changement climatique et de pression accrue sur les ressources. En effet, elles ne permettent ni la valorisation de l'eau ni la réduction des impacts environnementaux liés à l'imperméabilisation des sols, et n'offrent aucun habitat pour la biodiversité.

C'est pourquoi, dans une perspective de gestion durable de l'eau, il est nécessaire de compléter ces solutions traditionnelles par des approches plus résilientes. Nous proposons ainsi la mise en place d'un système de collecte des eaux de pluie, destiné à une réutilisation directe dans le bâtiment ou à un stockage dans des réservoirs souterrains. Ces solutions s'intègrent harmonieusement avec les infrastructures naturelles, ou phytotechnologies, qui, en plus de gérer efficacement l'eau, apportent des co-bénéfices environnementaux comme l'amélioration de la qualité de l'air, la réduction des îlots de chaleur urbaine et la séquestration du carbone.

Dans son rapport de stage intitulé « Recherche bibliographique et sensibilisation du public (Carrefour de l'eau) », l'étudiant Houssem Eddine Haroun a exploré plusieurs infrastructures grises pouvant être intégrées au bâtiment du Carrefour de l'Eau pour optimiser la gestion de l'eau. Parmi celles-ci, le système de récupération et de réutilisation des eaux grises permet de collecter les eaux usées issues des lavabos, douches, équipements de rinçage ou laboratoires. Ces eaux, moins contaminées que les eaux noires, peuvent être traitées via des procédés physiques, chimiques ou biologiques pour des usages non potables tels que le lavage des sols ou le remplissage des toilettes.

Le système de collecte et de réutilisation des eaux de pluie, quant à lui, offre une alternative décentralisée permettant de réduire la consommation d'eau potable en la réservant à des usages essentiels, tout en diminuant les coûts liés au traitement et à la distribution.

Dans les sanitaires, plusieurs dispositifs innovants sont également envisagés : les urinoirs sans eau, qui éliminent la consommation d'eau grâce à des cartouches anti-odeurs, et les urinoirs à faible consommation, limitant l'usage à 1,9 litre par chasse selon le Code de construction du Québec. Les toilettes à faible débit et à double chasse sont également mises en avant pour réduire le gaspillage, représentant un tiers de la consommation d'eau dans les bâtiments institutionnels. Enfin, les capteurs automatiques pour éviers et toilettes sont proposés pour améliorer l'hygiène, bien que leur usage puisse parfois augmenter la consommation d'eau en raison de déclenchements involontaires.

Ces solutions, proposées dans le rapport de stage, démontrent le potentiel de certaines infrastructures grises pour réduire l'empreinte hydrique du bâtiment tout en assurant une utilisation plus durable des ressources.

1.2.3.1. Réutilisation des eaux dans les bâtiments

La mise en œuvre des sources alternatives pour la gestion de l'eau urbaine, y compris les systèmes de collecte des eaux pluviales, s'est développée au cours des années dernières, en particulier de façon décentralisée (Campisano et al., 2017).

La performance de ces alternatives durables peut être analysée selon différents critères :

- Les aspects techniques : les technologies, les infrastructures et la qualité de l'eau (Friedler, 2004; Ghaitidak & Yadav, 2013; Lee, 2004; Matos et al., 2015; Ward et al., 2010) ;
- Les aspects sociaux : l'acceptation des utilisations finales des eaux grises recyclées et la volonté de payer (de Araújo Batista et al., 2014; Dobrowksy et al., 2014; Prathapar et al., 2005; Ward et al., 2013) ; et

- Les performances financières : telles que les coûts, les économies, la période de récupération des coûts, la valeur actuelle nette et le taux de rendement interne (García-Montoya et al., 2015; Ghisi & de Oliveira, 2007; Juan et al., 2016; Meléndez-Pérez et al., 2019; Roebuck et al., 2011).

1.2.3.2. Réservoirs d'eau souterrains

La mise en place de réservoirs souterrains pour la collecte des eaux de pluie est souvent obligatoire dans les villes pour limiter les débits de pointe dans les systèmes d'égout. Cependant, ces infrastructures coûteuses et monofonctionnelles ne constituent pas des solutions répondant à tous les piliers du développement durable. Les réservoirs souterrains visant l'économie d'eau dans les bâtiments s'approchent davantage de cette solution. Ghisi et al. (2007) ont étudié le potentiel d'économies d'eau des systèmes de collecte d'eau de pluie au Brésil (Amérique du Sud) et ont trouvé un potentiel moyen d'économies d'eau potable de 12 à 79 % par an pour les 195 villes analysées (Ghisi et al., 2007). En plus, Villarreal et Dixon (2005) ont découvert qu'une économie d'eau provenant du réseau de distribution de la ville de Norrköping, en Suède, de 30 % peut être réalisée en utilisant un réservoir de 40 m³ (uniquement pour les toilettes et la machine à laver) (Villarreal & Dixon, 2005).

Malgré les résultats positifs de nombreuses études, une réticence persiste au sein de la communauté à adopter la collecte des eaux pluviales à grande échelle pour une utilisation dans les bâtiments (Imteaz et al., 2011). Plusieurs facteurs expliquent cette hésitation. En plus du manque d'informations sur l'efficacité de ces systèmes et le volume de stockage nécessaire pour répondre aux exigences de performance dans des conditions spécifiques (Imteaz & Shanableh, 2009), les coûts initiaux élevés, l'absence d'incitations économiques attractives et des cadres réglementaires parfois limitants jouent également un rôle important. Ces obstacles freinent l'adoption de ces solutions malgré leur potentiel pour une gestion plus durable des ressources en eau.

1.2.4. Phytotechnologies à mettre en place au Carrefour de l'eau

Dans le cadre du projet du Carrefour de l'eau, la décision a été prise d'opter pour diverses phytotechnologies dans le but de circulariser la gestion de l'eau de façon à la rendre plus durable sur le terrain, sur les bâtiments et même à l'intérieur de ces derniers. La présente étude portera principalement sur trois phytotechnologies ayant été jugées stratégiques dans le contexte de notre étude, soit les toits végétalisés, les murs végétalisés et les biorétentions (Figure 4). Opter pour ces technologies permettra d'exploiter le potentiel des plantes et de la végétation pour améliorer la durabilité de l'environnement bâti. Chacune des phytotechnologies choisies présente des avantages uniques et différents, à savoir principalement : la réduction des îlots de chaleur, la gestion de l'eau pluviale, l'accroissement de la biodiversité, l'amélioration de la qualité de vie et du bien-être, la réduction des gaz à effet de serre et l'atténuation des nuisances sonores (Fortin Faubert & Hénault-Ethier, 2023).

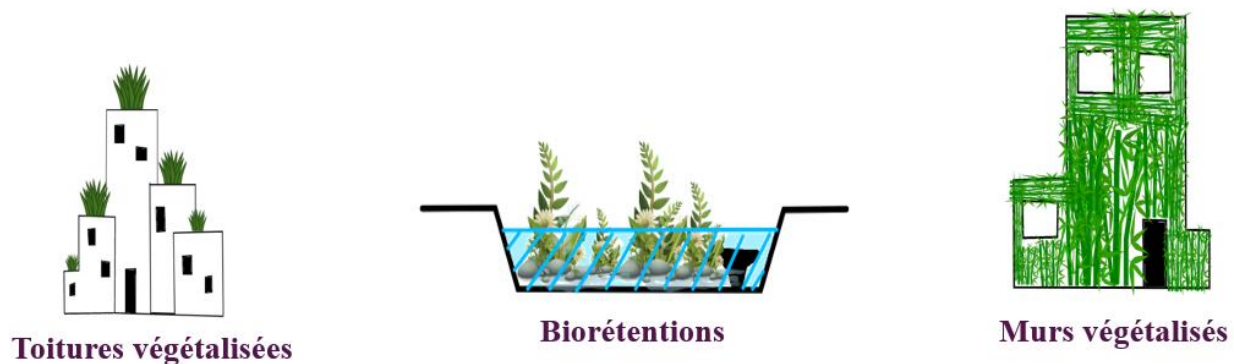


Figure 4 : Les trois phytotechnologies choisies dans le cadre du projet du Carrefour de l'eau

1.2.4.1. Toitures végétalisées

Comme défini par la Société Québécoise de Phytotechnologies (SQP, 2015), tout type de toiture recouverte de végétaux est une toiture végétalisée. Ces toits fournissent une certaine isolation thermique et acoustique, mais ne remplacent généralement pas entièrement les isolants conventionnels. Conçues de manière anthropique, elles reproduisent partiellement des conditions naturelles tout en s'intégrant à des structures bâties. Elles offrent une isolation thermique et acoustique partielle grâce à une structure artificielle, conçue pour reproduire un environnement naturel sur une construction humaine, composés de membranes, de substrat artificiel (le milieu de culture) et d'assemblages de plantes placés au sommet de bâtiments ou d'autres structures (Sutton & Lambrinos, 2015).

Il existe trois types de toits végétalisés : intensifs, semi-intensifs et extensifs.

a. Toits végétalisés intensifs

Ces toits se distinguent par une épaisseur de substrat supérieure à 30 cm, qui permet l'utilisation d'une plus grande diversité de plantes (SQP, 2015). Ce type de toiture est généralement accessible aux usagers et permet, ainsi, l'augmentation des superficies récréatives et utilitaires (SQP, 2015). Ils peuvent aussi accueillir et fournir des ressources alimentaires pour des cortèges d'arthropodes variés (Pétremand et al., 2015). Un toit intensif peut nécessiter ou non un système d'irrigation (SQP, 2015). De plus, ces toits peuvent être aménagés en potagers urbains, offrant ainsi des opportunités de culture locale et durable en plus d'un espace vert additionnel pour les usagers. Ces potagers urbains peuvent contribuer, également, à l'éducation environnementale et à la sensibilisation des usagers aux pratiques agricoles écologiques.

b. Toits végétalisés extensifs

Le substrat de ces toits est léger et mince. Ils se distinguent par une profondeur de 5 à 15 cm, un coût relativement faible et une sélection d'espèces végétales limitées (SQP, 2015). Les végétaux choisis pour ces toits sont souvent de petite taille, rustiques et résistants à la sécheresse. Ce type de toits végétalisés ne nécessite généralement pas d'irrigation, peut être peu dés herbé, vu leur tolérance des adventices, et, contrairement aux toits intensifs, est non accessible au public (Hardy, 2014).

c. Toits végétalisés semi-intensifs

Pour les toits semi-intensifs, la profondeur du substrat de croissance se situe entre 15 et 30 cm (SQP, 2015). Leurs caractéristiques se situent entre celles des toitures végétalisées extensives et intensives (Hardy, 2014).

d. Bénéfices des toits végétalisés

D'une part, plusieurs études ont estimé que l'effet moyen des îlots de chaleur urbains à l'échelle mondiale pourrait avoir contribué à une augmentation de 0,1°C des températures mondiales depuis l'ère préindustrielle (Easterling et al., 1997; Hansen et al., 1999; Jones et al., 1990; Parker, 2006; Peterson, 2003). Transformer tous les toits du monde en toits blancs, en se basant uniquement sur leur capacité à réfléchir la lumière solaire (albédo), pourrait réduire la température mondiale moyenne dans les zones densément peuplées de 0,02°C, mais causerait un réchauffement global de 0,07°C, selon des calculs faits par Jacobson and Ten Hoeve (2012). D'autre part, les toitures végétalisées bleues, qui consistent à stocker l'eau de pluie sur le toit dans l'objectif de contrôler le ruissellement et réduire les risques d'inondation causés par le refoulement des conduites d'eaux pluviales (BDC, s.d), sont une pratique de développement à faible impact très efficace pour la gestion des eaux pluviales. Elles peuvent jouer un rôle crucial dans les installations à faible impact des systèmes de drainage urbain modernes, grâce à leur capacité à retenir, ralentir et réduire le volume de ruissellement (Shafique et al., 2016). À Ottawa, en Ontario, Liu et Baskaran (2003) ont prouvé que les performances thermiques d'un système de toiture peuvent être améliorées grâce à l'ombrage, l'isolation, l'évapotranspiration et la masse thermique en utilisant un toit végétalisé. Les toitures végétalisées permettent de réaliser des économies d'énergie en réduisant la demande en climatisation des espaces intérieurs (Liu & Baskaran, 2003).

Les eaux pluviales peuvent entraîner des inondations, causant des dégâts difficilement réparables, si elles ne sont pas bien gérées. L'implantation des toits végétalisés vient répondre à la problématique de la gestion des eaux pluviales, notamment en agissant comme une éponge qui retient et retarde le ruissellement et les débits de pointe dans les canalisations d'égout. La végétation et son substrat de croissance sur le toit retiennent plus de précipitations que les toits traditionnels, imperméables, permettant à l'eau de s'écouler plus lentement. En plus, une partie des précipitations finit par retourner dans l'atmosphère par évapotranspiration (Bates et al., 2011; Berndtsson et al., 2006; Morgan et al., 2013). Les caractéristiques de ces toits dépendent principalement

du type de végétation choisie, du volume total du substrat, de sa composition et de la nature de l'événement pluvieux (Gregoire & Clausen, 2011; Schroll et al., 2011). Comme indiqué dans le Tableau 1, les toits végétalisés, en fonction de leur épaisseur, réduisent significativement le coefficient de ruissellement par rapport aux toits standards. De façon générale, un substrat plus épais avec une capacité de rétention de l'eau plus élevée permettra de retenir davantage d'eau et de ralentir son écoulement. Si les caractéristiques du bâtiment le permettent, ces bénéfices seront recherchés afin de réduire le débit de pointe dans les canalisations d'eaux pluviales menant à des rejets à l'égout. Il est à noter que la température globale d'une ville peut être réduite en été lorsque suffisamment de toitures végétalisées sont implantées (Smith & Roebber, 2011). De ce fait, un bâtiment individuel peut réduire ses besoins en refroidissement estival et en chauffage hivernal, vu que les toitures végétalisées agissent comme un isolant (Jim & He, 2010).

Tableau 1 : Coefficients de ruissellement selon les types de toits (Ville de Québec, 2017)

Surface	Coefficient *
Toit standard	0,95
Toit végétal d'une épaisseur de moins de 100 mm	0,50
Toit végétal d'une épaisseur de 100 mm à 200 mm	0,30
Toit végétal d'une épaisseur de 210 mm à 500 mm	0,20
Toit végétal d'une épaisseur de 500 mm et plus	0,10

* Le coefficient de ruissellement est le rapport entre la hauteur d'eau qui a ruisselé sur une surface donnée et la hauteur d'eau précipitée (pluie brute)

Un coefficient de ruissellement plus bas signifie que la surface retient plus d'eau, réduisant ainsi le volume d'eau qui s'écoule vers les égouts.

e. Étude réglementaire

La Régie du bâtiment du Québec (RBQ) classe un toit végétalisé comme étant intégré à la toiture du bâtiment et donc soumis aux réglementations du Code de construction (Gouvernement du Québec, 2015).

Selon la RBQ, les conditions de base de la construction des toitures végétalisées sont les suivantes :

- Le bâtiment est de construction incombustible ;
- Le toit sur lequel est aménagé un toit végétalisé n'est pas à plus de 46 m du niveau moyen du sol ;
- La pente du toit n'excède pas 17 % ;
- La couverture sur laquelle est construit le toit végétalisé n'est pas de type multicouche (asphalte et gravier) ;

- Le toit végétalisé peut être de type extensif (substrat de croissance d'une épaisseur d'au plus 150 mm), semi-intensif (substrat de croissance d'une épaisseur entre 150 mm et 300 mm) ou intensif (substrat de croissance excédant 300 mm). Toutefois, la hauteur maximale des plantes matures ne doit pas dépasser 1200 mm, et le toit végétalisé doit être essentiellement plat : la création de monticules ou de collines n'est pas permise ;
- Le service incendie de la municipalité doit être consulté dès la planification du projet au sujet de sa réglementation particulière et des besoins pour la lutte contre l'incendie ;
- Dans le cas d'un bâtiment existant, les critères techniques de la section 9 du guide des critères techniques visant la construction de toits végétalisés (Gouvernement du Québec, 2015) doivent être respectés, en plus des critères des sections 1 à 8 du même guide.

La réglementation détaillée est disponible dans le site de la RBQ dans le document « Critères techniques visant la construction de toits végétalisés » (Gouvernement du Québec, 2015).

f. Limites et contraintes

Malgré des études de recherche favorables et les initiatives d'organisations promouvant la construction durable, le développement des toitures végétalisées reste freiné par plusieurs obstacles (Vijayaraghavan, 2016). La Figure 5 présente les principales contraintes des toitures végétalisées.

Les toitures végétalisées sont souvent considérées comme des investissements offrant des avantages à long terme mais générant des dépenses à court terme (Bianchini & Hewage, 2012a). L'installation d'une toiture végétalisée nécessite un investissement significatif, dont le coût varie en fonction du type de toiture végétalisée, de l'emplacement, de la main-d'œuvre et de l'équipement. Cependant, le rendement de cet investissement est soit inconnu, soit très complexe à estimer (Vijayaraghavan, 2016). Il a été démontré qu'un retour sur investissement était atteint en 11 ans sur une seule toiture végétalisée dans le Michigan lorsque les coûts d'installation peu élevés et les avantages environnementaux élevés étaient pris en compte (Clark et al., 2006). Niu et al. (2010) ont constaté que le coût de l'installation des toitures végétalisées est de 27 % plus élevé que celui des toits conventionnels. Cependant, en tenant compte des avantages sur toute la durée de vie (40 ans) d'une toiture végétalisée, la valeur actuelle nette (VAN) d'une toiture végétalisée est d'environ 25 % inférieure à celle d'un toit conventionnel. Lee (2004) a réalisé une analyse du cycle de vie d'une toiture végétalisée dans l'Oregon en tenant compte des avantages tels que la prolongation de la durée de vie du toit, les économies d'énergie et la réduction des frais d'assainissement pluvial sur 60 ans, et a quand même constaté que la toiture végétalisée était 7 % plus chère que le toit conventionnel sur cette période. Carter and Keeler (2008) ont mené une analyse coûts-avantages (BCA) pour le cycle de vie d'un système de toiture verte extensive dans un bassin versant urbain et ont indiqué que sa VAN est de 10 % à 14 % plus élevée que celle d'un toit traditionnel.

Cependant, la plupart des études ont ignoré certains aspects dans l'analyse coûts-avantages, ce qui a biaisé les résultats finaux (Vijayaraghavan, 2016). Par exemple, l'amélioration de la qualité de l'air et la réduction de l'effet d'îlot de chaleur urbain sont des problèmes extrêmement complexes à quantifier (Vijayaraghavan, 2016). D'autres avantages des toitures végétalisées tels que l'esthétique, la préservation écologique et la réduction du bruit sont centrés sur l'individu et ne se traduisent pas par des économies directes pour les propriétaires de bâtiments (Vijayaraghavan, 2016).

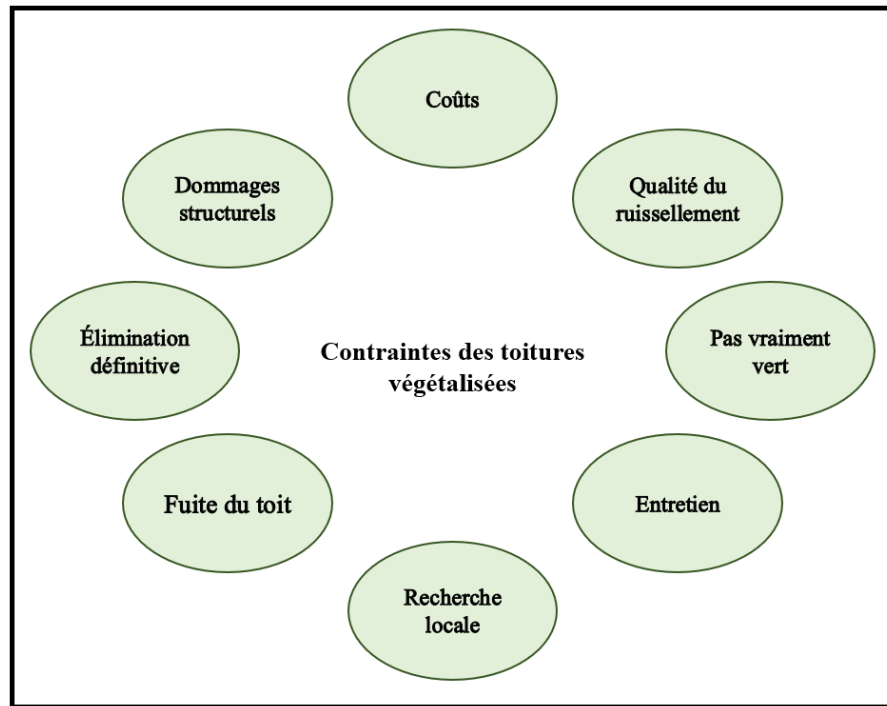


Figure 5 : Contraintes générales des toitures végétalisées selon la perspective du public (Vijayaraghavan, 2016)

1.2.4.2. Murs végétalisés

Un mur végétalisé est un mur couvert de végétaux; ces derniers peuvent être des plantes grimpantes ou des végétaux enracinés dans un support muni d'un système d'irrigation intégré (SQP, 2022). Pour mieux comprendre les différents types des murs végétalisés, la Figure 6 présente les catégories ainsi que les sous-catégories de ces derniers.

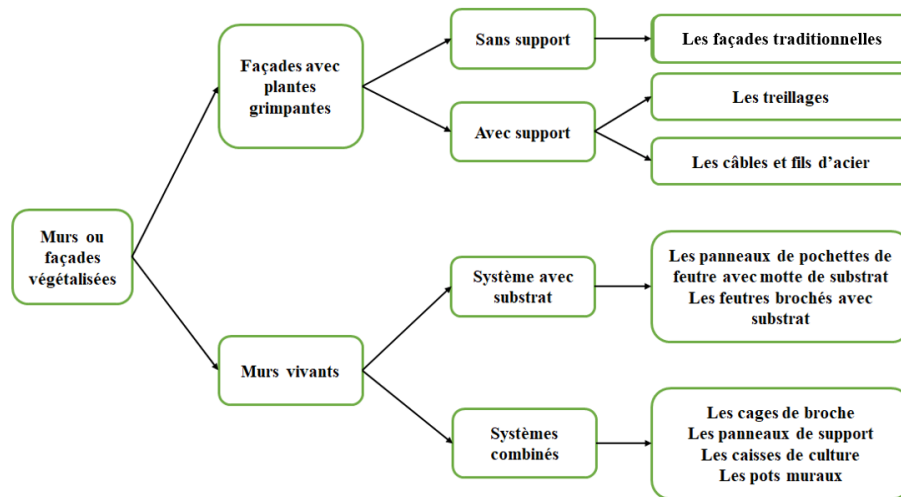


Figure 6 : Catégories et sous-catégories des murs végétalisés (adapté de Manso et Castro-Gomes, 2015)

a. Bénéfices des murs végétalisés

Les murs végétalisés, ou murs verts, visent à fournir des bénéfices environnementaux (Francis, 2011) en plus de l'aspect esthétique du végétal en tant que matériel de construction (Riley, 2017). En ce qui concerne les bénéfices environnementaux des murs végétalisés extérieurs, on parle principalement de la capacité des plantes à purifier l'air ainsi que l'eau retenue, l'amélioration de l'isolation des bâtiments et la rétention des eaux de pluie ; ce qui peut engendrer le ralentissement du ruissellement et favorise l'évapotranspiration ou, dans des cas extrêmes, aller jusqu'à la diminution des risques d'inondations (Francis & Lorimer, 2011; Medl et al., 2017). Les murs végétalisés intérieurs peuvent aussi contribuer à améliorer la qualité de l'air ambiant des bâtiments (SQP, 2022) ; ils peuvent être alimentés en eau de pluie si des systèmes de récupération des eaux pluviales sont disponibles dans le bâtiment. Pourtant, la littérature scientifique et technique en matière de murs verts connaît encore plusieurs lacunes (Baudoux, 2018).

b. Entretien des murs végétalisés

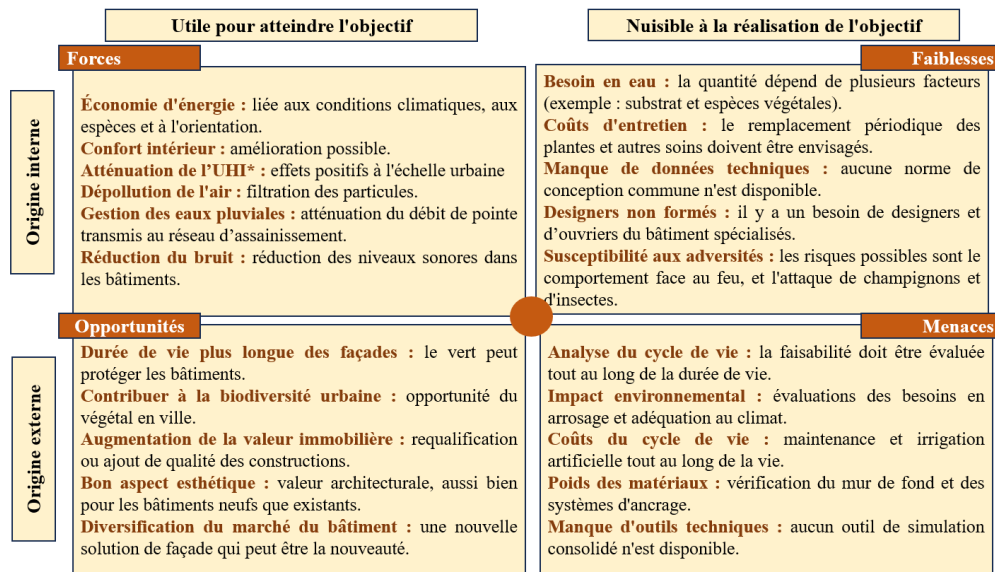
Les murs végétalisés ont leurs propres caractéristiques, avec des avantages et des inconvénients liés au potentiel esthétique, aux coûts et aux besoins d'entretien (Manso & Castro-Gomes, 2015). Les façades végétalisées qui sont plantées directement sur le mur, par exemple, sont une solution durable et économique (Manso et al., 2013; Perini et al., 2011). Aussi, les plantes grimpantes sont rustiques et peuvent ne nécessiter aucun arrosage ni engrais, mais il faut quand même s'assurer : qu'elles n'atteignent pas les tuiles ou ardoises des murs, ni les gouttières, que les feuilles mortes ne freinent pas l'évacuation des eaux pluviales, que la végétation soit taillée régulièrement et qu'elles ne guident pas d'espèces indésirables ou invasives vers les espaces intérieurs (Bouattour & Alain, 2009). Il est recommandé de garder le sol humide pendant une année

après la plantation, en arrosant au besoin en profondeur le matin; ensuite, il est possible d'arroser ponctuellement en cas de sécheresse prolongée (Bernier, 2011). Lorsqu'on se trouve face à la nécessité de remplacer les plantes des murs végétalisés, il est possible de rencontrer certaines difficultés pour assurer la continuité de la végétation (Manso & Castro-Gomes, 2015).

c. Limites et contraintes

Prédire avec précision les résultats économiques des murs végétalisés reste un défi. Cependant, plus il y a d'études visant à évaluer leur valeur économique en utilisant des hypothèses et des tests contrôlés, mieux leur potentiel et leur impact sont compris (Teotónio et al., 2021).

Lorsqu'on se réfère à l'analyse FFOM (Forces, Faiblesses, Opportunités et Menaces), les opportunités et les forces principales des murs végétalisés mettent en lumière les avantages largement établis par les chercheurs (Figure 7). Ces éléments deviendront d'autant plus significatifs compte tenu de l'augmentation de la température mondiale et de la nécessité croissante de réaménager les centres urbains (Ascione et al., 2020).



*UHI : îlot de chaleur urbain (*Urban Heat Island*)

Figure 7 : Matrice FFOM pour les systèmes verticaux verts (Ascione et al., 2020)

1.2.4.3. Cellules de biorétention

Les cellules de biorétention sont des systèmes ayant pour fonction de filtrer, retenir, ralentir, infiltrer et évaporer l'eau de pluie et l'eau de ruissellement (SQP, 2018). Elles ont pour objectif la collecte de ces eaux afin de retarder leur arrivée dans le réseau d'égout pluvial. Elles peuvent ainsi réduire le volume et le débit de pointe des eaux de ruissellement en plus de diminuer la fréquence des épisodes de surverses et la pollution des

cours d'eau récepteurs (SQP, 2018). Selon Vijayaraghavan (2021), les principaux composants qui constituent les systèmes de biorétention sont la végétation, en surface, suivie du substrat (milieu de croissance), du matériau de drainage et du drain souterrain. La conception des biorétentions, en particulier la sélection de leurs composants, dépend fortement des caractéristiques hydrologiques et de la pollution des eaux pluviales à traiter, des valeurs guides fixées pour les effluents ainsi que de la disponibilité locale des constituants (Vijayaraghavan et al., 2021).

Selon une étude de Trowsdale and Simcock (2011), les systèmes de biorétention commençaient, en date de l'étude, à être utilisés pour atténuer les effets négatifs, environnementaux et écologiques, des eaux pluviales urbaines. Ces auteurs décrivent un système de biorétention recevant l'eau d'une zone faiblement industrialisée et d'une route très fréquentée, sa conception, sa construction et les suivis qui y ont été réalisés afin de comprendre les changements dans la physique du sol ainsi que l'efficacité hydrologique et hydro-chimique. Dans leur cas d'étude, les sols du système de biorétention ont été conçus pour avoir un potentiel élevé d'élimination des métaux et une perméabilité élevée pour compenser le volume de biorétention sous-dimensionné. Ce cas d'étude est particulièrement pertinent pour le Carrefour de l'eau, car il illustre comment un design adapté peut optimiser l'élimination des métaux et la perméabilité des sols, même lorsque le volume de biorétention est limité.

a. Bénéfices de la biorétention

La mise en place de systèmes de biorétention a été souvent motivée par un certain nombre de caractéristiques bénéfiques de ces systèmes : outre leur efficacité attendue pour réduire les débits pluviaux et retenir les polluants, les unités de biorétention peuvent être intégrées dans les aménagements urbains et assurer un traitement à la source (Roy-Poirier et al., 2010). La biorétention offre plusieurs avantages tels que le potentiel d'amélioration de la qualité du ruissellement ainsi que la gestion du volume de ruissellement, la flexibilité d'intégration dans les paysages urbains, l'amélioration de la biodiversité et de l'esthétique et l'atténuation des effets des îlots de chaleur urbains (Vijayaraghavan et al., 2021).

En plus, l'installation de ces systèmes est peu coûteuse et ils nécessitent peu d'entretien après l'installation. Le coût de la construction d'une installation de biorétention qui traite les eaux de ruissellement d'un stationnement de 0,3 ha a été estimé à 1993 USD (Roy-Poirier et al., 2010). Pourtant, Vijayaraghavan et al. (2021) avancent que les coûts liés à la construction, à l'exploitation et à la maintenance des systèmes de biorétention sont très variables et dépendent fortement des objectifs de conception, de la nature des sites d'installation, du prix du terrain, des frais de permis, etc. ; une composante souvent négligée mais importante est le coût d'opportunité de l'espace ou du terrain occupé par la pratique de biorétention (Thurston, 2006).

b. Entretien de la biorétention

Les mécanismes et les pratiques d'entretien des systèmes de biorétention ainsi que les connaissances au sujet des performances à long terme et du coût de leur cycle de vie sont toujours en évolution (Davis et al., 2009). À titre d'exemple, dans une étude de Davis et al. (2009), deux ensembles de cellules de biorétention ont été réparés en creusant les 75 mm supérieurs du matériau de remplissage, augmentant ainsi le volume de stockage de la surface de biorétention de près de 90 % et le taux d'infiltration jusqu'à un facteur de 10. Le volume de débordement a diminué suite à la réparation, passant d'une gamme de 35 à 37 % à une gamme de 11 à 12 % selon les événements pluvieux. Presque toutes les charges polluantes des effluents sortant des cellules après réparation étaient inférieures à celles avant réparation (Davis et al., 2009). Ces résultats soulignent l'importance cruciale de l'entretien régulier pour optimiser durablement les performances des systèmes de biorétention.

c. Étude réglementaire

Pour assurer une gestion efficace des eaux pluviales, les normes de conception des biorétentions jouent un rôle crucial en garantissant la cohérence, la fiabilité et la sécurité des systèmes de drainage urbains. Ces normes contribuent à limiter les risques d'inondation, à protéger la qualité des eaux et à favoriser l'infiltration de l'eau dans les sols, réduisant ainsi la pression sur les réseaux d'égout. L'établissement de ces exigences permet également de s'adapter aux spécificités locales des précipitations et d'optimiser les performances des cellules de biorétention en fonction des besoins de chaque ville.

Différentes villes ont établi des exigences spécifiques pour la quantité d'eau infiltrée par les cellules de biorétention. Ces exigences varient en fonction des politiques locales de gestion des eaux pluviales. Le tableau ci-dessous (Tableau 2) présente quelques exemples de ces exigences dans diverses villes du Canada.

Tableau 2 : Exemples d'exigences en matière de quantité d'eau infiltrée par les biorétentions (Collerette & Roy, 2023)

Juridiction	Règlement	Quantité (hauteur d'infiltration en mm)
Communauté urbaine de Québec	RCI	6 mm (minimum) (50 % des pluies)
Montréal	20-030	11 mm (60 % des pluies)
Toronto	Wet Weather Master Plan	5 mm obligatoire - 10 mm / 25 mm facultatif (volontaire pour Toronto Green Standard – Note toits verts obligatoire pour les nouveaux bâtiments en toits plats)
Vancouver	Rainwater management	24 mm
Philadelphie		38,1 mm programme orienté pour le contrôle des surverses
Chicago		12,5 mm ou réduire les surfaces imperméables de 15% en redéveloppement
Paris		16 mm (94% des pluies) avec règles complexes en cas d'exception
Lyon		15 mm (80% des pluies annuelles) avec règles en cas d'exception

Ces exigences influencent directement la conception des infrastructures locales en imposant des critères spécifiques pour les performances des biorétentions, notamment en termes de capacité d'infiltration, pour éviter les débordements et limiter les impacts des fortes pluies sur les réseaux d'égout. Elles varient souvent d'une municipalité à l'autre en raison de différences climatiques, topographiques et d'urbanisation ainsi que des priorités locales en matière de gestion de l'eau. Cette adaptation locale permet aux villes de mieux répondre aux particularités de leurs territoires et aux défis environnementaux uniques de chaque région, optimisant ainsi la durabilité et la résilience de leurs systèmes d'eaux pluviales.

d. Limites et contraintes

Dans de nombreux cas, l'utilisation des biorétentions comme mesure de gestion des eaux pluviales n'a pas pleinement atteint ses objectifs, les avantages et fonctions escomptés n'étant pas complètement réalisés (Fondation David Suzuki, 2018; Vijayaraghavan et al., 2021). Diverses lacunes dans les connaissances subsistent, ce qui entrave les progrès de la technologie de biorétention pour assurer un développement durable à faible impact, en particulier pour le contrôle et le traitement de grands volumes d'eaux pluviales aux caractéristiques diverses (Vijayaraghavan et al., 2021).

Plusieurs objectifs de la gestion des eaux pluviales à l'aide de biorétentions restent difficiles à réaliser. Parmi les principaux défis, on note la gestion des volumes importants de ruissellement. En effet, bien que les biorétentions soient conçues pour capturer et infiltrer les eaux de pluie, elles peuvent atteindre leurs limites lorsque les volumes de ruissellement excèdent la capacité de la cellule. Cela peut entraîner des débordements et une gestion inefficace de l'eau, particulièrement dans les zones urbaines où l'imperméabilisation des sols est

élevée. Ce phénomène est souvent exacerbé par des pluies intenses et fréquentes, un défi pour lequel les technologies de biorétention doivent encore évoluer pour assurer une gestion adéquate de ces volumes accrus.

De plus, les biorétentions peuvent avoir des effets indésirables sur le sol, tels que l'érosion autour des cellules de végétation ou le compactage du sol dû à un excès d'eau. Ces problèmes affectent la longévité des installations et leur capacité à traiter l'eau efficacement. Les problèmes esthétiques sont également soulevés, notamment dans les projets où la végétation n'est pas correctement entretenue. L'absence de diversité végétale, les mauvaises herbes ou la dégradation des plantes peuvent affecter non seulement l'apparence des systèmes de biorétention, mais aussi leur efficacité, car la végétation joue un rôle crucial dans le traitement des eaux par absorption et filtration.

1.2.5. Entretien des phytotechnologies

L'entretien des phytotechnologies, notamment les toitures végétalisées, murs végétalisés et cellules de biorétention, est une composante cruciale pour garantir la pérennité et l'efficacité de ces infrastructures dans la gestion durable de l'eau en milieu urbain.

Dans un premier temps, un stage a été réalisé au sein de la Société Québécoise de Phytotechnologies, ce qui a permis d'acquérir des connaissances pratiques sur l'entretien et l'application des phytotechnologies. Une fiche technique a été rédigée, mettant en avant les pratiques d'entretien des phytotechnologies. Cette fiche s'est fondée sur une revue de littérature exhaustive, combinée à des entrevues avec des experts du domaine. Cette démarche a permis d'obtenir des informations précieuses sur les meilleures pratiques et les défis associés à l'entretien des cellules de biorétention ainsi que des toits et des murs végétalisés.

Pour les toitures et murs végétalisés, une représentante technique spécialisée a partagé son expertise au cours d'une entrevue de 1h30, incluant un suivi et des corrections détaillées tout au long de la rédaction. Ce contenu a ensuite été validé par un agronome et enseignant en horticulture. En ce qui concerne les cellules de biorétention, une ingénieure en hydrologie urbaine et infrastructures vertes a également apporté son savoir-faire au cours d'une entrevue d'une heure, puis a assuré un suivi et des corrections successives, contribuant ainsi à l'élaboration de recommandations d'entretien spécifiques et fiables pour ces systèmes. Ces savoirs ont été compilés et publiés dans une fiche technique dédiée à l'entretien des phytotechnologies (SQP, 2024).

L'inclusion de ces informations dans la revue de littérature du document a servi de base pour les choix ultérieurs concernant les phytotechnologies à utiliser dans le projet du Carrefour de l'eau. La collaboration avec des experts a non seulement enrichi la compréhension des exigences spécifiques de chaque technologie,

mais a également assuré que les recommandations étaient alignées avec les connaissances les plus récentes dans le domaine et les besoins des promoteurs et éventuels usagers du Carrefour de l'eau.

1.2.5.1. Toitures végétalisées

L'entretien des phytotechnologies, incluant les toitures végétalisées, murs végétalisés et cellules de biorétention, est essentiel pour assurer leur efficacité à long terme et leur intégration harmonieuse dans les infrastructures urbaines. Cette section s'appuie principalement sur les informations recueillies lors d'entrevues approfondies menées en 2023 avec des spécialistes du domaine.

a. Irrigation

Système d'irrigation

Il existe plusieurs variétés de systèmes d'irrigation adaptés aux toitures végétalisées, chacun présentant ses propres avantages et inconvénients. Le choix du système idéal dépend des exigences spécifiques de la végétation ainsi que des conditions climatiques locales, telles que l'exposition au soleil, la vitesse du vent et la disponibilité en eau (pluviométrie). Parmi les méthodes les plus couramment utilisées :

- **L'irrigation par aspersion** : utilise des tuyaux perforés pour disperser l'eau sur toute la surface du toit. Cette approche fonctionne bien sur les toits plats ou à faible pente, mais peut-être moins efficace en présence de vents forts (Bouras-Chekired, 2022).
- **L'irrigation goutte-à-goutte** : fournit de l'eau directement aux racines des plantes via des tuyaux perforés. Cette méthode est efficace pour les toits inclinés et ceux comportant différentes zones de plantation, nécessitant ainsi un système de valves et de répartition (Lejoyeux, 2018).
- **L'irrigation par arrosage racinaire localisé** : implique d'immerger les racines des plantes dans l'eau. Elle est adaptée aux bacs de plantation surélevés.
- **L'irrigation par récupération d'eau de pluie** : utilise l'eau collectée des précipitations pour arroser les plantes sur le toit, réduisant ainsi les coûts. Toutefois, un complément d'irrigation classique peut être nécessaire en cas de manque d'eau.
- **L'irrigation manuelle** : consiste à arroser localement à l'aide d'un tuyau d'arrosage, souvent utilisée lors de la période d'implantation des plantes. Cette méthode nécessite le déplacement fréquent des arroseurs et peut être employée temporairement.

Le choix du système doit prendre en compte la forme de la toiture ; par exemple, le goutte-à-goutte convient mieux aux toits plats. Les deux systèmes doivent être intégrés discrètement dans la végétation, de manière à être peu visibles ou camouflés parmi les plantes. L'irrigation racinaire peut également être ajoutée au besoin.

En règle générale, les systèmes d'irrigation sont automatisés, souvent avec un détecteur de pluie, pour simplifier le processus, réduire la main-d'œuvre requise, optimiser l'utilisation de l'eau et favoriser la croissance des plantes.

Planification de l'irrigation

Il est crucial de planifier l'irrigation en tenant compte des besoins en eau des plantes et des conditions météorologiques locales. Opter pour un arrosage le matin ou le soir réduit l'évaporation et diminue le risque de brûlure des feuilles, mais ces précautions ne sont pas nécessaires dans le cas de l'irrigation goutte-à-goutte. Surveiller régulièrement la météo est essentiel, surtout en cas de sécheresse prolongée, pour garantir un approvisionnement adéquat en eau. Il est également important de noter que les capteurs d'humidité, qui contrôlent l'activation des systèmes d'irrigation, mesurent le niveau d'humidité du substrat plutôt que la quantité de précipitations. Ainsi, l'irrigation est déclenchée en fonction des besoins réels en eau des plantes, optimisant l'efficacité de l'arrosage sans se baser uniquement sur les prévisions météorologiques.

Lors de la planification de l'irrigation des toits végétalisés, plusieurs facteurs doivent être pris en compte :

- **Besoins en eau des plantes** : chaque espèce végétale a des exigences en eau différentes. Il est donc crucial de connaître ses besoins spécifiques pour une irrigation adaptée. Par exemple, les besoins en eau d'un Sedum sont moindres que ceux de plusieurs herbacées (Cotoz et al., 2023; Vasl et al., 2017).
- **Climat nordique** : les conditions météorologiques influent sur les besoins en eau des plantes. Les prévisions locales, ainsi que des facteurs tels que la dessiccation hivernale, la couverture de neige et les vents en altitude, doivent être pris en considération (Collins et al., 2017; Johannessen et al., 2018).
- **Gestion de l'eau** : il est impératif de réduire les pertes d'eau, souvent dues au vent (dérive) ou à une installation inadéquate du système d'irrigation (ruissellement, arrosage inapproprié, etc.). Cela nécessite une combinaison de méthodes d'irrigation efficaces et d'une planification minutieuse (Saraeian et al., 2022).

De plus, lors de la conception d'un toit végétalisé, il est essentiel de prévoir des robinets pour faciliter l'arrosage. Étant donné que le Carrefour de l'Eau sera un bâtiment neuf conçu pour une gestion efficace de l'eau, l'intégration de points d'eau pour l'irrigation des toits végétalisés sera planifiée dès la conception, minimisant ainsi les besoins en interventions ultérieures.

Il est crucial de surveiller attentivement l'état des plantes, car une irrigation excessive peut entraîner des problèmes graves tels que l'asphyxie des racines, la pourriture et les maladies fongiques (Du et al., 2019).

Ajuster les volumes et les débits des systèmes d'irrigation en fonction des besoins des plantes est donc essentiel pour assurer leur santé et leur croissance optimales.

Contrôle de l'irrigation

Pour maintenir une irrigation adéquate des toitures végétalisées, il est essentiel de surveiller attentivement le niveau d'humidité du sol, veillant à ce qu'il soit suffisant pour la croissance des plantes sans être excessif. Le substrat est spécialement conçu pour éviter les excès d'eau, avec un système de récupération pour l'excès et un drainage pour évacuer le trop-plein. Voici quelques points clés à considérer pour un contrôle efficace de l'irrigation :

- **Qualité de l'eau :** l'eau utilisée pour l'irrigation doit être de bonne qualité pour préserver la santé des plantes (Barr et al., 2017; Lim et al., 2021). Il est important de vérifier régulièrement des paramètres tels que le pH et la salinité, et de s'assurer que l'eau n'est pas contaminée ou stagnante, surtout dans le cas d'un réservoir.
- **Surveillance régulière :** une surveillance fréquente des toits végétalisés est cruciale (Agrawal & Yadav). Cela implique d'inspecter l'état des plantes pour déterminer si elles ont besoin d'être arrosées, ainsi que de vérifier les systèmes d'irrigation pour détecter d'éventuels dysfonctionnements, comme des buses obstruées par des dépôts. Les signes de sous ou sur-arrosage peuvent être similaires, donc il est essentiel de vérifier le substrat au niveau des racines pour évaluer correctement les besoins en eau.

En suivant ces mesures, on peut assurer un contrôle efficace de l'irrigation des toitures végétalisées, favorisant ainsi une croissance saine et robuste des plantes.

b. Fertilisation

L'objectif premier de la fertilisation est d'assurer la croissance et la santé des plantes, garantissant ainsi le maintien d'une couverture végétale sur le toit. Le choix des engrais doit être effectué avec soin, en tenant compte des besoins spécifiques des plantes implantées. L'ajout de compost de qualité à faible dose peut être bénéfique. Les points importants à retenir concernant la fertilisation des toitures végétalisées sont les suivants :

- **Types de fertilisants :** les fertilisants utilisés doivent être spécifiquement adaptés aux plantes présentes, telles que les sédums, les graminées (*calamagrostis*, *deschampsia*, etc.) et certaines vivaces (*allium*, *achillée*, etc.) (Mitchell et al., 2018; Walters & Stoelzle Midden, 2018). En général, il est préférable d'utiliser des engrais à diffusion lente pour éviter d'endommager les membranes

d'étanchéité. Cependant, l'injection d'engrais liquide dans le système d'irrigation par dosatron, un dispositif de dosage proportionnel utilisé pour injecter des liquides directement dans un système d'irrigation, est une option viable.

- **Fréquence de la fertilisation** : la fréquence de la fertilisation dépend des besoins en nutriments des plantes et des conditions climatiques. Il est généralement recommandé de fertiliser le toit végétalisé une fois par an, au printemps, mais cette fréquence peut varier en fonction des exigences spécifiques des plantes.
- **Dosage** : il est essentiel de respecter les dosages recommandés pour éviter une sur-fertilisation de la toiture végétalisée. Suivre scrupuleusement les instructions du fabricant concernant les dosages et les fréquences d'application est crucial. Une utilisation excessive des engrais peut entraîner des conséquences néfastes sur l'environnement et la santé des plantes.
- **Méthodes d'application** : les engrais granulaires spécifiques à la végétation choisie doivent être simplement dispersés au sol. Étant efficaces sur une période de 3 à 6 mois, il est important de les choisir judicieusement en fonction des objectifs, que ce soit la croissance ou le maintien des plantes.

c. Nettoyage

Le nettoyage régulier des toitures végétalisées est essentiel pour assurer leur durabilité et leur bon fonctionnement (Paradis Bolduc, 2021; Werner, 2017). Voici les points clés à prendre en considération :

- **Fréquence de nettoyage** : la fréquence dépend du type de végétation, des conditions climatiques et de l'environnement. En général, il est recommandé de nettoyer la toiture végétalisée quatre à six fois par an, voire plus fréquemment si nécessaire, en fonction du type de végétation et des débris environnants tels que les feuilles d'arbres, les akènes ou les semences. La fréquence peut aussi être influencée par la localisation géographique.
- **Méthode de nettoyage** : le nettoyage doit être effectué en surface, en évitant de perturber le substrat. Il est crucial de faire preuve de prudence pour ne pas endommager les membranes inférieures, en utilisant des outils adaptés et en évitant tout labourage excessif. Pour les toitures végétalisées de grande taille, des outils manuels tels que des râtaux, des balais ou des brosses peuvent être utilisés, tandis que pour les petites surfaces et les détails, des machines adaptées, comme des aspirateurs de feuilles ou des souffleurs à feuilles, peuvent faciliter le nettoyage des débris sur de plus vastes zones. Dans tous les cas, il est important de choisir des équipements qui ne risquent pas d'endommager le substrat ou les membranes, en privilégiant des méthodes de nettoyage douces pour maintenir l'intégrité de l'installation.

- **Élimination des végétaux indésirables** : contrôler la croissance des plantes adventices pour éviter qu'elles ne concurrencent les plantes principales pour les ressources. Il est également important de gérer les semences d'arbres et d'autres plantes envahissantes sur le toit. Pour une gestion respectueuse de l'environnement, il est recommandé de privilégier des méthodes mécaniques, comme l'arrachage manuel ou le paillage, afin de réduire l'usage de produits chimiques.
- **Nettoyage du système d'irrigation** : veiller à nettoyer régulièrement le système d'irrigation pour éliminer les débris et les dépôts qui pourraient obstruer les tuyaux et les buses, ce qui compromettrait l'efficacité de l'irrigation.
- **Protection des plantes** : prendre des précautions pour ne pas endommager les plantes lors du nettoyage, en utilisant des méthodes douces et en évitant de tirer sur les tiges ou les racines.
- **Sécurité** : respecter les normes de sécurité lors du nettoyage des toitures végétalisées, en portant des équipements de protection individuelle, comme les harnais et les filets de sécurité, si nécessaire. Les tâches complexes ou dangereuses doivent être confiées à des professionnels qualifiés, notamment pour les toits inaccessibles. Des zones de sécurité doivent être délimitées, et des dispositifs de protection temporaires peuvent être installés, si besoin, pour assurer la sécurité des opérateurs.

d. **Contrôle et taille de la végétation**

Le choix de plantes telles, que le sedum ou d'autres vivaces, peut grandement simplifier l'entretien des toitures végétalisées, nécessitant ainsi moins d'efforts et de matériel. La tonte des graminées est essentielle pour contrôler leur croissance et maintenir l'aspect esthétique, tout en minimisant le risque d'incendie lié aux matières végétales mortes et sèches.

Voici les éléments clés à prendre en compte pour la tonte des toits végétalisés :

- **Bons outils** : utiliser des outils adaptés tels que des cisailles, des sécateurs ou des tondeuses à gazon, bien entretenus et aiguisés, pour éviter d'endommager les plantes. La tonte est souvent réalisée manuellement.
- **Bon minutage** : la tonte des herbacées et des graminées sur les toitures végétalisées doit être effectuée au printemps pour obtenir les meilleurs résultats.
- **Hauteur appropriée** : la hauteur de tonte dépend du type de végétation et de ses besoins spécifiques. Il est judicieux de conserver les plantes plus hautes en automne pour aider à retenir la neige, ce qui contribue à l'isolation, tandis qu'en été, des plantes plus basses favoriseront la transpiration, offrant ainsi une climatisation naturelle.

- **Préservation de la forme naturelle** : la tonte doit être effectuée de manière à préserver la forme naturelle des plantes. Pendant la saison de croissance, ne pas retirer plus de la moitié de la longueur des tiges pour éviter de les stresser. Des tailles de rajeunissement au printemps et des tailles de structure, servant à maintenir la forme et la santé des plantes sans compromettre leur capacité à capter la lumière et les nutriments, en saison, sont recommandées.
- **Élimination des déchets** : il est important de retirer les débris végétaux de la toiture végétalisée après la taille, afin d'éviter qu'ils ne tombent et n'obstruent les canaux de drainage, perturbant ainsi le flux d'eau prévu dans la conception. Un compostage des déchets végétaux pourrait être envisagé pour une gestion plus durable des débris.

En suivant ces éléments clés, on peut maintenir efficacement la végétation des toitures végétalisées, assurant ainsi leur esthétique et leur fonctionnalité tout en minimisant les risques.

e. Surveillance

La surveillance régulière des toitures végétalisées est essentielle pour garantir la longévité de la végétation et maintenir leur bon état. Voici pourquoi cette pratique est importante :

- **Détection précoce des problèmes** : la surveillance permet d'identifier rapidement tout problème éventuel, comme une humidité excessive du sol, une croissance excessive des plantes ou encore l'apparition de mousses ou d'algues. Bien que ces dernières ne soient pas des maladies, elles peuvent indiquer un déséquilibre dans les conditions environnementales. En intervenant rapidement, il est possible de corriger ces déséquilibres ou de résoudre les problèmes avant qu'ils ne causent des dommages plus importants.
- **Maintien de la santé des plantes** : en surveillant l'irrigation, la fertilisation et l'état général de la toiture végétalisée, on peut s'assurer que les plantes restent en bonne santé et continuent de croître de manière optimale. En cas de détection d'anomalies, des analyses du substrat peuvent être nécessaires pour identifier les problèmes sous-jacents. La surveillance doit aussi inclure une observation des nuisibles qui pourraient endommager la végétation ou nuire à l'écosystème du toit.
- **Économie de coûts** : la surveillance régulière peut contribuer à prolonger la durée de vie de la toiture végétalisée en évitant des réparations ou des remplacements coûteux. En intervenant rapidement sur les problèmes, on peut éviter des dommages importants qui pourraient nécessiter des dépenses élevées.

- **Sécurité** : la surveillance permet également de garantir la sécurité des personnes travaillant sur ou à proximité du toit. En identifiant et en corrigeant les risques potentiels tels que les zones glissantes ou les dangers de chute, on réduit le risque d'accidents et on crée un environnement de travail plus sûr.

En résumé, la surveillance régulière des toitures végétalisées est une pratique essentielle pour assurer leur bon fonctionnement, prolonger leur durée de vie et garantir la sécurité des personnes qui les entretiennent.

f. Réparation

La réparation rapide des dommages sur un toit végétalisé est cruciale pour plusieurs raisons :

- **Prévention des dégâts** : en agissant rapidement, on évite les dommages potentiels au toit et aux bâtiments situés en dessous, tels que les fuites, les problèmes de drainage, les dégâts causés par les tempêtes, etc.
- **Maintien de la santé des plantes** : les réparations aident à maintenir la santé des plantes en fournissant un environnement propice à leur croissance. Cela peut inclure le remplacement du substrat, l'amélioration du drainage, la taille régulière, voire le remplacement des plantes si nécessaire.
- **Préservation de la valeur** : un toit végétalisé en bon état ajoute de la valeur à un bâtiment et à son environnement. La réparation rapide des dommages contribue à préserver cette valeur ajoutée. En plus, un entretien efficace et bien fait contribue indirectement à la réduction des coûts énergétiques.

Pour atteindre ces objectifs, plusieurs éléments doivent être pris en compte :

- **Évaluation des dommages** : il est essentiel de déterminer l'étendue des dommages pour décider des réparations nécessaires, qu'elles concernent une zone limitée ou l'ensemble du toit.
- **Scellement des fuites** : les fuites doivent être scellées pour éviter d'endommager le bâtiment sous-jacent. Cela nécessite souvent l'intervention de spécialistes pour retirer méthodiquement les différentes couches de la toiture végétalisée jusqu'à la membrane d'étanchéité.
- **Rénovation de la surface** : si le substrat est dégradé, il devra être remplacé pour garantir une croissance optimale des plantes. Parfois, cela implique l'utilisation d'une grue pour retirer et remplacer le substrat, surtout en cas de contamination par des plantes adventices en grand nombre.

En résumé, la réparation rapide des dommages sur un toit végétalisé est essentielle pour maintenir sa fonctionnalité, préserver la santé des plantes et assurer la durabilité du système. Toutefois, dans le contexte spécifique du Carrefour de l'eau, il est crucial de souligner que l'entretien doit être considéré dès la phase de

conception du bâtiment. Cela inclut non seulement la planification des interventions régulières pour garantir la performance des toits végétalisés, mais également l'élaboration d'un budget d'entretien à long terme. Une telle approche est indispensable pour que les bénéfices attendus des phytotechnologies, notamment en matière de gestion durable des eaux pluviales, se concrétisent. En intégrant ces éléments dans la stratégie globale du projet, les partenaires pourront maximiser l'efficacité environnementale et économique des solutions mises en œuvre.

g. Récapitulatif

Les tableaux suivants fournissent un aperçu des tâches d'entretien recommandées pour les végétaux (Tableau 3) et l'infrastructure (Tableau 4) d'un toit végétalisé tout au long de l'année, de même qu'un récapitulatif synthèse (Tableau 6).

Tableau 3 : Entretien des végétaux d'un toit végétalisé au fil des saisons (SQP, 2024)

Opérations d'entretien	Outils	Fréquence	Printemps	Été	Automne
Nettoyer les déchets et les résidus de végétaux	Gants de jardinage, râteau, binette et sacs pour les ordures ou les résidus compostables	À chaque visite	X	X	X
Inspecter les maladies et les insectes ravageurs	Loupe entomologique, calepin de note pour les suivis	À chaque visite	X	X	X
Désherber, retirer les plantes envahissantes et nuisibles	Gants de jardinage, truelle ou pelle, houe, sarcloir, binette	À chaque visite	X	X	X
Retirer les végétaux morts	Sécateur, pelle, sacs pour les résidus compostables	Au besoin, vérifier la cause	X	X	X
Replanter pour maintenir la couverture végétale	Semoir, plantoir, truelle, pelle	Au besoin	X	X	
Tailler les graminées	Sécateur, cisaille, débroussailleuse, coupe-bordures et, dans certains cas, tondeuses	1 fois par an, au printemps	X		
Tailler les arbustes, selon les espèces	Sécateur, couteau-scie, tronçonneuse	1 fois par an, au besoin	X		
Tailler les vivaces	Sécateur à main	1 fois par an, au besoin			X
Enlever les plantes annuelles	Truelle	1 fois par an, au besoin			X
Fertiliser les végétaux	Arrosoir pour doser la fertilisation liquide ou disperser de granules	1 ou 2 fois par an, généralement au printemps ou à l'été	X	X	
Arroser	Système d'arrosage manuel (arrosoirs, boyaux d'arrosage) ou système d'irrigation	Au besoin lors des premières années et selon la végétation	X	X	
Renouveler le substrat	Pelles, conteneurs de vrac souple (<i>big bag</i>), grue. Contacter un spécialiste au besoin.	Rare, au besoin	X		
Protéger les végétaux	Toile de jute, attacher les branches de certains végétaux, au besoin clôtures à neige pour maximiser la protection de la neige retenue	1 fois par an, au besoin			X

Tableau 4 : Entretien de l'infrastructure d'un toit végétalisé (SQP, 2024)

Opérations d'entretien	Outils	Fréquence	Printemps	Été	Automne	Hiver
Dégager les drains	Gants de jardinage et sacs de poubelles	À chaque visite	X	X	X	X
Remettre le système d'irrigation		1 fois par an, au besoin	X			
Inspecter les drains	Par un spécialiste	Au besoin	X	X	X	
Inspecter le système d'irrigation	Par un spécialiste	Au besoin	X	X	X	
Vidanger le système d'irrigation	Par un spécialiste	1 fois par an				X
Vérifier et enlever l'accumulation excessive de neige sur les végétaux		Au besoin			X	X

Tableau 5 : Résumé des tâches d'entretien des végétaux par saison

Saison	Tâches d'entretien des végétaux
Printemps	- Taille légère pour enlever les parties mortes des plantes
	- Fertilisation légère pour encourager la croissance
	- Inspection des plantes pour détecter les signes de maladies ou de ravageurs
Été	- Arrosage régulier pour maintenir l'humidité du substrat
	- Élimination des mauvaises herbes et des plantes envahissantes
	- Surveillance des signes de stress hydrique ou de surchauffe
Automne	- Taille légère pour préparer les plantes à l'hiver
	- Protection des plantes sensibles aux gelées
	- Nettoyage des débris et des feuilles mortes
Hiver	- Surveillance de l'accumulation de neige et de glace
	- Protection contre les vents froids et desséchants
	- Réduire les arrosages pour éviter les engelures des plantes

Tableau 6 : Résumé des tâches d'entretien de l'infrastructure

Fréquence	Tâches d'entretien de l'infrastructure
Annuel	- Inspection générale de l'état du toit végétalisé
	- Vérification des drains et des canaux de drainage
	- Nettoyage des systèmes d'irrigation et des gouttières
	- Évaluation de l'état des membranes d'étanchéité
Trimestriel	- Inspection des joints et des fixations
	- Réparation des fuites ou des dommages structurels
	- Vérification de l'état des barrières de protection et des clôtures
Ponctuel	- Réparation des dégâts causés par les intempéries ou les accidents
	- Remplacement des matériaux dégradés ou endommagés
	- Intervention immédiate en cas de problèmes urgents*

*Exemples : blocage des drains entraînant un risque d'inondation, fuite importante compromettant la structure, dégradation des membranes pouvant affecter l'étanchéité ou la sécurité

1.2.5.2. Murs végétalisés

a. Irrigation

Le choix de la méthode d'irrigation pour les murs végétalisés dépend de plusieurs facteurs, tels que le type de mur (vivant ou grimpant), sa taille, le type de plantes utilisées et les conditions environnementales. Voici les points clés à retenir (Rivas-Sánchez et al., 2019) :

- **Sélection du système d'irrigation** : les murs vivants, contrairement aux plantes grimpantes robustes, nécessitent souvent une irrigation régulière, pour laquelle les méthodes couramment utilisées sont l'irrigation goutte-à-goutte et l'irrigation capillaire.
- **Automatisation de l'irrigation** : les systèmes automatisés offrent l'avantage de fournir de l'eau de manière régulière sans nécessiter une surveillance constante. Ils peuvent être programmés pour répondre aux besoins spécifiques en eau des plantes à des moments prédéfinis.
- **Uniformité de l'irrigation** : il est crucial de garantir une distribution uniforme de l'eau à travers le mur, en tenant compte des variations de hauteur des cellules, de la densité des plantes et des exigences individuelles de chaque espèce. Des canaux préférentiels d'écoulement de l'eau ou des obstructions peuvent se former avec le temps, perturbant ainsi l'uniformité de l'irrigation, et sont donc à surveiller.
- **Accessibilité pour l'entretien** : lors du choix d'une méthode d'irrigation ou d'un système d'automatisation, il est important de prendre en compte l'accessibilité du mur pour l'entretien et l'arrosage, en particulier pour les murs de grande taille avec un déploiement vertical étendu.

- **Équipements nécessaires** : des équipements tels que des pompes, des tuyaux spécifiques et des régulateurs de pression peuvent être requis pour assurer une distribution efficace de l'eau à travers le mur. Pour les murs de grande envergure, des équipements plus puissants peuvent être nécessaires.

b. Fertilisation

La fertilisation des murs végétalisés vivants présente des particularités en raison de leur nature verticale. Dans ce contexte, la fertilisation est généralement effectuée de manière régulière en incorporant une solution fertilisante dans le système d'irrigation (Oquendo-Di Cosola et al., 2020). Pour les murs végétalisés avec des plantes grimpantes robustes en pleine terre, il est souvent peu probable qu'une fertilisation soit nécessaire. Cependant, si nécessaire, l'utilisation d'engrais à libération lente est recommandée en raison de leur capacité à agir sur une période prolongée.

c. Nettoyage

Le nettoyage des murs végétalisés est une composante essentielle de leur entretien régulier, et sa fréquence peut varier en fonction du type de mur, de la saison et des zones géographiques. Par exemple, les façades végétalisées avec des plantes grimpantes peuvent nécessiter un ou deux nettoyages annuels pour empêcher les tiges de s'étendre vers les combles ou pour éliminer les débris accumulés après la chute des feuilles. En revanche, les murs végétalisés vivants exigent un nettoyage plus fréquent, parfois même une surveillance hebdomadaire selon les espèces de plantes sélectionnées. L'accessibilité et les équipements nécessaires doivent être pris en compte dès la conception du mur pour limiter les coûts et les difficultés.

Ces murs peuvent être exposés à la pollution atmosphérique et à la poussière, entraînant ainsi l'accumulation de débris et de biomasse morte sur les plantes, ce qui entrave la photosynthèse. Cette accumulation peut compromettre la croissance et la santé des végétaux, diminuant ainsi leur valeur esthétique et leurs bénéfices environnementaux. En extérieur, la pluie peut aider à nettoyer les murs végétalisés exposés aux intempéries, mais à l'intérieur, il peut être nécessaire de pulvériser de l'eau sur les plantes pour éliminer les particules de saleté. Une brumisation régulière peut être nécessaire pour maintenir la santé des plantes nécessitant une humidité élevée, telles que les fougères.

Pour les murs de grande taille ou difficiles d'accès, des équipements spécifiques peuvent être nécessaires pour assurer un nettoyage efficace et sécuritaire. Dans certains cas, une simple rallonge sur un tuyau d'eau peut suffire, mais pour les endroits plus complexes, l'utilisation de nacelles élévatrices peut être indispensable. Il est recommandé de faire appel à des professionnels pour les murs très hauts ou situés dans des zones difficiles d'accès afin d'assurer la sécurité et l'efficacité du nettoyage.

d. Contrôle et taille de la végétation

L'esthétique joue un rôle crucial dans la phytotechnologie des murs végétalisés. La taille des plantes a un impact direct sur la quantité de lumière, la circulation de l'air et l'humidité dans ces murs, ce qui influe sur la croissance et la santé des végétaux voisins. Pour assurer un contrôle et une taille optimaux de la végétation, plusieurs éléments doivent être pris en compte (Green.org, s.d) :

- **La fréquence de la taille** : elle dépend de divers facteurs tels que la croissance des plantes, leur densité foliaire et leur exposition aux conditions environnementales. Selon la vigueur de la croissance, la taille peut être nécessaire toutes les 3 à 4 semaines ou même tous les quelques mois. Les façades végétalisées avec des plantes grimpantes peuvent nécessiter moins d'entretien pendant la saison de croissance. La fréquence peut varier en fonction des espèces de plantes, du type de mur (vivant ou grimpant), de leur position et des conditions ambiantes, qui peuvent être plus stables à l'intérieur qu'à l'extérieur.
- **La hauteur du mur** : elle peut influencer la quantité de lumière reçue par les plantes et leur exposition aux intempéries, ce qui affecte leur croissance et la fréquence de la taille. Pour les façades végétalisées avec des plantes grimpantes, il est essentiel de tailler régulièrement la végétation pour éviter qu'elle n'atteigne les gouttières ou les toitures.
- **La structure de support** : les murs végétalisés vivants, composés de plusieurs cellules, nécessitent une taille des plantes qui ne compromette pas leur structure de support. Cette considération s'applique également aux murs grimpants, qu'ils soient soutenus par des fils de fer, des treillis ou d'autres structures.
- **La méthode de taille** : les techniques de taille varient en fonction du type de croissance des plantes et de la forme désirée. Cela peut inclure le pincage, la taille de formation, l'élagage, etc. Les outils de taille principaux pour ce type de travail sont généralement des sécateurs.

En résumé, un entretien régulier et adapté de la végétation sur les murs végétalisés est essentiel pour assurer leur esthétique, leur santé et leur fonctionnalité.

e. Surveillance

Pour assurer la santé et la longévité des murs végétalisés, une surveillance régulière est essentielle, bien que la fréquence puisse varier en fonction du type de mur. Les façades végétalisées rustiques peuvent nécessiter une surveillance saisonnière, tandis que les murs vivants peuvent nécessiter une attention plus fréquente. Si l'équipe d'entretien est externe, il est utile d'informer les occupants de l'édifice sur la manière de signaler tout problème

potentiel, comme le flétrissement soudain du feuillage, pouvant indiquer des problèmes avec les systèmes d'irrigation ou de fertilisation.

La surveillance doit porter sur plusieurs éléments clés, notamment :

- **La qualité du substrat** : il est important de vérifier régulièrement que le substrat est bien aéré, bien drainé et contient les nutriments nécessaires à la croissance des plantes.
- **L'irrigation** : il faut surveiller la quantité et la fréquence de l'arrosage pour éviter les excès ou les déficits d'eau.
- **La fertilisation** : pour les murs vivants, il est crucial de contrôler la concentration des nutriments dans la solution d'irrigation pour répondre aux besoins des plantes.
- **La santé des plantes** : il convient de vérifier régulièrement l'état de santé des plantes, en recherchant les signes de maladies, de parasites ou de croissance anormale.
- **Le contrôle des insectes** : il est important de surveiller et de traiter les infestations d'insectes ravageurs qui pourraient affecter la croissance des plantes. Pour une gestion éco-responsable des insectes, il est recommandé d'envisager des solutions naturelles, telles que l'introduction d'insectes bénéfiques, comme les coccinelles ou les chrysopes, qui se nourrissent de ravageurs. L'utilisation de techniques de lutte intégrée, comme la rotation des cultures et la promotion de la biodiversité, peut également aider à réduire les populations d'insectes nuisibles tout en préservant l'équilibre écologique. Ces approches minimisent le recours à des pesticides chimiques, favorisant ainsi un environnement plus sain pour les plantes et les organismes associés.
- **La sécurité** : les problèmes de sécurité, tels que les fuites d'eau ou les défaillances structurelles, doivent également être surveillés et corrigés rapidement.

La coordination entre différents intervenants, tels que les architectes paysagistes, les ingénieurs et les horticulteurs, peut être nécessaire pour effectuer les réparations nécessaires. En cas de problèmes structurels ou d'imperméabilisation, il est souvent préférable de faire appel à des entreprises spécialisées pour diagnostiquer et résoudre les problèmes.

L'utilisation de technologies de surveillance à distance, comme des capteurs d'humidité, de température ou des systèmes d'alerte connectés, peut faciliter le suivi en continu des conditions du mur végétalisé. Ces dispositifs sont particulièrement utiles pour les murs de grande taille ou difficilement accessibles, permettant de détecter rapidement des anomalies et d'intervenir avant que les problèmes ne s'aggravent.

1.2.5.3. Cellules de biorétentions

a. Irrigation

Après la phase initiale d'implantation, l'irrigation des biorétentions peut s'étaler sur une période pouvant aller jusqu'à deux ans, en fonction de plusieurs facteurs tels que le type de végétaux, les espèces, le volume d'eau nécessaire, la saison de plantation et les conditions météorologiques. Généralement, cette période varie de 3 à 4 mois pour les vivaces, de 6 mois ou plus pour les arbustes, et jusqu'à 2 ans pour les arbres. Dans certaines municipalités, l'arrosage des arbres peut même s'étendre sur une période plus longue, allant jusqu'à 5 ans (SQP, 2024).

Pendant cette phase, l'approvisionnement en eau se fait généralement de manière ponctuelle à l'aide de camions-citernes ou de sources d'eau locales, telles que des bornes-fontaines, plutôt que par le biais d'un système d'irrigation raccordé à un réseau d'aqueduc. Cette approche est privilégiée en raison de la durée limitée de la période d'irrigation.

Après la phase initiale, l'irrigation doit être réduite progressivement, car les végétaux implantés doivent être capables de s'adapter à des conditions de sécheresse. Si ce n'est pas le cas, cela peut indiquer que les plantes n'ont pas été sélectionnées correctement pour l'environnement spécifique de la biorétention. Il est donc important de surveiller régulièrement la survie, la croissance et le niveau de stress hydrique des espèces plantées dès le début de l'implantation afin d'éviter une irrigation excessive et d'identifier la nécessité éventuelle de remplacer certaines plantes.

b. Fertilisation

Les substrats utilisés dans les biorétentions sont souvent conçus pour minimiser le lessivage des nutriments avec les précipitations, ce qui peut les rendre relativement pauvres en éléments nutritifs. Bien que du compost puisse être ajouté pour enrichir le substrat en matières organiques, microorganismes et nutriments, à long terme, ce sont généralement les eaux de ruissellement qui apportent les éléments nutritifs essentiels à la croissance des plantes (SQP, 2024). Cela peut entraîner des concentrations variables de nutriments dans le substrat, par exemple, un excès de phosphore combiné à une carence en bore. Par conséquent, même si le sol ne présente pas de carence en nutriments, une plante peut manifester des signes de carence, ce qui peut indiquer un problème de biodisponibilité du nutriment plutôt qu'une véritable carence dans le sol.

Il est donc crucial de réaliser des analyses régulières du sol afin d'évaluer précisément les concentrations de nutriments et leur biodisponibilité. Cela permet d'ajuster les apports en fonction des besoins spécifiques des plantes, plutôt que de se fier uniquement aux signes visuels de carence, qui peuvent parfois être trompeurs.

c. Nettoyage

Le nettoyage des dispositifs de biorétention vise principalement à éliminer les débris organiques et inorganiques susceptibles de bloquer le système, tels que les feuilles, les branches, les boues organiques, les graviers et les débris anthropiques. Une planification minutieuse des activités de nettoyage dès la phase de conception est essentielle pour assurer le bon fonctionnement du dispositif. Cette planification doit prendre en compte divers facteurs tels que les conditions météorologiques, l'obtention des permis et la conformité aux réglementations locales (SQP, 2018).

Il est recommandé d'effectuer le nettoyage régulièrement pour maintenir l'efficacité du système de traitement des eaux pluviales. Pendant les premiers temps après la construction, un nettoyage toutes les deux semaines peut être nécessaire, tandis que par la suite, un nettoyage mensuel peut suffire lorsque les végétaux sont bien établis.

Au printemps, il est important de retirer les débris organiques et inorganiques accumulés pendant l'hiver, ainsi que de vérifier la nécessité d'enlever les bâches de protection hivernale. Pendant la période végétative, un suivi régulier de la croissance des plantes et de la présence éventuelle de mauvaises herbes est recommandé. À l'automne, la taille des plantes et l'élimination de la biomasse végétale excédentaire sont nécessaires, tout comme la mise en place éventuelle de bâches de protection pour l'hiver.

Il est également important de noter qu'un excès de nettoyage peut perturber l'équilibre naturel des plantes et des organismes bénéfiques présents dans la cellule de biorétention. Une fréquence de nettoyage trop élevée risque d'endommager le couvert végétal, de réduire l'activité microbienne utile et d'entraver la stabilisation écologique du système. Une approche équilibrée, ajustée en fonction des besoins réels, est donc essentielle pour préserver les fonctions écologiques et hydrologiques du dispositif.

d. Contrôle et taille de la végétation

La taille des végétaux dans les cellules de biorétention vise principalement à contrôler le volume de la végétation afin d'éviter le colmatage du système et l'accumulation de matières organiques et de nutriments dans le sol. Cet aspect est particulièrement crucial pour maintenir l'efficacité du dispositif.

Au printemps, la taille des arbustes permet d'éliminer les parties mortes et de stimuler leur croissance, favorisant ainsi leur capacité à absorber les nutriments et les polluants présents dans l'eau de pluie. Cette pratique aide également à contrôler la hauteur et la densité de la végétation, évitant ainsi les obstructions dans la cellule de biorétention. Pour les vivaces, la taille est généralement effectuée à l'automne pour éliminer la

biomasse foliaire morte. Quant aux arbres, un entretien régulier tout au long de leur croissance est nécessaire pour maintenir leur forme et leur solidité, ainsi que pour éliminer les branches mortes ou faibles.

La fréquence et la nature de la taille dépendent de plusieurs facteurs, notamment le type de végétation, la densité de plantation et les conditions environnementales telles que la lumière, l'eau et les nutriments disponibles. Il est essentiel de choisir les espèces végétales adaptées à leur environnement pour minimiser les besoins en entretien. Par ailleurs, le contrôle des plantes adventices peut être bénéfique pour maintenir certaines espèces qui apportent des fonctions supplémentaires au dispositif de biorétention, telles que la couverture du sol et l'augmentation de la biodiversité. Certaines adventices peuvent également présenter des caractéristiques esthétiques ou écologiques intéressantes, telles que la floribondité ou l'attrait pour les pollinisateurs.

e. Surveillance

Surveiller régulièrement les cellules de biorétention est essentiel pour garantir leur bon fonctionnement hydraulique, assurer la survie et la croissance des végétaux, et anticiper les éventuels problèmes. Voici quelques points clés à retenir concernant la surveillance de ces dispositifs (SQP, 2024) :

- **Fréquence** : La surveillance devrait généralement être effectuée 1 à 2 fois par an pour vérifier la santé des végétaux, le bon fonctionnement des filtres et le respect des niveaux d'eau conformément aux paramètres de conception.
- **Paramètres de surveillance** : Il est important de surveiller les niveaux d'eau, la santé et la croissance des végétaux ainsi que l'état des filtres. Bien que rare, il est également possible de surveiller la qualité de l'eau, surtout dans le cadre de projets de recherche.
- **Suivi** : Toutes les données de surveillance doivent être consignées pour permettre une analyse des tendances sur le long terme. Ces résultats peuvent aider à identifier les problèmes potentiels et à planifier les travaux de maintenance nécessaires. Alors que la plupart des suivis se concentrent souvent sur le court terme pour évaluer l'établissement initial des biorétentions, un suivi à long terme tout au long de la durée de vie du dispositif est préférable pour garantir son efficacité et sa durabilité.

f. Réparation

Effectuer des réparations dès qu'une défaillance est détectée dans le système est crucial pour maintenir son bon fonctionnement. Voici les principaux aspects à prendre en compte :

- **Évaluation** : avant d'entreprendre des réparations, il est essentiel d'évaluer l'étendue des dommages et d'identifier la cause du dysfonctionnement. Une inspection visuelle peut aider à repérer les problèmes tels que des végétaux endommagés, des filtres obstrués ou des fuites.
- **Travaux de réparation** : les réparations peuvent impliquer le remplacement des végétaux endommagés, le nettoyage ou le remplacement des filtres, le rechargement de la couche de matériau filtrant, la correction des fuites ou des dommages structurels ainsi que la restauration de la pente et de la forme d'origine des cellules de biorétention.
- **Impact sur l'environnement** : les travaux de réparation peuvent avoir un impact sur l'environnement, notamment en perturbant l'écosystème local. Il est donc important de prendre des mesures préventives.

L'entretien des phytotechnologies, comme les toitures végétalisées, les murs végétalisés et les cellules de biorétention, est une composante essentielle pour garantir leur efficacité et leur pérennité dans un projet tel que le Carrefour de l'eau. Cet entretien ne doit pas être considéré comme une simple étape opérationnelle, mais comme une dimension stratégique à intégrer dès la conception du bâtiment. Il est crucial de planifier des budgets d'entretien réalistes et adaptés sur le long terme afin d'assurer la réalisation des bénéfices attendus, notamment en matière de gestion durable des eaux pluviales. Une gestion proactive et bien encadrée de l'entretien permettra de maximiser les retombées positives des phytotechnologies tout en évitant des coûts de réparation ou de remplacement imprévus.

1.3. PROBLÉMATIQUE

D'une part, suivant la tendance croissante de l'urbanisation, les sols sont de plus en plus imperméables, ce qui rend l'infiltration des eaux pluviales dans le sol presque impossible, modifiant ainsi le cycle naturel de l'eau: à titre d'exemple, le coefficient de ruissellement du pavage est de 0,9 (Ville de Québec, 2017), ce qui veut dire que la majeure partie (90 %) des pluies précipitées est ruisselée. D'autre part, les changements climatiques ont des impacts directs sur la température ainsi que sur les ressources en eau ; la température de la Terre a augmenté en moyenne de 0,14°F (0,08°C) par décennie depuis 1880 (Lindsey & Dahlman, 2023). L'urbanisation et l'industrialisation rapides, en plus des changements dans les conditions climatiques, sont considérés comme un autre facteur majeur de la demande et de l'offre en eau (Chen & Xu, 2005; Elmahdi et al., 2009). C'est pourquoi la gestion des eaux pluviales dans les villes devient de plus en plus difficile vu l'augmentation des volumes et des débits de pointe des eaux de ruissellement urbaines, qui peuvent causer des débordements d'égout et d'éventuelles inondations. Dans ce sens, la Ville de Montréal s'est dotée d'une nouvelle stratégie sur l'eau (La ville de Montréal, 2023), visant à renforcer la gestion durable de ses ressources hydriques. Cette stratégie s'inscrit dans un cadre plus large de résilience face aux changements climatiques et de préservation de la biodiversité, des objectifs qui résonnent particulièrement avec les ambitions du Carrefour de l'eau.

Dans ce contexte, l'étude actuelle propose une gestion durable de l'eau du bâtiment du Carrefour de l'eau en utilisant des infrastructures grises et des phytotechnologies dans le but de favoriser l'infiltration des eaux dans le sol et de ralentir l'acheminement des précipitations vers les réseaux d'égout : cela va permettre de réduire les débits de pointe, de limiter les surverses ainsi que le besoin de surdimensionner des conduites pluviales, etc.

1.4. OBJECTIFS DE RECHERCHE

L'objectif principal de cette étude est d'explorer si, dans le contexte hydro-climatologique du Québec, il est possible de concevoir un bâtiment multi-usages Net Zéro Eau, comme le Carrefour de l'eau, grâce à une combinaison stratégique de phytotechnologies et d'infrastructures grises. Cette étude vise ainsi à identifier, de manière qualitative et quantitative, les technologies les plus adaptées pour optimiser la gestion des eaux pluviales dans un cadre bâti.

Le concept de Net Zéro Eau désigne une approche de gestion de l'eau où la quantité d'eau utilisée dans un site ou un bâtiment est égale à la quantité d'eau qui y est récupérée, traitée, réutilisée ou évacuée de manière durable. L'objectif est de minimiser l'impact sur les ressources en eau locales en réutilisant l'eau pluviale, en réduisant la consommation d'eau potable et en intégrant des solutions naturelles comme les phytotechnologies pour gérer les eaux de ruissellement. Un bâtiment ou un projet Net Zéro Eau vise, ainsi, à équilibrer ses besoins en eau

tout en contribuant à la durabilité environnementale, en prévenant les risques d'inondations et en favorisant la résilience face aux changements climatiques (Canadian Water Network, 2023).

Le projet met en avant des solutions diversifiées, incluant les phytotechnologies, qui bouclent le cycle de l'eau en misant sur les plantes. L'objectif ultime est de faire du Carrefour de l'eau un exemple concret et reproductible de gestion durable et intégrée des ressources en eau. Les objectifs spécifiques de l'étude sont :

- **Réaliser une caractérisation du site projeté pour le Carrefour de l'Eau :** Afin d'alimenter une étude de faisabilité du déploiement des phytotechnologies, dresser le portrait climatologique, hydrologique, des dépôts de surface, de l'hydrogéologie et du type de végétation présents dans la zone d'étude.
- **Planifier l'implantation des phytotechnologies :** Planifier des infrastructures végétales (murs végétalisés, toitures végétalisées et cellules de biorétention) à mettre en place pour assurer la gestion de 100 % des précipitations tombant sur le terrain et le bâtiment du Carrefour de l'eau et la résilience climatique. Cet objectif s'inscrit dans une approche Net Zéro Eau, visant à intégrer des solutions durables et exemplaires pour la gestion intégrée des ressources en eau.
- **Analyser les retombées économiques potentielles des phytotechnologies choisies :** Examiner les coûts et les avantages économiques potentiels des infrastructures vertes, y compris les perspectives de retour sur investissement de même que les économies envisageables à long terme et les impacts financiers possibles pour la communauté.

Les résultats de la recherche permettront d'approfondir le développement de nouvelles normes pour la gestion durable et circulaire de l'eau en contexte urbain, voire le développement d'une norme Net Zéro Eau pour la construction des habitations futures adaptées aux changements climatiques. C'est un point de départ sur lequel plusieurs autres études pourront se baser.

2. MÉTHODOLOGIE

Dans le cadre du projet du Carrefour de l'eau, une approche méthodologique a été adoptée pour sélectionner et concevoir des phytotechnologies adaptées. Cette section détaille les étapes clés de la méthodologie, en mettant l'accent sur la collecte d'informations, la sélection des phytotechnologies pertinentes ainsi que la détermination du bassin versant et la caractérisation des eaux de surface.

2.1. Choix des phytotechnologies pertinentes

Les phytotechnologies les plus pertinentes pour le projet du Carrefour de l'eau ont été sélectionnées, soit les cellules de biorétention ainsi que les murs et les toits végétalisés. Ce choix repose sur une appréciation qualitative de plusieurs critères, incluant la capacité des technologies à gérer 100 % des précipitations tombant sur le terrain et le bâtiment, leur efficacité démontrée dans le contexte hydro-climatique québécois ainsi que leur potentiel à offrir une adaptation durable face aux changements climatiques.

Tout d'abord, le bâtiment envisagé nécessite une gestion efficace des eaux pluviales et une amélioration de la qualité de l'eau. Les cellules de biorétention sont particulièrement adaptées à l'absorption des eaux de ruissellement, permettant ainsi de réduire l'impact des inondations et de favoriser l'infiltration. Les murs et toits végétalisés, quant à eux, non seulement contribuent à la gestion des eaux pluviales, mais améliorent également l'esthétique du bâtiment, offrent des espaces de biodiversité et réduisent l'effet d'îlot de chaleur urbaine.

Les critères de sélection incluaient également les co-bénéfices environnementaux, tels que la réduction des îlots de chaleur urbains, la création d'abris pour la biodiversité et les contributions à l'esthétique et à la qualité de vie urbaine. Ces critères, combinés à des considérations économiques et techniques, ont permis de déterminer que l'agencement des trois phytotechnologies choisies serait le plus adapté pour atteindre les objectifs de durabilité et d'exemplarité du Carrefour de l'eau.

L'intégration de ces phytotechnologies dans le design du bâtiment est donc justifiée par la nécessité d'assurer une approche durable et respectueuse de l'environnement, tout en répondant aux enjeux locaux de gestion de l'eau.

2.2. Détermination du bassin versant et caractérisation des eaux de surface

Une fois les phytotechnologies sélectionnées, il a été essentiel de déterminer le bassin versant dans lequel se situe le projet, en l'occurrence le bassin versant de la rivière Saint-Charles. Cette étape est importante pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, la connaissance du bassin versant permet d'analyser les caractéristiques hydrologiques de la zone, notamment les schémas d'écoulement des eaux de pluie et les zones de collecte. En identifiant les sources d'eau et les zones à risque d'inondation, il devient possible d'adapter les solutions phytotechniques aux spécificités locales.

De plus, la caractérisation des eaux de surface fournit des données sur la qualité de l'eau, permettant ainsi d'évaluer les polluants potentiels et les besoins en traitement, dans l'optique où les phytotechnologies choisies pourraient non seulement être efficaces pour gérer les eaux pluviales, mais aussi pour améliorer la qualité de l'eau qui est déversée dans la rivière Saint-Charles et le fleuve Saint-Laurent.

En somme, cette approche méthodologique, fondée sur une collecte rigoureuse d'informations et une analyse approfondie des spécificités du site, permet d'assurer que le projet du Carrefour de l'eau sera à la fois fonctionnel et respectueux de l'environnement.

2.3. Étude climatologique de la zone d'étude

2.3.1. Données disponibles

Pour obtenir des données de précipitations solides et liquides ainsi que de températures journalières et mensuelles, trois stations météorologiques ont été étudiées : la station Lauzon, opérée par le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs du Québec (MELCCFP), la station Beauport d'Environnement et Changement Climatique Canada (ECCC) ainsi qu'une autre station Lauzon, également opérée par ECCC. Cependant, en raison de l'absence de données complètes et pertinentes dans les stations du MELCCFP et de Beauport, en particulier pour les précipitations, la station Lauzon d'ECCC a été sélectionnée comme source principale de données. Située à respectivement 8 km et 9 km des deux sites envisagés pour le Carrefour de l'eau, elle présentait une meilleure adéquation géographique et une continuité de données satisfaisante.

Des régressions linéaires des précipitations annuelles et saisonnières, à la fois sous forme solide et liquide, ont été réalisées. Ces analyses ont permis de comprendre les tendances historiques de précipitations dans la région

étudiée, ce qui est crucial pour évaluer les effets des conditions météorologiques sur le Carrefour de l'eau et sur les phytotechnologies sélectionnées et pour anticiper une projection des tendances futures.

En combinant ces différentes sources de données météorologiques, une vue d'ensemble complète des conditions environnementales dans lesquelles opèreront les phytotechnologies du Carrefour de l'eau a pu être obtenue. Cette approche a permis d'approfondir l'analyse et d'extraire des conclusions plus précises sur la performance et l'adaptabilité de ces technologies dans des contextes météorologiques variés. En outre, en tenant compte des usages réguliers du bâtiment du Carrefour de l'eau, l'efficacité des phytotechnologies dans leur environnement opérationnel réel a pu être évaluée de façon plus holistique.

2.3.2. Traitement des données

L'utilisation de Python pour l'analyse des données météorologiques réparties par saison revêt une importance cruciale pour plusieurs raisons. Tout d'abord, le langage Python offre une grande variété de bibliothèques et d'outils spécialisés dans l'analyse de données, tels que Pandas, NumPy et Matplotlib, qui facilitent la manipulation, le traitement et la visualisation des données météorologiques à grande échelle. Cette capacité à gérer efficacement de grandes quantités de données saisonnières permet une exploration approfondie des tendances et des variations climatiques spécifiques à chaque saison.

L'utilisation de Python pour cette analyse offre également la possibilité d'automatiser et de répéter facilement le processus d'analyse pour différentes années ou régions, garantissant ainsi la robustesse et la reproductibilité des résultats. Cette approche systématique et rigoureuse de l'analyse des données saisonnières renforce la crédibilité et la fiabilité des conclusions, et facilite la prise de décision éclairée.

En divisant les données par saison, les variations saisonnières des précipitations et des températures, ainsi que leur impact sur les phytotechnologies, peuvent également être mieux comprises. Cette approche saisonnière permet une analyse plus précise et nuancée des performances des systèmes, en tenant compte des fluctuations naturelles du climat tout au long de l'année. Par exemple, il est possible d'évaluer comment les phytotechnologies réagissent aux changements saisonniers, tels que les périodes de gel en hiver, les fortes pluies au printemps ou les vagues de chaleur estivales.

De plus, l'analyse saisonnière permet de dégager des tendances à long terme et de détecter d'éventuels schémas récurrents dans les données météorologiques, ce qui est essentiel pour formuler des prévisions et des recommandations à plus long terme concernant les phytotechnologies. Par exemple, il est possible d'identifier si certaines saisons sont plus propices que d'autres pour le bon fonctionnement des systèmes ou si des ajustements saisonniers sont nécessaires pour optimiser leur efficacité et leur durabilité.

2.3.3. Régression linéaire

L'analyse de régression linéaire a été utilisée pour explorer les tendances des précipitations solides et liquides au fil du temps. Cette approche statistique a permis d'obtenir des connaissances précieuses sur les schémas et les variations des précipitations dans la région d'étude.

En utilisant la régression linéaire, les hausses, les baisses ou la stabilité des précipitations solides et liquides ont pu être identifiées sur une période de 145 années. Cela a permis de comprendre l'évolution du climat dans la région d'étude et de détecter d'éventuels changements significatifs au fil du temps. De plus, en examinant les coefficients de régression, la magnitude et la direction de ces tendances ont pu être estimées, ce qui est essentiel pour évaluer l'impact potentiel des variables météorologiques sur les phytotechnologies choisies.

Le choix de la régression linéaire s'est imposé comme un modèle simplifié, bien adapté à l'objectif d'obtenir une vue d'ensemble des changements climatiques régionaux. Bien que d'autres modèles, tels que la régression quadratique ou des approches non linéaires, puissent capter des variations plus complexes, la linéarité est apparue comme un compromis pertinent pour détecter des tendances globales tout en minimisant les risques de surajustement, compte tenu des données disponibles. Cette méthode a donc fourni une bonne base pour évaluer les impacts potentiels des variations climatiques sur les phytotechnologies choisies, tout en offrant des résultats compréhensibles et exploitables dans le cadre du projet.

Cette analyse de régression linéaire des précipitations dans le temps a également fourni une base pour faire des prévisions sur les variations futures des précipitations. En utilisant les modèles de régression établis, les tendances observées ont pu être extrapolées vers l'avenir et les changements probables dans les précipitations solides et liquides au fil du temps ont pu être estimés, en faisant l'hypothèse que les tendances observées dans le passé se maintiendront au cours des prochaines décennies. Ces prévisions sont essentielles pour informer la planification et la prise de décision lors de la conception des infrastructures phytotechnologiques et des infrastructures de gestion des eaux pluviales tout au long de la durée de vie du projet.

2.4. Étude de faisabilité

2.4.1. Étude technique, économique et réglementaire

Cette phase repose sur une analyse des phytotechnologies adaptées au projet du Carrefour de l'eau. Elle s'appuie sur les données de la revue de littérature existante, ajustées pour fournir des calculs et estimations spécifiques au contexte local et au bâtiment concerné. L'objectif est d'assurer une intégration réaliste des technologies, tenant compte des contraintes techniques (charge structurelle, compatibilité environnementale), des aspects économiques (coûts d'installation et d'entretien) et des exigences réglementaires.

2.4.2. Évapotranspiration

L'évapotranspiration mensuelle a été calculée en utilisant le logiciel CROPWAT8.0 en tenant compte des données climatiques spécifiques de la région (station Lauzon pour l'année 2011). CROPWAT 8.0 est un outil développé par la FAO permettant de calculer les besoins en eau des cultures à partir de données climatiques. Pour ce projet, les températures maximales et minimales journalières, l'humidité relative moyenne, le nombre d'heures d'ensoleillement et d'autres données (la vitesse du vent, les précipitations, la pression de vapeur et le rayonnement solaire) de la station de Lauzon (année 2011) ont été intégrées dans le logiciel.

Le logiciel utilise l'équation de Penman-Monteith pour estimer l'évapotranspiration de référence (ET_0), c'est-à-dire la quantité d'eau que la végétation théorique (gazon) évaporerait dans des conditions optimales.

Cette estimation permet de comprendre la demande en eau des végétaux et de concevoir l'irrigation nécessaire pour maintenir la santé des plantes tout au long de l'année. En intégrant les températures journalières maximales et minimales, les besoins hydriques des phytotechnologies ont pu être modélisés, contribuant ainsi à une gestion efficace des ressources en eau et à la durabilité du projet.

2.4.3. Dimensionnement des phytotechnologies

Le dimensionnement a été conduit de manière à optimiser l'efficacité environnementale, la durabilité et l'utilisation de l'espace.

Toitures végétalisées

Répartition de la surface : sur une toiture de 6 800 m², 80 % de la superficie, soit 5 440 m², sera végétalisée. Ce choix découle d'un compromis entre maximisation des superficies végétalisées et maintien de toitures conventionnelles pour d'autres usages. Les 20 % restants, représentant 1 360 m², sont destinés à des fonctions nécessitant des surfaces non végétalisées, telles que l'installation d'équipements techniques (systèmes de ventilation, panneaux solaires, etc.), l'accès pour l'entretien ou des zones de circulation.

De plus, cette répartition permet de maîtriser les coûts d'installation et d'entretien tout en atteignant des objectifs environnementaux ambitieux. En végétalisant 80 % des toitures, il est possible de réduire significativement le ruissellement des eaux pluviales, d'améliorer l'isolation thermique du bâtiment et de contribuer à la lutte contre les îlots de chaleur urbains, tout en respectant les contraintes budgétaires et techniques du projet.

- **40 % de cette superficie** (2 176 m²) sera dédiée à des toitures extensives (et semi-intensives) avec une épaisseur de substrat variant entre 10 cm et 25 cm, selon la charge admissible.

- **60 % de la superficie** (3 264 m²) sera affectée aux toitures intensives, avec un substrat de plus de 30 cm, permettant la culture de légumes.

Rendement agricole : les légumes cultivés sur les toitures intensives ont été sélectionnés en fonction des conditions climatiques locales. Les rendements potentiels ont été estimés à l'aide de données agronomiques (voir section 5.1.1.2). La capacité de production a également été traduite en quantité d'eau exportée sous forme de légumes.

Murs végétalisés

Surface totale : sur les 8 500 m² de murs extérieurs du Carrefour de l'eau, 1700 m² (soit 20 %) seront végétalisés. Ce pourcentage a été retenu pour trouver un équilibre entre deux contraintes principales :

- **Superficies fenestrées** : la présence de fenêtres est essentielle pour maximiser l'apport de lumière naturelle et favoriser l'efficacité énergétique du bâtiment.
- **Murs avec revêtements architecturaux** : certaines sections des murs nécessitent des matériaux spécifiques pour des raisons esthétiques ou fonctionnelles (par exemple, des façades particulièrement exposées nécessitant des revêtements résistants).

L'épaisseur standard du substrat retenue est de 10 cm, ce qui nécessite un volume total de 170 m³ de substrat pour soutenir les plantes. Cette configuration a été choisie pour assurer une couverture végétale efficace tout en maîtrisant les coûts d'installation et d'entretien.

Cellules de biorétention

Le dimensionnement des cellules de biorétention a été basé sur la gestion des eaux de ruissellement provenant des surfaces imperméables, soit les espaces de stationnement et les portions non végétalisées du toit du bâtiment. L'analyse a pris en compte le besoin en stationnement des différentes zones du bâtiment, estimé entre 1 500 et 2 100 m² (voir section 5.3.4).

Règle de dimensionnement : la superficie des cellules de biorétention a été déterminée pour représenter au moins 10 % de la superficie totale des espaces imperméables, qui sont, dans notre cas, les espaces de stationnement et 20 % de la superficie du toit du bâtiment (Ville de Québec, s.d). Cette règle repose sur des recommandations issues de la littérature scientifique et des pratiques courantes en aménagement durable. Plusieurs guides, tels que ceux produits par l'Environmental Protection Agency (2021) aux États-Unis et des

organismes spécialisés en gestion des eaux pluviales, préconisent un ratio de 5 à 10 % pour la superficie des infrastructures de biorétention par rapport à la superficie imperméable drainée dans des zones urbaines et périurbaines. Ainsi, les cellules doivent couvrir entre 150 m² et 210 m², selon l'étendue finale des espaces de stationnement et des toitures non végétalisées.

Ces cellules jouent un rôle clé dans la gestion des eaux pluviales, en favorisant l'infiltration et en réduisant le risque de ruissellement vers les zones environnantes.

3. DÉTERMINATION DU BASSIN VERSANT ET CARACTÉRISATION DES EAUX DE SURFACE DE LA ZONE D'ÉTUDE

3.1. Bassin versant de la rivière Saint-Charles

Le projet du Carrefour de l'eau doit voir le jour au sein du bassin versant de la rivière Saint-Charles (voir Figure 8). Le haut-bassin de la rivière Saint-Charles, également connu sous le nom de bassin versant de la prise d'eau potable, couvre une étendue de 348 km², s'étendant de Wendake à Stoneham-et-Tewkesbury, englobant la partie nord de la ville de Québec et plusieurs municipalités de la MRC de la rivière Jacques-Cartier. Ce territoire est caractérisé par de nombreux cours d'eau et plans d'eau, dont le lac Saint-Charles, qui constitue le principal réservoir d'eau potable de la Ville de Québec. Depuis 1854, la rivière Saint-Charles, émanant du lac, alimente le système d'aqueduc de la ville (APEL, 2014).

La caractérisation du bassin versant est importante pour comprendre le contexte hydrologique de la région. En cartographiant le bassin versant, en identifiant les affluents et en analysant les données sur les précipitations, il est possible de mieux saisir les dynamiques de l'écoulement de l'eau et leurs variations saisonnières. Cette compréhension est utile pour plusieurs raisons :

- **Pressions sur le bassin versant** : Identifier les pressions exercées sur le bassin versant, telles que l'urbanisation, l'agriculture et les activités industrielles, permet de mieux évaluer les impacts cumulés sur les ressources en eau. Connaître ces pressions aide à anticiper les défis liés à la qualité et à la quantité de l'eau.
- **Gestion des risques** : Comprendre les caractéristiques topographiques et climatiques du bassin versant permet de mieux gérer les risques d'inondation et d'érosion. Cela est particulièrement pertinent pour les zones en aval, où les effets des événements hydrologiques extrêmes sont amplifiés.

Les notions sur les bassins versants sont non seulement pertinentes pour la contextualisation du lieu du Carrefour de l'eau, mais elles pourraient aussi enrichir le volet sensibilisation du public dans le cadre du volet muséal du Carrefour de l'eau. En intégrant ces concepts dans les recommandations, on met en lumière comment le contenu de ce projet peut éclairer le volet éducatif et sensibiliser les visiteurs à l'importance de la gestion durable des ressources en eau. En illustrant l'interconnexion des différents éléments du bassin versant et l'impact des activités humaines sur la qualité et la quantité des ressources hydriques, le Carrefour de l'eau peut devenir un outil pédagogique essentiel pour promouvoir des pratiques respectueuses de l'environnement et renforcer la compréhension des enjeux liés à l'eau parmi le grand public.

Le lac Saint-Charles est principalement alimenté par la rivière des Hurons, avec son embouchure située dans sa partie Nord-Est. Les rivières Nelson et Jaune jouent également un rôle crucial, se déversant dans la rivière Saint-Charles en amont de la prise d'eau. La prise d'eau, positionnée à 11 km en aval du lac Saint-Charles, approvisionne l'usine de traitement d'eau potable de Québec (APEL, 2014), responsable de fournir 53 % des quelque 100 milliards de litres d'eau traités annuellement pour le bénéfice d'environ 300 000 citoyens, assurant ainsi un approvisionnement quotidien en eau potable de qualité (APEL, 2014). La Figure 8 illustre les sous-bassins versants au sein du bassin versant de la rivière Saint-Charles, tel que répertorié par l'APEL (2014). Elle présente une vue d'ensemble des divisions naturelles de ce territoire, permettant ainsi de mieux comprendre la répartition et le flux des eaux au sein du bassin versant. Cette cartographie est utile pour orienter les interventions en gestion de l'eau, en particulier pour les actions visant à réduire le ruissellement et à protéger les ressources hydriques locales.

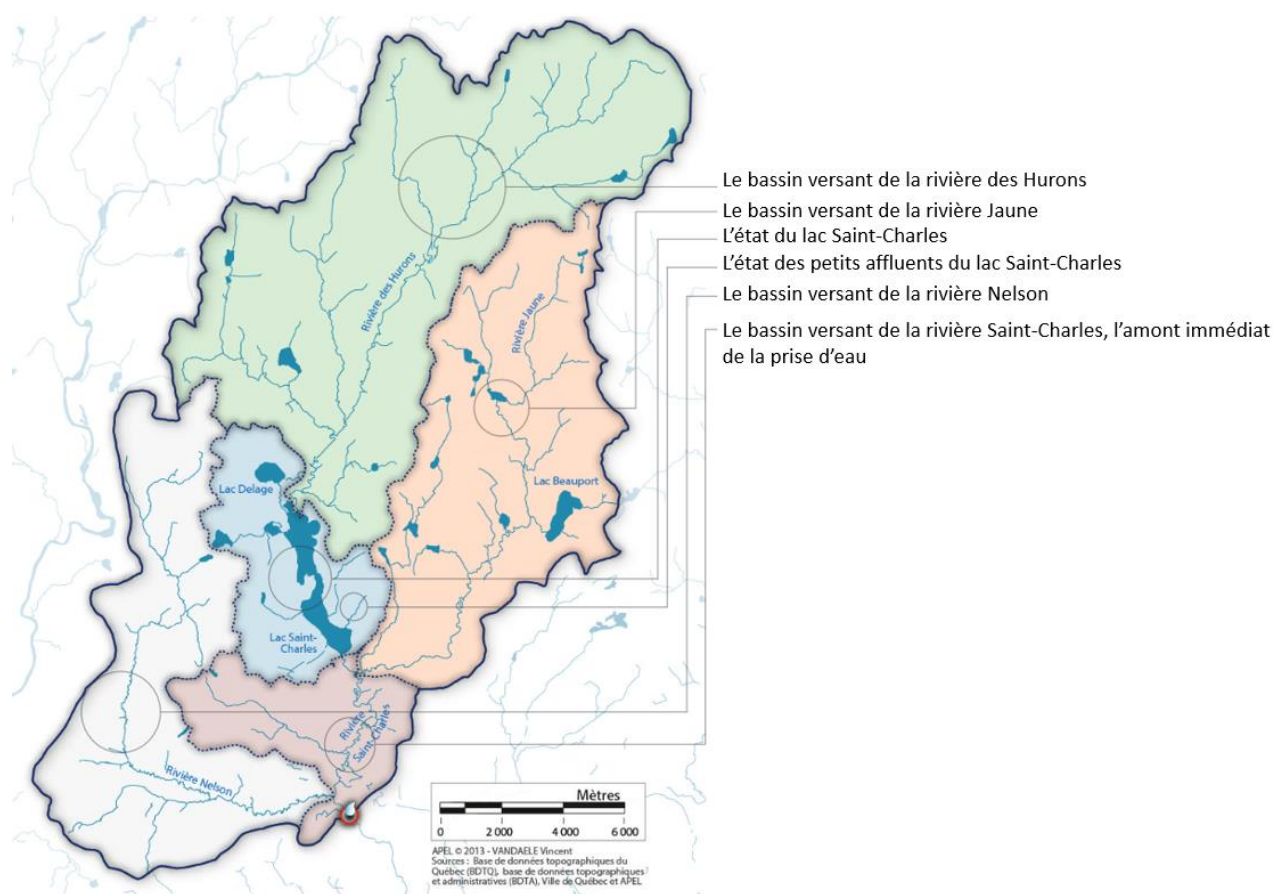


Figure 8 : Les sous-bassins versants du bassin-versant de la rivière Saint-Charles (APEL, 2014)

Malgré la prédominance des zones boisées dans le haut-bassin de la rivière Saint-Charles, les pressions anthropiques ont augmenté au fil des années (APEL, 2014). Étant donné que toutes les activités humaines dans un bassin versant peuvent influencer la qualité de l'eau, la Ville de Québec a mis en place diverses initiatives

pour protéger ses sources d'eau potable. Dans cette perspective, la Ville s'est associée à l'Association pour la protection de l'environnement du lac Saint-Charles et des Marais du Nord (APEL, 2014), maintenant nommée Agiro, pour sensibiliser toutes les parties prenantes du haut-bassin de la rivière Saint-Charles.

En somme, le bassin versant de la rivière Saint-Charles, en tant que source majeure d'eau potable pour la Ville de Québec, illustre l'importance cruciale de gérer de manière durable les pressions anthropiques et naturelles qui s'y exercent. Comprendre les dynamiques hydrologiques et les impacts des activités humaines dans cette région constitue non seulement un enjeu local, mais également un exemple représentatif des défis globaux liés à la gestion des ressources en eau.

3.1. Les eaux de surface

3.1.1. Rivière des Hurons

La rivière des Hurons occupe la position d'affluent prédominant du lac Saint-Charles. Son bassin versant (Figure 9), couvrant une superficie de 138,2 km², fournit 81,6 % des eaux alimentant le lac (APEL, 2014). Les rivières Noire, Hibou, Turgeon et Trois Petits Lacs ainsi que les ruisseaux Plamondon et Leclerc sont les principaux affluents de la rivière des Hurons (APEL, 2014).

Les résultats de l'étude de Tasing Kouom (2020) révèlent que l'occupation du bassin versant contribue à une charge totale moyenne de 1,54 tonne/an de phosphore (0,11 kg P/ha/an) et de 43,8 tonnes/an d'azote (3,19 kg N/ha/an) déversée de la rivière des Hurons vers le lac Saint-Charles. La caractérisation inclut les sources diffuses de contaminants, telles que les installations septiques autonomes, ainsi que les sources ponctuelles, comme l'usine de traitement des eaux usées (UTEU) de Stoneham (Kouom, 2020).

Ces informations mettent en évidence l'impact significatif de l'occupation du bassin versant, y compris les sources diffuses de contaminants, sur la qualité de l'eau du lac Saint-Charles ainsi que la contribution proportionnellement moindre mais non négligeable de l'usine de traitement des eaux usées de Stoneham (Kouom, 2020).

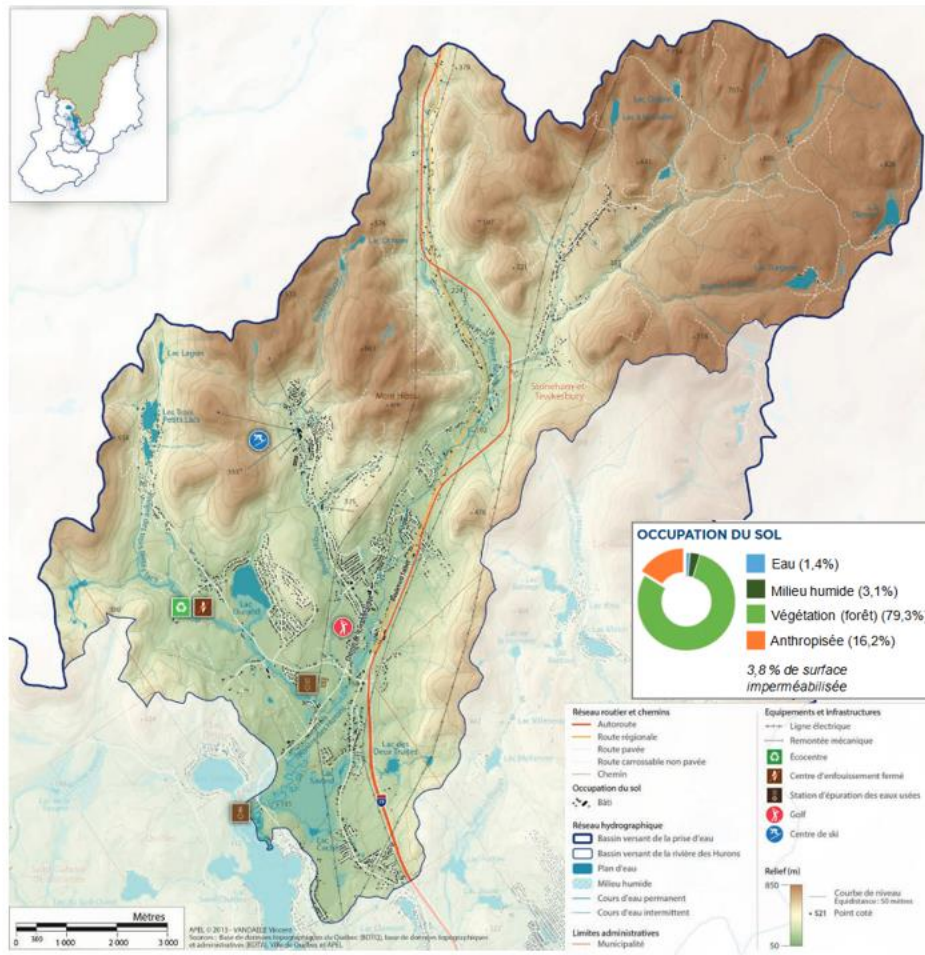


Figure 9 : Bassin versant de la rivière des Hurons (Agiro, 2021)

3.1.2. Rivière Jaune

Le bassin versant de la rivière Jaune (Figure 10) couvre 84,1 km² et représente 24 % de la superficie totale du bassin versant de la prise d'eau (Agiro, 2021). La partie sud du bassin versant est située sur le territoire de la Ville de Québec, alors que sa partie amont passe par les municipalités de Lac-Beauport, des cantons unis de Stoneham-et-Tewkesbury et de Sainte-Brigitte-de-Laval. Les lacs se trouvant dans le bassin versant de la rivière Jaune sont les suivants : Beauport, Clément, Morin, Fortier et Bleu. Le principal affluent de la rivière Jaune est le ruisseau du Valet (Agiro, 2021).

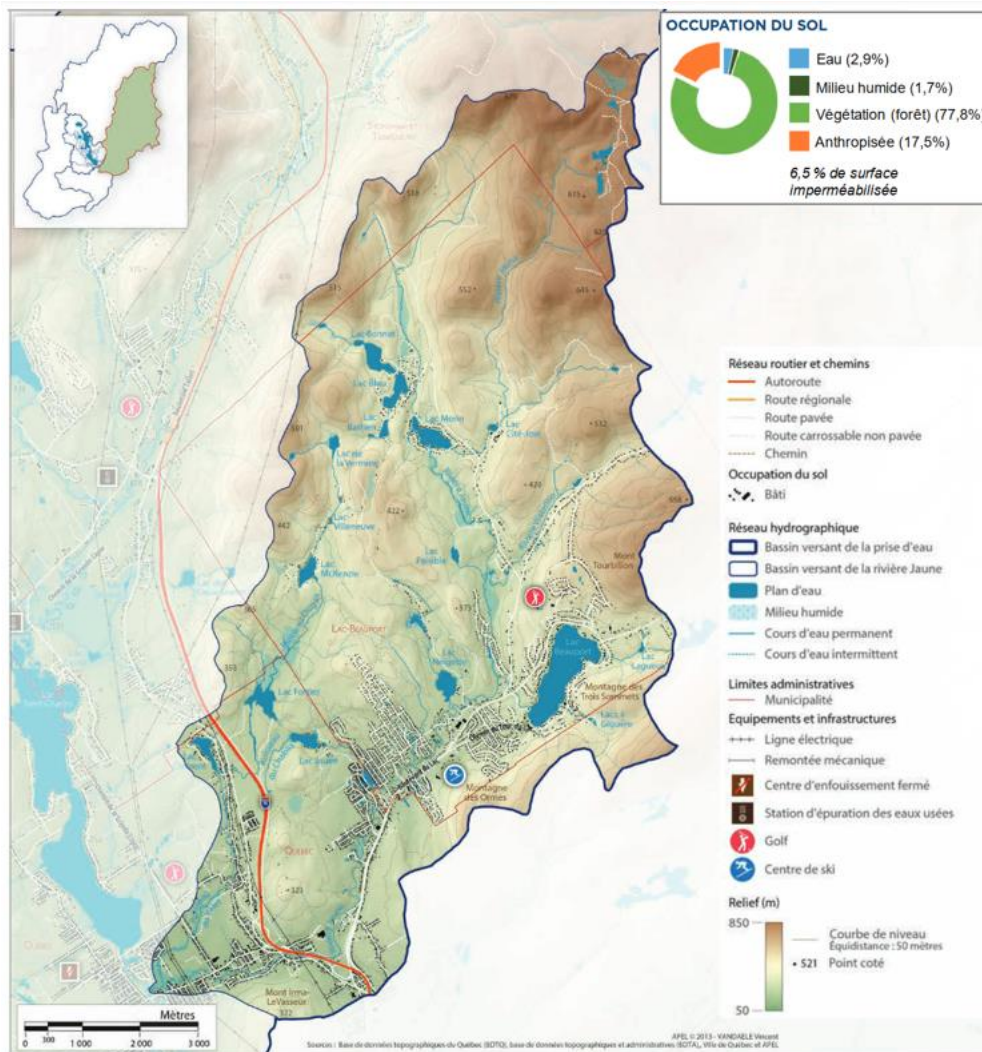


Figure 10 : Bassin versant de la rivière Jaune (Agiro, 2021)

Malgré les efforts de la Ville de Québec et de la municipalité de Lac-Beauport pour réparer les conduites d'égouts sanitaires et raccorder les installations septiques entre 2017 et 2019, la rivière Jaune continue de présenter des niveaux préoccupants de contamination fécale (Agiro, 2021).

3.1.3. Rivière Nelson

Le bassin versant de la rivière Nelson (Figure 11) s'étend sur une superficie de 68,3 km². En suivant le cours de l'amont vers l'aval, cette région est occupée par la municipalité de Saint-Gabriel-de-Valcartier, la base militaire des Forces canadiennes de Valcartier et le secteur Val-Bélair de la Ville de Québec. Il représente 20 % de la superficie totale du bassin versant de la prise d'eau (APEL, 2014). Le ruisseau Savard constitue le principal affluent de la rivière Nelson (APEL, 2014).

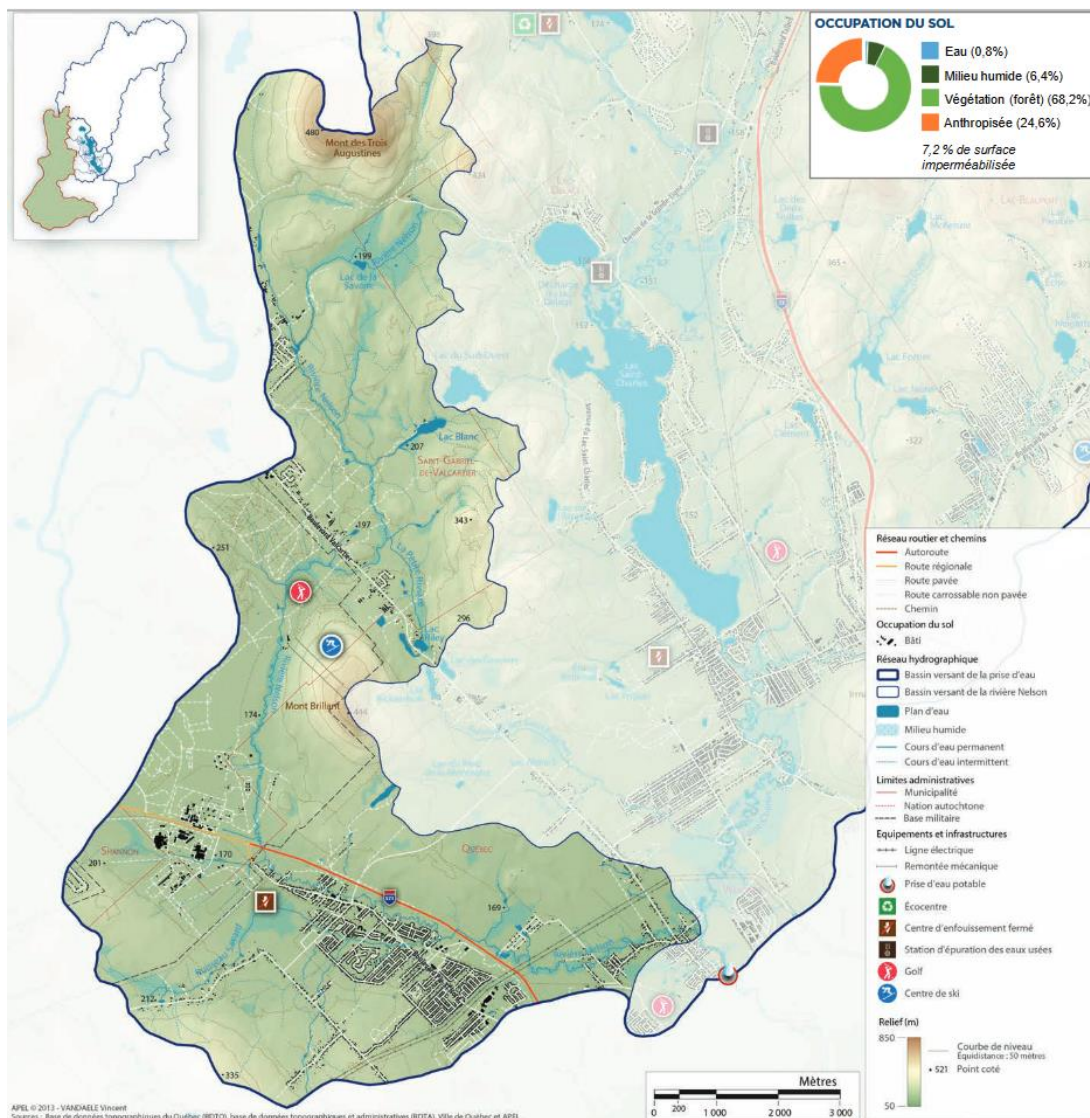


Figure 11 : Bassin versant de la rivière Nelson (APEL, 2014)

Le bassin versant de la rivière Nelson présente différentes problématiques, à savoir : conductivité spécifique élevée, présence d'*E. coli* et enrichissement en phosphore total et en composés azotés (Agiro, 2021). Ces problèmes peuvent être liés à plusieurs sources, notamment l'urbanisation croissante dans la région, qui entraîne le ruissellement des eaux pluviales chargées de contaminants provenant des routes, des infrastructures et des zones imperméables. L'activité militaire peut également contribuer à la dégradation de la qualité de l'eau en raison des produits chimiques et des déchets générés sur la base, ainsi que les installations septiques qui, lorsqu'elles sont mal entretenues, peuvent libérer des polluants dans les eaux souterraines et de surface.

L'impact de ces contaminants sur la qualité de l'eau et les écosystèmes est important. Par exemple, un enrichissement en phosphore peut entraîner des blooms algaux, qui dégradent l'oxygène dissous dans l'eau et

nuisent aux espèces aquatiques. De plus, la présence d'*E. coli* indique une contamination fécale, pouvant compromettre la santé publique et réduire la biodiversité en affectant les organismes sensibles. Ainsi, la gestion et la réduction de ces contaminants sont essentielles pour préserver la santé des écosystèmes aquatiques et la qualité de l'eau.

3.1.4. Lac Saint-Charles

Depuis 2006, le lac Saint-Charles (Figure 12) et le bassin versant de la prise d'eau potable associée à la rivière éponyme sont au cœur de nombreuses discussions, initiées par l'émergence de proliférations de cyanobactéries à leur surface (Agiro, 2022). Ces proliférations sont souvent causées par l'enrichissement en nutriments, notamment en phosphore, provenant de diverses sources telles que l'urbanisation, l'agriculture intensive et les effluents domestiques (Hayzoun, 2014).

L'excès de phosphore favorise la croissance rapide des cyanobactéries, qui peuvent former des blooms nuisibles (Barroin, 2003). Ces blooms ont des effets néfastes sur la qualité de l'eau, car ils peuvent réduire la transparence de l'eau, diminuer la concentration en oxygène dissous et libérer des toxines potentiellement dangereuses pour la santé humaine et la faune aquatique. En outre, la présence de cyanobactéries peut contaminer l'eau potable, posant des risques pour la santé des populations locales, ainsi que nuire à l'écosystème du lac Saint-Charles en perturbant les chaînes alimentaires et en affectant la biodiversité. Une gestion proactive des nutriments et une surveillance régulière sont donc cruciales pour préserver la qualité de l'eau et la santé des écosystèmes aquatiques (Barroin, 2003).

Le lac Saint-Charles, constituant le principal réservoir de la prise d'eau potable avec une contribution pouvant atteindre jusqu'à 6 0% en été, revêt une importance cruciale pour la Ville de Québec (Tanguay et al., 2021). Face aux proliférations de cyanobactéries, la Communauté métropolitaine de Québec (CMQ) a instauré trois règlements de contrôle intérimaire (RCI) en 2010, 2016 et 2019, visant à prévenir de nouvelles éclosions de cyanobactéries et à assurer la protection globale de la prise d'eau potable (Tanguay et al., 2021). Toutefois, le RCI de 2016 a été abrogé en raison de critiques soulevées par certains acteurs locaux qui considéraient que les restrictions imposées affectaient les usages récréatifs et économiques du lac, en particulier pour les activités nautiques. Ces tensions ont mis en lumière les défis politiques et réglementaires liés à la gestion de l'eau dans le contexte d'une population croissante et d'une urbanisation accrue. Bien que les règlements aient eu un impact positif sur la protection de la prise d'eau, il est essentiel d'établir un équilibre entre la préservation des ressources en eau et les besoins des communautés environnantes (Tanguay et al., 2021).

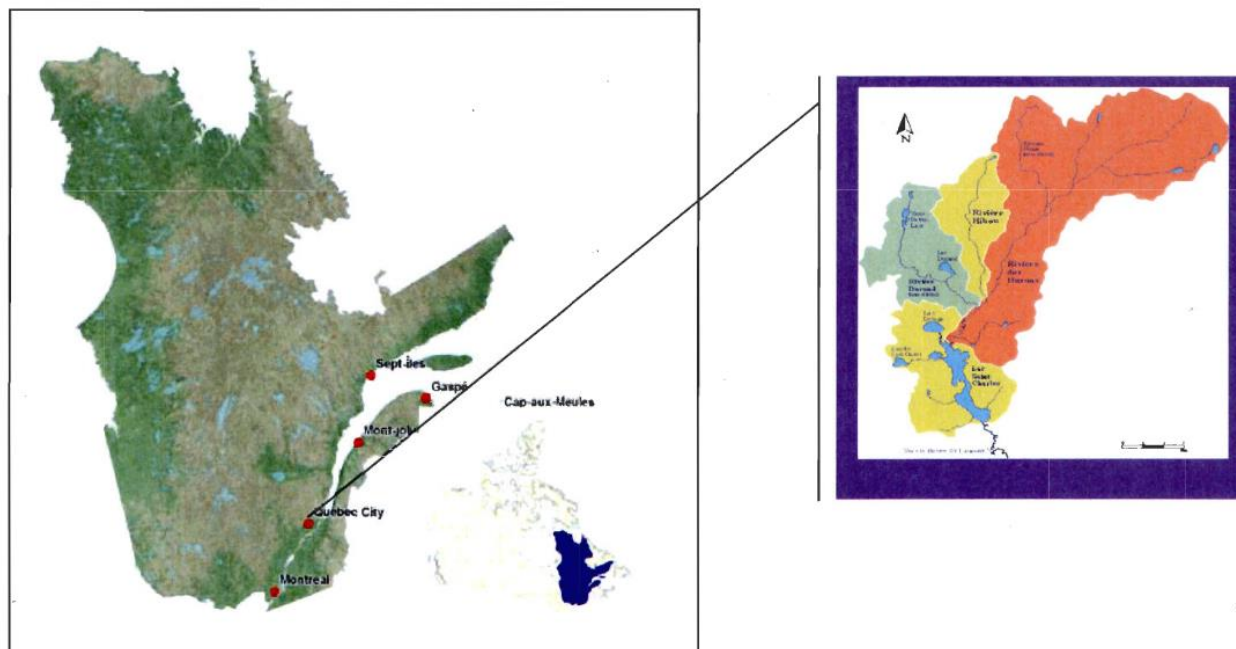


Figure 12 : Localisation du lac Saint-Charles (Salou, 2009)

Le rapport final de la démarche participative du projet de recherche LimnoScenES relève cinq importants défis socio-écologiques auxquels le bassin versant de la prise d'eau du lac Saint-Charles se trouve confronté (Tanguay et al., 2021). En premier lieu, il est crucial de maintenir la qualité de l'eau et l'intégrité du lac et de la rivière Saint-Charles. De plus, la nécessité d'adopter une gouvernance intégrée et concertée, spécifiquement adaptée au contexte du bassin versant de la prise d'eau, est un enjeu majeur, préférant ainsi une approche participative à une gouvernance descendante. Réduire l'impact environnemental du développement résidentiel et de l'aménagement constitue un troisième défi, suivi de près par la quatrième priorité d'améliorer l'accessibilité au lac et à la rivière, ainsi qu'aux écosystèmes de leurs bassins versants. Enfin, le cinquième défi consiste à assurer l'acceptabilité sociale des mesures adoptées pour la protection du bassin versant de la prise d'eau potable, soulignant l'importance d'une approche inclusive et acceptée par la communauté (Tanguay et al., 2021).

Le projet du Carrefour de l'eau répond de manière concrète aux cinq défis socio-écologiques relevés dans le rapport LimnoScenES pour le bassin versant de la prise d'eau et du lac Saint-Charles. En adoptant une approche de gestion "Net Zéro Eau", le projet vise à réduire la pression sur les ressources en eau potable et sur les bassins versants en amont. La création d'un lieu unique où convergent divers acteurs aux intérêts complémentaires permet d'aborder les enjeux d'économie circulaire et de gestion durable des ressources hydriques. En adoptant une approche "Net Zéro Eau", le projet réduit la dépendance aux ressources naturelles externes en recyclant et

réutilisant l'eau directement sur site, ce qui contribue à alléger la pression exercée sur les bassins versants en amont, notamment ceux du lac Saint-Charles.

3.1.5. Fleuve Saint-Laurent

Le réseau hydrographique du Saint-Laurent commence dans les Grands Lacs et s'étend jusqu'à la côte Est du Canada, où il se jette dans l'océan Atlantique. Il est reconnu comme l'un des plus vastes systèmes hydrographiques mondiaux, abritant quelque 45 millions de personnes réparties dans 76 bassins versants (Goyette et al., 2016). Ce système peut être subdivisé en trois régions principales : la portion fluviale, allant des Grands Lacs à la ville de Québec ; l'estuaire, s'étendant jusqu'à Pointe-des-Monts ; et enfin le golfe, qui s'ouvre sur l'océan Atlantique (Figure 13).

Malgré l'importance de ce fleuve dans la région de Québec, l'eau utilisée pour les bâtiments à Québec, y compris ceux du projet du Carrefour de l'eau, provient principalement du lac Saint-Charles. Ce lac joue un rôle crucial dans l'approvisionnement en eau potable de la région, ce qui rend la gestion de son bassin versant d'autant plus importante.

Cependant, en période de crue et de grande marée, les niveaux d'eau élevés du fleuve posent des risques potentiels d'inondation, ce qui nécessite une gestion rigoureuse des infrastructures. De plus, l'efficacité des systèmes de biorétention, souvent situés en dessous du niveau du sol et à proximité du fleuve, peut être compromise en zones saturées. Ces systèmes, essentiels pour la gestion durable des eaux pluviales, doivent être conçus et maintenus en tenant compte des variations saisonnières et des conditions hydrologiques spécifiques de la région.

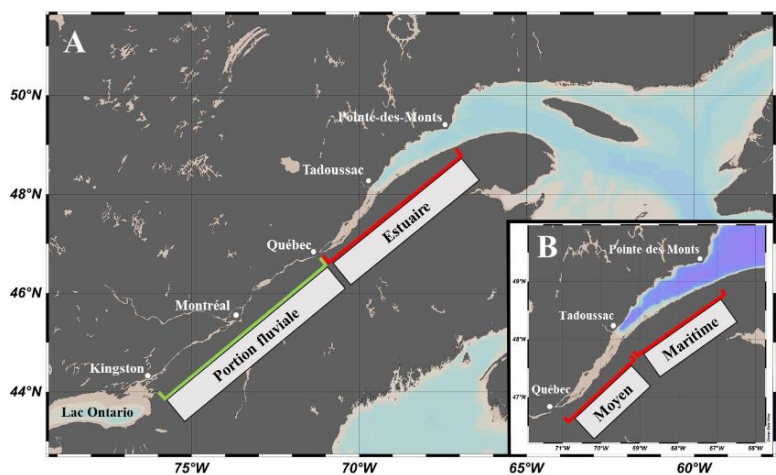


Figure 13 : Système du Saint-Laurent avec ses portions fluviales (Kingston à Québec) et estuariennes (Québec à Pointe-des-Monts) en A) et la sous-division entre estuaire moyen (Québec à Tadoussac) et maritime (Tadoussac à Pointe-des-Monts) en B) (Villeneuve, 2020)

3.2.Élévation des sites par rapport au niveau de la mer et de la nappe phréatique

Pour une meilleure compréhension des risques d'inondation et de la gestion durable de l'eau au Carrefour de l'eau, il est essentiel d'examiner les données topographiques et hydrologiques de la zone. À cet effet, une carte des courbes de niveau a été intégrée (Figure 14), réalisée à l'aide du logiciel QGIS en se basant sur les données provenant de Forêt Ouverte (Gouvernement du Québec, 2019, 2024), représentant l'élévation des sites du projet par rapport au niveau de la mer.

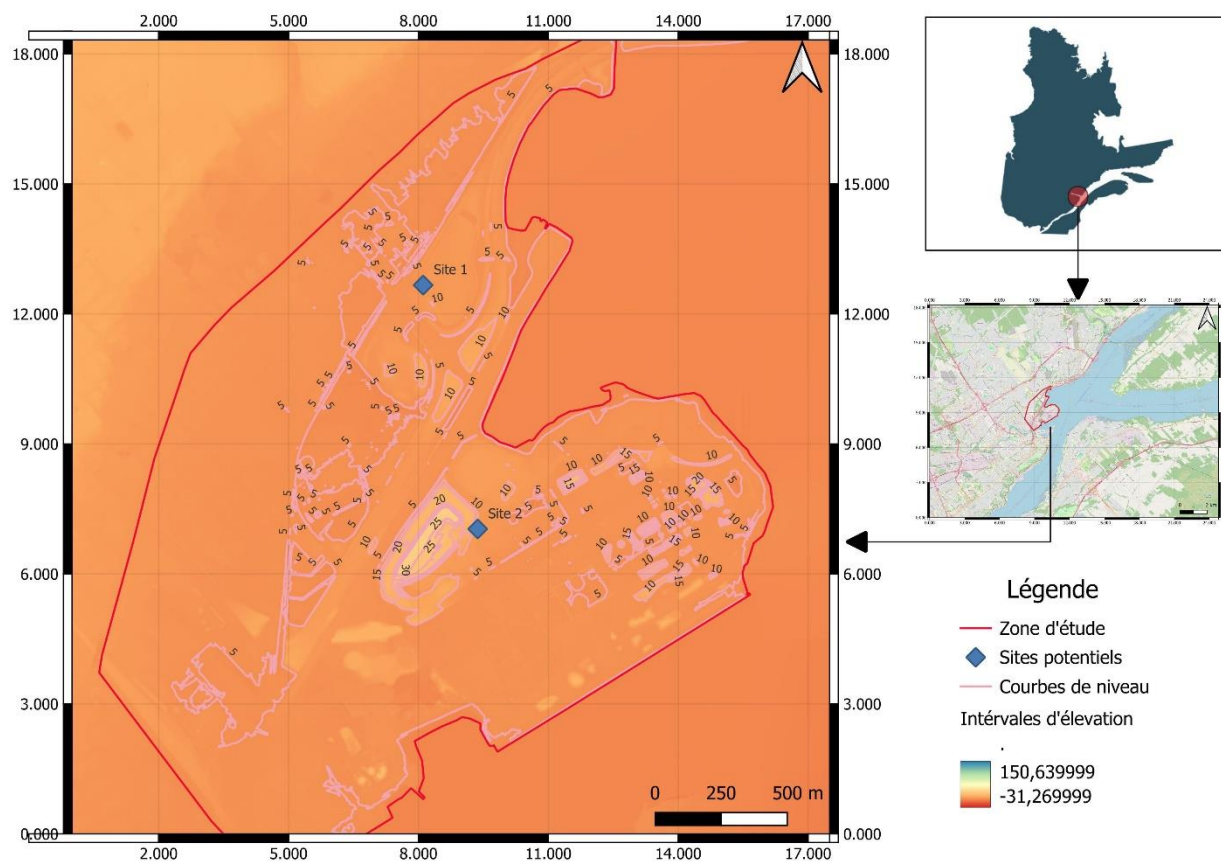


Figure 14 : Courbes de niveau représentant l'élévation des sites du Carrefour de l'eau par rapport au niveau de la mer, carte élaborée à l'aide du logiciel QGIS basée sur les données du Gouvernement du Québec (2024)

Les deux sites potentiels se trouvent à une altitude approximative de 10 mètres au-dessus du niveau de la mer. Cette information est pertinente pour évaluer la vulnérabilité aux inondations, notamment en raison des variations annuelles du niveau de l'eau dans le Saint-Laurent. Le niveau du Saint-Laurent varie annuellement en fonction des précipitations, de la fonte des neiges, des conditions climatiques générales et surtout en fonction de la marée. En moyenne, cette variation peut être de plusieurs mètres, ce qui peut augmenter les risques d'inondation pour les zones situées à basse altitude. Les prévisions climatiques suggèrent une

augmentation de ces variations dues aux changements climatiques, avec des épisodes plus fréquents et intenses de précipitations, et principalement avec l'augmentation du niveau de la mer.

L'altitude de 10 mètres des sites par rapport au niveau de la mer offre une certaine protection contre les inondations, mais il est crucial de tenir compte des scénarios d'élévation du niveau de l'eau, notamment en période de crue. Dans le golfe du Saint-Laurent, l'élévation du niveau de la mer pourrait atteindre entre 30 et 75 cm d'ici 2050, accentuant ainsi l'érosion et la submersion des zones côtières vulnérables (Parker et al., 2017). On peut s'attendre à une élévation du niveau de l'eau du même ordre dans la zone du projet d'étude. Par conséquent, il est important de mettre en place des infrastructures et des mesures de mitigation adaptées pour minimiser les risques d'inondation.

Il est essentiel de prendre en compte l'ensemble des aménagements situés en dessous du niveau du sol, comme les sous-sols du Carrefour de l'eau, pour garantir leur résilience face aux risques d'inondation et d'élévation de la nappe phréatique. En ce qui concerne les cellules de biorétention, dans ce mémoire de maîtrise, la profondeur des cellules a été déterminée en fonction de l'épaisseur standard du substrat, qui devrait être au minimum de 60 cm, mais idéalement de 90 cm ou plus (SQP, 2018), afin de maximiser la capacité de filtration, de soutenir une végétation robuste et d'améliorer la rétention des nutriments. Mais, il est important de vérifier si cette profondeur pourrait être influencée par l'élévation de la nappe phréatique. Si celle-ci augmente, il pourrait être nécessaire d'adapter la profondeur des biorétentions, en particulier dans les zones à faible altitude où l'infiltration pourrait être perturbée.

Pour évaluer l'impact des conditions hydrologiques sur les phytotechnologies au Carrefour de l'eau, la Figure 15 représente l'altitude du niveau de la nappe phréatique de la station 05097002, située à environ 15 km des sites d'étude.

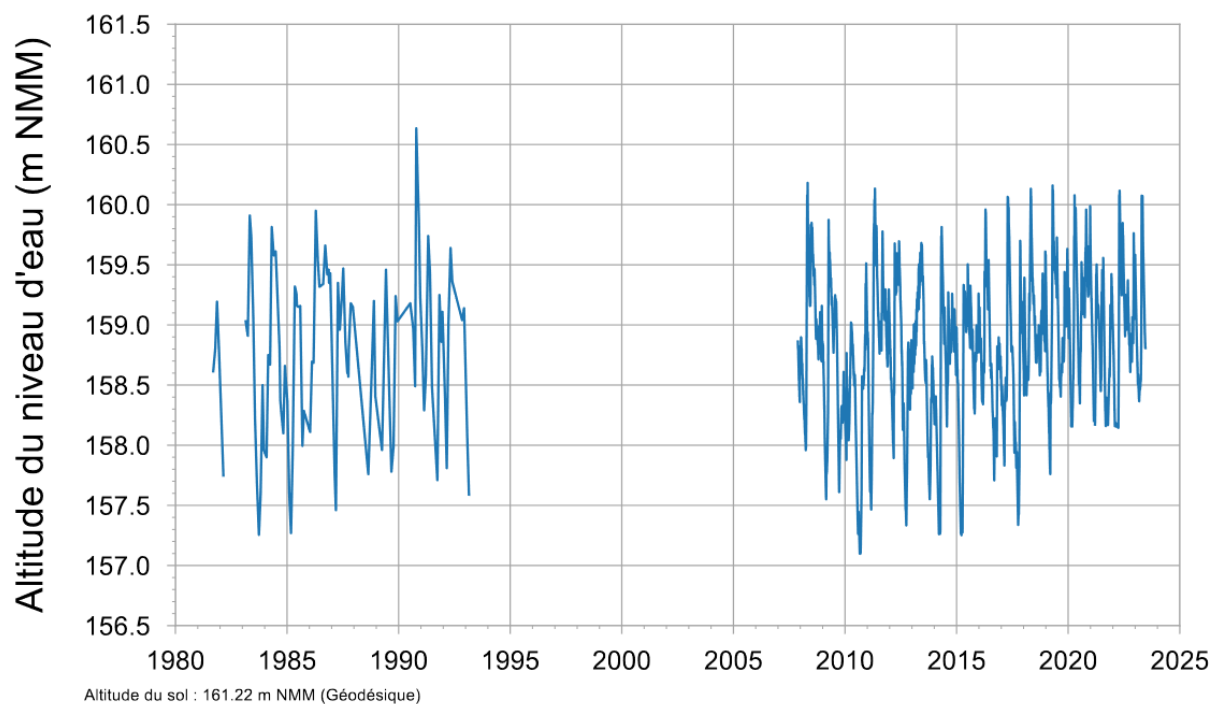


Figure 15 : Altitude du niveau de la nappe phréatique de la station 05097002 (Ministère de l'Environnement, s.d.)

Les variations d'altitude du niveau de la nappe phréatique sont relativement stables sur une période de 45 ans, ce qui donne une bonne indication de la tendance générale et des fluctuations saisonnières potentielles.

3.3. Caractérisation biophysique et géologique du sol

Afin de mieux comprendre la pédologie de la zone d'étude, les données du Système d'Information Hydrogéologique (SIH) ont été utilisées. Le SIH est une banque de données permettant de connaître la description de forages réalisés sur le territoire québécois depuis l'entrée en vigueur du Règlement sur les eaux souterraines en 1967. La figure suivante (Figure 16) présente la localisation des forages les plus proches de la zone d'étude (MELCCFP, s.d).

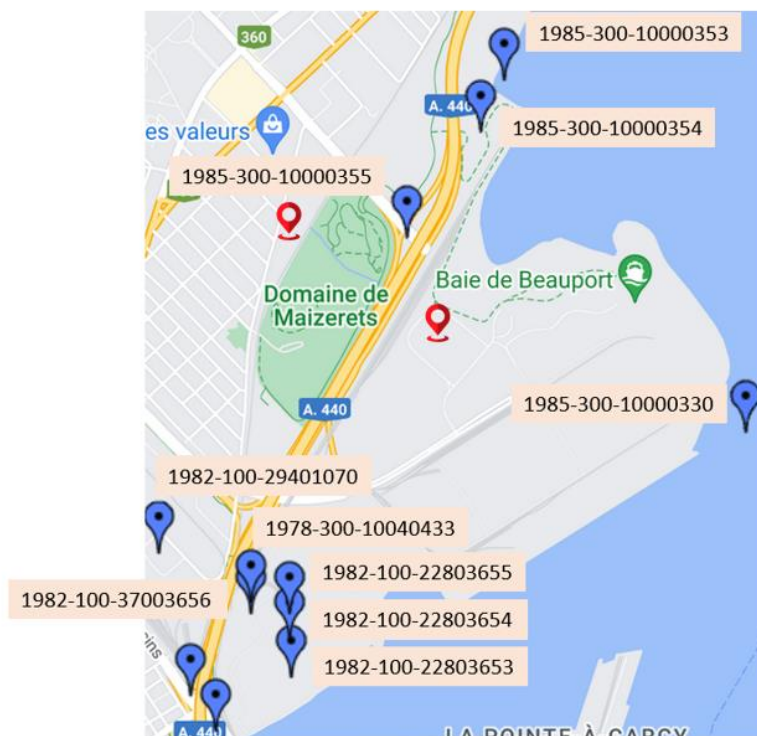


Figure 16 : Localisations des puits de forages faits par le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP, s.d)

Les données de granulométrie montrent que les matériaux les plus courants en surface (couche 1) sont généralement des sables de différentes textures (fin, moyen ou grossier) ou des remblais, indiquant une bonne capacité d'infiltration initiale. En revanche, des matériaux limitant l'infiltration comme l'argile ou le roc sont observés à des profondeurs variables selon les sites : par exemple, dès 1,5 m pour l'argile dans certains cas (ID 1978-300-10040433) et à partir de 51,8 m pour le roc dans d'autres (ID 1985-300-10000330) (Tableau 7). Ces informations sont cruciales pour la conception et l'implantation des cellules de biorétention au sein du Carrefour de l'eau. En connaissant la composition granulométrique du sol, la capacité de rétention et d'infiltration de l'eau de ces phytotechnologies peut être estimée. Cette connaissance permet d'optimiser la performance des cellules de biorétention, assurant ainsi une gestion efficace des eaux pluviales, la réduction des risques d'inondation et l'amélioration de la qualité de l'eau dans la zone environnante.

**Tableau 7 : Épaisseur et description des matériaux des séquences stratigraphiques des pompages
(MELCCFP, s.d)**

Identifiant	Diamètre (cm)	Profondeur (m)	Date du pompage	Séquence stratigraphique	Épaisseur de la couche (m)	Description du matériau
1985-300-10000353	5,1	9,6	Inconnu	1	9,6	SABL_Inconnu
1985-300-10000354	5,1	9,4	Inconnu	1	9,4	SABL_Inconnu
1985-300-10000355	5,1	24,7	Inconnu	1	5,9	REMB_Inconnu
				2	8,5	SABL_Inconnu
				3	1,7	ARGL_Inconnu
				4	6,1	ARGL/BLO_Inconnu
				5	2,5	ROCH_Inconnu
1985-300-10000330	5,1	164,6	1985-02-22	1	51,8	SABL/GRA_Inconnu
				2	112,8	ROCH_Inconnu
1982-100-29401070	50,8	24,8	1974-04-09	1	7,6	SABL/MOY_Inconnu
				2	6,1	SABL/GRO_Inconnu
				3	9,1	SABL/GRO_AVEC_GRAV
				4	2	GRAV_AVEC_SABL/GRO
1978-300-10040433	15,2	42,1	Inconnu	1	1,5	REMB_Inconnu
				2	2,1	SABL/FIN_Inconnu
				3	1,5	ARGL_Inconnu
				4	36,9	SABL_Inconnu
1982-100-22803655	40,6	32	1955-05-16	1	1,8	SABL/FIN_Inconnu
				2	3,7	ARCL/SIL_AVEC_SABL/FIN
				3	11,6	SABL/FIN_AVEC_BLOC
				4	2,7	SABL/FIN_Inconnu
				5	12,2	SABL/GRA_AVEC_BLOC
1982-100-37003656	25,4	33,5	1980-05-20	1	4,6	SABL_AVEC_ARGL
				2	25,9	SABL/FIN_Inconnu
				3	3	SABL/GRA_Inconnu
1982-100-22803654	30,5	35,1	1954-04-30	1	1,8	SABL/FIN_Inconnu
				2	3,7	ARGL/SIL_AVEC_SABL/FIN
				3	11,6	SABL/FIN_AVEC_BLOC
				4	2,4	SABL/FIN_Inconnu
				5	15,5	SABL/GRA_AVEC_BLOC
1982-100-22803653	30,5	41,1	1948-10-01	1	1,5	REMB_Inconnu
				2	2,1	SABL/FIN_Inconnu
				3	1,5	ARGL/SABL_Inconnu
				4	16,2	SABL/SIL_Inconnu
				5	10,4	SABL_Inconnu
				6	9,4	SABL/GRA_Inconnu

Il est important d'intégrer une évaluation pédologique in situ avant de finaliser les plans du Carrefour de l'eau. Une étude sur le terrain, incluant des carottes de sol extraites à plusieurs mètres de profondeur, permettrait d'affiner la compréhension des types de matériaux présents et de mieux évaluer leur capacité d'infiltration. En complément, l'utilisation d'un perméamètre de Guelph permettrait de mesurer directement les vitesses d'infiltration dans les différentes zones du site, garantissant ainsi la précision des estimations pour la gestion des eaux pluviales. Ces données permettront d'ajuster le dimensionnement des cellules de biorétention et de déterminer s'il est nécessaire d'inclure un exutoire, comme un système d'égout, pour gérer efficacement les trop-pleins.

La carte de découpage géologique de la zone du Carrefour de l'eau (Figure 17) montre que les deux sites prévus se trouvent sur des formations composées principalement de schiste, d'ardoise, de calcaire, de dolomie et de grès.

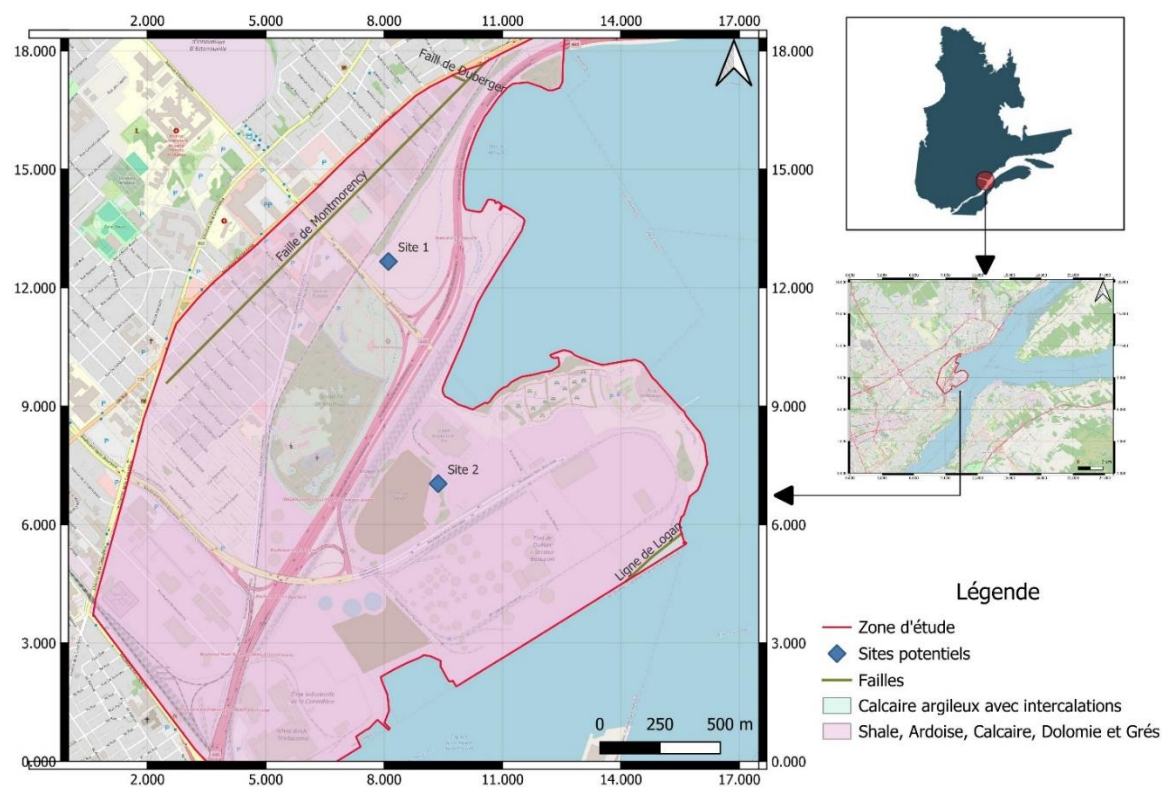


Figure 17 : Découpage géologique de la zone d'étude, carte élaborée à l'aide du logiciel QGIS sur la base des données provenant du Gouvernement du Québec (2024)

3.4. Couverture végétale et forestière

La carte du couvert forestier (Figure 18) est une composante importante de l'étude pour plusieurs raisons. Premièrement, la végétation existante influence directement la gestion de l'eau sur le site. Les forêts et les

arbres individuels contribuent significativement à l'infiltration et à l'évapotranspiration de l'eau, réduisant ainsi le ruissellement et les risques d'inondation. Deuxièmement, la connaissance du couvert forestier aide à planifier l'implantation des infrastructures vertes et grises. Les données utilisées pour élaborer la carte de la Figure 18 (ainsi que les cartes des Figures 19 et 20) proviennent de Forêt ouverte (Gouvernement du Québec, 2019), un service de cartographie Web qui peut être intégré dans un système d'information géographique. Les données disponibles sont mises à jour en continu. Par contre, il est possible que cette source se concentre principalement sur les essences ligneuses à grand déploiement, telles que les arbres, et qu'elle ne recense pas de manière aussi détaillée les arbustes et les herbacées présents dans la zone. En effet, les zones déjà couvertes de végétation peuvent être intégrées dans la conception pour maximiser les avantages écologiques. Enfin, la carte forestière permet d'identifier les types de végétation déjà présents, facilitant ainsi le choix des plantes pour les toitures et murs végétalisés ainsi que pour les cellules de biorétention.

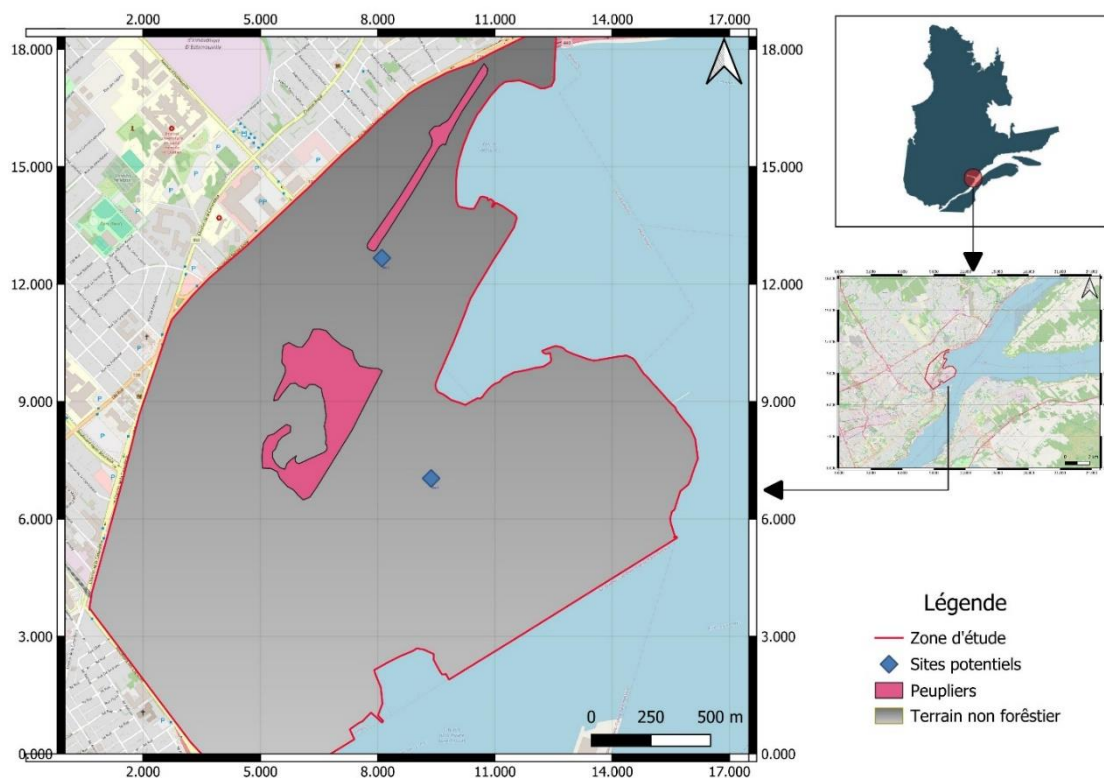


Figure 18 : Couvert forestier de la zone d'étude carte élaborée à l'aide du logiciel QGIS sur la base des données provenant du Gouvernement du Québec (2024)

L'analyse de la carte du couvert forestier de la zone d'étude révèle que cette dernière est principalement un terrain non forestier, avec une présence de peupliers près du site 1.

Les peupliers ont un fort potentiel d'évapotranspiration (Deveaux, 1969), et dépendamment de leur disposition exacte à proximité du terrain du Carrefour de l'Eau et du mouvement de la nappe phréatique, ils pourraient influencer le traitement de l'eau des biorétentions. Une partie de l'eau de ruissellement des zones imperméables pourrait être envoyée vers les zones avec peupliers. Quant aux terrains non forestiers, ils offrent une flexibilité maximale pour l'implantation des infrastructures sans nécessiter de défrichement préalable. Cependant, ils peuvent également nécessiter une modification du sol pour améliorer la capacité d'infiltration, comme discuté précédemment. La présence de peupliers, bien adaptés aux conditions locales, suggère que des espèces similaires pourraient être choisies pour les nouvelles plantations. Les peupliers, par exemple, sont connus pour leur croissance rapide et leur capacité à absorber de grandes quantités d'eau.

Aussi, la carte du couvert végétal permet de comprendre les types de végétation présents dans la zone du projet. Cette information est essentielle pour plusieurs raisons. Elle influence la capacité d'infiltration et d'évapotranspiration du sol, qui sont des éléments clés pour la gestion durable de l'eau. De plus, elle aide à planifier l'implantation des infrastructures vertes, comme les toitures et murs végétalisés ainsi que les cellules de biorétention. Connaître les types de végétation existants permet également de choisir les plantes les mieux adaptées pour ces infrastructures, maximisant ainsi leur efficacité.

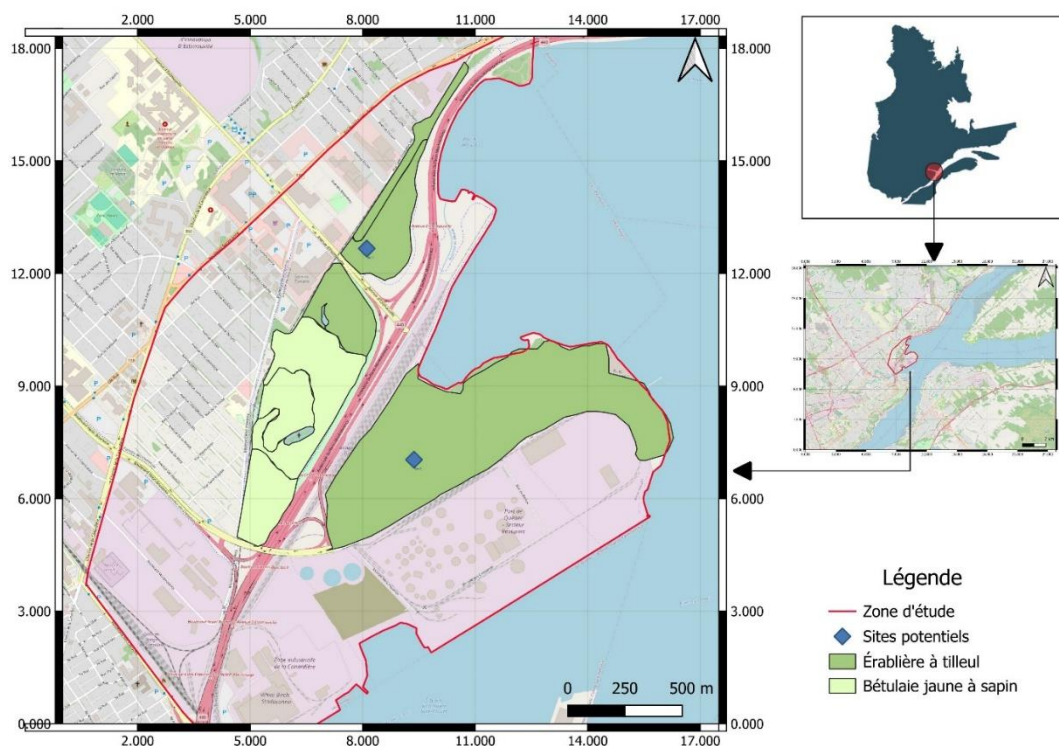


Figure 19 : Couvert végétal de la zone d'étude carte élaborée à l'aide du logiciel QGIS basé sur des données provenant du Gouvernement du Québec (2024)

En analysant la carte du couvert végétal (Figure 19), nous constatons que les deux sites se trouvent dans une zone naturellement dominée par des érablières à tilleul, avec une proximité immédiate à une bétulaie jaune à sapin.

D'une part, les érablières à tilleul et les bétulaies jaunes à sapin sont des écosystèmes qui favorisent une bonne infiltration et évapotranspiration de l'eau. Cela suggère que le sol dans ces zones pourrait avoir une bonne capacité d'infiltration naturelle, ce qui est avantageux pour les cellules de biorétention. Une analyse détaillée du sol sera cependant nécessaire pour confirmer cette hypothèse et déterminer si des modifications du substrat seront nécessaires. D'une autre part, la présence de ces types de végétation offre une couverture végétale existante qui peut être intégrée dans la conception des infrastructures vertes. Par exemple, les érablières à tilleul et les bétulaies jaunes à sapin indiquent que ces espèces sont bien adaptées aux conditions locales. Ces types de végétation peuvent donc servir de référence pour la sélection des plantes pour les infrastructures végétalisées. Les érables et les tilleuls, par exemple, sont des espèces robustes qui offrent une bonne ombre et une évapotranspiration efficace, ce qui est bénéfique pour la gestion de l'eau sur le terrain en conjonction avec les zones de biorétention. L'implantation de végétation basse typique des sous-bois des forêts d'érables et de tilleuls pourrait aussi être facilitée ailleurs sur le terrain si la végétation dominante était influencée par les caractéristiques pédologiques du site.

4. ÉTUDE CLIMATOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

4.1. Régression linéaire

4.1.1. Précipitations liquides par saison

Comme on peut le constater à la Figure 20, en automne, la régression linéaire révèle une tendance croissante des précipitations liquides, bien que le coefficient de détermination (R^2) de 0,126 indique que le modèle explique seulement 12,6% de la variance, avec une pente de 0,6249 et une significativité statistique (p -value $< 0,001$). En hiver, la régression linéaire ne montre pas de tendance significative, le R^2 étant de 0,007 et le modèle n'étant pas statistiquement significatif (p -value = 0,333). Au printemps, une tendance croissante significative est observée, avec un R^2 de 0,147 et une pente de 0,5749, renforcée par une significativité statistique (p -value $< 0,05$). En été, une légère tendance croissante est également visible, bien que plus modérée, avec un R^2 de 0,069 et une pente de 0,5822, le modèle étant statistiquement significatif (p -value $< 0,05$). Ces résultats soulignent l'importance de surveiller les variations saisonnières des précipitations liquides pour une gestion efficace des ressources en eau (voir Annexe 1). En 2050, on peut s'attendre à une augmentation des précipitations saisonnières : 231 mm au printemps, 388 mm en été et 326 mm en automne, tandis que l'hiver enregistrerait 59 mm, si on extrapole les tendances linéaires du passé.

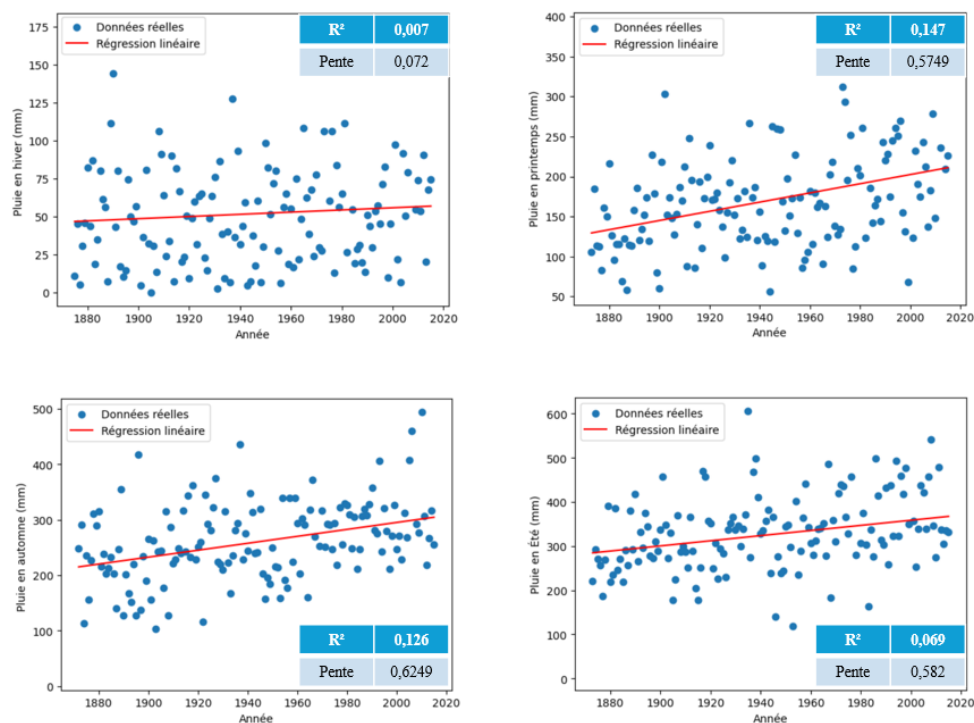


Figure 20 : Régression linéaire des précipitations liquides sur 145 ans

En résumé, les résultats de l'analyse de régression linéaire révèlent une tendance croissante des précipitations liquides en automne, au printemps et en été, bien que les modèles expliquent une faible part de la variance, avec des significativités statistiques variées selon les saisons.

4.1.2. Précipitations solides par saison

La Figure 21 illustre qu'en automne, la régression linéaire montre une tendance légèrement décroissante des précipitations solides, représentées en équivalent en eau, au fil des 144 ans étudiés, avec une pente négative (-0,131) et un R^2 de 0,045, expliquant seulement 4,5% de la variance, statistiquement significative ($p = 0,0105$). En hiver, la tendance des précipitations solides montre une très légère augmentation, mais cette tendance est si faible qu'elle n'est pas statistiquement significative ($p = 0,324$), indiquant ainsi une stabilité générale des précipitations solides hivernales au fil du temps (avec une pente positive de 0,1279 et un R^2 de 0,007). Au printemps, une légère diminution est visible avec une pente faible (pente = -0,0950) et un R^2 de 0,010, mais le modèle n'est pas statistiquement significatif ($p = 0,243$), indiquant une stabilité des précipitations printanières (Annexe 2).

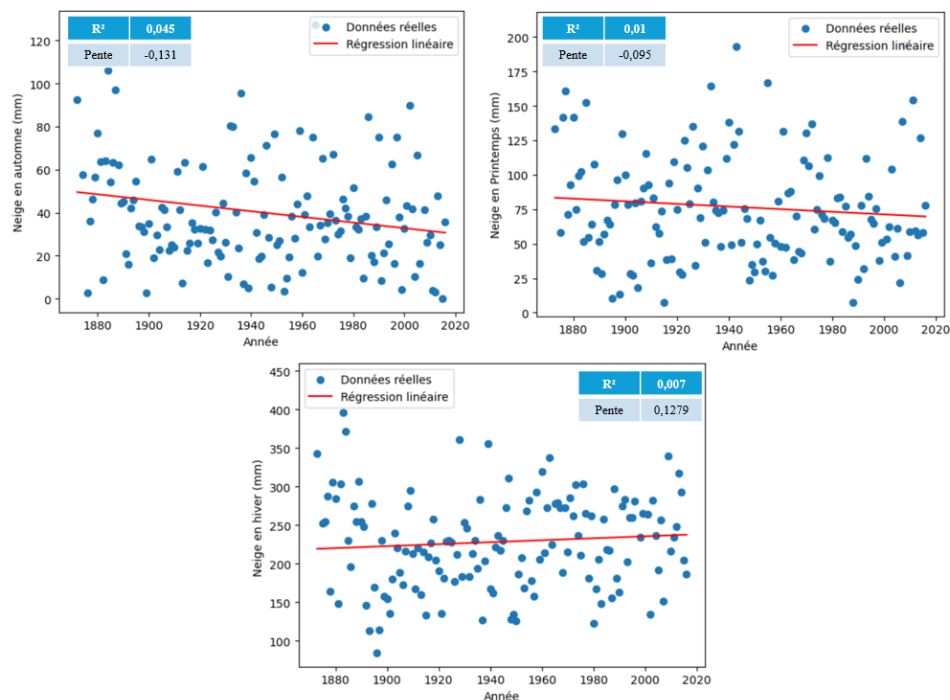


Figure 21 : Régression linéaire des précipitations solides, exprimées en équivalent en eau, sur 145 ans

En plus de vérifier les variations saisonnières des précipitations solides, il est crucial de comprendre leur impact spécifique pour le Carrefour de l'eau. Les données historiques sur les précipitations solides permettent de calculer la charge portante du toit requise, un aspect essentiel pour les plans futurs, notamment si une végétalisation du toit est envisagée, car celle-ci augmenterait le poids total. Par ailleurs, la gestion des eaux de

fonte est primordiale pour éviter la surcharge du réseau d'égout. 1 cm de neige équivaut à environ 1 mm d'eau une fois la neige fondue (Gouvernement du Canada, 2023). Si la neige accumulée sur le toit devait être utilisée comme source d'eau pour le bâtiment, ou si l'eau de fonte devait être évapotranspirée ou infiltrée, il est impératif de planifier ces aspects en avance pour une gestion durable. En intégrant ces considérations, le Carrefour de l'eau peut non seulement optimiser sa structure et son fonctionnement, mais aussi contribuer à une gestion environnementale plus efficace et résiliente.

4.1.3. Températures

Les modèles de régression linéaire montrent une capacité variable à expliquer les variations annuelles des températures saisonnières moyennes. Pour le printemps, le modèle présente une faible capacité prédictive avec des R^2 de 0,004 et des R^2 ajustés négatifs de -0.023, indiquant une absence de relation significative entre les températures et les années étudiées. Pour l'été et l'automne, les modèles montrent une capacité légèrement améliorée avec un R^2 de 0,089 pour l'été et de 0,077 pour l'automne, tandis que l'hiver présente un ajustement modeste avec un R^2 de 0,128 et une significativité statistique pour l'année (p -value = 0,0296). Ces résultats soulignent la nécessité d'explorer davantage de variables pour améliorer la précision des modèles dans la prédiction des variations saisonnières des températures sur cette période de 40 ans. En outre, la Figure 22 illustrant la régression linéaire des températures annuelles moyennes sur 40 ans, est présentée pour visualiser les tendances observées et anticipées dans les températures.

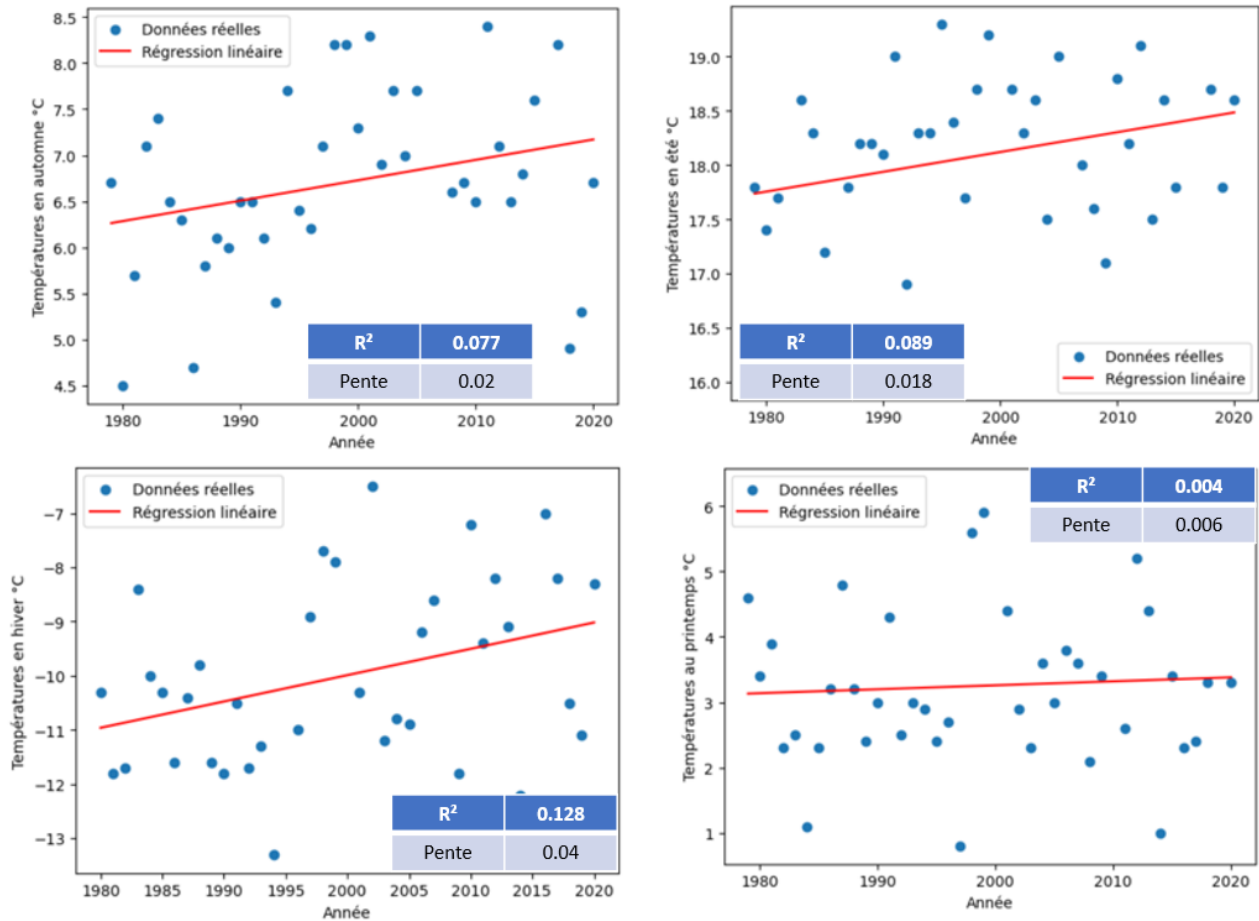


Figure 22 : Régression linéaire des températures moyennes saisonnières sur 40 ans

4.2. Estimation des précipitations et températures futures

Le Tableau 8 présente les estimations des précipitations liquides et solides ainsi que des températures pour les saisons de l'automne, de l'hiver, du printemps et de l'été pour les années 2025, 2030 et 2075. Ces estimations ont été faites en extrapolant les régressions linéaires établies précédemment. Ces informations revêtent une importance capitale pour le projet de gestion des eaux pluviales du bâtiment du Carrefour de l'eau, en permettant d'anticiper et de planifier efficacement sur la durée de vie des infrastructures. L'analyse des tendances météorologiques futures est essentielle pour garantir une gestion durable des ressources hydriques et une résilience face aux conditions climatiques changeantes.

Tableau 8 : Estimations des précipitations et températures saisonnières

Année	P liquides (mm)	Intervalle de confiance à 95% (mm)	P solides – équivalent en eau (mm)	Intervalle de confiance à 95% (mm)	T moyenne (°C)	Intervalle de confiance à 95 % (°C)
Automne (septembre-novembre)						
2025	310	[285 ; 335]	29	[20 ; 38]	7,3	[6 ; 8]
2030	313	[287 ; 340]	28	[19 ; 38]	7,4	[6 ; 8]
2075	341	[303 ; 379]	22	[18 ; 38]	8,4	[6 ; 10]
Hiver (décembre-février)						
2025	57	[44 ; 70]	238	[215 ; 261]	-8,7	[-10 ; -7]
2030	57	[43 ; 71]	239	[215 ; 264]	-8,5	[-9 ; -7]
2075	61	[40 ; 81]	245	[210 ; 280]	-6,3	[-9 ; -3.]
Printemps (mars-mai)						
2025	216	[195 ; 238]	68	[54 ; 83]	3,4	[2 ; 4]
2030	219	[198 ; 241]	68	[53 ; 83]	3,4	[2 ; 4]
2075	245	[213 ; 277]	64	[42 ; 86]	3,7	[1 ; 6]
Été (juin-août)						
2025	373	[340 ; 405]	-	-	18,5	[18 ; 19]
2030	376	[341 ; 410]	-	-	18,6	[18 ; 19]
2075	402	[353 ; 451]	-	-	19,5	[17 ; 21]

4.3. Analyse des précipitations journalières et évapotranspiration

Pour évaluer la viabilité des phytotechnologies au Carrefour de l'eau, une analyse des précipitations journalières et de l'évapotranspiration a été réalisée sur une année représentative, en l'occurrence 2011 (voir Tableau 9), qui a été choisie en raison de ses conditions météorologiques extrêmes (avec un total annuel de 1 217 mm de précipitations liquides et de 380 mm de précipitations solides, en équivalent en eau). Cette année a aussi enregistré des précipitations saisonnières maximales (avec un total de précipitations liquides et solides de 288 mm en hiver, 490 mm au printemps, 478 mm en été et 311 mm en automne), permettant ainsi une évaluation robuste de la capacité des infrastructures.

Tableau 9 : Calcul de l'évapotranspiration mensuelle de l'année 2011

Mois	T min	T max	H moyenne	Ensoleillement	Évapotranspiration
	(°C)	(°C)	(%)	(h/j)	(mm/j)
Janvier	-14,0	-7,3	79	3,2	0,31
Février	-15,3	-5,5	73	5,3	0,48
Mars	-9,6	0,0	74	6,0	0,87
Avril	-2,0	7,0	76	6,5	1,57
Mai	6,2	14,1	79	6,5	2,38
Juin	10,6	21,9	74	9,9	3,89
Juillet	14,1	26,1	74	10,6	4,52
Août	14,1	22,8	79	7,4	3,29
Septembre	10,1	20,1	76	7,5	2,60
Octobre	3,9	11,3	80	4,8	1,25
Novembre	-1,5	6,0	79	4,2	0,72
Décembre	-9,9	-1,8	77	4,0	0,43
Moyenne	0,6	9,6	77	6,3	1,86

T : température

H : humidité

Les mois d'hiver (janvier à mars) montrent des températures minimales et maximales basses, avec un ensoleillement relativement faible et une humidité relative élevée. Ces conditions limitent l'évapotranspiration, comme indiqué par les faibles valeurs (0,31 mm/j en janvier, 0,48 mm/j en février et 0,87 mm/j en mars).

À partir d'avril, les températures augmentent progressivement, tout comme l'ensoleillement et l'évapotranspiration. Les mois d'été (juin à août) présentent les valeurs les plus élevées d'évapotranspiration (3,89 mm/j en juin, 4,52 mm/j en juillet et 3,29 mm/j en août), correspondant à des températures plus chaudes et à un ensoleillement maximal. Ces mois exigent une gestion efficace de l'irrigation pour répondre aux besoins croissants des plantes.

Vers la fin de l'année, l'évapotranspiration diminue à nouveau à mesure que les températures chutent (0,72 mm/j en novembre et 0,43 mm/j en décembre), ce qui reflète une diminution de la demande en eau des plantes avant l'hiver.

La moyenne annuelle d'évapotranspiration est calculée à 1,86 mm/jour. Cette valeur moyenne est utilisée pour dimensionner les systèmes d'irrigation et est essentielle pour assurer une gestion efficace de l'eau tout au long de l'année. En intégrant ces données dans la conception des phytotechnologies, nous visons à maximiser

l'utilisation durable de l'eau tout en assurant une croissance optimale des plantes, contribuant ainsi à la résilience du projet face aux variations climatiques et aux extrêmes météorologiques.

En résumé, la zone d'étude illustre la nécessité d'une gestion proactive et intégrée des ressources en eau, en combinant des infrastructures adaptées aux variations climatiques saisonnières et des phytotechnologies optimisées pour maximiser l'utilisation durable de l'eau. Cela renforce la résilience environnementale et soutient une planification durable face aux défis hydrologiques et climatiques anticipés.

5. ÉTUDE DE FAISABILITÉ ET PLANIFICATION DE L'IMPLANTATION DES PHYTOTECHNOLOGIES

5.1. Toitures végétalisées

5.1.1. Étude technique

L'étude technique consiste à analyser les aspects pratiques et techniques de ce projet. Elle vise à déterminer les spécificités de la mise en place des toitures végétalisées, telles que le choix des matériaux, la structure de la toiture, les systèmes de drainage et d'irrigation, le type de végétation, etc. Le but est d'optimiser le système, de réduire les risques et d'assurer la performance des toitures végétalisées.

Le dimensionnement des toitures végétalisées a été réalisé en tenant compte des contraintes du bâtiment et du terrain. Cette approche permet de définir les paramètres de conception à partir des caractéristiques physiques du site, telles que la surface disponible, la capacité de charge de la toiture et les besoins en gestion de l'eau. Les choix de matériaux, la structure de la toiture et les systèmes de drainage et d'irrigation ont été optimisés pour répondre aux contraintes spécifiques tout en maximisant les bénéfices écologiques et fonctionnels.

5.1.1.1. Types de toitures végétalisées

Pour 40% de l'espace dédié aux toitures végétalisées, l'implantation de toitures végétalisées extensives a été choisie. Ces dernières requièrent une couche de substrat d'une épaisseur variant entre 10 et 20 cm, ce qui permet la croissance de plantes de faible hauteur ainsi que d'arbustes. Il est plus pratique d'opter pour ce type de toiture vu qu'elles nécessitent moins de profondeur de sol, supposent un auto-entretien de la toiture et ont moins de besoins en eau (Berardi et al., 2014). En plus, ces toitures ont une masse inférieure et conviennent aux toits de grande taille tandis que leur processus de construction est techniquement simple et permet une mise en œuvre sur des toits en pente. Les toitures végétalisées extensives se distinguent par l'utilisation de plantes à croissance lente et peu exigeantes en entretien, telles que les crassulacées, les bryophytes et certaines herbacées (Grégoire & Hénault-Éthier, s.d). Cependant, les types de plantes pouvant être utilisées pour les toitures végétalisées extensives sont limités, et les potentiels de performance énergétique et de gestion des eaux pluviales sont relativement faibles (Dunnett & Kingsbury, 2008; MacIvor et al., 2013). Pour cette raison, le reste des toits dédiés à la plantation sera couvert de végétations intensives. En outre, il est montré que les toitures végétalisées pourraient conduire à une atténuation du ruissellement de 60 % pour celles extensives et jusqu'à 100 % pour les toitures végétalisées intensives (DeNardo et al., 2005). Cette répartition permet d'optimiser la performance hydrique et la capacité de stockage d'eau de l'ensemble des toits, tout en tenant compte des spécifications techniques et des coûts d'entretien.

Pour les toitures intensives, diverses variétés de plantes peuvent être utilisées pour créer un environnement naturellement attrayant, favorisant une biodiversité accrue tout en fournissant un espace de détente (Berardi et al., 2014). Elles présentent un potentiel plus élevé en termes d'isolation améliorée, de gestion efficace des eaux de pluie et de performances énergétiques améliorées. Cependant, leur poids significatif peut nécessiter une structure renforcée, et l'utilisation de systèmes de drainage et d'irrigation est souvent nécessaire, ce qui entraîne une augmentation de la complexité technique et des coûts associés (Dunnett & Kingsbury, 2008; Pearen & Wilson, 2006). En plus, puisqu'un des principaux objectifs du Carrefour de l'eau est de créer un lieu socialement acceptable et désirable, il est crucial de permettre un accès aux toits. Ainsi, la variété de plantes choisies permettra de créer un environnement naturel attrayant et de promouvoir la biodiversité, tout en offrant un espace de loisirs pour les usagers et les visiteurs du bâtiment.

Afin d'avoir une meilleure idée des différences entre les toitures végétalisées extensives et intensives, le Tableau 10 présente une classification de ces dernières et de leurs principaux attributs.

Tableau 10 : Classification des toitures végétalisées et leurs principaux attributs (Berardi et al., 2014)

Principaux attributs	Toitures extensives	Toitures intensives
Épaisseur	200 mm et moins	200 mm et plus
Accessibilité	Inaccessible*	Accessible
Poids	60-150 kg/m ²	300 kg/m ²
Diversité des plantes	Faible	Élevée
Construction	Modérément facile	Techniquement compliquée
Irrigation	Souvent pas nécessaire	Nécessité de drainage et d'irrigation
Maintenance	Simple	Compliquée
Coûts totaux (installation + entretien)	Faibles	Élevés

*Les toitures extensives sont effectivement inaccessibles pour les usagers du bâtiment, principalement en raison de leur sensibilité au piétinement, qui pourrait endommager la végétation et réduire leur efficacité.

La classification des toitures végétalisées, notamment en ce qui concerne l'épaisseur du substrat, peut varier selon les auteurs et les sources consultées. Certains considèrent une épaisseur maximale de 150 mm pour les toitures extensives, tandis que d'autres fixent cette limite à 200 mm. Ces différences s'expliquent par des approches méthodologiques ou des contextes climatiques et techniques spécifiques. Ces variations ne remettent pas en question la pertinence des catégories, car elles restent cohérentes avec les objectifs de performance attendus (rétention d'eau, poids, biodiversité, etc.). Il est donc important de préciser la référence utilisée dans chaque contexte, tout en reconnaissant que ces écarts sont fréquents dans la littérature et n'ont pas d'impact significatif sur la validité des analyses.

5.1.1.2. Choix des végétaux

D'une part, il faut prendre en considération l'environnement froid du Québec, qui pousse à choisir des plantes résistantes au froid et capables de survivre à des températures hivernales basses. D'autre part, différents choix de plantes dans les toitures végétalisées entraînent des variations significatives de la valeur d'isolation thermique (Berardi et al., 2014), ce qui est démontré à la Figure 23.

Dans le graphe présenté, l'axe des ordonnées (Y) illustre la résistance thermique (R-value), exprimée en $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ (mètre carré-kelvin par watt). Cette unité mesure la capacité d'un matériau ou d'une surface à limiter le transfert de chaleur : plus la valeur est élevée, meilleure est l'isolation thermique. En pratique, une résistance thermique élevée signifie que la plante ou le substrat associé contribue davantage à réduire la perte ou le gain de chaleur, un atout essentiel pour des toitures végétalisées.

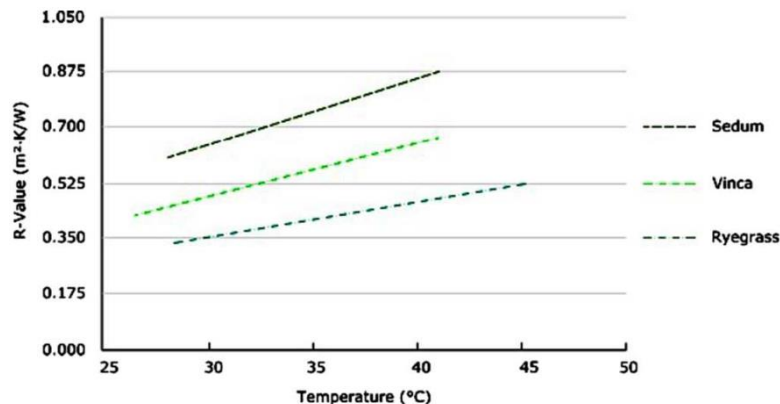


Figure 23 : Résistance thermique d'une même toiture verte avec différentes plantes : Sedum, Vinca et Ryegrass (tiré de Berardi et al., 2014)

Ces données mettent en évidence que les sédums offrent la meilleure isolation thermique, suivis par la vinca, tandis que le ryegrass est moins performant.

Pour les toits extensifs, le sedum, le type de végétation le plus utilisé pour les toitures végétalisées, sera choisi. Il offre une forte protection contre les rayons du soleil, présente des racines peu profondes et s'adapte bien aux conditions de faible humidité (Emilsson, 2008; Rowe et al., 2012). Néanmoins, il ne parvient pas à empêcher le transfert de chaleur par convection sous ses feuilles, ce qui se traduit par une résistance thermique relativement basse (Emilsson, 2008; Rowe et al., 2012). Afin de pallier cette limite, l'ajout de 15% de pervenche (genre *Vinca*, famille des *Apocynacées*) est proposé, vu qu'elle garantit un meilleur ombrage par rapport aux autres, mais permet également un transfert de chaleur par convection (Parizotto & Lamberts, 2011). Les deux plantes sont compatibles dans une même plantation et peuvent être intégrées dans un mélange

homogène. La pervenche, grâce à son port plus dense et sa capacité d'ombrage, complète efficacement les caractéristiques du sedum sans créer de compétition notable. Cette approche permet d'optimiser la performance thermique et écologique des toitures végétalisées tout en maintenant une simplicité dans la gestion et l'entretien.

Le fait que les toits intensifs puissent avoir une profondeur supérieure à 15 cm permet la croissance de plantes plus grandes, telles que des arbres et des arbustes (Pearen & Wilson, 2006). En plus, ces toits sont conçus pour permettre la culture de plantes potagères ainsi que l'aménagement de terrasses avec des arbres et des arbustes (Grégoire & Hénault-Éthier, s.d). Il y a trois méthodes de culture possibles sur un toit : toit potager en contenant, toit avec système hydroponique et toiture végétalisée. Le choix entre ces techniques est influencé par plusieurs facteurs, notamment la capacité de charge du toit, l'accessibilité, la sécurité, les décisions des responsables de projet, les propriétaires du toit et le contexte territorial (Daniel, 2013). La méthode du toit potager en contenant implique la culture principalement de légumes, d'herbes aromatiques et de fleurs comestibles dans des pots, des bacs ou des lits de substrat surélevés (Daniel, 2013). À titre d'exemple, le toit potager du Palais des congrès de Montréal utilise deux technologies distinctes : des Smart Pots en géotextile et des jardinières Alternatives fabriquées à partir de bacs de 50 litres dotés d'une réserve d'eau d'environ 14 litres (Lejoyeux, 2018). Les différentes cultures possibles sont mentionnées au Tableau 11.

Tableau 11 : Études de terrain sur l'agriculture sur les toits (modifié de Harada et al., 2017)

Lieu	Culture	Rendement	Max. irrigation (mm/jour)	Méthode d'irrigation	Profondeur du sol (mm)	Performance hydrologique	Type de sol (composition)
Blacksburg, VA, É-U.	Chou	S*	Selon les besoins	Goutte à goutte	102	Rétention des eaux pluviales	Terreau commercial pour pots (non spécifié)
Bologne, Italie	Laitue, tomate, aubergine, poivron, melon, pastèque	S*	11,7	—	—	—	Terreau commercial pour pots (non spécifié)
Suwon, Corée du Sud	Laitue, chicorée	S*	—	Mèche	50, 100, 200	—	Terreau commercial pour pots (55-65% tourbe, 35-45% perlite)
Suwon, Corée du Sud	Laitue, chicorée	S*	—	Mèche, réservoir de goutte-à-goutte	150	—	Terreau commercial pour pots (55-65% tourbe, 35-45% perlite)
Paris, France	Laitue, tomate	S*	—	Goutte à goutte	300	—	1) Terreau commercial pour pots (non spécifié) 2) Terreau expérimental (compost de déchets de jardin, bois broyé, marc de café)
East Lansing, MI, É-U.	Concombre, poivre	S*	1,6	Arroseurs à jets	125	—	Terreau de toiture végétalisée expérimental (0-100% de compost de déchets de jardin, schiste expansé, sable)
East Lansing, MI, É-U.	Tomate, haricots, concombre,	S* (sauf poivre)	11,0	Micro-asperseurs	105	—	Terreau de toiture végétalisée

Lieu	Culture	Rendement	Max. irrigation (mm/jour)	Méthode d'irrigation	Profondeur du sol (mm)	Performance hydrologique	Type de sol (composition)
	poivre, ciboulette, basilic						commercial (50% schiste expansé, 35% sable, 15% compost de feuilles)
East Lansing, MI, É-U.	Tomate, haricots, concombre, poivre, ciboulette, basilic	S*	9,0	Micro-asperseurs	105	Rétention des eaux pluviales	Terreau de toiture végétalisée commercial (non spécifié)
East Lansing, MI, É-U.	Tomate, haricots, concombre, poivre, ciboulette, basilic	S*	13,5	Micro-asperseurs	127	—	Terreau de toiture végétalisée commercial (non spécifié)

*S : Satisfaisant

5.1.1.3. Structure de la toiture

Toute toiture végétalisée se caractérise par des éléments de base communs (Figure 24).

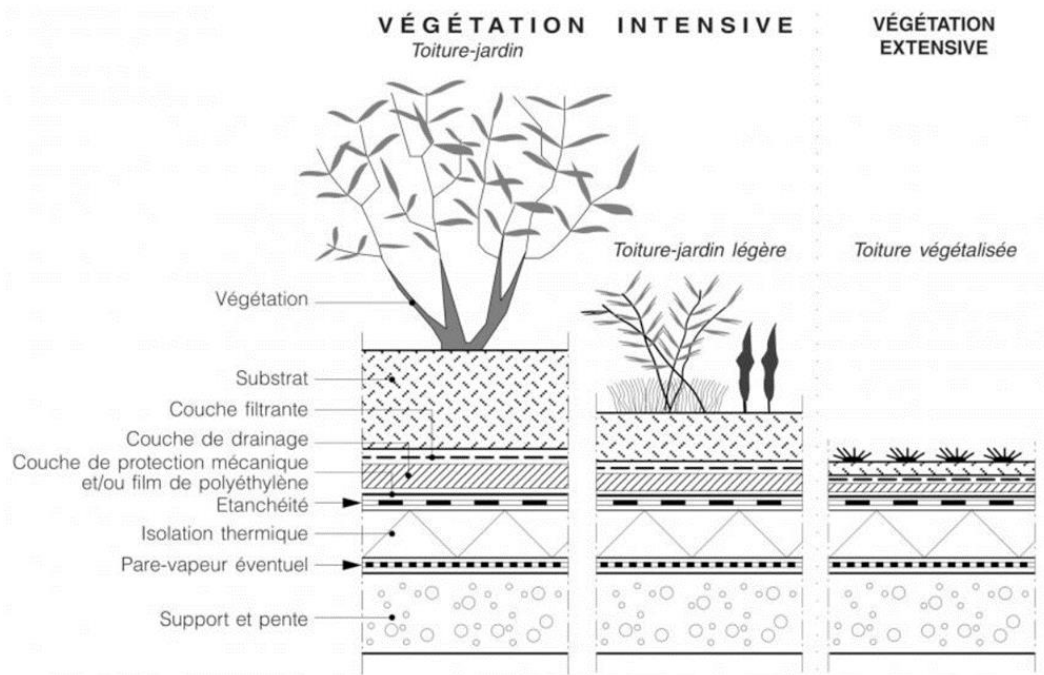


Figure 24 : Éléments de base de toute toiture végétalisée (Bruxelles Environnement, s.d)

Pour assurer l'étanchéité des toitures végétalisées, seuls des revêtements souples seront sélectionnés. Ce type de couverture est constitué d'éléments (bandes ou lés) solidarisés entre eux par collage à froid, par soudage à chaud ou par fixation mécanique. Cette méthode de pose garantit une étanchéité parfaite grâce à un assemblage fiable des matériaux (Bruxelles Environnement, s.d).

Les revêtements souples utilisés pour l'étanchéité sont exposés à des variations de température importantes, ce qui peut accélérer leur vieillissement en raison des dilatations et autres contraintes. Toutefois, certains revêtements tels que l'EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer), le TPO (thermoplastic polyolefin) ou le PVC (Polyvinyl chloride) offrent une meilleure résistance à ces facteurs en raison de leur composition ou de leur apparence. Ces matériaux assurent une durabilité accrue, garantissant une durée de vie de plus de 25 ans (Bruxelles Environnement, s.d). Il est possible de recycler les membranes en TPO et EPDM. Un ancien revêtement de toiture peut donc être transformé en détournant éventuellement son usage initial.

5.1.1.4. Système de drainage et d'irrigation

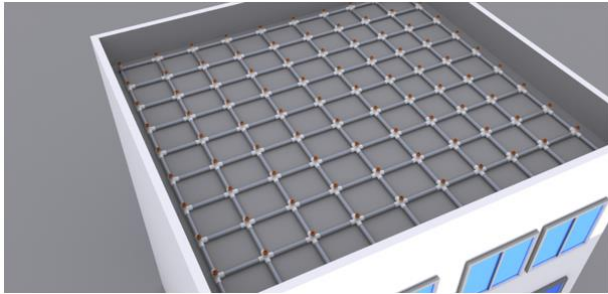
Dans les toitures végétalisées, le système d'irrigation dépend principalement du climat et du type de toiture végétalisée (Cascone et al., 2019; Pirouz et al., 2021). Les impacts thermiques, notamment la régulation de la température, dépendent de l'irrigation, surtout en été (Azeñas et al., 2018; Maiolo et al., 2020). Ils sont également influencés par les caractéristiques du substrat (comme le matériau et la profondeur) ainsi que par le type de végétation utilisée (Tan & Wang, 2023). Les systèmes d'irrigation des toitures végétalisées sont généralement des systèmes d'irrigation par aspersion ou goutte à goutte. Cependant, l'irrigation souterraine pourrait être une méthode appropriée pour réduire les besoins en eau des toitures végétalisées (Pirouz et al., 2023).

Pour le Carrefour de l'eau, la source principale de l'eau d'irrigation sera les précipitations directes sur les toitures végétalisées. Pendant les périodes de sécheresse, nous proposons d'opter pour un système d'irrigation selon les besoins spécifiques de la végétation (voir section 1.2.5.1.a). La moyenne annuelle des précipitations liquides à Québec est de 813 mm, ce qui représente une source importante d'eau naturelle. Avec une évapotranspiration estimée à environ 3 mm/jour pour la végétation des toitures végétalisées en été, la consommation quotidienne d'eau par mètre carré serait de 3 litres, soit 3 mm d'eau. Pour une surface de toiture végétalisée de 5440 m², cela représente un total de 16 320 litres par jour, équivalent à 3 mm pour l'ensemble de la surface (plus de détails sont présentés au Chapitre 6).

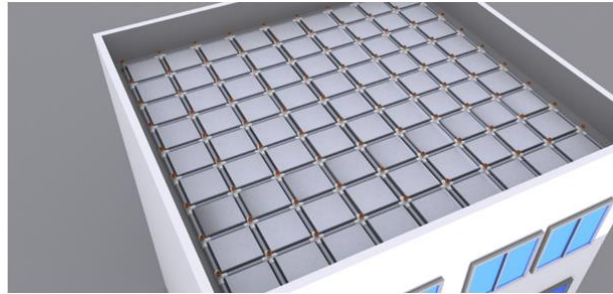
L'installation d'un réservoir d'eau souterrain, bien que non prévue initialement, pourrait être envisagée pour stocker l'eau de pluie et fournir une réserve en période de sécheresse. Cela permettrait de garantir une fourniture continue d'eau pour l'irrigation, tout en minimisant la dépendance à l'eau potable. Ce réservoir devrait être

dimensionné pour stocker une quantité suffisante d'eau afin de couvrir les besoins d'irrigation durant les périodes de faible précipitation.

Cependant, la réutilisation de l'eau de pluie dans un système d'irrigation peut entraîner des risques de colmatage. Il est donc crucial de choisir des buses d'irrigation conçues pour traiter l'eau de pluie et de mettre en place un entretien régulier pour nettoyer les filtres et les buses. De plus, bien que le climat de Québec soit relativement frais sur une base annuelle, les températures estivales peuvent être élevées sous les chauds rayons du soleil. Dans ce contexte, l'intégration de plantes xériques, connues pour leur faible besoin en eau, pourrait représenter une solution efficace pour minimiser davantage les besoins en irrigation tout en résistant aux conditions de chaleur. Enfin, l'utilisation de plantes adaptées au climat froid de Québec, nécessitant moins d'irrigation, pourrait également contribuer à réduire les besoins en eau. Une toiture végétalisée polyvalente auto-irriguée avec une couche de drainage innovante est proposée (Pizouz et al., 2023), tel qu'illustré à la Figure 25.



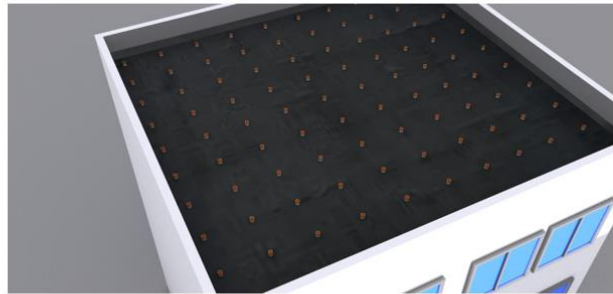
1. Réseau de canalisations en PVC pour le stockage de l'eau et l'auto-irrigation



2. Remplissage de la zone vide entre les tubes PVS avec de la mousse de polystyrène, des granulats d'argile expansée ou des granulats légers locaux similaires (du même diamètre que les tuyaux en PVC)



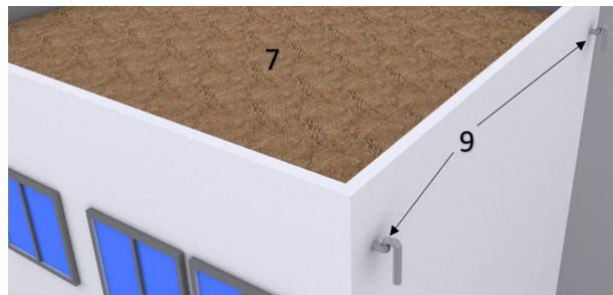
3. Une couche de 1 cm de mousse de polystyrène utilisée pour créer une surface lisse pour les couches supérieures.



4. Couche de membrane d'étanchéité



5. Barrière anti-racines ou couche anti-racines (au-dessus de la couche de membrane d'étanchéité).



6. Support de sol au-dessus de la couche barrière racinaire (8 cm ou plus, selon les plantes). (7) milieux de sol ; (9) sortie du tube en U à l'envers.

Figure 25 : Étapes de l'installation du système de drainage et d'irrigation (tiré de Pirouz et al., 2023)

Pour une meilleure compréhension, les Figures 26 et 27 montrent les différentes couches du toit proposé ainsi que les détails de chaque couche.

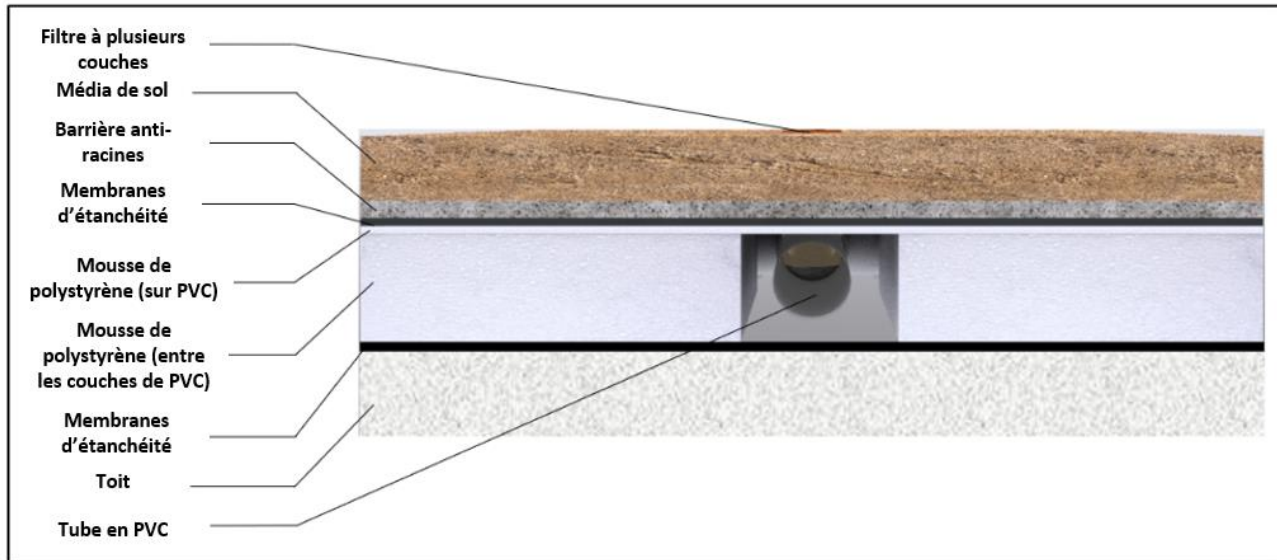


Figure 26 : Couches de la nouvelle toiture végétalisée (tiré de Pirouz et al., 2023)

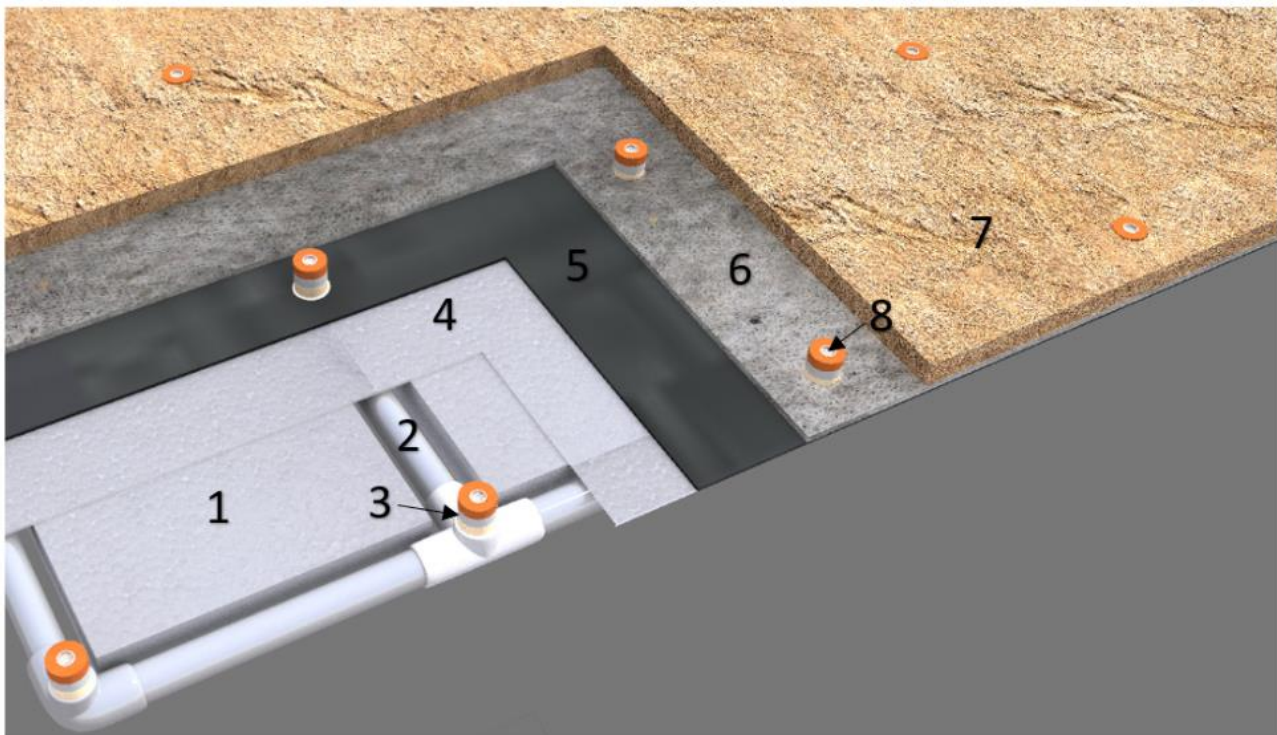


Figure 27 : Détails de toutes les couches : (1) mousse de polystyrène; (2) tube en PVC ; (3) filtre multicouche ; (4) 1 cm de mousse de polystyrène; (5) membrane d'étanchéité ; (6) couche barrière racinaire ; (7) milieux de sol ; (8) filtres de vidange (Pirouz et al., 2023)

La conception proposée par Pirouz et al. (2023) comprend un réseau de canalisations et un tube en forme de U inversé pour l'évacuation de l'eau excédentaire (Figure 28). Cette configuration permet à l'eau de remplir et de demeurer dans le réseau de canalisations, servant ainsi de réservoir d'eau destinée à l'irrigation ou à d'autres

utilisations non potables du bâtiment. Lorsque nécessaire (par exemple, pour le nettoyage, la maintenance ou en prévision d'inondations graves), le réseau de canalisations peut être vidé. La taille du réseau serait adaptée à la planéité du toit ; un toit irrégulier pourrait nécessiter plusieurs réseaux de canalisations distincts au lieu d'un seul. De plus, le système peut être facilement installé sur un toit en pente, comme illustré à la Figure 29.

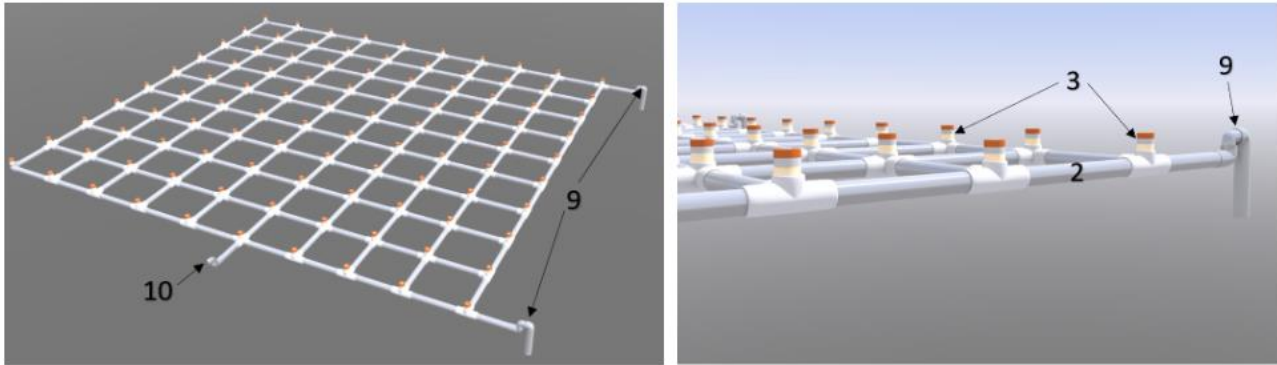


Figure 28 : Détails de la sortie du tube en forme de U inversé pour le retrait de l'eau supplémentaire et de l'entrée pour le remplir : (3) filtres multicouches ; (2) réseau de conduites ; (9) sortie du tube en forme de U inversé ; (10) entrée (Pirouz et al., 2023)

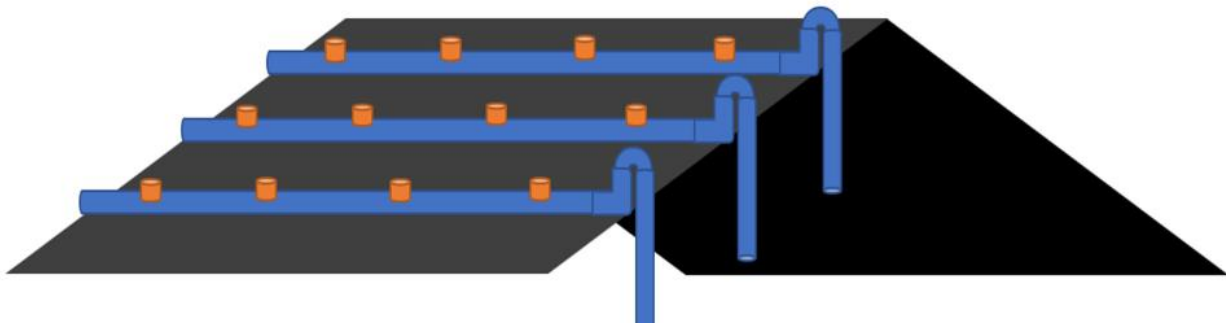


Figure 29 : Détails du réseau de canalisations sur un toit en pente (Pirouz et al., 2023)

5.1.1.5. Choix du substrat

Le substrat choisi doit être un mélange nutritif spécifique conçu pour répondre aux besoins des toitures vertes. Il fournit les nutriments, l'eau et l'oxygène nécessaires à la croissance des plantes et favorise leur enracinement. L'épaisseur et la composition du substrat seront directement adaptées au type de végétation qu'il doit soutenir et nourrir. Les conditions idéales du sol se composent généralement de moitié de particules solides, un quart d'eau et un quart d'oxygène. Pour maximiser la porosité, on utilise généralement du schiste expansé léger ou de l'argile chauffée à des températures dépassant 1 000°C, ce qui provoque leur dilatation (Pearen & Wilson, 2006).

Il est important que le substrat soit léger mais robuste, ce qui signifie qu'il doit être à la fois résistant à la compaction et au déplacement par le vent (érosion éolienne). Il doit également être stable pour offrir un soutien

adéquat aux plantes cultivées. Un substrat de qualité doit posséder les caractéristiques suivantes (Bruxelles Environnement, s.d) :

- Une bonne capacité de drainage et d'aération pour assurer une circulation adéquate de l'eau et de l'air.
- Une capacité de rétention d'eau efficace sans devenir trop lourd lorsqu'il est saturé en eau.
- Une capacité d'échange cationique suffisante pour stocker de manière réversible certains éléments fertilisants comme le potassium, le magnésium et le calcium, qui sont importants pour la fertilité du substrat.
- Une capacité d'enracinement adaptée aux espèces cultivées, favorisant leur développement racinaire.
- Une résistance au gel pour supporter les conditions hivernales.

L'utilisation de « Rooflite Intensive Ag », un mélange commercial de sol composé de schiste expansé, de compost de fumier animal et de substrat usagé provenant de la production de champignons, est proposée. Ce substrat est habituellement constitué de fumier animal et de matériaux lignocellulosiques tels que la paille de céréales et la sciure de bois (Kong et al., 2015; Paredes et al., 2009; Phan & Sabaratnam, 2012). Les performances de ce mélange, ainsi qu'une comparaison avec d'autres matériaux, sont présentées à la Figure 30.

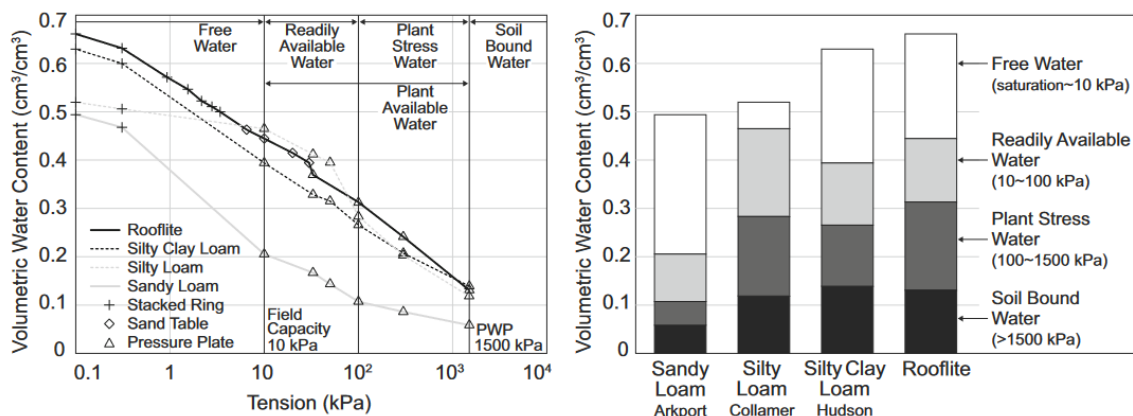


Figure 30 : Caractéristiques de libération d'humidité du Rooflite, du loam argilo-limoneux, du loam limoneux et du loam sableux. La teneur volumétrique en eau de chaque échantillon à saturation est tracée à 0,1 kPa (Harada et al., 2017)

5.1.2. Étude économique

Les coûts d'installation des toitures végétalisées varient considérablement en fonction de la structure du toit, des types de plantes et du drainage existant (William et al., 2016). Selon l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis (US EPA), les coûts moyens de l'installation des toitures végétalisées

commencent à environ 108 USD/m² pour un toit végétalisé extensif simple et atteignent environ 323 USD/m² pour les toits intensifs.

En 2023, l'Indice des prix à la consommation (IPC) a enregistré une augmentation moyenne annuelle de 3,9 %. Cette hausse fait suite à une augmentation exceptionnelle de 6,8 % en 2022, la plus forte depuis 40 ans, et à une croissance de 3,4 % en 2021. En excluant l'année 2022, marquée par une inflation inhabituelle, la croissance de 3,9 % en 2023 est la plus importante depuis 1991. De plus, si l'on exclut les prix de l'énergie, l'IPC a augmenté de 4,5 % en 2023, contre 5,7 % en 2022 (Statistique Canada, 2024).

En tenant compte de l'inflation, les coûts d'installation des toitures végétalisées ont augmenté au fil des ans. Sur la base des données de l'IPC présentées ci-haut, les coûts moyens de l'installation des toitures végétalisées en 2023 peuvent être estimés à environ 124 CAD/m² pour les toits extensifs et à environ 371 CAD/m² pour les toits intensifs. Ces ajustements reflètent les augmentations de l'IPC observées de 2021 à 2023 (SQP, 2015).

5.1.2.1. Toits extensifs

La littérature recense de nombreuses études qui examinent les toitures végétalisées extensives en tant qu'alternative économiquement rentable du point de vue des utilisateurs (Tableau 12). Le coût initial d'installation d'une toiture végétalisée est estimé entre 110 \$ et 200 \$/m² (10 \$ à 18 \$/pi²) pour une toiture extensive (Québec vert & SQP, 2024).

Tableau 12 : Études antérieures axées sur les toitures végétalisées extensives (Ulubeyli & Arslan, 2017)

Auteurs	Pays	Méthode de viabilité				Coûts (USD/m ²)	Viable?
		NPV (USD/m ²)	BCR	IRR (%)	DPBP (ans)		
Wong et al. (2003)	Singapour	115,95	n.d.	8	20	89,86	Oui
Clark et al. (2008)	États-Unis	234,18	n.d.	n.d.	n.d.	232,00	Oui
Blackhurst et al. (2010)	États-Unis	n.d.	0,023	n.d.	n.d.	97,04	Non
Tsang and Jim (2011)	Hong Kong	426,29	n.d.	n.d.	n.d.	150,00	Oui
Bianchini and Hewage (2012b)	États-Unis	291,00	n.d.	n.d.	n.d.	130,00 - 150,00	Oui
Claus and Rousseau (2012)	Belgique	11,36	n.d.	n.d.	n.d.	35,27	Oui
Chan and Chow (2013)	Hong Kong	346,52	n.d.	n.d.	n.d.	68,00	Oui

NPV (*Net Present Value*) : valeur nette actualisée

BCR (*Benefit-Cost Ratio*) : rapport bénéfices-coûts

IRR (*Internal Rate of Return*) : taux de rentabilité interne

DPBP (*Discounted Payback Period*) : période de remboursement actualisée

n.d. : non disponible

Bien que certaines des études citées soient relativement anciennes, elles ont été retenues pour plusieurs raisons. Premièrement, elles permettent de suivre l'évolution des coûts des toitures végétalisées au fil des années et de comprendre les tendances historiques, ce qui est pertinent pour analyser leur viabilité économique à long terme. Deuxièmement, ces études fournissent une base comparative essentielle, étant donné le manque de données récentes uniformisées dans ce domaine.

Cependant, nous reconnaissons que les prix mentionnés peuvent ne pas refléter les réalités actuelles en raison des changements dans les technologies, les matériaux et les conditions économiques depuis leur publication. Ces limites sont à garder à l'esprit lors de l'interprétation des résultats. Pour pallier ces écarts, nous avons croisé ces données avec des études plus récentes et des estimations actuelles afin de fournir une vue d'ensemble plus complète.

Pendant la phase de construction, l'utilisation d'une grue est indispensable pour acheminer tous les matériaux jusqu'au sommet du bâtiment. Le tarif de location quotidien standard d'une telle grue commence à partir de 500 CAD/j (SOSÉquipement, 2025). En plus, conformément à une procédure standard, une toiture végétalisée extensive nécessite quelques activités d'entretien (voir section 1.2.5.) deux fois par an, réalisées par un jardinier dont le salaire journalier de 26,66 \$ a été établi en consultant le marché du travail et a été confirmé par des utilisateurs actuels de ces toits (Ulubeyli & Arslan, 2017). Une estimation des différents coûts est présentée dans le Tableau 13.

Tableau 13 : Paramètres économiques des toitures végétalisées extensives (TVE) (Ulubeyli & Arslan, 2017)

Paramètres	Unité	Scénarios			Source
		Le meilleur	Le plus probable	Le pire	
Coût des plantes et de la végétation	USD/m ²	9,35	9,56	9,68	Producteurs de plantes et de végétation
Coût du substrat de culture	USD/m ²	7,70	9,35	11,00	Constructeurs des TVE ¹
Coût de la couche filtrante perméable aux racines	USD/m ²	0,72	1,46	2,20	Constructeurs des TVE
Coût de la couche de drainage et de capillarité	USD/m ²	5,50	11,55	17,60	Constructeurs des TVE
Coût de la couche de protection	USD/m ²	1,87	6,44	11,00	Constructeurs des TVE
Coût de la couche de stockage	USD/m ²	1,32	4,62	7,92	Constructeurs des TVE
Coût de l'étanchéité	USD/m ²	12,83	14,48	16,13	Constructeurs des TVE
Coût du béton de nivellement	USD/m ²	2,66	3,00	3,33	Centrales à béton
Durée de location de la grue	j/an	7,00	9,00	11,00	Constructeurs des TVE
Durée de l'entretien	j/an	4,00	5,00	6,00	Utilisateurs actuels des TVE ²
Bénéfice de l'économie d'énergie	kWh/an	130,4	84,65	38,90	Angelakoglou et al. (2013)
Bénéfice de l'isolation acoustique	USD/m ²	18,33	16,33	13,83	Fournisseurs de matériaux de construction ³
Bénéfice de la valeur immobilière	%	5,00	3,50	2,00	Bianchini & Hewage (2012b)
Taux d'intérêt composé	%/an	11,50	10,00	9,00	Banques

¹**Constructeurs des TVE** : les entreprises spécialisées dans la conception, la fabrication et l'installation des différentes couches et éléments nécessaires à la mise en place de ces toitures. Ces constructeurs sont généralement des sociétés de construction et d'aménagement paysager qui se spécialisent dans les infrastructures vertes et les toitures écologiques, et peuvent inclure des sous-traitants spécialisés pour certaines couches ou systèmes spécifiques.

²**Utilisateurs actuels des TVE** : incluent généralement des gestionnaires d'immeubles et des propriétaires ayant installé ce type de toiture pour optimiser la performance énergétique et environnementale de leurs bâtiments. Leur retour d'expérience est précieux pour affiner les estimations de coûts d'entretien annuel.

³**Fournisseurs de matériaux de construction** : en particulier ceux spécialisés dans l'acoustique, jouent un rôle clé dans la sélection de matériaux pour les TVE, permettant d'optimiser les bénéfices liés à l'isolation acoustique. Ils adaptent leurs produits pour maximiser les avantages environnementaux et économiques tout en garantissant la durabilité des installations.

5.1.2.2. Toits intensifs

Le coût d'une toiture végétalisée intensive standard commence autour de 540 USD/m² (Bianchini & Hewage, 2012a). Dans la plupart des villes, les toitures végétalisées intensives sont privilégiées par rapport aux intensives, car ces dernières nécessitent une capacité de charge plus élevée, engendrent des coûts d'installation plus importants et demandent un entretien plus soutenu (Getter & Rowe, 2006).

Un coût d'installation moyen de 112 USD/m² a été relevé pour les toitures végétalisées extensives. Les systèmes semi-intensifs ont tendance à être plus coûteux en raison de la diversité généralement plus grande des espèces végétales. Des études antérieures indiquent un coût d'installation moyen de 147 USD/m² pour les toits végétalisés semi-intensifs. Les toitures intensives sont encore plus coûteuses à installer en raison de la présence de plus de matériaux et de plantes plus lourdes (comme de petits arbres), atteignant un coût d'installation moyen de 409 USD/m² (Figure 31) (Manso et al., 2021). Cependant, d'autres études ont estimé des coûts planchers supérieurs pour les toitures intensives, allant jusqu'à 540 USD/m², ce qui reflète les variations possibles selon les régions, les matériaux utilisés et les spécificités des projets. Ces écarts mettent en lumière la diversité des données disponibles dans la littérature, soulignant l'importance de tenir compte du contexte et des sources pour interpréter ces chiffres.

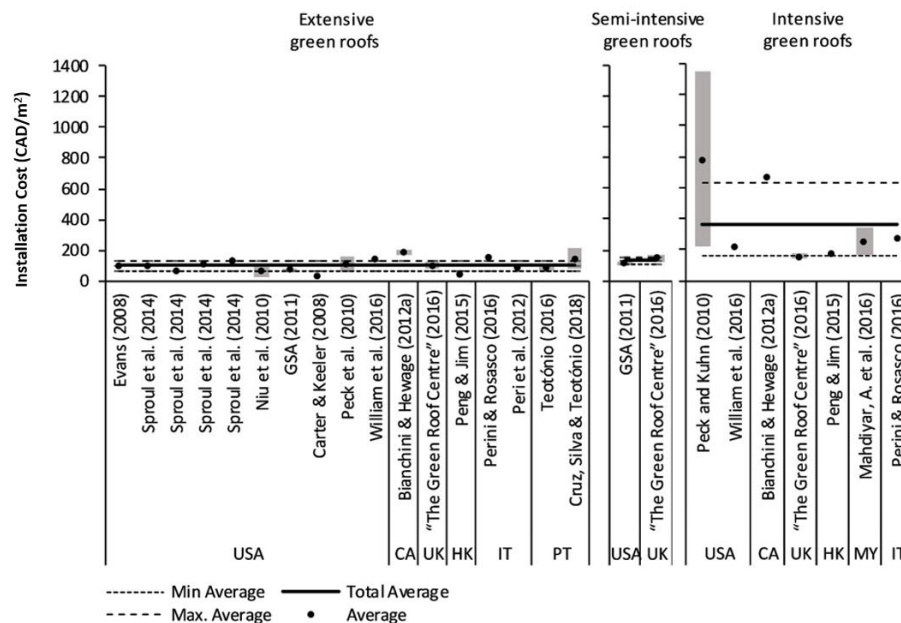


Figure 31 : Coûts d'installation (€/m²) des toitures végétalisées extensives, semi-intensives et intensives (Bianchini & Hewage, 2012b; Carter & Keeler, 2008; Gsa, 2011; MacMullan et al., 2009; Mahdiyar et al., 2016; Manso et al., 2021; Niu et al., 2010; Peck et al., 1999; Peng & Jim, 2015; Peri et al., 2012; Perini & Rosasco, 2016; Sproul et al., 2014; William et al., 2016)

Les coûts d'exploitation et d'entretien sont présentés dans la Figure 32.

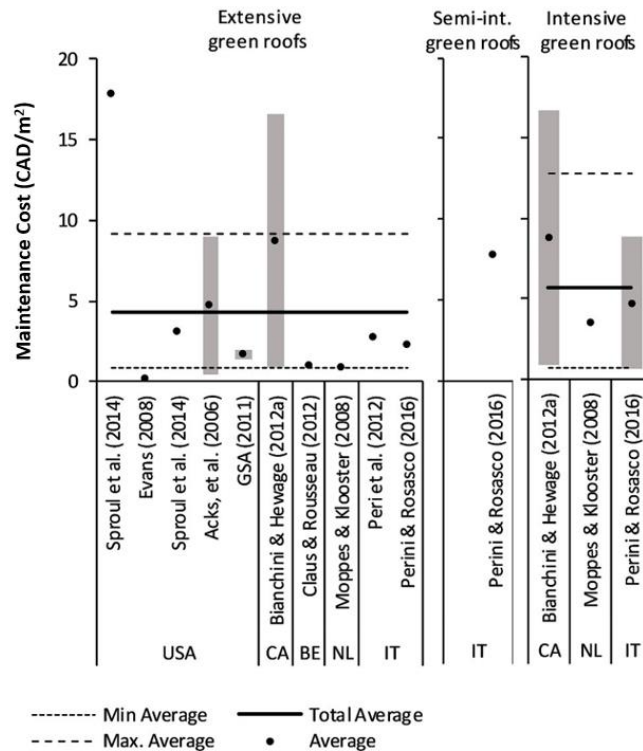


Figure 32 : Coûts d'exploitation et d'entretien (€/m²/an) des toitures végétalisées extensives, semi-intensives et intensives (Acks et al., 2006; Bianchini & Hewage, 2012b; Claus & Rousseau, 2012; Evans, 2008; Gsa, 2011; Manso et al., 2021; Peri et al., 2012; Perini & Rosasco, 2016; Rotterdam, 2008; Sproul et al., 2014)

5.1.3. Évapotranspiration

Au cours des dernières années, l'évapotranspiration (ET) a attiré de plus en plus l'attention de la communauté de recherche sur les toitures végétalisées en raison de son influence sur le transfert de chaleur et de masse. Ce phénomène découle de la combinaison de l'eau libérée par les plantes pendant leur croissance ou retenue dans leurs tissus (transpiration) ainsi que de l'humidité évaporée depuis la surface du sol et de la végétation (évaporation) (Cascone et al., 2019).

L'ET a été étudiée dans plusieurs recherches en utilisant le logiciel EnergyPlus (EnergyPlus, s.d). Boafu et al. (2017) ont exploré l'impact potentiel de l'ET sur la consommation annuelle d'énergie d'un bâtiment de bureaux à Incheon, en Corée du Sud. Ils ont constaté que l'ET mensuelle moyenne variait de 1,80 mm/j à 4,79 mm/j pour un indice de surface foliaire (ISF) élevé et de 0,31 mm/j à 4,16 mm/j pour un ISF faible. L'irrigation a

également influencé l'ET, avec des valeurs allant de 1,31 mm/j à 4,28 mm/j pour un ISF élevé. Les flux d'évapotranspiration étaient plus élevés en été et plus faibles en hiver, augmentant respectivement de 10,4 % et 80,2 % avec une augmentation de l'ISF de 1,0 à 5,0.

Silva et al. (2016) ont comparé les performances thermiques de toitures végétalisées intensives et extensives à Lisbonne, au Portugal, constatant des valeurs maximales d'ET de 2 mm/j pour les toits extensifs, de 6 mm/j pour les semi-intensifs et de 9 mm/j pour les intensifs, principalement en été (Silva et al., 2016). Vera et al. (2017) ont examiné l'effet de la variation de l'ISF sur des toitures végétalisées dans différentes villes et climats. Ils ont trouvé que le refroidissement des pièces augmentait avec l'ISF en raison de l'augmentation de l'ET, réduisant le flux de chaleur jusqu'à 20,0 W/m² lorsque l'ISF atteignait 5,0 (Vera et al., 2017).

En climat québécois, caractérisé par des hivers rigoureux et des étés parfois chauds et humides (Weather Spark, 2025), l'évapotranspiration (ET) devrait suivre une variation saisonnière marquée. Les niveaux d'ET contribueraient à réduire les îlots de chaleur urbains et à améliorer le confort thermique des bâtiments. Cependant, en hiver, les flux d'ET seraient considérablement réduits en raison de la dormance des plantes et des températures basses (Anquez & Herlem, 2011; Drapeau, 2021; Lamine, 2023). Pour le projet du Carrefour de l'Eau, ces variations saisonnières soulignent l'importance de concevoir des toitures végétalisées adaptées au climat, avec une sélection de plantes résistantes au froid, et d'intégrer des systèmes d'irrigation pour soutenir l'ET en période estivale, tout en optimisant les économies d'énergie et la gestion des eaux pluviales.

5.1.4. Dimensionnement

La réglementation québécoise stipule que le couvert végétal des toitures doit atteindre au moins 80 % de la surface végétalisée dans un délai de trois ans (Gouvernement du Québec, 2015), indépendamment de la méthode d'implantation (plantations, semis, etc.). Cela garantit que le substrat de croissance ne reste pas exposé à long terme, ce qui pourrait entraîner une érosion, une perte de nutriments ou des problèmes esthétiques et environnementaux. Ce n'est pas un plafond, mais un seuil minimal à atteindre pour assurer la viabilité et la pérennité des toitures végétalisées. Pour le Carrefour de l'Eau, l'objectif d'un taux de couverture d'au moins 80 % dans les premières années s'aligne sur cette exigence réglementaire, tout en maximisant l'efficacité écologique et esthétique des toitures.

Donc, pour dimensionner les toitures végétalisées avec précision, il faut connaître la répartition de l'espace sur le toit et les spécifications relatives à l'épaisseur du substrat et aux types de végétaux à utiliser. Sur une superficie totale de toiture de 6 800 m², 80 % sera couverte de toitures végétalisées, soit 5 440 m².

Pour les toitures végétalisées extensives, qui représenteront 40 % de cette superficie (soit environ 2 176 m²), l'épaisseur du substrat varie en fonction des besoins spécifiques en rétention d'eau et en végétation. Il faut opter pour une répartition qui permet d'optimiser les performances écologiques tout en tenant compte des contraintes structurelles du bâtiment.

Pour les toitures végétalisées intensives, qui occuperont les 60 % restants de la superficie (soit environ 3 264 m²), une épaisseur de substrat supérieure à 30 cm sera utilisée. Cette épaisseur permettra de cultiver une variété de légumes. Ces toitures peuvent également accueillir des espaces de loisirs ou des jardins communautaires, offrant ainsi des bénéfices supplémentaires en termes de biodiversité et de qualité de vie de même qu'une plus grande flexibilité en termes de conception et d'utilisation de l'espace.

Les légumes les mieux adaptés au climat de Québec comprennent les carottes, les betteraves, les choux, les épinards et les pommes de terre, tous capables de résister aux conditions plus fraîches et aux variations de précipitations (Tremblay).

5.1.4.1. Capacité de production de légumes

Sur une superficie de 3 264 m², en utilisant une culture intensive et des techniques agricoles modernes, il est possible de produire une grande quantité de légumes. En moyenne, les rendements pour ces cultures sont les suivants (Liu et al., 2016; Walters & Stoelzle Midden, 2018; Whittinghill et al., 2013) :

- **Carottes** : environ 4 kg/m²
- **Betteraves** : environ 5 kg/m²
- **Choux** : environ 3 kg/m²
- **Épinards** : environ 2.5 kg/m²
- **Pommes de terre** : environ 5 kg/m²

Division de la surface : $3\,264\text{ m}^2 \div 5 = 652,8\text{ m}^2$ par parcelle.

Estimation de la production par parcelle et par légume :

- Pour les carottes (4 kg/m²) : $652,8\text{ m}^2 \times 4\text{ kg/m}^2 = 2\,611,2\text{ kg}$.
- Pour les betteraves (5 kg/m²) : $652,8\text{ m}^2 \times 5\text{ kg/m}^2 = 3\,264\text{ kg}$.
- Pour les choux (3 kg/m²) : $652,8\text{ m}^2 \times 3\text{ kg/m}^2 = 1\,958,4\text{ kg}$.
- Pour les épinards (2,5 kg/m²) : $652,8\text{ m}^2 \times 2,5\text{ kg/m}^2 = 1\,632\text{ kg}$.
- Pour les pommes de terre (5 kg/m²) : $652,8\text{ m}^2 \times 5\text{ kg/m}^2 = 3\,264\text{ kg}$.

5.1.4.2. Humidité moyenne et exportation d'eau

Les légumes contiennent une part importante d'eau; l'humidité moyenne des légumes est généralement autour de 85-90 % (Chowdhury et al., 2021). En prenant une valeur moyenne de 87,5 % pour les calculs, la quantité d'eau exportée sous forme de légumes peut être estimée.

Par exemple, pour les carottes :

- **Poids total de carottes** : 2 611,2 kg
- **Contenu en eau (87,5 %)** : $13\,056\text{ kg} \times 0.875 = 2\,284,8\text{ kg d'eau}$

En extrapolant pour chaque type de légume, la quantité totale d'eau exportée annuellement sous forme de légumes pourrait être estimée comme suit :

- **Carottes** : 2 284,8 kg d'eau
- **Betteraves** : $3\,264\text{ kg} \times 0.875 = 2\,856\text{ kg d'eau}$
- **Choux** : $1\,958,4\text{ kg} \times 0.875 = 1\,713,6\text{ kg d'eau}$
- **Épinards** : $1\,632\text{ kg} \times 0.875 = 1\,428\text{ kg d'eau}$
- **Pommes de terre** : $3\,264\text{ kg} \times 0.875 = 2\,856\text{ kg d'eau}$

En totalisant ces valeurs, la quantité totale d'eau exportée sous forme de légumes cultivés sur les toitures végétalisées intensives du Carrefour de l'eau pourrait être estimée à environ :

- **Total d'eau exportée** : $2\,284,8 + 2\,856 + 1\,713,6 + 1\,428 + 2\,856 = 11\,138,4\text{ kg d'eau par an.}$

Cette production de légumes sur les toitures végétalisées intensives offre une contribution significative non seulement à la sécurité alimentaire et à la biodiversité urbaine, mais aussi à la gestion des ressources en eau en exportant une quantité notable d'eau sous forme de produits comestibles.

5.2. Murs végétalisés

5.2.1. Étude technique

5.2.1.1. Façades vertes

Dans le cas des façades vertes, les plantes peuvent pousser pour couvrir naturellement les murs, en se développant soit vers le bas, soit vers le haut de la surface verticale (Timur & Karaca, 2013). Ce type de murs végétalisés nécessite une sélection spécifique de plantes qui restent vertes toute l'année. Ces dernières sont

généralement plus adaptées afin de ne pas affecter les performances et l'esthétique du mur végétal pendant les saisons hivernales (Perini et al., 2011). Les façades vertes se divisent en deux types : directes et indirectes (Figure 32).

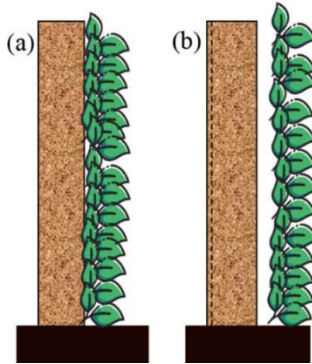


Figure 33 : Schémas de façades vertes : (a) façade verte directe ; (b) façade verte indirecte (Addo-Bankas et al., 2021)

Les façades vertes directes sont constituées de plantes grimpantes qui poussent pour recouvrir directement la surface du mur vertical sans structure de soutien; elles consistent généralement en des plantes grimpantes auto-adhérentes (Ottelé et al., 2011). Les murs végétaux indirects, en revanche, sont composés de plantes enracinées soit directement dans le sol soit dans des jardinières. La caractéristique principale est que les plantes croissent et se développent le long de la structure de support (Addo-Bankas et al., 2021). Ce système peut être associé à des jardinières qui soutiennent les racines des plantes (Perini et al., 2011). La structure de support peut prendre la forme soit d'un système de support continu, constitué d'une seule structure, soit d'un système de support modulaire comprenant des jardinières et offrant différentes hauteurs de façade (Manso & Castro-Gomes, 2015).

a. Choix du substrat

L'utilisation du biochar composté est proposée dans ce projet comme substrat pour les façades végétalisées. La matière organique du sol enrichit la fertilité du sol en libérant des nutriments par minéralisation, en offrant une réserve de nutriments et en améliorant la rétention d'eau. De plus, elle sert d'habitat aux micro-organismes du sol (Fischer & Glaser, 2012). Le biochar est conçu pour atteindre plusieurs objectifs de durabilité, tels que la séquestration du carbone ainsi que l'amélioration de la croissance des sols et des plantes (Marris, 2006). Les impacts du biochar sur la croissance des plantes ont fait l'objet de nombreuses études approfondies (Glaser et al., 2002; Sohi et al., 2010; Waters et al., 2011). Des études récentes ont déjà démontré qu'une combinaison bénéfique de biochar et de compost peut être une solution prometteuse, surtout face à l'augmentation des coûts de la fertilisation artificielle et à la détérioration des perspectives liées au stock limité de phosphore et d'autres éléments nutritifs essentiels (Fischer & Glaser, 2012; Prost et al., 2013; Schulz et al., 2013; Schulz & Glaser, 2012). Pour répondre aux besoins spécifiques des façades vertes envisagés dans ce projet, il convient de noter que les plantes sélectionnées dans la section suivante, principalement des grimpantes, seront enracinées dans des lits de plantation au sol. Ces lits auront une profondeur moyenne de 30 cm, adaptée aux besoins des plantes et à la capacité du substrat à soutenir leur croissance. La dimension exacte des lits de plantation sera précisée en fonction de la configuration des murs et des besoins spécifiques des espèces végétales.

b. Choix des végétaux

Les plantes constituent l'élément esthétique principal du mur végétalisé, que ce soit une façade végétalisée ou un mur vivant, et fournissent des services écosystémiques qui génèrent la plupart des avantages environnementaux associés aux systèmes de mur (Ascione et al., 2020).

Différentes espèces sont utilisées dans les façades végétalisées. Certaines espèces à feuilles caduques, comme *Parthenocissus quinquefolia* et *Hydrangea petiolaris*, ainsi que des espèces à feuilles persistantes, telles qu'*Euonymus fortunei* et *Hedera helix*, ont été appliquées avec succès, dans une région de Chine où les étés sont chauds, humides et partiellement nuageux, et les hivers glacials (Addo-Bankas et al., 2021). D'une part, *Humulus lupulus* et *Capsis radicans* sont des exemples de plantes grimpantes volubiles qui nécessitent des supports tels que des cadres métalliques et du fil de fer. D'autre part, les arbustes rampants, comme *Forsythia suspense* et *Pyracantha atalantioides*, sont généralement utilisés dans les structures en grille (Addo-Bankas et al., 2021). Le lierre anglais (*Hedera helix*) et le lierre de Boston (*Parthenocissus tricuspidata*) sont parmi les espèces ornementales les plus populaires pour les murs végétalisés, et leur utilisation remonte à plusieurs décennies (Köhler, 2008). Cependant, il se peut que le climat hivernal de Québec ne soit pas adapté à ces

derniers. Enfin, les besoins en eau des plantes sont le facteur clé dans les taux d'absorption des nutriments (Fowdar et al., 2017).

c. Conception et fonctionnement

Dans le cadre du projet du Carrefour de l'eau, les façades végétalisées choisies pour l'extérieur du bâtiment se composent de plantes grimpantes enracinées au sol. Ces plantes, soutenues par des structures verticales telles que des treillis ou des cadres métalliques, s'élèvent et s'étendent pour former une couverture végétale homogène. Ce système, basé sur un enracinement au sol, offre une solution simple et efficace, minimisant les besoins en substrats complexes et en systèmes d'irrigation sophistiqués, tout en réduisant l'impact sur la structure du bâtiment (Addo-Bankas et al., 2021).

d. Système d'irrigation

Les façades vertes utilisent des systèmes de support tels que des câbles ou des treillis, avec des lignes d'irrigation goutte à goutte pour l'arrosage et l'alimentation des plantes. Cependant, dans les systèmes modulaires, le système d'irrigation goutte à goutte est installé entre les structures modulaires, permettant à l'eau de s'infiltrer lentement vers le bas. Certains plateaux modulaires comportent des trous dans l'évidement pour permettre l'écoulement des eaux dans le substrat de culture par gravité (Davis et al., 2017).

La principale source d'eau pour l'irrigation des murs végétalisés, que ce soit façade verte ou mur vivant, au Carrefour de l'eau proviendra des précipitations. Les précipitations annuelles moyennes dans la région de Québec sont de 813 mm de liquide et 342 mm (en équivalent en eau) de solide. Ces précipitations seront collectées et gérées pour maximiser l'utilisation de l'eau de pluie dans les systèmes d'irrigation, réduisant ainsi la dépendance aux sources d'eau potable.

Les systèmes d'irrigation goutte à goutte nécessiteront une filtration efficace pour éviter le colmatage par les particules de sol et les débris. Les systèmes de filtration devront être entretenus régulièrement pour assurer une performance optimale et éviter l'obstruction des lignes d'irrigation. Les impacts potentiels des précipitations sur les systèmes d'irrigation incluent l'ajustement des taux d'irrigation en fonction des conditions météorologiques pour éviter le sur-arrosage ou le sous-arrosage des plantes.

Pour les façades vertes, la quantité d'eau d'irrigation nécessaire variera en fonction des types de plantes utilisées et des conditions climatiques. Par exemple, les vignes grimpantes utilisées pour les murs extérieurs ont des besoins en eau relativement faibles, avec une évapotranspiration estimée à environ 3 mm/jour. En termes de

conversion, 1 mm d'évapotranspiration correspond à 1 litre d'eau par mètre carré, ce qui signifie que 3 mm/jour équivalent à 3 litres d'eau par mètre carré et par jour.

En prenant une superficie totale des façades vertes de 1 700 m² (soit 20 % de 8 500 m²), la consommation quotidienne d'eau s'élève donc à : $3 \text{ l/m}^2/\text{j} \times 1\,700 \text{ m}^2 = 5\,100 \text{ l/j} = 5,1 \text{ m}^3/\text{j}$.

Les façades vertes ne consomment généralement pas d'eau en hiver, car leur capacité à absorber l'humidité diminue considérablement pendant la saison froide. Il est donc plus pertinent de considérer uniquement la période de croissance végétative, qui correspond généralement à la période entre le dernier gel (estimé autour du 1^{er} octobre) et le premier dégel (autour du 31 mars). Durant cette période, la végétation active nécessite une irrigation plus importante (Agriculture et agroalimentaire Canada, 2024; Météo média, 2024; Ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec, 2025).

Sur une période de 183 jours, cette consommation représente un total annuel de : $5\,100 \text{ l/j} \times 183 \text{ j} = 933\,300 \text{ l/an} = 933,3 \text{ m}^3/\text{an}$.

5.2.1.2. Murs vivants

Les murs végétalisés vivants se définissent par la présence de plantes cultivées sur un système structurel distinct, pouvant être autonome ou fixé au mur (Loh, 2008).

Il serait également pertinent de considérer l'option des murs vivants à l'intérieur. Ces murs présentent plusieurs avantages pour le confort des usagers, notamment en assainissant l'air et en augmentant l'humidité ambiante. Ce type de végétalisation intérieure permet d'améliorer la qualité de l'air en filtrant les polluants et en augmentant les niveaux d'humidité, contribuant ainsi à un environnement plus agréable et plus sain. De plus, l'ajout de murs vivants peut compléter les murs végétalisés extérieurs en contribuant à la performance énergétique et en apportant des bénéfices supplémentaires en matière de bien-être intérieur.

a. Choix du substrat

Le substrat des murs vivants est un composant important; le choix du substrat influence dans certains cas la conception d'un système de mur vivant (Addo-Bankas et al., 2021). Pour garantir un bon fonctionnement, stable, du mur végétal, il est nécessaire d'utiliser un matériau approprié en tant que substrat pour éviter le colmatage du système (Yang et al., 2018). En plus, le substrat joue un rôle essentiel dans l'élimination des excès de nutriments tels que l'azote, le phosphore et les métaux grâce à divers processus physiques, chimiques et biologiques tels que la filtration, l'adsorption, la précipitation et la formation de biofilms (Addo-Bankas et al., 2021).

b. Choix des végétaux

Selon les informations fournies par la Société Québécoise de Phytotechnologies SQP (2022), les murs vivants, grâce à leur capacité d'évapotranspiration, peuvent également jouer un rôle clé dans la régulation thermique intérieure tout en offrant une esthétique naturelle et apaisante. Dans les murs vivants en pot, on trouve généralement des plantes telles que *Asparagus sprengeri*, *Begonia tuberhybrida* et *Dracanea spp* (Addo-Bankas et al., 2021).

c. Conception et fonctionnement du système

En revanche, les murs vivants, principalement utilisés à l'intérieur des bâtiments, sont adoptés pour leurs nombreux bienfaits, tels que l'amélioration de la qualité de l'air et le maintien d'une humidité ambiante optimale. Ces murs reposent sur des systèmes modulaires et hydroponiques composés de matériaux comme des plateaux, des récipients, des dalles de jardinière ou des poches flexibles. Ces éléments, organisés en cellules individuelles, sont fixés sur une structure porteuse (Addo-Bankas et al., 2021).

Parmi les murs vivants hydroponiques, le substrat feutré est particulièrement répandu. Ce matériau flexible et perméable soutient les racines des plantes tout en jouant un rôle de drainage pour évacuer l'excès d'eau. Ce système est complété par une irrigation mécanique continue qui fournit l'eau et les nutriments nécessaires (Medl et al., 2017). Le système de panneaux pré-plantés et celui des poches suspendues se distinguent par leur popularité grâce à leur flexibilité et leur facilité d'installation (Radić et al., 2019).

Enfin, ces diverses configurations de murs vivants sont adaptées à différents besoins et environnements. Elles permettent d'améliorer l'esthétique, de purifier l'air ou encore d'augmenter l'humidité ambiante, tout en intégrant des objectifs de durabilité grâce à l'utilisation de matériaux innovants tels que la laine de roche ou des substrats légers et recyclables (Loh, 2008).

5.2.2. Étude économique

Les murs végétaux vivants peuvent parfois s'avérer plus coûteux que d'autres phytotechnologies et les façades vertes. En effet, leur coût peut varier en fonction des systèmes et des matériaux utilisés, ce qui pourrait en partie expliquer pourquoi ils sont moins répandus que les toits végétalisés (Francis & Lorimer, 2011). Ce type de technologie nécessite, en outre, un entretien plus intensif, ce qui peut aussi jouer un rôle dans la limitation de leur adoption.

Les façades vertes ont un coût d'installation moyen de 215 CAD/m², étant donné qu'elles nécessitent moins de matériaux que les murs vivants. En revanche, les coûts d'installation des murs végétalisés vivants peuvent

varier davantage, en raison de la diversité des systèmes disponibles sur le marché, expliquant un coût d'installation moyen de 848 CAD/m² (Figure 33) (Manso et al., 2021).

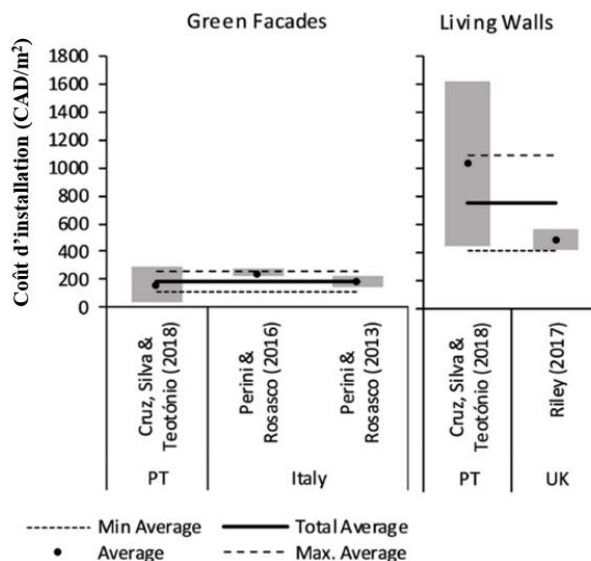


Figure 34 : Coût d'installation (CAD/m²) des murs végétalisés (Manso et al., 2021; Perini & Rosasco, 2013; Riley, 2017; Teotónio et al., 2018)

Selon les données les plus récentes de la littérature (Figure 34), le coût moyen d'entretien des façades vertes est de 6,29 CAD/m²/an, tandis que celui des murs vivants est de 21,45 CAD/m²/an (Manso et al., 2021).

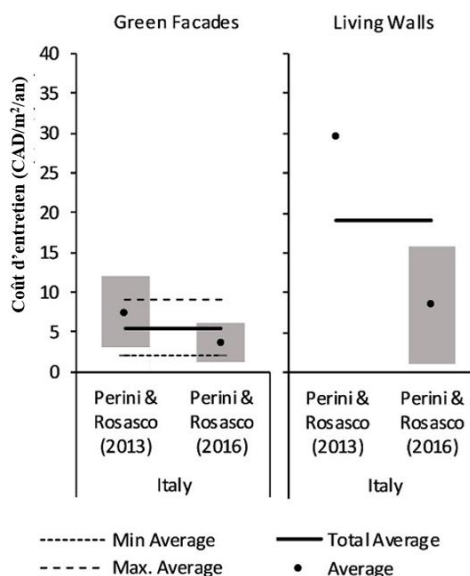


Figure 35 : Coût d'exploitation et d'entretien (CAD/m²/an) des murs végétalisés (Manso et al., 2021; Perini & Rosasco, 2013, 2016)

5.2.3. Évapotranspiration

Selon Stec et al. (2005), environ 60 % de l'énergie accumulée dans une feuille peut être libérée par la transpiration. En général, l'évapotranspiration a un impact moindre sur le refroidissement du bâtiment que l'ombrage, mais elle a une plus grande importance dans la réduction de la température de l'air ambiant à une échelle spatiale plus grande, comme l'ont démontré Huang et al. (1987) et Knoll et al. (2023).

5.3. Cellules de biorétention

5.3.1. Étude technique

La planification des biorétentions, notamment le choix des éléments qui les composent, est étroitement liée aux propriétés hydrologiques et de contamination des eaux de pluie à traiter, aux normes établies pour les déversements et à la disponibilité locale de ressources telles que la végétation, les sols et les matériaux de substrat (Vijayaraghavan et al., 2021). Les principaux éléments d'un système de biorétention sont présentés dans la Figure 36.

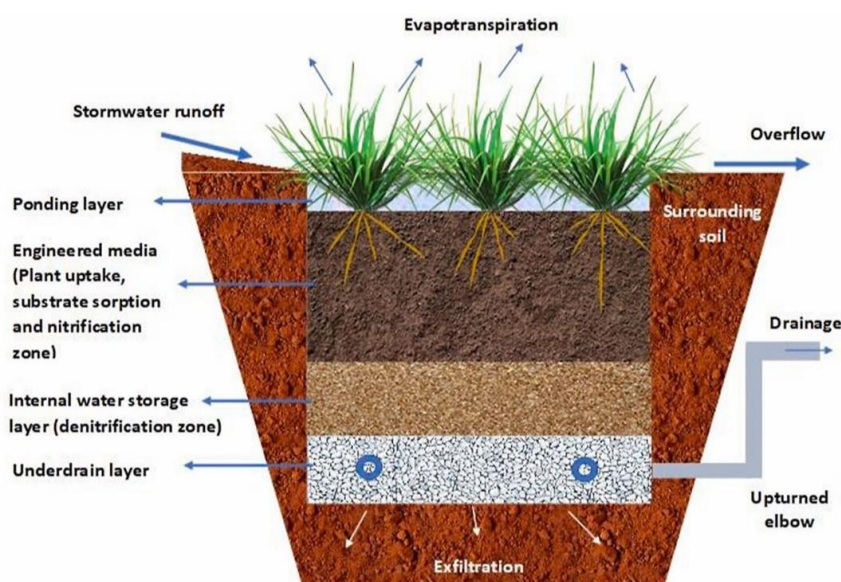


Figure 36 : Système de biorétention (Vijayaraghavan et al., 2021)

5.3.1.1. Choix des végétaux

Les plantes constituent la couche supérieure d'un système de biorétention et remplissent diverses fonctions environnementales et esthétiques. Elles peuvent améliorer la qualité des eaux de ruissellement en éliminant les nutriments, les métaux, les matières en suspension totales et les matières organiques, ainsi que les performances hydrologiques en prévenant le colmatage du substrat, en minimisant le volume des eaux pluviales par évapotranspiration, en réduisant l'érosion et en influençant les chemins d'écoulement préférentiels. De plus, les

plantes permettent aux systèmes de biorétention d'atteindre d'autres avantages tels que le verdissement urbain (esthétique), la fourniture d'habitats pour les insectes et d'autres espèces et l'amélioration de la qualité de l'air (Muerdter et al., 2018; Payne et al., 2018; Water by Design, 2012).

Les critères du choix des végétaux sont présentés à la Figure 37 ici-bas.

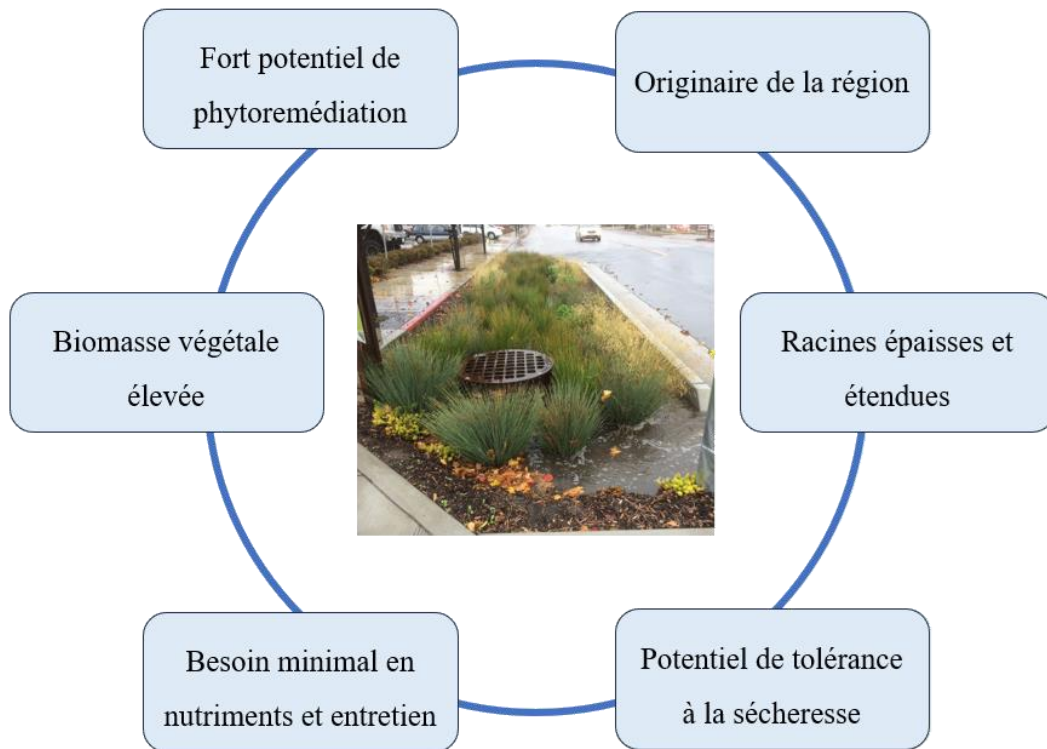


Figure 37 : Caractéristiques souhaitées de la végétation pour la biorétention (Vijayaraghavan et al., 2021)

Ces critères sont spécifiquement sélectionnés pour répondre aux exigences de durabilité, de résilience climatique et d'efficacité dans la gestion des eaux pluviales. Le fort potentiel de phytoremédiation garantit que les plantes peuvent absorber et neutraliser les polluants présents dans les eaux de ruissellement, contribuant ainsi à la dépollution avant leur ré-infiltration. L'utilisation de plantes indigènes ou originaires de la région favorise l'adaptation aux conditions locales, ce qui limite les besoins en ressources supplémentaires et facilite la biodiversité.

De plus, une biomasse végétale élevée et des racines épaisses et étendues jouent un rôle essentiel dans la stabilisation du sol et l'absorption des eaux pluviales, augmentant la capacité de rétention et la résilience des cellules de biorétention face aux variations d'humidité. Les plantes sélectionnées nécessitent également un

besoin minimal en nutriments et en entretien, ce qui réduit les coûts d'exploitation et s'aligne avec la vision du Carrefour de l'eau de minimiser l'empreinte écologique des infrastructures.

Enfin, un potentiel de tolérance à la sécheresse est crucial pour faire face aux périodes de faible précipitation ou de sécheresse, contribuant à la viabilité et à l'autonomie du système. Ces critères permettent ainsi de créer des cellules de biorétention performantes, durables et peu exigeantes, soutenant les objectifs environnementaux du Carrefour de l'eau en matière de gestion durable et circulaire de l'eau.

Dans le cas du Carrefour de l'eau, nous pouvons opter pour les végétaux mentionnés à la Figure 38.

ARBRES	ARBUSTES	HERBACÉES
<i>Acer rubrum</i>	<i>Aronia melanocarpa</i>	<i>Symphyotrichum laeve</i>
<i>Celtis occidentalis</i>	<i>Caragana arborescens</i>	<i>Symphyotrichum novi-belgii</i>
<i>Quercus bicolor</i>	<i>Cornus racemosa</i>	<i>Deschampsia cespitosa</i>
<i>Quercus rubra</i>	<i>Cornus sericea</i>	<i>Monarda fistulosa</i>
<i>Larix laricina</i>	<i>Cornus sericea</i> 'Flaviramea'	<i>Panicum virgatum</i>
	<i>Myrica gale</i>	<i>Rudbeckia hirta</i>
	<i>Physocarpus opulifolius</i> 'Dart's Gold'	<i>Rudbeckia laciniata</i>
	<i>Physocarpus opulifolius</i> 'Nanus'	<i>Sesleria autumnalis</i>
	<i>Salix interior</i>	<i>Symphyotrichum novae-angliae</i>
	<i>Salix petiolaris</i>	<i>Verbena hastata</i>
	<i>Salix purpurea</i> 'Gracilis'	

Figure 38 : Liste des végétaux pouvant être utilisés dans les biorétentions (SQP, 2018)

La végétation joue également un rôle crucial dans la remédiation des hydrocarbures à travers la biorétention. Bien que le substrat des biorétentions élimine principalement les hydrocarbures dans les eaux pluviales (par adsorption/filtration), la végétation influence également le devenir des hydrocarbures, en particulier ceux de faible poids moléculaire (Muerdter et al., 2018).

5.3.1.2. Substrat

La performance globale des systèmes de biorétention dépend des caractéristiques du substrat, en tandem avec celles des plantes. Par conséquent, la sélection d'un milieu de biorétention approprié est essentielle pour le succès global des systèmes de biorétention. Le substrat influence la santé et la croissance des plantes ainsi que le taux d'infiltration, le potentiel d'élimination des polluants et la stabilité des systèmes de biorétention (Fassman-Beck et al., 2015; Hsieh & Davis, 2005).

Les critères du choix d'un substrat pour les cellules de biorétentions sont présentés dans la Figure 39.

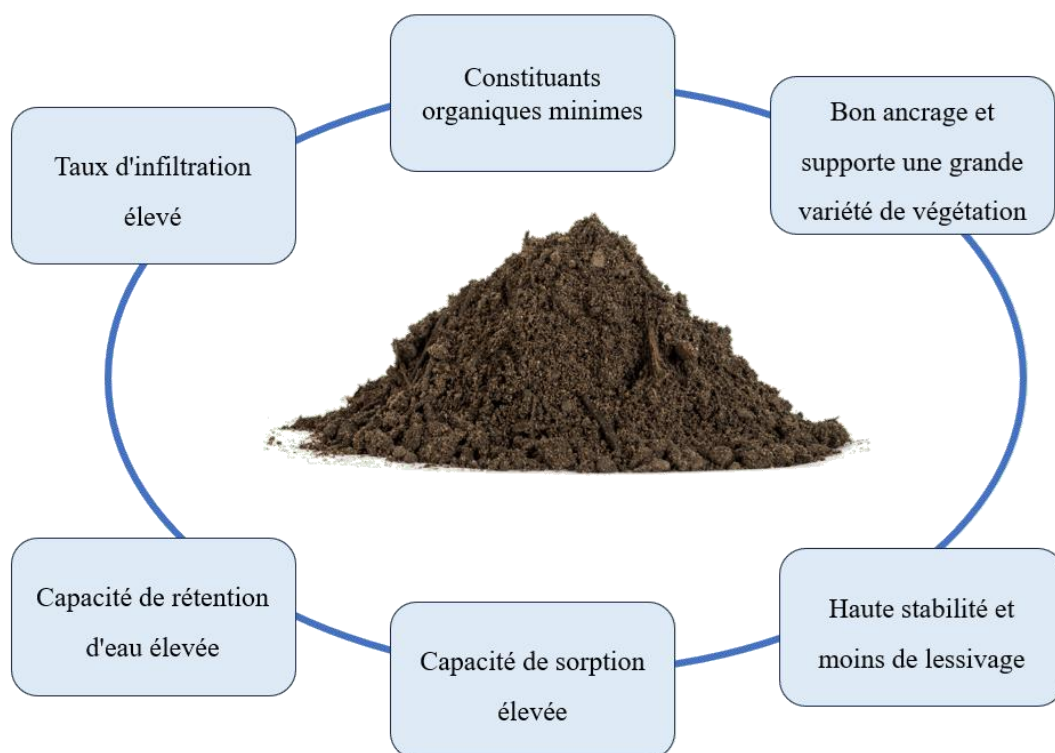


Figure 39 : Caractéristiques du substrat des cellules de biorétention

Étant donné les nombreuses caractéristiques souhaitées, il est irréaliste de supposer qu'un seul matériau possède toutes ces caractéristiques pour former un milieu de biorétention idéal. Il est donc courant de combiner des constituants organiques/inorganiques présentant différentes caractéristiques à des ratios définis pour produire un substrat avec des propriétés spécifiques (Vijayaraghavan et al., 2021). Traditionnellement, le substrat de biorétention est préparé en mélangeant (sur une base de volume) : du sol de petites particules (20 à 30 %), du sable (30 à 60 %) et de la matière organique (20 à 40 %) (Brown & Hunt, 2012).

5.3.2. Étude économique

L'estimation du coût de construction d'une installation de biorétention pour le traitement des eaux de ruissellement provenant d'un parking de 0,3 hectare (0,8 acre) s'élevait à 6 500 \$ (Roy-Poirier et al., 2010).

Les coûts liés à la construction, à l'exploitation et à l'entretien des systèmes de biorétention se sont révélés très variables et dépendent fortement des objectifs de conception et de la nature des sites d'installation (Vijayaraghavan et al., 2021). En général, les variables importantes influençant le coût global des biorétentions sont les suivantes :

- **Prix du terrain** : Il convient de noter que l'installation de systèmes de biorétention nécessite des surfaces relativement plus grandes par rapport à d'autres mesures de contrôle des eaux pluviales ;

- **Coûts des permis ;**
- **Conditions du site** (le type de sol et le paysagement du site prévu) ;
- **Coûts liés à la conception et à la construction de systèmes de biorétention à grande échelle ;**
- **Coûts liés aux opérations quotidiennes et à l'entretien de ces systèmes.**

En plus, les composantes de coût associées à chaque étape de la mise en œuvre d'un système de biorétention comprennent (Minnesota Stormwater Manual, s.d.) :

- **Préparation du site** : protection/enlèvement des arbres et des plantes, défrichage et essouchage et récupération de la terre végétale ;
- **Formation du site** : excavation/nivellement et transport des matériaux hors site ;
- **Composantes structurales** : structures d'entrée et de sortie et drains souterrains ;
- **Restauration du site** : bande filtrante, préparation du sol, ensemencement et plantation/transplantation ;
- **Exploitation, entretien et inspection annuels** : contrôle des mauvaises herbes, tonte, enlèvement des débris et des sédiments et inspection.

Tableau 14 : Comparaison des coûts de l'installation d'une cellule de biorétention : Hong Kong, Seattle et Singapour (Tan & Wang, 2023; Vijayaraghavan et al., 2021)

Paramètres	Hong Kong	Seattle	Singapour
Coût du terrain (USD/m ²)	*	*	*
Plantes (USD/m ²)	7	59	33
Gravier (USD/m ³)	90	86	88
Sol (USD/m ³)	92	62	77
Excavation (USD/m ³)	5	27	16
Élimination (USD/m ³)	17	7	12
Tuyau (USD/m)	19	39	29
Regard d'évacuation (USD/unité)	1226	*	*
Géotextile (USD/m ²)	*	3	3

*Donnée non disponible

Le Tableau 14 met en évidence les variations de coûts associés à l'installation de cellules de biorétention dans trois villes : Hong Kong, Seattle et Singapour. On observe des écarts significatifs selon les postes de dépenses. Par exemple, le coût des plantes est nettement plus élevé à Seattle (59 USD/m²) qu'à Hong Kong (7 USD/m²) et Singapour (33 USD/m²), ce qui peut être attribué à la disponibilité locale des espèces végétales et aux politiques d'aménagement urbain.

Les coûts des matériaux de base, comme le gravier et le sol, varient relativement peu entre les villes, bien que Seattle affiche un coût de sol plus bas (62 USD/m³) que Hong Kong (92 USD/m³) et Singapour (77 USD/m³). L'excavation et l'élimination des matériaux sont également plus coûteuses à Seattle, ce qui pourrait refléter des différences dans les réglementations environnementales et les coûts de main-d'œuvre.

Enfin, le coût des infrastructures, comme les tuyaux et les regards d'évacuation, varie aussi considérablement. Le coût des tuyaux est le plus élevé à Seattle (39 USD/m) et le plus bas à Hong Kong (19 USD/m), tandis que les regards d'évacuation sont renseignés uniquement pour Hong Kong (1226 USD/unité), ce qui suggère une différence dans les standards ou la disponibilité des données.

Dans l'ensemble, ces variations traduisent l'influence des facteurs économiques locaux, des réglementations en vigueur et des choix techniques propres à chaque région.

L'évaluation du cycle de vie (ECV) est un outil souvent utilisé pour quantifier les conséquences environnementales (tant positives que négatives) de divers objets tout au long de leur cycle de vie (du berceau à la tombe) (Vijayaraghavan et al., 2021). Pour les biorétentions, ces cycles incluent l'acquisition des matières premières, la production des différents composants d'un système de biorétention, le transport, l'installation, l'exploitation et l'entretien des systèmes de biorétention ainsi que le recyclage et/ou l'élimination des composants obsolètes à la fin de leur cycle de vie (Bhatt et al., 2019).

L'analyse des coûts du cycle de vie (ACCV) quantifie les impacts économiques des processus ou systèmes sur toute leur durée de vie ; l'ECV et l'ACCV sont toutes deux importantes et se complètent bien (Vijayaraghavan et al., 2021). Wang et al. (2016) ont intégré trois catégories dans leur analyse ACCV : les matériaux, la construction et l'exploitation/entretien. Ils ont constaté que les phases d'exploitation et d'entretien représentaient la majeure partie de l'ACCV, avec un montant de 30 509 CAD, soit 57 % de l'ACCV total, tandis que les coûts de construction étaient les plus bas parmi les trois catégories (Wang et al., 2016).

5.3.3. Dimensionnement

Le dimensionnement des cellules de biorétention est basé sur la gestion des surfaces imperméables, dans ce cas précis, le stationnement et les toitures non végétalisées. Le bâtiment du Carrefour de l'eau, de 18 965 m², inclura des locaux et laboratoires pour l'enseignement et la recherche, un banc d'essai pour tester des technologies à échelle réelle, un incubateur d'entreprises spécialisées dans le secteur de l'eau, un pôle immobilier spécialisé en eau, une usine de recyclage d'eaux usées et de distribution, un centre de muséologie pour les visiteurs ainsi que des espaces communs. Le besoin en stationnement est estimé comme suit (Ville de Laval, 2025) :

- Locaux d'enseignement et laboratoires (25 % de la surface, soit 4 741 m²) : avec un ratio de 1 place pour 500 m², environ 10 places sont nécessaires.
- Incubateur et bureaux (20 % de la surface, soit 3 793 m²) : avec un ratio de 1 place pour 100 m², environ 38 places sont nécessaires.
- Usine de recyclage et distribution (20 % de la surface, soit 3 793 m²) : avec un ratio de 1 place pour 1000 m², environ 3 places sont nécessaires.
- Centre visiteurs/muséologie (15 % de la surface, soit 2 844 m²) : avec un ratio de 1 place pour 1 000 m², environ 3 places sont nécessaires.
- Espaces communs et divers (20 % de la surface, soit 3 793 m²) : avec un ratio de 1 place pour 1000 m², environ 3 places sont nécessaires.

Le total des places de stationnement nécessaires serait arrondi à 60 places, ce qui correspondrait à une superficie de stationnement comprise entre 1 500 et 2 100 m², en fonction de la taille des places et des voies de circulation.

Afin de dimensionner les cellules de biorétention de manière adéquate, la règle selon laquelle la superficie du stationnement et des toitures non végétalisées ne doit pas être plus de 10 fois supérieure à celle des cellules de biorétention a été appliquée (Ville de Québec, s.d). Ce ratio permet de garantir une capacité d'infiltration suffisante pour traiter le volume d'eau de ruissellement généré par les surfaces imperméables. Ce ratio est en général aligné avec les performances typiques des systèmes de biorétention, en climat québécois, assurant une gestion efficace des eaux pluviales. De plus, cette règle respecte les normes locales, de la ville de Québec et ceux du gouvernement provincial, en matière de réduction des risques de débordement et de surcharge des infrastructures de drainage, contribuant ainsi à la durabilité des systèmes d'eaux pluviales.

En se basant sur cette règle, la surface des cellules de biorétention doit être proportionnelle à la taille du stationnement et des toitures non végétalisées. En prenant compte la superficie des toitures non végétalisées (1 360 m²) et une superficie minimale de stationnement de 1 500 m², les cellules de biorétention devraient couvrir au moins 286 m². Pour la superficie maximale de stationnement, estimée à 2 100 m², les cellules de biorétention devraient avoir une surface d'au moins 346 m². Ce dimensionnement est conçu pour assurer une gestion efficace du ruissellement des eaux pluviales provenant des surfaces imperméables, tout en respectant les critères de conception et de durabilité du projet.

5.3.4. Infiltration et évapotranspiration

La compréhension de la pédologie de la zone d'étude est essentielle pour la conception et l'implantation efficace des cellules de biorétention au Carrefour de l'eau. En utilisant les données fournies par le Système d'Information Hydrogéologique (SIH) du gouvernement du Canada (MELCCFP, s.d), les principaux matériaux présents dans notre zone d'étude, comme mentionné précédemment, ont été identifiés, à savoir le sable (fin, moyen et gros), l'argile et le gravier.

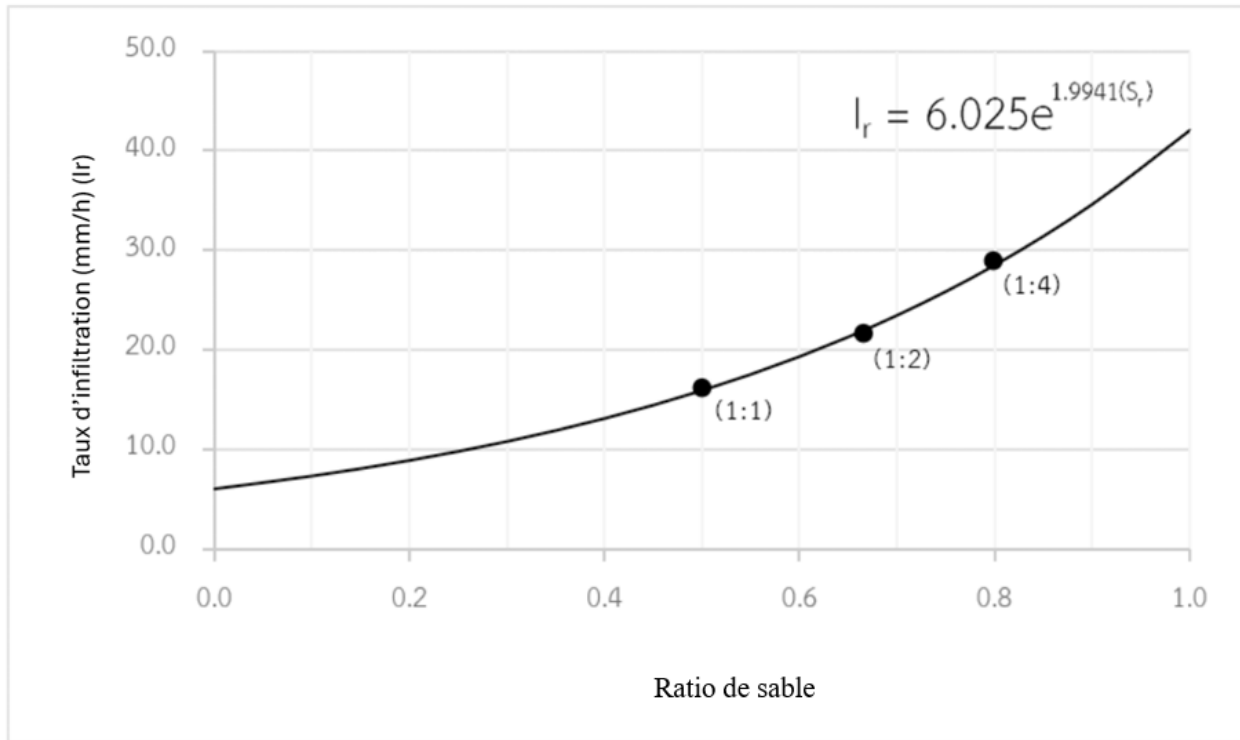
Les taux d'infiltration typiques des différents types de sols présents dans la zone, comme le montre le Tableau 15, varient considérablement. Par exemple, le sable présente un taux d'infiltration élevé de 105 mm/h ($2,92 \times 10^{-6}$ m/s), ce qui en fait un matériau idéal pour favoriser une infiltration rapide de l'eau. En revanche, l'argile, avec un taux d'infiltration de seulement 0,3 mm/h ($8,35 \times 10^{-8}$ m/s), ralentit considérablement le mouvement de l'eau (Tableau 5). Cette variabilité implique que dans les zones où l'argile est présente à une certaine profondeur, il pourrait être nécessaire de creuser et de retirer une partie de ce matériau pour améliorer l'efficacité des cellules de biorétention.

Cependant, il est fortement recommandé que la granulométrie et l'infiltration soient testées localement lors de la construction afin de s'assurer que les taux d'infiltration souhaités soient effectivement respectés. Ces tests permettront de valider les estimations initiales et de garantir que les conditions réelles du sol et du substrat utilisé pour les toitures végétalisées ou autres dispositifs de gestion des eaux pluviales correspondent aux exigences de performance pour une gestion optimale de l'eau.

Tableau 15 : Taux d'infiltration typiques (Ministère de l'Environnement, s.d.)

Type de sol	Taux d'infiltration pour conception (facteur de sécurité de 0,5)	
	(mm/h)	(m/s)
Sable	105	$2,92 \times 10^{-6}$
Sable limoneux	30,5	$8,45 \times 10^{-6}$
Limon sablonneux	13	$3,61 \times 10^{-6}$
Limon	6,5	$1,81 \times 10^{-6}$
Limon silteux	3,4	$9,45 \times 10^{-7}$
Limon argilo-sablonneux	2,2	$5,95 \times 10^{-7}$
Limon argileux	1,2	$3,20 \times 10^{-7}$
Limon argilo-silteux	0,75	$2,09 \times 10^{-7}$
Argile sablonneuse	0,6	$1,67 \times 10^{-7}$
Argile silteuse	0,45	$1,25 \times 10^{-7}$
Argile	0,3	$8,35 \times 10^{-8}$

Pour une cellule de biorétention, les taux d'infiltration pour les rapports de substrat original par rapport au sable de 1:1, 1:2 et 1:3 sont de 16,09, 21,53 et 28,90 mm/h, respectivement (Sittisom et al., 2022). Ces taux sont présentés sous forme graphique dans la Figure 40,



I_r : *Infiltration rate* (taux d'infiltration)

S_r : *Sand ratio* (ratio de sable)

Figure 40 : Taux d'infiltration en fonction du rapport entre le sable et les agrégats* (Sittisom et al., 2022)

*Le terme agrégats désigne ici les particules minérales autres que le sable, comme le gravier ou la pierre concassée, qui influencent la perméabilité du sol et le taux d'infiltration.

Pour faciliter les calculs, il est possible de se baser sur une moyenne de 22,17 mm/h, ce qui est équivalent à 0,53 m/j.

Afin de déterminer la capacité des cellules de biorétention à gérer le volume d'eau de pluie journalier total, nous nous sommes basés sur les données de précipitations de l'année 2011, spécifiquement le 29 août, la journée ayant enregistré les précipitations les plus élevées de cette année avec 109 mm de pluie (Environnement Canada, 2024).

Pour une superficie de 346 m² de cellules de biorétention, le volume d'eau total pouvant être infiltré par jour est estimé à : 0,53 m/j × 346 m² = 183 m³/j.

Cependant, étant donné que la pluie du 29 août 2011 a été de 109 mm, soit 0,109 m, et en prenant en compte la superficie totale des terrains imperméables du bâtiment (3 460 m²), le volume d'eau acheminé vers les cellules de biorétention pendant cette journée est de : 0,109 m × 3 460 m² = 377 m³.

Dans ce scénario extrême, le volume de débordement prévu est estimé à 194 m³. Ce surplus d'eau peut être directement acheminé vers les réseaux d'égout. Cependant, une solution alternative consiste à construire un réservoir souterrain dédié, capable de recueillir et de stocker ces débordements.

En analysant les autres mois de l'année 2011, le jour ayant le plus de précipitations, après le 29 août, est le 14 octobre, avec des précipitations totales de 34 mm, soit 0,034 m (Gouvernement du Canada, 2024). Dans ce cas, le volume d'eau acheminé vers les cellules de biorétention pendant cette journée est de : $0,034 \text{ m} \times 3\,460 \text{ m}^2 = 118 \text{ m}^3$. Ce volume peut être géré totalement par les biorétentions.

Sur la base de ces données, si l'on souhaite construire un réservoir d'eau souterrain pour gérer les débordements lors d'événements extrêmes, un volume total de 200 m³ serait suffisant pour couvrir les besoins, y compris une marge de sécurité.

Cette étude de faisabilité met en lumière une approche multidimensionnelle intégrant des analyses techniques, économiques et réglementaires, soutenues par des outils comme CROPWAT 8.0 et des données climatiques spécifiques. Le but est d'assurer une intégration harmonieuse et performante des solutions au Carrefour de l'eau.

6. BILAN HYDRIQUE

Pour établir une matrice de l'eau complète pour le bâtiment du Carrefour de l'eau, les entrées et les sorties d'eau ont été calculées en tenant compte des précipitations, de l'évapotranspiration et de l'infiltration. Les données des précipitations et des températures moyennes estimées pour les années 2025, 2030 et 2075 ainsi que les caractéristiques géologiques et végétales de la zone d'étude sont utilisées dans les calculs.

6.1. Entrées d'eau

Dans le but de faire une modélisation pour le futur, il est adéquat d'utiliser les données de 2075, soit dans 50 ans, durée de vie utile du bâtiment.

- **Précipitations liquides** : 1 051 mm
- **Précipitations solides (converties en équivalent en eau)** : 332 mm
- **Total annuel** : 1 051 mm + 332 mm = 1 383 mm

Il faut savoir que les précipitations sont reçues sur :

- Le bâtiment; celles-ci seront gérées par les toitures végétalisées, les murs végétalisés et l'excédent par les biorétentions ;
- Le stationnement; celles-ci seront gérées par les biorétentions ;
- Les zones perméables du terrain. Pour ces zones, on suppose que l'eau de pluie s'infiltré en totalité et elle n'est pas prise en compte dans le bilan.

6.2. Infiltration et évapotranspiration

6.2.1. Toitures végétalisées

- a. **Extensive** (40% de la superficie totale des toits végétalisés)

Superficie : 2 176 m²

Évapotranspiration annuelle moyenne : 1,86 mm/jour

Évapotranspiration totale : 1,86 mm/jour × 365 jours = 679,9 mm/an

Volume d'eau pouvant être évapotranspiré : 0,6799 m × 2 176 m² = 1 479 m³/an

Infiltration annuelle moyenne : basée sur un taux d'infiltration de 13 mm/h pour un sol de type limon sablonneux, ajusté pour les toitures végétalisées. Ce type de substrat offre un équilibre optimal entre rétention d'eau, drainage et support pour la végétation, tout en permettant une infiltration efficace. Cette hypothèse est également soutenue par les recommandations techniques trouvées dans des études

sur les toitures végétalisées en climat similaire, où des substrats avec une composition de type limon sablonneux ou des mélanges granulaires adaptés sont privilégiés (section 5.1.1.4).

Dans le climat nordique de Québec, nous supposons que les toitures végétalisées sont pleinement fonctionnelles pendant environ neuf mois (6 480 h) de l'année. En hiver, l'accumulation de neige et la formation de glace limitent les processus d'absorption de l'eau par le substrat. Toutefois, dès le printemps et jusqu'à l'automne, ces toitures jouent un rôle essentiel dans la gestion des eaux pluviales en réduisant le ruissellement. Même en hiver, la couverture végétale et le substrat contribuent à limiter les variations extrêmes de température, offrant ainsi des bénéfices énergétiques et structurels au bâtiment.

Capacité d'infiltration totale maximale : $13 \text{ mm/h} \times 6\,480 \text{ heures/an} = 84\,240 \text{ mm/an} = 84 \text{ m/an}$

Volume d'eau pouvant être infiltré : $84 \text{ m/an} \times 2\,176 \text{ m}^2 = 183\,306 \text{ m}^3/\text{an}$

L'eau infiltrée dans le substrat des toitures végétalisées est absorbée par le substrat et peut soit être évapotranspirée, soit être drainée. Ainsi, le volume d'eau infiltrée n'est pas ajouté au volume d'eau évapotranspirée car ces deux processus sont liés.

b. Intensive (60% de la superficie totale des toits végétalisés)

Superficie : $3\,264 \text{ m}^2$

Évapotranspiration annuelle moyenne : 3 mm/jour

Évapotranspiration totale : $3 \text{ mm/jour} \times 365 \text{ jours} = 1\,095 \text{ mm/an}$

Volume d'eau pouvant être évapotranspiré : $1,095 \text{ m} \times 3\,264 \text{ m}^2 = 3\,574 \text{ m}^3/\text{an}$

Infiltration annuelle moyenne : Pour les toits intensifs (potagers), un taux d'infiltration plus élevé de 20 mm/h est utilisé.

Infiltration totale : $20 \text{ mm/h} \times 6\,480 \text{ h/an} = 129\,600 \text{ mm/an}$

Volume d'eau pouvant être infiltré : $129 \text{ m} \times 3\,264 \text{ m}^2 = 469\,670 \text{ m}^3/\text{an}$

6.2.2. Murs végétalisés

Superficie totale : $1\,700 \text{ m}^2$

Épaisseur moyenne au sol : 50 cm (0,5 m) .

Hauteur des murs : supposons une hauteur moyenne de 10 m .

Pour obtenir une empreinte au sol réelle, il faut considérer la largeur réelle du mur. En général, cette largeur est petite mais doit être incluse dans les calculs. Dans ce cas, la largeur du mur est estimée à 0,5 m.

Calcul de l'empreinte au sol : largeur du mur (m) $\times$ (surface totale du mur (m²) / hauteur (m))

$$\text{Empreinte au sol} = 0,5 \text{ m} (1\,700 \text{ m}^2 / 10 \text{ m}) = 85 \text{ m}^2$$

Évapotranspiration annuelle moyenne : les murs végétalisés ont une évapotranspiration généralement moins élevée que les toits, mais pour cette estimation, une moyenne de 1,5 mm/jour est utilisée.

$$\text{Évapotranspiration totale} : 1,5 \text{ mm/jour} \times 365 \text{ jours} = 547,5 \text{ mm/an}$$

$$\text{Volume d'eau pouvant être évapotranspiré} : 0,5475 \text{ m/an} \times 85 \text{ m}^2 = 47 \text{ m}^3/\text{an}$$

6.2.3. Cellules de biorétention

$$\text{Superficie des cellules de biorétention} : 346 \text{ m}^2$$

$$\text{Évapotranspiration annuelle moyenne} : 2 \text{ mm/jour}$$

$$\text{Capacité d'évapotranspiration totale} : 2 \text{ mm/jour} \times 365 \text{ jours} = 730 \text{ mm/an}$$

$$\text{Volume d'eau pouvant être évapotranspiré} : 0,73 \text{ m} \times 210 \text{ m}^2 = 153,3 \text{ m}^3/\text{an}$$

L'infiltration théorique moyenne des biorétentions est de 0,022 m/h (Sittisom et al., 2022), voir les calculs présentés ci-haut à la section 5.3.4.

Dans le climat nordique de Québec, nous supposons que les cellules de biorétention sont fonctionnelles pour l'infiltration de l'eau durant neuf mois par an. En hiver, lorsque le sol est gelé, l'infiltration devient limitée, réduisant ainsi l'efficacité du dispositif. Toutefois, durant le reste de l'année, ces cellules permettent de gérer efficacement les eaux pluviales en favorisant leur absorption par le sol et leur filtration par les substrats. La période d'infiltration active correspond principalement au printemps, à l'été et à l'automne, lorsque les températures permettent au sol de rester perméable et aux plantes de jouer pleinement leur rôle dans l'évapotranspiration et l'amélioration de la qualité de l'eau.

$$\text{Capacité d'infiltration totale maximale} : 0,022 \text{ m/h} \times 6\,480 \text{ h/an} = 142,56 \text{ m/an}$$

$$\text{Volume d'eau pouvant être infiltré} : 142,56 \text{ m/an} \times 346 \text{ m}^2 = 49\,325 \text{ m}^3/\text{an}$$

6.3. Bilan hydrique du Carrefour de l'eau

Pour estimer le bilan hydrique du Carrefour de l'eau, les entrées (précipitations liquides et solides) et les sorties (évapotranspiration et infiltration) d'eau ont été considérées. On suppose que toute la neige est gardée sur place et que l'eau de fonte est gérée sur le site. Les données sont basées sur les valeurs annuelles moyennes des précipitations et les taux d'évapotranspiration et d'infiltration des différentes phytotechnologies. Afin de réaliser le bilan, il est nécessaire de calculer le volume d'eau total géré par les phytotechnologies choisies, en commençant par les murs et toitures végétalisés (Tableau 16).

Tableau 16 : Bilan hydrique prenant en compte les murs et les toitures végétalisés du bâtiment du Carrefour de l'eau

Phytotechnologies		Superficie (m ²)	Volume d'eau reçu (m ³ /an)	Volume d'eau pouvant être évapotranspiré (m ³ /an)	Volume d'eau pouvant être infiltré (m ³ /an)	Volume total d'eau gérée (m ³ /an)	Bilan hydrique (m ³ /an)
Toitures végétalisées	Extensives	2 176	3 002	1 479	183 306	3 002	0 ¹
	Intensives	3 264	4 504	3 574	469 670	4 504	0 ¹
Murs végétalisés		85 ²	117	46	0 ³	46	71
Total		5 525	7 624	5 099	652 976	7 552	+71

¹ Il n'y a pas de débordement; la totalité de l'eau de pluie est gérée sur place

² L'empreinte au sol des murs végétalisés

³ L'eau qui n'est pas gérée par les murs végétalisés est acheminée vers les cellules de biorétention

Les résultats présentés au Tableau 16 montrent l'efficacité des toitures et murs végétalisés dans la gestion des eaux pluviales. Les toitures végétalisées extensives couvrent 2 176 m² et peuvent infiltrer un volume annuel maximal de 183 306 m³. Cela indique que le volume d'eau reçu (3 002 m³/an) est géré en totalité : 1 479 m³/an de ce volume est évapotranspiré alors que le reste (1 523 m³/an) est acheminé vers les cellules de biorétention (Tableau 17). En revanche, les toitures intensives, avec une superficie plus grande de 3 264 m², montrent une gestion plus intensive avec une capacité de gestion annuelle atteignant un maximum de 183 306 m³. Réellement, un volume de 3 574 m³/an pourra être évapotranspiré, ce qui veut dire que seulement 930 m³/an est acheminé vers les cellules de biorétention (Tableau 17). Pourtant, elles assurent un ralentissement de ruissellement. Les murs végétalisés, avec une empreinte au sol de 85 m², ont une capacité limitée d'évapotranspiration (46,53 m³/an) et aucune capacité d'infiltration, ne gérant au total que 46,53 m³/an, laissant un surplus 71 m³ (Tableau 17). Ce surplus est aussi acheminé vers les cellules de biorétention.

Globalement, les phytotechnologies analysées, sur une superficie totale de 5 525 m², reçoivent un volume d'eau de 7 624 m³/an et sont capables de gérer efficacement 7 552 m³/an.

Tableau 17 : Bilan hydrique de l'eau gérée par les cellules de biorétention du bâtiment du Carrefour de l'eau

Superficie (m ²)	Volume d'eau reçu (m ³ /an)			Volume d'eau pouvant être infiltré (m ³ /an)	Volume d'eau évapotranspiré (m ³ /an)	Volume d'eau géré (m ³ /an)	Bilan hydrique (m ³ /an)
	S	D	Total				
346	1 314,8	2 524	3 839	49 325	153	3 839	0*

*Il n'y a pas de débordement et la totalité d'eau est gérée

S : Surfaces imperméables = stationnement + portion non végétalisée de la toiture

D : Débordement des phytotechnologies (71 m³/an provenant des murs végétalisés, 1 523 m³/an provenant des toitures végétalisées extensives et 930 m³/an provenant des toitures végétalisées intensives)

Le bilan hydrique est nul (0 m³/an), ce qui indique qu'il n'y a aucun débordement non traité. Cela montre une gestion optimale où l'ensemble du volume d'eau de pluie reçu est entièrement infiltré ou évapotranspiré, sans surplus à rediriger vers d'autres systèmes. L'efficacité du système suggère qu'il est dimensionné de manière adéquate pour gérer les apports hydriques annuels, malgré la contribution des débordements des phytotechnologies vers les biorétentions.

Cependant, les calculs présentés reposent sur des moyennes annuelles et des hypothèses spécifiques concernant les taux d'évapotranspiration et d'infiltration des phytotechnologies. Ces simplifications peuvent ne pas capturer entièrement les variations saisonnières, les événements de précipitations extrêmes ou les incertitudes liées aux propriétés physiques des infrastructures vertes, ce qui pourrait influencer les résultats finaux et leur interprétation.

7. RETOMBÉES ÉCONOMIQUES DES PHYTOTECHNOLOGIES CHOISIES

Dans cette section, nous abordons les retombées économiques associées aux phytotechnologies sélectionnées pour le projet. L'intégration de solutions naturelles telles que les toitures végétalisées, les murs verts et les systèmes de biorétention permet non seulement d'améliorer la qualité de l'environnement urbain, mais également de générer des économies d'énergie et de réduire les coûts de gestion des eaux pluviales. Ces technologies contribuent à l'atteinte d'objectifs de durabilité tout en offrant des bénéfices économiques mesurables sur le long terme, particulièrement en ce qui concerne la consommation énergétique des bâtiments. La Figure 41 illustre comment la taille des bâtiments influence leur consommation d'énergie, donnant un aperçu utile pour l'évaluation des impacts économiques des phytotechnologies dans différents contextes de superficie bâtie.

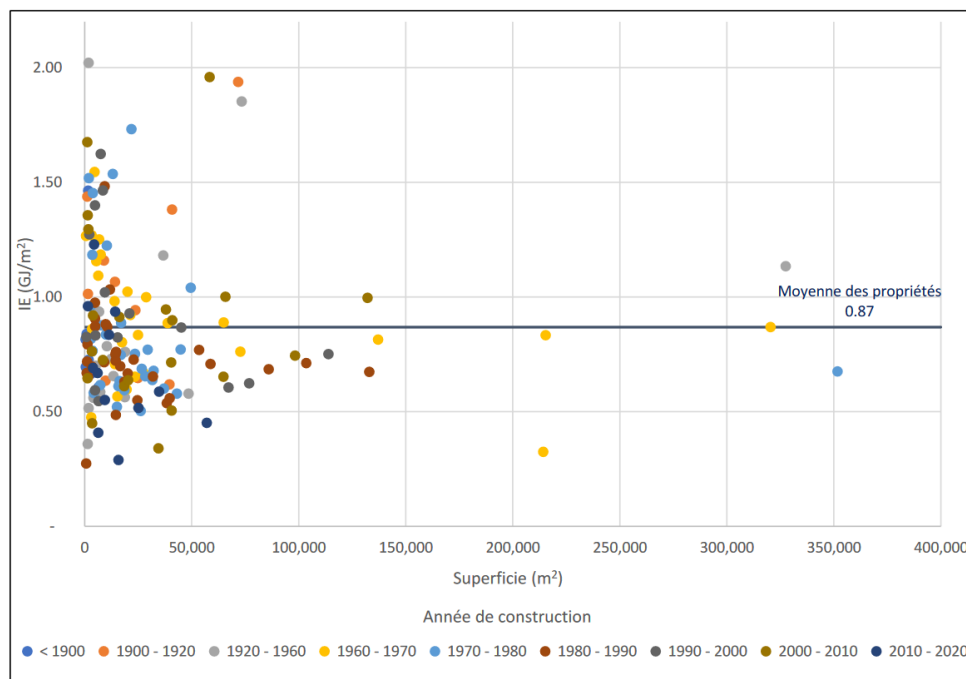


Figure 41 : Intensité énergétique en fonction de la superficie des bâtiments (BOMA, 2020)

Le Carrefour de l'eau, avec une superficie totale de 18 965 m², engendre des dépenses énergétiques et des émissions de CO₂e proportionnelles à sa taille. En appliquant les moyennes indiquées dans les paragraphes suivants pour les bâtiments, les coûts et les émissions annuelles peuvent être calculés.

Coût énergétique annuel

Au Québec, les bâtiments dépensent en moyenne 20 \$/m² en énergie (BOMA, 2020). Le coût total pour le Carrefour de l'eau est donc de :

$$\text{Coût total} = 18\,965 \text{ m}^2 \times 20 \text{ \$/m}^2 = 379\,300 \text{ \$}$$

Émissions de CO₂e annuelles

Les bâtiments, au Québec, émettent en moyenne 11 kg/m² de CO₂e (BOMA, 2020). Cette moyenne est basée sur un approvisionnement en gaz naturel. Elle correspond à une moyenne provinciale, sans tenir compte des spécificités énergétiques propres au bâtiment du Carrefour de l'eau. Les émissions totales pour le Carrefour de l'eau sont donc de :

$$\text{Émissions totales} = 18\,965 \text{ m}^2 \times 11 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^2 = 208\,615 \text{ kg CO}_2\text{e}$$

7.1. Toitures végétalisées

7.1.1. Coût total de l'installation et de l'entretien

Les coûts moyens de l'installation en 2023 sont de 123 CAD/m² pour les toits extensifs et de 371 CAD/m² pour les toits intensifs. Le coût total de l'installation est donc de :

- Toitures extensives : $123 \text{ CAD/m}^2 \times 2\,176 \text{ m}^2 = 267\,648 \text{ CAD}$
- Toitures intensives : $371 \text{ CAD/m}^2 \times 3\,264 \text{ m}^2 = 1\,210\,944 \text{ CAD}$

Le coût moyen de l'exploitation et de l'entretien des toitures extensives est estimé à 4,60 \$/m²/an, et celui des toitures intensives à 6,00 \$/m²/an. Sur une durée de vie de 50 ans, le coût total de l'exploitation et de l'entretien sera donc de :

- Toitures extensives : $4,60 \text{ CAD/m}^2\text{/an} \times 2\,176 \text{ m}^2 \times 50 \text{ ans} = 500\,480 \text{ CAD}$
- Toitures intensives : $6,00 \text{ CAD/m}^2\text{/an} \times 3\,264 \text{ m}^2 \times 50 \text{ ans} = 979\,200 \text{ CAD}$

En somme, le coût total, incluant l'installation et l'entretien sur 50 ans, se répartit comme suit :

- Toitures extensives : 267 648 CAD (installation) + 500 480 CAD (entretien) = 768 128 CAD
- Toitures intensives : 1 210 944 CAD (installation) + 979 200 CAD (entretien) = 2 190 144 CAD
- Coût total = 2 958 272 CAD

7.1.2. Économies d'énergie

Le bâtiment du Carrefour de l'eau, avec une superficie totale de 18 965 m², a un coût énergétique annuel de 379 300 CAD. De cette somme, 54 %, soit 204 822 CAD, est consacré au chauffage et à la climatisation (Hydro-Québec, s.d.). En installant une toiture végétalisée, il est possible de réduire la demande en chauffage

de 30 % (Susca, 2019). Cela se traduit par une économie d'énergie annuelle de 61 446,60 CAD. De plus, la consommation d'énergie pour la climatisation peut être réduite de manière significative grâce aux toitures végétalisées, avec une diminution de l'entrée de chaleur de 99 % pour un toit irrigué et de 91 % pour un toit non irrigué. Cela représente un potentiel d'économie énergétique considérable pour le bâtiment.

L'inflation a été intégrée en appliquant un taux annuel composé de 2 % sur la durée considérée. La formule utilisée est : Économie projetée = Économie initiale $\times (1 + \text{Taux d'inflation})^{\text{Durée}}$.

Le Tableau 18 met en évidence l'impact de l'inflation sur les économies totales projetées dans le temps. À mesure que les années augmentent, la valeur monétaire des économies augmente en raison de l'effet de l'inflation cumulée.

Tableau 18 : Économies totales (CAD) d'énergies des toitures végétalisées sur 50 ans

Durée (années)	3	5	10	15	20	25	50
Économie totale initiale	184 340,8	307 233	614 466	921 699	1 228 932	1 536 165	3 072 330
Économie totale en projetant l'inflation	195 623	339 210	749 030	1 240 485	1 826 128	2 520 241	8 269 456

En conclusion, l'installation d'une toiture végétalisée isolée sur le Carrefour de l'eau permettrait de réaliser des économies substantielles sur les coûts de chauffage et de climatisation, contribuant ainsi à une réduction significative des dépenses énergétiques annuelles.

Pour évaluer l'impact environnemental des toitures végétalisées, qui couvrent une superficie de 5 440 m², leur capacité à absorber le CO₂ et à libérer l'O₂ doit être examinée. Les estimations disponibles indiquent qu'une pelouse de 1 hectare (10 000 m²) peut absorber 400 kg de CO₂ et libérer 290 kg d'O₂ chaque jour (Yan, 2011).

Les avantages énergétiques offerts par les toitures végétalisées jouent un rôle significatif sur leur cycle de vie. Bien que leur construction nécessite davantage de ressources initiales, ces toitures se révèlent être une option écologiquement avantageuse grâce à leur capacité à réduire légèrement la demande énergétique et à prolonger

la durée de vie de la membrane de toiture, ce qui compense les cycles de remplacement plus courts et l'impact des matériaux nécessaires (Kosareo & Ries, 2007).

Ainsi, en approximant la capacité de captation de la toiture par celle d'une herbacée, les toitures végétalisées sur le site d'étude auraient la capacité d'absorber environ 217,6 kg de CO₂ chaque jour, soit 79 424 kg de CO₂ par an, et de libérer environ 157,76 kg d'O₂ chaque jour, soit 57 084,4 kg d'O₂ par an. Le Carrefour de l'eau pourrait donc réduire ses émissions nettes de CO₂e de 61,9 %, passant de 208 615 kg à 129 191 kg par an. Cette réduction significative met en lumière l'importance et l'efficacité des toitures végétalisées dans la stratégie de réduction des émissions de gaz à effet de serre et dans l'amélioration de la qualité de l'air.

Cependant, les économies énergétiques projetées sur 50 ans reposent sur des hypothèses concernant l'inflation et l'efficacité énergétique, sans prendre en compte des variables telles que les fluctuations des prix de l'énergie, les avancées technologiques ou les changements climatiques qui pourraient affecter la performance thermique des toitures. Par ailleurs, l'évaluation de la capacité de captation de CO₂ et de libération d'O₂ repose sur une approximation basée sur des données générales pour une pelouse herbacée. Cette simplification peut ne pas refléter précisément les performances des toitures végétalisées dans un climat spécifique ou avec des espèces végétales différentes.

7.1.3. Réduction des coûts de la gestion des eaux pluviales

Selon une étude faite à l'Université de Gênes (Italie), une ville caractérisée par des étés courts, chauds, humides et dégagés dans l'ensemble et des hivers longs, frisquets et partiellement nuageux (Weather Spark, 2024a), un système de toit végétalisé peut réduire de manière significative la génération de ruissellement des eaux pluviales. En moyenne, ce type de toit retient 68 % du volume de ruissellement et atténue les pointes de débit de 89 %, selon les observations effectuées sur une année hydrologique complète (Palla et al., 2011).

L'installation de toitures végétalisées sur le bâtiment du Carrefour de l'eau peut entraîner une réduction significative des coûts de gestion des eaux pluviales. En utilisant 80 % de la superficie totale pour des toitures végétalisées, on obtient 5 440 m² de toitures végétalisées. Cette superficie se divise en 2 176 m² de toitures végétalisées extensives (40 %) et 3 264 m² de toitures végétalisées intensives (60 %). Selon les calculs présentés ci-haut, la pluviométrie annuelle moyenne de la région dans le futur (entre 2025 et 2045) peut être estimée à 1 307 mm/an.

Selon les données de Ville de Québec (2024), le coût moyen de gestion des eaux pluviales est estimé à 2,75 CAD/m³. Ainsi, en réduisant les volumes d'eau à gérer grâce aux toitures végétalisées, on peut envisager des économies annuelles importantes.

Calculs des volumes et réduction des coûts

Volume de pluie annuel

- **Toitures extensives** : $2\,176\text{ m}^2 \times 1,31\text{ m/an} = 2\,850,56\text{ m}^3/\text{an}$.
- **Toitures intensives** : $3\,264\text{ m}^2 \times 1,31\text{ m/an} = 4\,275,84\text{ m}^3/\text{an}$.

Volume de ruissellement réduit

Selon le bilan hydrique (section 6.3), les toitures végétalisées extensives permettent une réduction de ruissellement de 50 %. En ce qui concerne les toitures intensives, c'est une réduction de 80 %. Le volume de ruissellement réduit est donc calculé comme suit :

- **Toitures extensives** : $3\,002\text{ m}^3/\text{an} \times 0,50 = 1\,501\text{ m}^3/\text{an}$.
- **Toitures intensives** : $4\,504\text{ m}^3/\text{an} \times 0,80 = 3\,603\text{ m}^3/\text{an}$.
- **Total** : $1\,501\text{ m}^3/\text{an} + 3\,603\text{ m}^3/\text{an} = 5\,104\text{ m}^3/\text{an}$.

Réduction des coûts annuels

- $5\,104\text{ m}^3/\text{an} \times 2,75\text{ CAD/m}^3$ (Ville de Québec, 2024) = 14 038 CAD/an.

Tableau 19 : Économies totales (CAD) de la réduction des coûts de la gestion des eaux pluviales des toitures végétalisées sur 50 ans

Durée (années)	3	5	10	15	20	25	50
Économie totale	42 115	70 192	140 384	210 576	280 768	350 961	701 922
Économie totale en projetant l'inflation	44 692	77 497	171 127	283 407	417 206	575 788	1 889 284

L'installation de toitures végétalisées sur le bâtiment du Carrefour de l'eau engendre des économies significatives sur les coûts d'énergie et de gestion des eaux pluviales (Tableau 19). Sur une durée de 50 ans, les économies totales réalisées grâce à ces toitures peuvent être résumées comme suit :

- **Économies d'énergie** : 8 269 456 CAD
- **Réduction des coûts de gestion des eaux pluviales** : 1 889 284 CAD

En combinant ces deux aspects, les économies totales s'élèvent à 10 158 740 CAD sur 50 ans. Ces économies démontrent que, malgré un investissement initial élevé, les toitures végétalisées permettent de réduire considérablement les coûts opérationnels à long terme tout en offrant des avantages environnementaux substantiels.

Il convient toutefois de souligner certaines limites des résultats présentés et des méthodes de calcul utilisées. Le coût moyen de gestion des eaux pluviales, estimé à 2,75 CAD/m³, pourrait évoluer en fonction des politiques locales ou des fluctuations économiques, ce qui pourrait influencer les économies projetées. En plus, bien que l'impact environnemental des toitures végétalisées soit important, leur potentiel réel pourrait être affecté par des facteurs tels que la disponibilité en eau pour l'irrigation ou les périodes de sécheresse prolongées. Ces considérations appellent à une approche prudente dans l'interprétation des résultats et soulignent la nécessité d'une évaluation continue des performances des toitures dans le temps.

7.1.4. Retour sur investissement

Le retour sur investissement (ROI) est donné par la formule : (Bénéfices totaux – Coûts totaux) / Coûts totaux. Dans notre cas, pour les toitures végétalisées, le ROI est calculé comme suit :

$$\text{ROI} = ((10\,158\,740 \text{ CAD} - 2\,958\,272 \text{ CAD}) / 2\,958\,272) \times 100\% = 243 \%$$

Les toitures végétalisées, en particulier les modèles extensifs, offrent un retour sur investissement considérable, justifiant ainsi leur intégration dans les projets d'infrastructure durable. Bien que les toitures intensives soient également rentables, leur coût plus élevé nécessite une évaluation plus approfondie pour des projets spécifiques.

7.2. Murs végétalisés

7.2.1. Coût total de l'installation et de l'entretien

L'installation de murs végétalisés sur une surface de 1 700 m², au coût de 390 CAD/m², et un coût d'entretien annuel de 8,61 CAD/m², représentent un investissement initial calculé ainsi :

Coût total de l'installation :

$$1\,700 \text{ m}^2 \times 390 \text{ CAD/m}^2 = 663\,000 \text{ CAD}$$

Coût total de l'entretien :

$$1\,700 \text{ m}^2 \times 8,61 \text{ CAD/m}^2/\text{an} \times 50 \text{ ans} = 731\,850 \text{ CAD}$$

En somme, le coût total, incluant l'installation et l'entretien sur 50 ans, se répartit comme suit :

663 000 CAD (installation) + 731 850 CAD (entretien) = 1 394 850 CAD

Cependant, ces coûts sont compensés par de nombreux avantages, y compris des économies d'énergie, une amélioration de la qualité de l'air, une biodiversité accrue et une amélioration esthétique. Compte tenu des avantages économiques et environnementaux à long terme, les murs végétalisés représentent un investissement durable dans l'infrastructure urbaine.

7.2.2. Économie d'énergie

Hoelscher et al. (2016) ont constaté une réduction de la température d'un mur extérieur végétalisé de 10,5°C par rapport à un mur nu, grâce aux processus illustrés à la Figure 42.

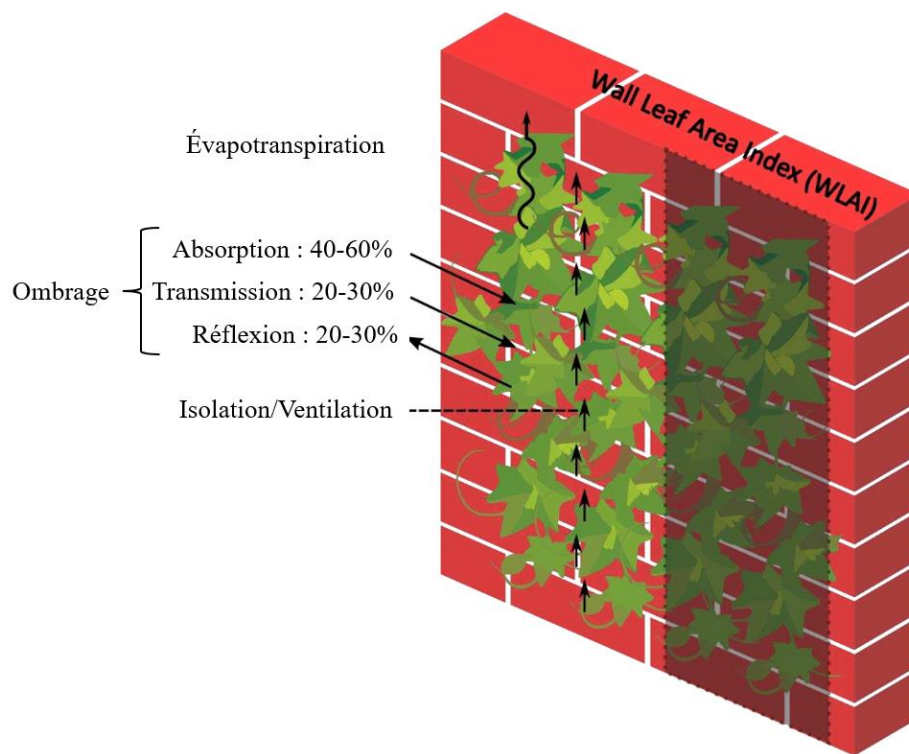


Figure 42 : Aperçu schématique des mécanismes de refroidissement et de leurs paramètres déterminants (Stec et al., 2005)

La transpiration entraîne le refroidissement de l'air entourant la feuille. Selon Stec et al. (2005), environ 60 % de l'énergie accumulée dans une feuille peut être libérée par transpiration (Stec et al., 2005). En revanche, Tudiwer et Korjenic (2017) ont constaté que, dans une situation hivernale (à Vienne, connaissant un hiver froid, mais beaucoup moins qu'à Québec (Weather Spark, 2024b)), les propriétés d'isolation étaient meilleures, car le mur avec végétation était 3,5°C plus chaud que le mur nu (Tudiwer & Korjenic, 2017). Cela signifie qu'il y aura des économies d'énergie importantes. Plusieurs simulations ont été réalisées, dans des études antérieures, pour étudier l'impact des façades végétalisées sur la valeur de résistance thermique. Divers

programmes de simulation ont été employés à cette fin. Les résultats obtenus indiquent qu'une végétalisation des façades peut augmenter la résistance thermique de 23,7 % et réduire le coût de climatisation de 20 % (Perini & Rosasco, 2013; Tudiwer & Korjenic, 2017). En se basant sur un coût énergétique annuel total de 204 822 CAD pour le chauffage (54 % du coût énergétique annuel du Carrefour de l'eau de 379 300 CAD) (Hydro-Québec, s.d.), on peut estimer que cette amélioration de la performance thermique permettrait une économie proportionnelle sur les coûts de chauffage et de climatisation. Ainsi, une réduction de 20 % de ces coûts représenterait une économie d'environ 40 964 CAD par an ($204\,822 \text{ CAD} \times 0,2$), mettant en lumière l'impact économique et environnemental positif des façades végétalisées.

Tableau 20 : Économies totales (CAD) d'énergies des murs végétalisés sur 50 ans

Durée (années)	3	5	10	15	20	25	50
Économie totale	122 893	204 822	409 644	614 466	819 288	1 024 110	2 048 220
Économie totale en projetant l'inflation	130 415	226 140	499 353	826 990	1 217 418	1 680 161	5 512 964

En plus des avantages économiques, les murs végétalisés contribuent à la réduction des émissions de CO₂e en améliorant l'efficacité énergétique du bâtiment et en offrant des bénéfices environnementaux et esthétiques. En conclusion.

7.2.3. Réduction des coûts de la gestion des eaux pluviales

Les murs végétalisés, selon le bilan hydrique (section 6.3), peuvent assurer une réduction du ruissellement de 60 %. Le volume de ruissellement réduit est donc calculé comme suit :

$$\text{Volume réduit} = 177 \text{ m}^3/\text{an} \times 0,6 = 106 \text{ m}^3/\text{an}$$

$$\text{Coût évité} = 106 \text{ m}^3/\text{an} \times 2,75 \text{ CAD/ m}^3 \text{ (Ville de Québec, 2024)} = 291 \text{ CAD/an}$$

Ces économies (Tableau 21) montrent que l'installation de murs végétalisés peut avoir un impact financier significatif en réduisant les coûts liés à la gestion des eaux pluviales.

Tableau 21 : Économies totales (CAD) des coûts de la gestion des eaux pluviales des murs végétalisés sur 50 ans

Durée (années)	3	5	10	15	20	25	50
Économie totale	873	1 455	1 910	4 365	5 820	7 275	14 550
Économie totale en projetant l'inflation	926	1 606	1 328	5 874	8 648	11 935	39 162

7.2.4. Retour sur investissement

Pour les murs végétalisés, le ROI est calculé comme suit :

$$\text{ROI} = ((5\,552\,126 \text{ CAD} - 1\,394\,850 \text{ CAD}) / 1\,394\,850 \text{ CAD}) \times 100\% = 298 \%$$

Ce retour sur investissement de 298 % démontre la rentabilité des murs végétalisés sur le long terme, malgré leur coût initial élevé. L'économie générée, notamment grâce aux réductions des coûts énergétiques et de gestion des eaux pluviales, dépasse largement l'investissement de départ. Cela renforce l'intérêt d'intégrer ces infrastructures végétalisées dans une perspective de durabilité et d'efficacité économique.

Il est aussi essentiel de prendre en compte d'autres avantages difficilement quantifiables financièrement (Koch et al., 2020; Manso et al., 2021; Viecco et al., 2021):

- L'amélioration de la qualité de l'air.
- L'augmentation de la biodiversité.
- L'amélioration esthétique et la valorisation immobilière.
- La contribution à l'atténuation des îlots de chaleur urbains.

7.3. Cellules de biorétention

7.3.1. Coût total de l'installation et de l'entretien

Pour estimer le coût total de l'installation et de l'entretien des cellules de biorétention au Carrefour de l'eau, il est essentiel de prendre en compte plusieurs facteurs déterminants. Le prix du terrain, les conditions du site ainsi que les coûts de conception, de construction, d'exploitation et d'entretien sont des éléments clés qui influencent ces estimations.

Coût d'installation

Les coûts d'installation comprennent la préparation du site, les composantes structurales et la restauration du site. En se basant sur des données recueillies dans différentes régions (Ontario, Minnesota, Amérique du Nord et Singapour), on peut estimer les coûts des principaux matériaux et opérations comme suit (Bhatt et al., 2019; Minnesota Stormwater Manual, s.d.; Roy-Poirier et al., 2010; Tan & Wang, 2023; Vijayaraghavan et al., 2021; Wang et al., 2016) :

- **Plantes** : environ 45 à 80 CAD/m²
- **Gravier** : environ 116 à 122 CAD/m³
- **Sol** : environ 84 à 124 CAD/m³
- **Excavation** : environ 7 à 36 CAD/m³
- **Élimination des matériaux** : environ 9,50 à 23 CAD/m³
- **Tuyaux** : environ 26 à 53 CAD/m

Pour une surface de 346 m² et un volume de 311,4 m³ (en prenant en compte 0,9 m d'épaisseur), les coûts totaux sont les suivants :

- Plantes : 15 570 à 27 680 CAD
- Gravier : 36 122 à 37 990 CAD
- Sol : 26 157 à 38 613 CAD
- Excavation : 2 179 à 11 210 CAD
- Élimination des matériaux : 2 958 à 7 162 CAD
- Tuyaux : 2 938 à 5 989 CAD (en supposant un total de 113 m)

Cela nous donne un total de 85 942 à 128 644 CAD.

Cette estimation repose sur des valeurs moyennes tirées de diverses sources et inclut la préparation, les composantes structurales et la restauration du site.

Les coûts d'entretien annuels pourraient varier en fonction des besoins spécifiques du site, mais une estimation typique du coût total de l'exploitation et de l'entretien est de 30 508,46 CAD (3 058 CAD/an) sur la durée de vie de la cellule d'environ 10 ans (Wang et al., 2016), en prenant en compte les opérations courantes comme le contrôle des mauvaises herbes, la tonte et l'inspection régulière.

Ces chiffres sont des estimations basées sur les coûts observés dans différents projets similaires; ils pourront être ajustés au fur et à mesure avec l'état d'avancement du projet au Carrefour de l'eau.

7.3.2. Réduction des coûts de la gestion des eaux pluviales

Les cellules de biorétention offrent de nombreux avantages pour la gestion des eaux pluviales, notamment en termes de réduction des coûts. Voici comment elles contribuent à cette réduction :

Réduction des coûts d'infrastructure

Les cellules de biorétention permettent de diminuer la dépendance aux systèmes d'égout pluviaux traditionnels. En facilitant l'infiltration et l'évapotranspiration, elles réduisent la quantité d'eau nécessitant d'être transportée par les systèmes d'égout. Cela diminue la nécessité d'agrandir ou de moderniser les infrastructures existantes, ce qui représente un coût significatif pour les municipalités. Pour rappel, le coût moyen de gestion des eaux pluviales est estimé à 2,75 CAD/m³ (Ville de Québec, 2024). Ceci souligne l'intérêt économique des solutions basées sur la nature, comme les cellules de biorétention, pour compléter ou remplacer les systèmes conventionnels.

Diminution des coûts d'entretien

Grâce à leur capacité à gérer l'eau à la source, les cellules de biorétention nécessitent moins d'entretien comparé aux systèmes traditionnels, tels que les bassins de rétention ou les réseaux de drainage complexes. L'infiltration de l'eau dans le substrat de la cellule, avec un taux de 22 mm/h, favorise une gestion efficace sans accumulation excessive d'eau, limitant ainsi les risques d'obstruction ou d'accumulation de débris dans les infrastructures de drainage.

Optimisation des coûts de traitement de l'eau

Les cellules de biorétention jouent un rôle clé dans l'amélioration de la qualité de l'eau en filtrant les polluants avant qu'ils n'atteignent les cours d'eau ou les aquifères. Cela réduit la charge sur les stations de traitement des eaux usées, diminuant ainsi les coûts liés au traitement de l'eau. En filtrant les précipitations, ces systèmes permettent de capter les sédiments, les nutriments et les polluants, améliorant ainsi la qualité de l'eau avec un coût de traitement moindre.

Réduction des coûts liés aux inondations

Les cellules de biorétention aident à réduire les risques d'inondation en permettant une infiltration rapide de l'eau dans les sols, particulièrement dans les zones composées de sable. En prévenant les débordements lors de fortes pluies, elles diminuent les coûts associés aux dommages causés par les inondations, tels que la réparation des infrastructures, des bâtiments et d'autres actifs.

Économies à long terme sur la gestion de l'eau

En assurant une gestion durable des eaux pluviales, les cellules de biorétention contribuent à une meilleure résilience face aux changements climatiques. En réduisant la pression sur les systèmes de drainage et en minimisant les impacts des périodes de sécheresse (vu qu'elles permettent de capter et de stocker une partie de l'eau de pluie, qui peut ensuite être lentement libérée dans le sol, ce qui aide à soutenir la végétation durant les périodes de sécheresse), les cellules de biorétention favorisent une utilisation plus efficace des ressources en eau. Sur le long terme, cela permet de réaliser des économies substantielles en évitant les coûts liés à la construction de nouvelles infrastructures ou à la réhabilitation des systèmes existants.

Bénéfices environnementaux et économiques

Enfin, l'intégration des cellules de biorétention dans un projet comme celui du Carrefour de l'eau favorise la création d'espaces verts, contribuant à la biodiversité et à la régulation du microclimat. Ces bénéfices écologiques, en plus d'améliorer la qualité de vie des habitants, peuvent également augmenter la valeur immobilière des terrains environnants, générant ainsi des retombées économiques positives pour la communauté (Lammers et al., 2022; Sagrelus et al., 2022).

7.3.3. Amélioration de la qualité de l'eau

L'amélioration de la qualité de l'eau grâce aux cellules de biorétention peut avoir des retombées économiques significatives. Voici comment :

Réduction des coûts de traitement de l'eau

Les cellules de biorétention filtrent naturellement les eaux pluviales en retenant les sédiments, les nutriments, et les polluants (comme les métaux lourds, les hydrocarbures et les pesticides) avant qu'ils n'atteignent les nappes phréatiques ou les réseaux fluviaux. En améliorant la qualité de l'eau à la source, elles réduisent la charge sur les stations de traitement des eaux usées, si le réseau de drainage est unitaire, diminuant ainsi les coûts de traitement, qui peuvent être élevés pour éliminer ces contaminants.

Diminution des coûts de réhabilitation environnementale

La pollution de l'eau peut entraîner des coûts élevés de réhabilitation des écosystèmes affectés. En améliorant la qualité de l'eau, les cellules de biorétention réduisent la probabilité de dommages environnementaux graves, ce qui limite les dépenses liées à la restauration des habitats aquatiques et des zones riveraines.

Augmentation de la valeur des propriétés et des terrains

La qualité de l'eau est un facteur clé dans la valeur des biens immobiliers. Les zones bénéficiant d'une bonne gestion de l'eau et d'une haute qualité environnementale tendent à être plus prisées. Les cellules de biorétention, en contribuant à une meilleure qualité de l'eau et à un environnement plus sain, peuvent ainsi accroître la valeur des terrains environnants, générant des revenus supplémentaires pour les propriétaires fonciers et les municipalités à travers l'augmentation des taxes foncières.

7.3.4. Durabilité et co-bénéfices

Les cellules de biorétention offrent des avantages économiques non seulement par leur fonction première de gestion des eaux pluviales, mais aussi à travers des co-bénéfices qui renforcent la durabilité des projets et génèrent des retombées économiques positives. Voici comment elles contribuent à la durabilité et aux co-bénéfices économiques :

Durabilité à long terme des infrastructures

Les cellules de biorétention, en gérant efficacement les eaux pluviales et en réduisant le risque d'inondations, prolongent la durée de vie des infrastructures environnantes telles que les routes, les trottoirs et les bâtiments. Moins de stress sur ces infrastructures signifie moins de coûts de réparation et de remplacement à long terme, ce qui se traduit par des économies substantielles pour les municipalités et les propriétaires immobiliers.

Réduction des coûts énergétiques

En réduisant la quantité d'eau qui doit être pompée et traitée dans les stations de traitement des eaux, les cellules de biorétention diminuent la consommation d'énergie associée à ces processus. Cette réduction de la demande énergétique entraîne des économies sur les coûts d'exploitation des infrastructures de gestion de l'eau et contribue également à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, un bénéfice important pour les villes engagées dans des initiatives de durabilité.

Création d'emplois et développement économique local

La conception, l'installation et l'entretien des cellules de biorétention nécessitent des compétences spécialisées, ce qui peut créer des emplois locaux dans le secteur du génie civil, de la construction et de l'entretien paysager. En favorisant le développement des compétences locales et en stimulant l'emploi, ces projets apportent des retombées économiques directes à la communauté.

Augmentation de la biodiversité urbaine

Les cellules de biorétention sont souvent végétalisées avec des plantes indigènes qui favorisent la biodiversité urbaine. Cette végétalisation non seulement améliore la qualité de l'air et embellit le paysage, mais elle attire également des pollinisateurs et d'autres formes de faune urbaine, créant des espaces verts qui améliorent la qualité de vie des résidents. Ces espaces verts peuvent aussi accroître la valeur immobilière et attirer des investissements dans la région.

Co-bénéfices liés à l'amélioration de la résilience climatique

En améliorant la gestion des eaux pluviales et en réduisant les risques d'inondation, les cellules de biorétention renforcent la résilience des communautés face aux événements climatiques extrêmes. Cette résilience accrue peut réduire les coûts associés aux réparations post-catastrophe et aux interruptions d'activité, offrant ainsi une stabilité économique plus grande pour les entreprises et les résidents locaux.

Contribution à la réutilisation de l'eau

Les cellules de biorétention peuvent être intégrées dans des systèmes de gestion de l'eau qui favorisent la réutilisation de l'eau pour l'irrigation ou d'autres usages non potables. Cette réutilisation réduit la demande en eau potable, ce qui permet de réaliser des économies sur les coûts de l'eau et de préserver les ressources en eau locales, contribuant ainsi à la durabilité à long terme.

8. LIMITES DE L'ÉTUDE

Cette étude présente une première évaluation des phytotechnologies adaptées au Carrefour de l'Eau, mais plusieurs limites doivent être mentionnées et considérées pour affiner les résultats et optimiser les choix technologiques.

Tout d'abord, l'absence d'une **analyse de sensibilité** constitue une contrainte importante. Une telle analyse permettrait d'optimiser plus finement la répartition des superficies de toitures, de murs et de terrains à végétaliser en fonction des coûts et des bénéfices environnementaux attendus. Sans cette démarche, les choix retenus reposent sur des estimations générales et pourraient être améliorés par une approche plus précise prenant en compte les variations des coûts, des rendements hydrologiques et des impacts thermiques selon les configurations adoptées.

Ensuite, l'étude ne propose pas encore **d'intégration complète entre les phytotechnologies et les infrastructures grises** du bâtiment. Or, pour quantifier avec précision la consommation et la gestion de l'eau au sein du Carrefour de l'Eau, il serait nécessaire d'analyser de manière conjointe les solutions fondées sur la nature et les infrastructures traditionnelles, comme les systèmes de canalisation, les réservoirs souterrains et les dispositifs de traitement de l'eau. Une telle intégration permettrait d'évaluer la capacité réelle du bâtiment à atteindre une gestion optimisée et circulaire des flux hydriques.

Un autre axe d'amélioration réside dans l'absence de **modélisation numérique avancée** du bâtiment. La création d'un **jumeau numérique** dans une seconde phase d'étude serait une approche pertinente pour optimiser l'ensemble des paramètres hydrologiques, thermiques et économiques du projet. Cet outil permettrait de simuler différents scénarios en fonction des conditions météorologiques, des niveaux d'occupation du bâtiment et des variations de consommation d'eau, offrant ainsi une meilleure capacité d'adaptation aux enjeux réels du site.

Par ailleurs, l'étude ne comprend pas encore de **rétroaction avec les partenaires du projet**, ce qui pourrait limiter la pertinence des hypothèses retenues. Il serait nécessaire d'échanger avec les acteurs impliqués dans le Carrefour de l'Eau afin de recontextualiser les paramètres de conception du bâtiment à la lumière des études de faisabilité ou des avancées techniques plus récentes. Cette concertation permettrait d'ajuster les recommandations aux besoins spécifiques du projet et aux contraintes identifiées par les différents partenaires.

Enfin, le **modèle de prédiction de la pluviométrie** utilisé pourrait être affiné. Actuellement, l'approche repose sur l'analyse de l'année la plus pluvieuse, ce qui peut biaiser les résultats et surestimer les besoins en gestion

des eaux pluviales. Il serait préférable d'intégrer un historique météorologique plus large, en tenant compte des tendances des dernières décennies ainsi que de la variabilité journalière des précipitations afin d'obtenir une estimation plus représentative des variations climatiques et de garantir un dimensionnement optimal des infrastructures de gestion de l'eau.

En somme, bien que cette étude pose des bases solides pour l'intégration des phytotechnologies au sein du Carrefour de l'Eau, plusieurs améliorations méthodologiques permettraient d'affiner les résultats et d'assurer une meilleure adéquation entre les solutions proposées et les réalités du site et de ses usagers.

9. CONCLUSIONS

L'objectif principal de cette étude était de déterminer de façon qualitative et quantitative quelles sont les phytotechnologies pouvant optimiser la gestion des eaux pluviales et de ruissellement dans le cadre bâti. Les résultats obtenus démontrent que les phytotechnologies étudiées, nommément les toitures végétalisées extensives et intensives, les murs végétalisés et les cellules de biorétention, offrent des solutions efficaces pour gérer les eaux pluviales, réduire le ruissellement et améliorer la résilience climatique du Carrefour de l'eau.

L'analyse des données montre que les toitures végétalisées jouent un rôle crucial dans la gestion des eaux pluviales. Les toitures extensives et intensives permettent une évapotranspiration annuelle significative, atteignant respectivement 1 479 m³/an et 3 574 m³/an. Elles assurent donc une gestion efficace de la totalité du volume d'eau reçu. Les murs végétalisés, quant à eux, contribuent à une évapotranspiration annuelle de 46,53 m³/an. Ils génèrent quand même un surplus de 71 m³/an qui est acheminé vers les cellules de biorétention.

Les cellules de biorétention, couvrant une superficie de 346 m², gèrent également une quantité importante d'eau, à savoir l'eau acheminée à partir des espaces de stationnement et des toitures non végétalisées, ainsi que le surplus non évapotranspiré provenant des autres phytotechnologies (toitures et murs végétalisés). Elles assurent une évapotranspiration de 153,3 m³/an et leur capacité d'infiltration permet d'infiltrer toutes les eaux reçues à l'échelle annuelle. Ces infrastructures végétalisées montrent leur capacité à absorber et à traiter les eaux pluviales de manière durable, réduisant ainsi la charge sur les systèmes de drainage traditionnels et minimisant les risques d'inondation.

Le bilan hydrique global du projet prouve l'efficacité des infrastructures qui seront mises en place, ce qui est particulièrement pertinent dans le contexte des changements climatiques actuels, où la gestion durable de l'eau est essentielle pour faire face aux précipitations abondantes et aux sécheresses fréquentes.

En visant l'atteinte d'une norme Net Zéro Eau, le Carrefour de l'eau se positionne comme un projet novateur et exemplaire dans la gestion durable de l'eau en milieu urbain. La norme Net Zéro Eau, encore en développement, pourrait servir de référence pour la construction future d'habitations adaptées aux changements climatiques, en assurant que toute l'eau utilisée soit recyclée et réutilisée de manière optimale. Cela inclut des technologies innovantes telles que les systèmes de récupération et de réutilisation des eaux grises, les réservoirs souterrains pour la gestion des eaux pluviales et les systèmes d'irrigation intelligents. La norme Net Zéro Eau devrait idéalement inclure une gestion intégrée de tous les sources et usages de l'eau. Cela implique de prendre en compte non seulement les précipitations captées sur le bâtiment et le terrain, mais aussi les usages intérieurs, tels que la consommation d'eau potable, les eaux usées sanitaires et la réutilisation des eaux grises. Une approche holistique garantirait une gestion plus durable et circulaire, permettant de minimiser l'empreinte hydrique du projet tout en maximisant la résilience face aux changements climatiques.

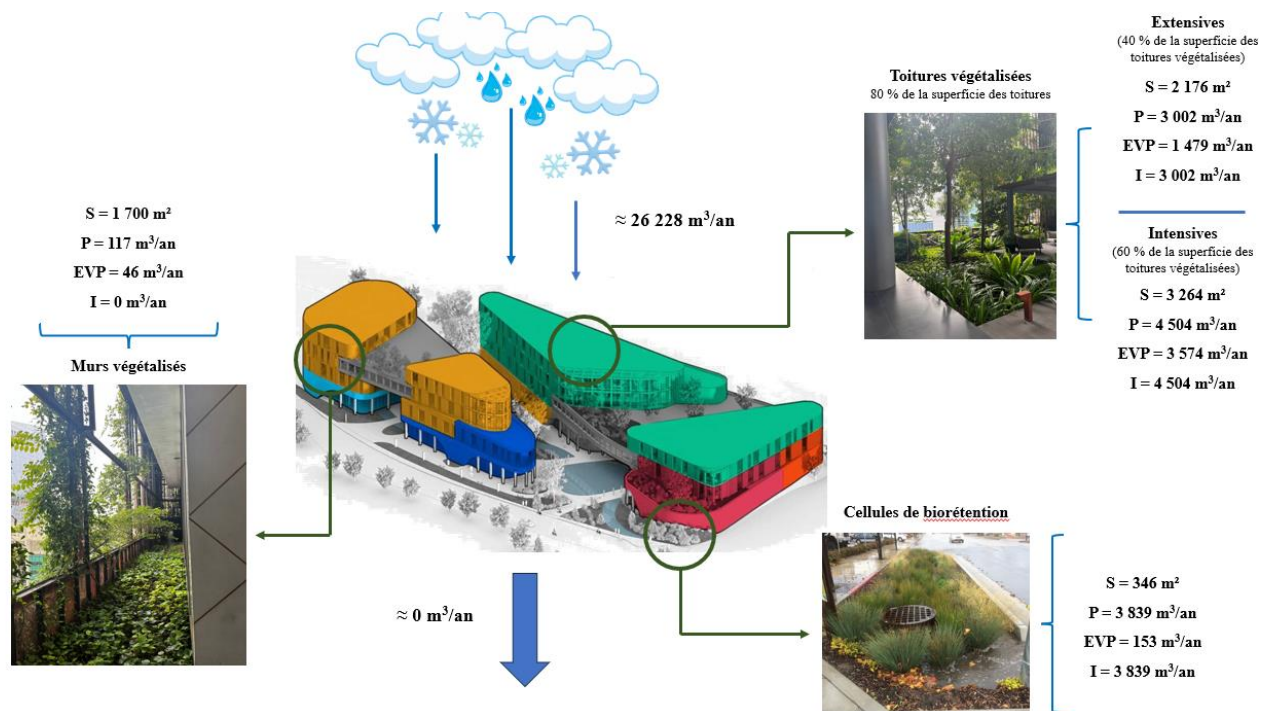
En outre, cette étude contribue de manière significative au développement de nouvelles normes pour la gestion durable et circulaire de l'eau en milieu urbain. Elle pose les bases pour l'élaboration de directives et de pratiques qui pourraient être adoptées par d'autres projets similaires, favorisant ainsi une approche plus écologique et résiliente de la gestion de l'eau.

Par exemple, les toitures végétalisées non seulement gèrent les eaux pluviales mais aussi améliorent l'isolation thermique des bâtiments, réduisant ainsi les besoins en énergie pour le chauffage et la climatisation. Les murs végétalisés peuvent également contribuer à la qualité de l'air en absorbant les polluants et en produisant de l'oxygène.

En conclusion, cette étude offre un cadre pour le développement et l'implémentation de phytotechnologies efficaces dans la gestion des eaux pluviales et pose les bases pour l'élaboration de nouvelles normes de construction axées sur une utilisation durable et circulaire de l'eau. Ces innovations sont propices à la création de communautés résilientes face aux défis climatiques, tout en apportant des avantages économiques, environnementaux et sociaux significatifs. Le Carrefour de l'eau représente un modèle à suivre pour les futurs projets urbains souhaitant intégrer des solutions de gestion de l'eau écologiquement responsables et efficaces.

Bien que les toitures et murs végétalisés ainsi que les cellules de biorétention démontrent une capacité impressionnante à gérer les eaux pluviales et à réduire le ruissellement, leur performance dépend fortement des conditions locales telles que la fréquence et l'intensité des précipitations, la qualité du sol et l'entretien régulier de ces infrastructures. Par exemple, les valeurs élevées d'évapotranspiration et d'infiltration pourraient être affectées dans des contextes de sécheresse prolongée ou si l'entretien n'est pas optimal, ce qui pourrait réduire leur efficacité à long terme. De plus, bien que la norme Net Zéro Eau soit ambitieuse et visionnaire, sa mise en œuvre nécessitera des investissements initiaux considérables, une expertise technique avancée et une sensibilisation accrue des parties prenantes pour garantir une adoption réussie. Ces considérations invitent à aborder le projet avec un regard pragmatique, en tenant compte des contraintes économiques, sociales et environnementales susceptibles d'influencer sa pérennité.

Le diagramme des entrées et sorties d'eau du Carrefour de l'eau (Figure 43) illustre les flux hydriques engendrés par les différentes phytotechnologies mises en place, telles que les toitures végétalisées, les murs végétalisés et les cellules de biorétention. Ce schéma présente de manière visuelle la capacité de chaque infrastructure verte à capter, stocker, évaporer et infiltrer l'eau. En intégrant les processus d'évapotranspiration et d'infiltration, le diagramme offre un aperçu complet des échanges hydriques au sein du projet, démontrant la synergie entre les éléments végétalisés pour atteindre les objectifs de réduction du ruissellement et de résilience hydrique.



S : superficie
P : précipitations liquides et solides
EVP : évapotranspiration
I : infiltration

Figure 43 : Diagramme des entrées et sorties d'eau du Carrefour de l'eau en prenant en compte les phytotechnologies mises en place

BIBLIOGRAPHIE

- Acks, Kenneth, Rosenzweig, C, Gaffi, S, & Parshall, L. (2006). A framework of green roof cost-benefit analysis: Initial estimates. *Green Roofs in the New York Metropolitan Region*.
- Addo-Bankas, Olivia, Zhao, Yaqian, Vymazal, Jan, Yuan, Yujie, Fu, Jingmiao, & Wei, Ting. (2021). Green walls: A form of constructed wetland in green buildings. *Ecological Engineering*, 169, 106321. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106321>
- Agiro. (2021). *Guide d'introduction aux enjeux de la prise d'eau potable de la rivière saint-charles*. https://agiro.org/wp-content/uploads/APEL_Guide_enjeux_UTE_lowres.pdf
- Agiro. (2022). *Suivi des rivières du bassin versant de la rivière saint-charles – campagne 2021*. https://agiro.org/wp-content/uploads/Suivi-rivieres-2021_VF.pdf
- Agrahari, Sakshi, & Kumar, Sushil. (2024). Emerging and futuristic phyto-technologies for sustainable wastewater treatment with resource recovery and economical aspects. *Journal of Water Process Engineering*, 65, 105753.
- Agrawal, Sachin, & Yadav, Sachin. Smart rooftop gardening.
- Agriculture et agroalimentaire Canada. (2024). *Number of frost free days: 0°C*. https://agriculture.canada.ca/atlas/data_donnees/climateNormals/maps_cartes/en/lt_ffp0/lt_ffp0_gs_1991_2020_e.pdf
- Anquez, Philippe, & Herlem, Alicia. (2011). *Les îlots de chaleur dans la région métropolitaine de montréal: Causes, impacts et solutions*. Chaire de responsabilité sociale et de développement durable, UQAM.
- APEL, Association pour la protection de l'environnement du lac Saint-Charles et des Marais du Nord (APEL). (2014). *Rapport annuel*. https://agiro.org/wp-content/uploads/Rapport_annuel_2014_APEL_web.pdf
- Ascione, Fabrizio, De Masi, Rosa Francesca, Mastellone, Margherita, Ruggiero, Silvia, & Vanoli, Giuseppe Peter. (2020). Green walls, a critical review: Knowledge gaps, design parameters, thermal performances and multi-criteria design approaches. *Energies*, 13(9), 2296.
- Association des architectes paysagistes du Québec. (2020). « québec, ville éponge » pour une cité plus écologique. Retrieved 02 juillet from <https://aapq.org/quebec-ville-eponge-pour-une-cite-plus-ecologique/>
- Azeñas, V, Cuxart, J, Picos, R, Medrano, H, Simó, G, López-Grifol, A, & Gulías, J. (2018). Thermal regulation capacity of a green roof system in the mediterranean region: The effects of vegetation and irrigation level. *Energy and buildings*, 164, 226-238.
- Barr, Catherine M, Gallagher, Patricia M, Wadzuk, Bridget M, & Welker, Andrea L. (2017). Water quality impacts of green roofs compared with other vegetated sites. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 3(3), 04017007.
- Barroin, Guy. (2003). Phosphore, azote et prolifération des végétaux aquatiques. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*, 48(48), 13-25.
- Bates, Adam J, Sadler, Jon P, Fairbrass, Alison J, Falk, Steven J, Hale, James D, & Matthews, Tom J. (2011). Changing bee and hoverfly pollinator assemblages along an urban-rural gradient. *PloS one*, 6(8), e23459.
- Baudoux, Tom. (2018). Murs verts: Une approche " habitats analogues". Test pour la mise en oeuvre de murs végétalisés analogues aux habitats de falaises et de vieux murs.
- BDC. (s.d). Retrieved 11 novembre from <https://www.bdc.ca/fr/articles-outils/developpement-durable/environnement/qu-est-ce-qu-un-toit-bleu-comment-peut-il-aider-entreprise>
- Berardi, Umberto, GhaffarianHoseini, AmirHosein, & GhaffarianHoseini, Ali. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, 115, 411-428.
- Berndtsson, Justyna Czemieli, Emilsson, Tobias, & Bengtsson, Lars. (2006). The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality. *Science of The Total Environment*, 355(1-3), 48-63.
- Bernier, Anne-Marie. (2011). *Les plantes grimpantes: Une solution rafraîchissante*. Centre d'écologie urbaine de Montréal.

- Bhatt, Akul, Bradford, Andrea, & Abbassi, Bassim E. (2019). Cradle-to-grave life cycle assessment (lca) of low-impact-development (lid) technologies in southern ontario. *Journal of Environmental Management*, 231, 98-109.
- Bianchini, Fabricio, & Hewage, Kasun. (2012a). How “green” are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. *Building and Environment*, 48, 57-65.
- Bianchini, Fabricio, & Hewage, Kasun. (2012b). Probabilistic social cost-benefit analysis for green roofs: A lifecycle approach. *Building and Environment*, 58, 152-162.
- Blackhurst, Michael, Hendrickson, Chris, & Matthews, H Scott. (2010). Cost-effectiveness of green roofs. *Journal of Architectural Engineering*, 16(4), 136-143.
- Boafo, Fred Edmond, Kim, Jun-Tae, & Kim, Jin-Hee. (2017). Evaluating the impact of green roof evapotranspiration on annual building energy performance. *International journal of green energy*, 14(5), 479-489.
- BOMA, Québec. (2020). *Rapport de divulgation des données 2020 : Participants au défi énergie en immobilier*. https://defienergie.ca/wp-content/uploads/2021/03/2020-Rapport-public_210318.pdf
- Bouattour, Med, & Alain, Fuchs. (2009). La végétalisation des bâtiments. Paris: DREIF (Direction régionale de l'Équipement Ile de France).
- Bouras-Chekired, Fatma Zohra. (2022). Cours bases d'irrigation.
- Brown, Robert A, & Hunt, William F. (2012). Improving bioretention/biofiltration performance with restorative maintenance. *Water Science and Technology*, 65(2), 361-367.
- Bruxelles Environnement. (s.d). *Composition des toitures vertes*. Retrieved 23février from <https://www.guidebatimentdurable.brussels/realiser-toitures-vertes/composition-toitures-vertes>
- Campisano, Alberto, Butler, David, Ward, Sarah, Burns, Matthew J, Friedler, Eran, DeBusk, Kathy, Fisher-Jeffes, Lloyd N, Ghisi, Enedir, Rahman, Ataur, & Furumai, Hiroaki. (2017). Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives. *Water Research*, 115, 195-209.
- Canadian Water Network. (2023). *Cwn's net zero water roadmap funded by environment and climate change canada*. Retrieved 31 janvier from <https://cwn-rce.ca/2024/11/12/cwns-net-zero-water-roadmap-funded-by-environment-and-climate-change-canada/>
- Carter, Timothy, & Keeler, Andrew. (2008). Life-cycle cost–benefit analysis of extensive vegetated roof systems. *Journal of Environmental Management*, 87(3), 350-363.
- Cascone, Stefano, Coma, Julià, Gagliano, Antonio, & Pérez, Gabriel. (2019). The evapotranspiration process in green roofs: A review. *Building and Environment*, 147, 337-355.
- Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines. (2020). *Portrait des infrastructures en eau des municipalités du québec*. <https://ceriu.qc.ca/system/files/2023-02/Rapport-annuel-2022-Portrait-des-infrastructures-en-eau-des-municipalites-du-Quebec.pdf>
- Chan, ALS, & Chow, TT. (2013). Energy and economic performance of green roof system under future climatic conditions in hong kong. *Energy and buildings*, 64, 182-198.
- Chen, Yaning, & Xu, Zongxue. (2005). Plausible impact of global climate change on water resources in the tarim river basin. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 48(1), 65-73. <https://doi.org/10.1360/04yd0539>
- Chowdhury, Milon, Kiraga, Shafik, Islam, Md Nafiul, Ali, Mohammad, Reza, Md Nasim, Lee, Wang-Hee, & Chung, Sun-Ok. (2021). Effects of temperature, relative humidity, and carbon dioxide concentration on growth and glucosinolate content of kale grown in a plant factory. *Foods*, 10(7), 1524.
- Clark, C, Adriaens, P, & Talbot, B. (2006). Probabilistic economic analysis of green roof benefits for policy design.
- Clark, Corrie, Adriaens, Peter, & Talbot, F Brian. (2008). Green roof valuation: A probabilistic economic analysis of environmental benefits. *Environmental Science & Technology*, 42(6), 2155-2161.
- Claus, Karla, & Rousseau, Sandra. (2012). Public versus private incentives to invest in green roofs: A cost benefit analysis for flanders. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11(4), 417-425.
- Collerette, Claude, & Roy, Bara. (2023). *Cadre règlementaire pour l'infiltration par biorétention à la ville de laval sur les lots privés*. <https://ceriu.qc.ca/system/files/2024->

[02/Cadre%20r%C3%A8glementaire%20pour%20l%E2%80%99infiltration%20par%20bior%C3%A9tention%20%C3%A0%20la%20ville%20de%20Laval.pdf](#)

- Collins, Steven, Kuoppamäki, Kirsi, Kotze, David J, & Lü, Xiaoshu. (2017). Thermal behavior of green roofs under nordic winter conditions. *Building and Environment*, 122, 206-214.
- Cotoz, Alex-Péter, Dan, Valentin-Sebastian, Gocan, Tincuța-Marta, Andreica, Ileana, Rózsa, Sándor, & Cantor, Maria. (2023). Sedum growth patterns under different pedoclimatic conditions. *Plants*, 12(14), 2739.
- Daniel, Anne-Cécile. (2013). Aperçu de l'agriculture urbaine, en europe et en Amérique du nord. *AgroParisTech: Paris, France*, 79.
- Davis, Allen P, Hunt, William F, Traver, Robert G, & Clar, Michael. (2009). Bioretention technology: Overview of current practice and future needs. *Journal of Environmental Engineering*, 135(3), 109-117.
- Davis, MJM, Tenpierik, MJ, Ramírez, FR, & Perez, Maria Elena. (2017). More than just a green facade: The sound absorption properties of a vertical garden with and without plants. *Building and Environment*, 116, 64-72.
- de Araújo Batista, Fábio Giovanni, dos Santos Oliveira, Douglas, & de Queiroz, Felipe Raphael Paganini. (2014). Percepção socioambiental do reuso das águas residuárias em condomínios verticais da cidade de campina grande–pb. *HOLOS*, 6, 70-82.
- DeNardo, JC, Jarrett, AR, Manbeck, HB, Beattie, DJ, & Berghage, RD. (2005). Stormwater mitigation and surface temperature reduction by green roofs. *Transactions of the ASAE*, 48(4), 1491-1496.
- Deveaux, Cyprien. (1969). Quelques considérations théoriques sur l'élagage du peuplier. *Revue forestière française*, 21(4), 281-284.
- Dobrowksy, PH, Mannel, D, De Kwaadsteniet, M, Prozesky, H, Khan, W, & Cloete, TE. (2014). Quality assessment and primary uses of harvested rainwater in kleinmond, south africa. *Water SA*, 40(3), 401-406.
- Dominici, Laura. (2021). Phytotechnology & design for vertical greening systems. Light requirements for indoor applications and low-cost solutions for fostering their diffusion.
- Drapeau, Laurie-Maude. (2021). Lutter contre les îlots de chaleur urbains dans un contexte de changements climatiques. *À propos*, 2, 124.
- Du, Pengzhen, Arndt, Stefan K, & Farrell, Claire. (2019). Is plant survival on green roofs related to their drought response, water use or climate of origin? *Science of The Total Environment*, 667, 25-32.
- Dunnett, Nigel, & Kingsbury, Noel. (2008). *Planting green roofs and living walls*. Timber press Portland, OR.
- Easterling, David R, Horton, Briony, Jones, Philip D, Peterson, Thomas C, Karl, Thomas R, Parker, David E, Salinger, M James, Razuvaev, Vyacheslav, Plummer, Neil, & Jamason, Paul. (1997). Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*, 277(5324), 364-367.
- Elmahdi, A, ElGafy, I, & Kheireldin, K. (2009). Global warming-water shortage and food security future planning interaction, system analysis approach (wbfs). Wrm2009. *Water Resource Management, Malta*, 9-11.
- Emilsson, Tobias. (2008). Vegetation development on extensive vegetated green roofs: Influence of substrate composition, establishment method and species mix. *Ecological Engineering*, 33(3-4), 265-277.
- EnergyPlus. (s.d). Retrieved 13 novembre from <https://energyplus.net/>
- Environmental Protection Agency. (2021). *Stormwater best management practice : Bioretention (rain gardens)*. Retrieved 07 janvier from <https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-11/bmp-bioretention-rain-gardens.pdf>
- Environnement Canada. (2024). *Rapport de données quotidiennes pour août 2011*. Retrieved 20 janvier from https://climat.meteo.gc.ca/climate_data/daily_data_f.html?hlyRange=%7C&dlyRange=1978-12-01%7C2024-11-30&mlyRange=1979-01-01%7C2018-02-01&StationID=5393&Prov=QC&urlExtension=f.html&searchType=stnName&optLimit=yearRange&StartYear=2011&EndYear=2011&selRowPerPage=25&Line=0&searchMethod=contains&txtStationName=Lauzon&timeframe=2&Day=1&Year=2011&Month=8#legende
- Erickson, Larry E, & Pidlisnyuk, Valentina. (2021). *Phytotechnology with biomass production: Sustainable management of contaminated sites*. Taylor & Francis.
- Evans, David. (2008). Inc. "Cost-benefit evaluation of ecoroofs.". *Update November*.

- Fassman-Beck, Elizabeth, Wang, Simon, Simcock, Robyn, & Liu, Ruifen. (2015). Assessing the effects of bioretention's engineered media composition and compaction on hydraulic conductivity and water holding capacity. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 1(4), 04015003.
- Fischer, Daniel, & Glaser, Bruno. (2012). Synergisms between compost and biochar for sustainable soil amelioration. *Management of organic waste*, 1, 167-198.
- Fondation David Suzuki. (2018). *Quel avenir pour les phytotechnologies au québec ? Un rapport sur les forces, faiblesses, limites et opportunités des phytotechnologies*. Retrieved 20 janvier from <https://fr.davidsuzuki.org/publication-scientifique/quel-avenir-pour-les-phytotechnologies-au-quebec-un-rapport-sur-les-forces-faiblesses-limites-et-opportunités-des-phytotechnologies/>
- Fortin Faubert, Maxime, & Hénault-Ethier, Louise. (2023). *S'adapter au climat par le verdissement*.
- Fowdar, Harsha S, Hatt, Belinda E, Breen, Peter, Cook, Perran LM, & Deletic, Ana. (2017). Designing living walls for greywater treatment. *Water Research*, 110, 218-232.
- Francis, Robert A. (2011). Wall ecology: A frontier for urban biodiversity and ecological engineering. *Progress in physical Geography*, 35(1), 43-63.
- Francis, Robert A., & Lorimer, Jamie. (2011). Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls. *Journal of Environmental Management*, 92(6), 1429-1437. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.01.012>
- Friedler, E. (2004). Quality of individual domestic greywater streams and its implication for on-site treatment and reuse possibilities. *Environmental technology*, 25(9), 997-1008.
- García-Montoya, Mariana, Bocanegra-Martínez, Andrea, Nápoles-Rivera, Fabricio, Serna-González, Medardo, Ponce-Ortega, José María, & El-Halwagi, Mahmoud M. (2015). Simultaneous design of water reusing and rainwater harvesting systems in a residential complex. *Computers & Chemical Engineering*, 76, 104-116.
- Getter, Kristin L, & Rowe, D Bradley. (2006). The role of extensive green roofs in sustainable development. *HortScience*, 41(5), 1276-1285.
- Ghaitidak, Dilip M, & Yadav, Kunwar D. (2013). Characteristics and treatment of greywater—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 2795-2809.
- Ghisi, Eneide, Bressan, Diego Lapolli, & Martini, Mauricio. (2007). Rainwater tank capacity and potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of southeastern Brazil. *Building and Environment*, 42(4), 1654-1666.
- Ghisi, Eneide, & de Oliveira, Sulayre Mengotti. (2007). Potential for potable water savings by combining the use of rainwater and greywater in houses in southern Brazil. *Building and Environment*, 42(4), 1731-1742.
- Glaser, Bruno, Lehmann, Johannes, & Zech, Wolfgang. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review. *Biology and fertility of soils*, 35, 219-230.
- Gouvernement du Canada. (2023). *Outils météorologiques : Faits intéressants*. Retrieved 07 janvier from <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/conditions-meteorologiques-ressources-outils-generaux/foire-questions.html>
- Gouvernement du Canada. (2024). *Rapport de données quotidiennes pour octobre 2011*. Retrieved 24 janvier from https://climat.meteo.gc.ca/climate_data/daily_data_f.html?hlyRange=%7C&dlyRange=1978-12-01%7C2024-11-30&mlyRange=1979-01-01%7C2018-02-01&StationID=5393&Prov=QC&urlExtension=_f.html&searchType=stnName&optLimit=yearRange&StartYear=2011&EndYear=2011&selRowPerPage=25&Line=0&searchMethod=contains&txtStationName=Lauzon&timeframe=2&Day=1&Year=2011&Month=10
- Gouvernement du Québec. (2015). *Critères techniques visant la construction de toits végétalisés*. <https://www.rbq.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/Publications/francais/guide-criteres-techniques-construction-toits-vegetalises.pdf>
- Gouvernement du Québec. (2019). *Forêt ouverte*. <https://www.foretouverte.gouv.qc.ca/>
- Gouvernement du Québec. (2024). *Forêt ouverte*. Retrieved 11 janvier from <https://www.foretouverte.gouv.qc.ca/>

- Goyette, Jean-Olivier, Bennett, Elena M, Howarth, Robert W, & Maranger, Roxane. (2016). Changes in anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs to the st. Lawrence sub-basin over 110 years and impacts on riverine export. *Global Biogeochemical Cycles*, 30(7), 1000-1014.
- Green.org. (s.d). *Tips for pruning and trimming vertical gardens*. <https://green.org/2024/01/30/tips-for-pruning-and-trimming-vertical-gardens/>
- Gregoire, Bruce G, & Clausen, John C. (2011). Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality. *Ecological Engineering*, 37(6), 963-969.
- Grégoire, Guillaume, & Hénault-Éthier, Louise. (s.d). Dans l'univers des toits verts.
- Gsa, UGSA. (2011). The benefits and challenges of green roofs on public and commercial buildings. *A Report of the United States General Service Administration*.
- Hansen, James, Ruedy, R, Glascoe, J, & Sato, Mki. (1999). Giss analysis of surface temperature change. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D24), 30997-31022.
- Harada, Yoshiki, Whitlow, Thomas H, Bassuk, Nina L, & Russell-Anelli, Jonathan. (2017). Biogeochemistry of rooftop farm soils. In *Urban soils* (pp. 275-294). CRC Press.
- Hardy, Myriam. (2014). *Les toits verts au québec: Pour une urbanisation équilibrée* éditeur non identifié].
- Hayzoun, Hanane. (2014). *Caractérisation et quantification de la charge polluante anthropique et industrielle dans le bassin du sebou* Université de Toulon; Université Sidi Mohamed ben Abdellah (Fès, Maroc ...].
- Hsieh, Chi-hsu, & Davis, Allen P. (2005). Evaluation and optimization of bioretention media for treatment of urban storm water runoff. *Journal of Environmental Engineering*, 131(11), 1521-1531.
- Hydro-Québec. (s.d.). *Répartition de la consommation d'un ménage*. Retrieved 21 juin from <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.hydroquebec.com/residentiel/espace-clients/consommation/consommation-electrique-sources.html&ved=2ahUKEwjRnq7Di-yGAxWhEVkFHU4sCjYQFnoECA8QAw&usq=AOvVaw0z8TjrXu36kcvCGRXh3eQh>
- Imteaz, MA, & Shanableh, A. (2009). Daily water balance modeling for investigating effectiveness of stormwater harvesting for golf course. Australia's National Water Conference (OzWater'09),
- Imteaz, Monzur Alam, Shanableh, Abdallah, Rahman, Aatur, & Ahsan, Amimul. (2011). Optimisation of rainwater tank design from large roofs: A case study in melbourne, australia. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 1022-1029.
- Jacobson, Mark Z, & Ten Hoeve, John E. (2012). Effects of urban surfaces and white roofs on global and regional climate. *Journal of Climate*, 25(3), 1028-1044.
- Jim, Chi Yung, & He, Hongming. (2010). Coupling heat flux dynamics with meteorological conditions in the green roof ecosystem. *Ecological Engineering*, 36(8), 1052-1063.
- Johannessen, Birgitte Gissvold, Muthanna, Tone Merete, & Braskerud, Bent Christen. (2018). Detention and retention behavior of four extensive green roofs in three nordic climate zones. *Water*, 10(6), 671.
- Jones, Phil D, Groisman, P Ya, Coughlan, M, Plummer, N, Wang, WC, & Karl, TR. (1990). Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land. *Nature*, 347(6289), 169-172.
- Joyal, Gabriel, & Souffez, Karine. (2023). *Étude préliminaire visant à valider la viabilité économique et la pérennité du carrefour sur l'eau*
- Juan, Yi-Kai, Chen, Yi, & Lin, Jing-Ming. (2016). Greywater reuse system design and economic analysis for residential buildings in taiwan. *Water*, 8(11), 546.
- Koch, Kyra, Ysebaert, Tess, Denys, Siegfried, & Samson, Roeland. (2020). Urban heat stress mitigation potential of green walls: A review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 55, 126843.
- Köhler, Manfred. (2008). Green facades—a view back and some visions. *Urban ecosystems*, 11, 423-436.
- Kong, Angela YY, Rosenzweig, Cynthia, & Arky, Joshua. (2015). Nitrogen dynamics associated with organic and inorganic inputs to substrate commonly used on rooftop farms. *HortScience*, 50(6), 806-813.
- Kosareo, Lisa, & Ries, Robert. (2007). Comparative environmental life cycle assessment of green roofs. *Building and Environment*, 42(7), 2606-2613.

- Kouom, Ralph Dimitri Tasing. (2020). *Modélisation de la qualité de l'eau et bilan des nutriments azote et phosphore dans le bassin versant de la rivière des hurons* Institut National de la Recherche Scientifique (Canada)].
- La ville de Montréal. (2023). *L'avenir de l'eau de montréal : Consultation publique*. https://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/COMMISSIONS_PERM_V2_FR/MEDIA/DOCUMENTS/DOCUMENTATION_AVENIREAUMONTR%C9AL_V4_20230815.PDF
- Lamine, MKSEM. (2023). *La végétation urbaine comme moyen de rafraîchissement et d'atténuation des îlots de chaleur urbains: Cas de la ville de mostaganem* Doctoral dissertation, Université de Mostaganem].
- Lammers, Roderick W, Miller, Laura, & Bledsoe, Brian P. (2022). Effects of design and climate on bioretention effectiveness for watershed-scale hydrologic benefits. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 8(4), 04022011.
- Lee, A. (2004). Life cycle cost analysis-green roofs form an investment. proceedings of the second North American green roof conference: greening rooftops for sustainable communities, Portland, OR, The Cardinal Group, Toronto,
- Lejoyeux, Charlotte. (2018). *Projet de recherche en production verticale sur un toit*.
- Lim, HS, Segovia, E, & Ziegler, AD. (2021). Water quality impacts of young green roofs in a tropical city: A case study from singapore. *Blue-Green Systems*, 3(1), 145-163.
- Lindsey, Rebecca , & Dahlman, LuAnn. (2023). *Climate change: Global temperature*. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>
- Liu, Karen, & Baskaran, Bas. (2003). Thermal performance of green roofs through field evaluation.
- Liu, Ting, Yang, Meng, Han, Zhiguo, & Ow, David W. (2016). Rooftop production of leafy vegetables can be profitable and less contaminated than farm-grown vegetables. *Agronomy for sustainable development*, 36, 1-9.
- Loh, Susan. (2008). Living walls—a way to green the built environment. *Environment Design Guide*, 1-7.
- MacIvor, J Scott, Margolis, Liat, Puncher, Curtis L, & Matthews, Benjamin J Carver. (2013). Decoupling factors affecting plant diversity and cover on extensive green roofs. *Journal of Environmental Management*, 130, 297-305.
- MacMullan, Ed, Reich, Sarah, Puttman, Tom, & Rodgers, Kelly. (2009). Cost-benefit evaluation of ecoroofs. In *Low impact development for urban ecosystem and habitat protection* (pp. 1-10).
- Mahdiyar, Amir, Tabatabaee, Sanaz, Sadeghifam, Aidin Nobahar, Mohandes, Saeed Reza, Abdullah, Arham, & Meynagh, Mahdi Moharrami. (2016). Probabilistic private cost-benefit analysis for green roof installation: A monte carlo simulation approach. *Urban Forestry & Urban Greening*, 20, 317-327.
- Maiolo, Mario, Pirouz, Behrouz, Bruno, Roberto, Palermo, Stefania Anna, Arcuri, Natale, & Piro, Patrizia. (2020). The role of the extensive green roofs on decreasing building energy consumption in the mediterranean climate. *Sustainability*, 12(1), 359.
- Manso, Maria, Castro-Gomes, J, Silva, Pedro D, Virtudes, Ana Lúcia, & Delgado, FMG. (2013). Modular system design for vegetated surfaces: A proposal for energy-efficient buildings. *BESS-SB13 CALIFORNIA: Advancing Towards Net Zero..*
- Manso, Maria, & Castro-Gomes, João. (2015). Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and sustainable energy reviews*, 41, 863-871.
- Manso, Maria, Teotónio, Inês, Silva, Cristina Matos, & Cruz, Carlos Oliveira. (2021). Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence. *Renewable and sustainable energy reviews*, 135, 110111. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110111>
- Marris, Emma. (2006). Putting the carbon back: Black is the new green. *Nature*, 442(7103), 624-626.
- Matos, Cristina, Bentes, Isabel, Santos, C, Imteaz, Monzur, & Pereira, Sandra. (2015). Economic analysis of a rainwater harvesting system in a commercial building. *Water Resources Management*, 29, 3971-3986.
- McGill. (2024). *L'eau : Au coeur de la vie*. Retrieved 14 Octobre from <https://www.mcgill.ca/waterislife/fr/1%E2%80%99eau-%C3%A0-la-maison/notre-consommation>
- MDDEP, & CRE Laurentides. (2007). *Protocole de caractérisation de la bande riveraine*. https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/rsvl/bande_riveraine.pdf

- Medl, Alexandra, Stangl, Rosemarie, & Florineth, Florin. (2017). Vertical greening systems—a review on recent technologies and research advancement. *Building and Environment*, 125, 227-239.
- MELCCFP, Ministère de l'Environnement de la Lutte contre les changements climatiques de la Faune et des Parcs (s.d.). *Extraction des données du système d'information hydrogéologique (sih)*. <http://www.sih.environnement.gouv.qc.ca/cgi-bin/extraction.cgi>
- Meléndez-Pérez, Julisse Andrea, Lemos-Lima, María Manuela C, Domínguez, Isabel, & Oviedo-Ocaña, Edgar Ricardo. (2019). Reutilización de aguas grises domésticas para el uso eficiente del recurso hídrico: Aceptación social y análisis financiero. Un caso en Portugal. *Revista UIS Ingenierías*, 18(1), 223-236.
- Météo média. (2024). *Premier get au québec, pour l'automne météorologique*. Retrieved 24 janvier from <https://www.meteomedia.com/fr/nouvelles/meteo/previsions/le-premier-get-a-officiellement-ete-enregistre-au-quebec>
- Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques de la Faune et des Parcs (s.d.). *Caractérisation des sites pour infiltration*. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/pluviales/annexeB.pdf>
- Ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec. (2025). *Période de dégel – dates officielles*. Retrieved 24 janvier from <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/ent-camionnage/degel/pages/periode-de-degel.aspx>
- Minnesota Stormwater Manual. (s.d.). Retrieved 10 juin from
- Mitchell, ME, Hamilton, TL, Uebel-Niemeier, C, Hopfensperger, KN, & Buffam, I. (2018). Nitrogen cycling players and processes in green roof ecosystems. *Applied Soil Ecology*, 132, 114-125.
- Morgan, Susan, Celik, Serdar, & Retzlaff, William. (2013). Green roof storm-water runoff quantity and quality. *Journal of Environmental Engineering*, 139(4), 471-478.
- Muerdter, Claire P, Wong, Carol K, & LeFevre, Gregory H. (2018). Emerging investigator series: The role of vegetation in bioretention for stormwater treatment in the built environment: Pollutant removal, hydrologic function, and ancillary benefits. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 4(5), 592-612.
- Mukherjee, Sourav, Mishra, Ashok, & Trenberth, Kevin E. (2018). Climate change and drought: A perspective on drought indices. *Current climate change reports*, 4, 145-163.
- Nations Unies. (s.d.). *L'ONU lance la décennie d'action sur l'eau pour le développement durable*. Nations Unies. Retrieved 17septembre from <https://www.un.org/fr/desa/water-action-decade>
- Newton, Robert Ato, Pidlisnyuk, Valentina, Wildová, Eliška, Nováková, Ludmila, & Trögl, Josef. (2023). State of brownfields in the northern bohemia, saxony and lower silesian regions and prospects for regeneration by utilization of the phytotechnology with the second generation crops. *Land*, 12(2), 354.
- Niu, Hao, Clark, Corrie, Zhou, Jiti, & Adriaens, Peter. (2010). Scaling of economic benefits from green roof implementation in Washington, DC. *Environmental Science & Technology*, 44(11), 4302-4308.
- Oquendo-Di Cosola, V, Olivieri, F, Ruiz-García, L, & Bacenetti, J. (2020). An environmental life cycle assessment of living wall systems. *Journal of Environmental Management*, 254, 109743.
- Ottelé, Marc, Perini, Katia, Fraaij, ALA, Haas, EM, & Raiteri, Raiteri. (2011). Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems. *Energy and buildings*, 43(12), 3419-3429.
- Palla, Anna, Sansalone, John J, Gnecco, Ilaria, & Lanza, Luca G. (2011). Storm water infiltration in a monitored green roof for hydrologic restoration. *Water Science and Technology*, 64(3), 766-773.
- Paradis Bolduc, Lydia (2021). Bâtiment durable et eaux grises des solutions innovantes pour le recyclage. *Vecteur Environnement*, 54(3), 18-21.
- Paredes, Concepcion, Medina, Eva, Moral, Raul, Pérez-Murcia, Maria Dolores, Moreno-Caselles, Joaquín, Angeles Bustamante, M, & Cecilia, José Antonio. (2009). Characterization of the different organic matter fractions of spent mushroom substrate. *Communications in soil science and plant analysis*, 40(1-6), 150-161.
- Parizotto, S, & Lamberts, Raul. (2011). Investigation of green roof thermal performance in temperate climate: A case study of an experimental building in Florianópolis city, southern Brazil. *Energy and buildings*, 43(7), 1712-1722.

- Parker, David E. (2006). A demonstration that large-scale warming is not urban. *Journal of Climate*, 19(12), 2882-2895.
- Parker, Scott, Nantel, Patrick, Mathieu, Élyse, Thomas, Julia, & Côté, Mathieu. (2017). Adaptation aux changements climatiques au parc national du Canada de Forillon: Contexte et base de connaissances.
- Payne, Emily GI, Pham, Tracey, Deletic, Ana, Hatt, Belinda E, Cook, Perran LM, & Fletcher, Tim D. (2018). Which species? A decision-support tool to guide plant selection in stormwater biofilters. *Advances in Water Resources*, 113, 86-99.
- Pearen, Blair, & Wilson, Chloe. (2006). Feasibility study for green roof application on Queen's University campus. *Queen's Phys. Plant Serv.*
- Peck, Steven W, Callaghan, Chris, Kuhn, Monica E, & Bass, Brad. (1999). Greenbacks from green roofs: Forging a new industry in Canada.
- Peng, Lilliana LH, & Jim, Chi Yung. (2015). Economic evaluation of green-roof environmental benefits in the context of climate change: The case of Hong Kong. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(3), 554-561.
- Peri, Giorgia, Traverso, Marzia, Finkbeiner, Matthias, & Rizzo, Gianfranco. (2012). The cost of green roofs disposal in a life cycle perspective: Covering the gap. *Energy*, 48(1), 406-414.
- Perini, Katia, Ottelé, Marc, Haas, EM, & Raiteri, Rossana. (2011). Greening the building envelope, façade greening and living wall systems. *Open Journal of Ecology*, 1(1), 1-8.
- Perini, Katia, & Rosasco, Paolo. (2013). Cost-benefit analysis for green façades and living wall systems. *Building and Environment*, 70, 110-121.
- Perini, Katia, & Rosasco, Paolo. (2016). Is greening the building envelope economically sustainable? An analysis to evaluate the advantages of economy of scope of vertical greening systems and green roofs. *Urban Forestry & Urban Greening*, 20, 328-337.
- Peterson, Thomas C. (2003). Assessment of urban versus rural in situ surface temperatures in the contiguous United States: No difference found. *Journal of Climate*, 16(18), 2941-2959.
- Pétrémand, Gaël, Rochefort, Sophie, Jaccard, Gaëtan, & Fischer, Serge. (2015). First detection of the southern green stink bug parasitoid trichopoda pennipes (Fabr.) (Diptera: Tachinidae) in western Switzerland. *Mitteilungen der Schweizerischen Entomologischen Gesellschaft: Bulletin de la Société Entomologique Suisse*.
- Phan, Chia-Wei, & Sabaratnam, Vikineswary. (2012). Potential uses of spent mushroom substrate and its associated lignocellulosic enzymes. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 96, 863-873.
- Pirouz, Behrouz, Palermo, Stefania Anna, Becciu, Gianfranco, Sanfilippo, Umberto, Nejad, Hana Javadi, Piro, Patrizia, & Turco, Michele. (2023). A novel multipurpose self-irrigated green roof with innovative drainage layer. *Hydrology*, 10(3), 57.
- Pirouz, Behrouz, Palermo, Stefania Anna, & Turco, Michele. (2021). Improving the efficiency of green roofs using atmospheric water harvesting systems (an innovative design). *Water*, 13(4), 546.
- Prathapar, SA, Jamrah, A, Ahmed, M, Al Adawi, S, Al Sidairi, S, & Al Harassi, A. (2005). Overcoming constraints in treated greywater reuse in Oman. *Desalination*, 186(1-3), 177-186.
- Prost, Katharina, Borchard, Nils, Siemens, Jan, Kautz, Timo, Séquaris, Jean-Marie, Möller, Andreas, & Amelung, Wulf. (2013). Biochar affected by composting with farmyard manure. *Journal of Environmental Quality*, 42(1), 164-172.
- Québec vert, & SQP. (2024). *Fiches informatives sur les infrastructures végétalisées : Toitures végétalisées*. https://quebecvert.com/wp-content/uploads/2024/03/quebecvert_ficheiv_toituresvegetalisees.pdf
- Radić, Mina, Brković Dodig, Marta, & Auer, Thomas. (2019). Green facades and living walls—a review establishing the classification of construction types and mapping the benefits. *Sustainability*, 11(17), 4579.
- Riley, Benjamin. (2017). The state of the art of living walls: Lessons learned. *Building and Environment*, 114, 219-232.
- Rivas-Sánchez, Yair Andrey, Moreno-Pérez, María Fátima, & Roldán-Cañas, José. (2019). Environment control with low-cost microcontrollers and microprocessors: Application for green walls. *Sustainability*, 11(3), 782.

- Roebuck, RM, Oltean-Dumbrava, Crina, & Tait, S. (2011). Whole life cost performance of domestic rainwater harvesting systems in the united kingdom. *Water and Environment Journal*, 25(3), 355-365.
- Rotterdam, Gemeente. (2008). Groene daken rotterdam maatschappelijke kosten-batenanalyse.
- Rowe, D Bradley, Getter, Kristin L, & Durhman, Angela K. (2012). Effect of green roof media depth on crassulacean plant succession over seven years. *Landscape and Urban Planning*, 104(3-4), 310-319.
- Roy-Poirier, Audrey, Champagne, Pascale, & Filion, Yves. (2010). Review of bioretention system research and design: Past, present, and future. *Journal of Environmental Engineering*, 136(9), 878-889.
- Sagrelus, Pär Öhrn, Blecken, Godecke, Hedström, Annelie, Ashley, Richard, & Viklander, Maria. (2022). Environmental impacts of stormwater bioretention systems with various design and construction components. *Journal of Cleaner Production*, 359, 132091.
- Salou, Boris Idriss Gervais. (2009). *Estimation des apports au lac saint-charles à l'aide du modèle hydrologique swat* Université Laval].
- Saraeian, Zahra, Farrell, Claire, & Williams, Nicholas SG. (2022). Green roofs sown with an annual plant mix attain high cover and functional diversity regardless of irrigation frequency. *Urban Forestry & Urban Greening*, 73, 127594.
- Schroll, Erin, Lambrinos, John, Righetti, Tim, & Sandrock, David. (2011). The role of vegetation in regulating stormwater runoff from green roofs in a winter rainfall climate. *Ecological Engineering*, 37(4), 595-600.
- Schulz, Hardy, Dunst, Gerald, & Glaser, Bruno. (2013). Positive effects of composted biochar on plant growth and soil fertility. *Agronomy for sustainable development*, 33, 817-827.
- Schulz, Hardy, & Glaser, Bruno. (2012). Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175(3), 410-422.
- Shafique, Muhammad, Kim, Reeho, & Lee, Daehee. (2016). The potential of green-blue roof to manage storm water in urban areas. *Nature Environment and Pollution Technology*, 15(2), 715.
- Silva, Cristina M, Gomes, M Glória, & Silva, Marcelo. (2016). Green roofs energy performance in mediterranean climate. *Energy and buildings*, 116, 318-325.
- Sittisom, Prattakorn, Tangsongsuwan, Rapee, Munlikawong, Sikarint, Wongsapai, Wongkot, Sitthikankun, Sitthikorn, & Rinchumphu, Damrongsak. (2022). The determination of soil infiltration rate of urban bioretention design process in chiang mai, thailand. *Nakhara: Journal of Environmental Design and Planning*, 21(3), 228-228.
- Smith, Kathryn R, & Roebber, Paul J. (2011). Green roof mitigation potential for a proxy future climate scenario in chicago, illinois. *Journal of applied meteorology and climatology*, 50(3), 507-522.
- Sohi, Saran P, Krull, Evelyn, Lopez-Capel, Elisa, & Bol, Roland. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in agronomy*, 105, 47-82.
- Sol, Hors. (s.d). Fiche agronomique au/lab.
- SOSÉquipement. (2025). *Grues sur chenilles*. https://sosequipement.ca/vehicule_type/grues-sur-chenilles/
- Sproul, Julian, Wan, Man Pun, Mandel, Benjamin H, & Rosenfeld, Arthur H. (2014). Economic comparison of white, green, and black flat roofs in the united states. *Energy and buildings*, 71, 20-27.
- SQP. (2014). Les marais filtrants (eaux usées). https://www.phytotechno.com/wp-content/uploads/2018/02/SQP_Fiche_MaraisFiltrants.pdf
- SQP. (2015). Les toits végétalisés. https://www.phytotechno.com/wp-content/uploads/2018/02/SQP_Fiche_Toits-v%C3%A9g%C3%A9talis%C3%A9s-2.pdf
- SQP. (2016). *La phytoremédiation* <https://www.phytotechno.com/wp-content/uploads/2018/04/fiches-Phytoremediation.pdf>
- SQP. (2018). Les biorétention. https://www.phytotechno.com/wp-content/uploads/2018/04/Fiche-bior%C3%A9tention-finale_LHEb-ilovepdf-compressed.pdf
- SQP. (2019). La stabilisation des pentes. https://www.phytotechno.com/wp-content/uploads/2019/05/SQP_FicheTechnique_StabilisationPentes.pdf
- SQP. (2022). Les murs végétalisés. https://www.phytotechno.com/wp-content/uploads/2022/05/SQP_MursVegetalise%CC%81s_Web.pdf

- SQP. (2024). *L'entretien des phytotechnologies : Fiche technique*. Société Québécoise de Phytotechnologies. https://phytotechno.com/wp-content/uploads/2024/12/SQP_EntretienPhytotechnologies_v5_LR_Final-1.pdf?_gl=1*1k8zeu1*_up*MQ..*_ga*MjA4Nzk5NDIyNy4xNzM2Mjc5NDI0*_ga_C4KMEKXGZD*MTczNjI3MjQyNC4xLjAuMTczNjI3MjQyNC4wLjAuMA..
- Statistique Canada. (2024). *Indice des prix à la consommation : Revue annuelle, 2023*. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/240116/dq240116b-fra.htm>
- Stec, WJ, Van Paassen, AHC, & Maziarz, A. (2005). Modelling the double skin façade with plants. *Energy and buildings*, 37(5), 419-427.
- Susca, Tiziana. (2019). Green roofs to reduce building energy use? A review on key structural factors of green roofs and their effects on urban climate. *Building and Environment*, 162, 106273.
- Sutton, Richard K, & Lambrinos, John. (2015). *Green roof ecosystems: Summary and synthesis*. Springer.
- Tan, Kanghao, & Wang, Junsong. (2023). Substrate modified with biochar improves the hydrothermal properties of green roofs. *Environmental Research*, 216, 114405.
- Tanguay, Louis, René, Audet, Beatrix, Beisner, Giancarlo, Cesarello, & Laura Mae, Herzog. (2021). *Accroître la résilience du système socioécologique du lac saint-charles : Rapport final de la démarche participative du projet de recherche limnoscenes*. <https://chairetransition.esg.uqam.ca/wp-content/uploads/sites/48/2021/11/Accroître-la-résilience-du-système-socioécologique-du-lac-Saint-Charles.pdf>
- Teotónio, Inês, Silva, Cristina Matos, & Cruz, Carlos Oliveira. (2018). Eco-solutions for urban environments regeneration: The economic value of green roofs. *Journal of Cleaner Production*, 199, 121-135.
- Teotónio, Inês, Silva, Cristina Matos, & Cruz, Carlos Oliveira. (2021). Economics of green roofs and green walls: A literature review. *Sustainable Cities and Society*, 69, 102781. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102781>
- Thurston, Hale W. (2006). Opportunity costs of residential best management practices for stormwater runoff control. *Journal of water resources planning and management*, 132(2), 89-96.
- Timur, Ö, & Karaca, E. (2013). Vertical gardens, advances in landscape architecture. Retrieved from IntechOpen: <https://www.intechopen.com/books/advances-in-landscape-architecture/verticalgardens>.
- Tremblay, Jean-Philippe. L'agriculture au saguenay-lac-saint-jean: Adaptée au climat frais. *DES GÉOGRAPHES À L'ŒUVRE 50 ans de géographie à l'Université du Québec à Chicoutimi*, 95.
- Trowsdale, Sam A, & Simcock, Robyn. (2011). Urban stormwater treatment using bioretention. *Journal of Hydrology*, 397(3-4), 167-174.
- Tsang, SW, & Jim, Chi Yung. (2011). Game-theory approach for resident coalitions to allocate green-roof benefits. *Environment and Planning A*, 43(2), 363-377.
- Tudiwer, David, & Korjenic, Azra. (2017). The effect of living wall systems on the thermal resistance of the façade. *Energy and buildings*, 135, 10-19.
- Ulubeyli, Serdar, & Arslan, Volkan. (2017). Economic viability of extensive green roofs through scenario and sensitivity analyses: Clients' perspective. *Energy and buildings*, 139, 314-325. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.042>
- Vasl, Amiel, Shalom, H¹, Kadas, GJ, & Blaustein, L¹. (2017). Sedum—annual plant interactions on green roofs: Facilitation, competition and exclusion. *Ecological Engineering*, 108, 318-329.
- Vera, Sergio, Pinto, Camilo, Tabares-Velasco, Paulo Cesar, Bustamante, Waldo, Victorero, Felipe, Gironás, Jorge, & Bonilla, Carlos A. (2017). Influence of vegetation, substrate, and thermal insulation of an extensive vegetated roof on the thermal performance of retail stores in semiarid and marine climates. *Energy and buildings*, 146, 312-321.
- Viecco, Margareth, Jorquera, Héctor, Sharma, Ashish, Bustamante, Waldo, Fernando, Harindra JS, & Vera, Sergio. (2021). Green roofs and green walls layouts for improved urban air quality by mitigating particulate matter. *Building and Environment*, 204, 108120.

- Vijayaraghavan, K. (2016). Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and sustainable energy reviews*, 57, 740-752. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119>
- Vijayaraghavan, Kuppusamy, Biswal, Basanta Kumar, Adam, Max Gerrit, Soh, Soon Hong, Tsen-Tieng, Daryl Lee, Davis, Allen P, Chew, Soon Hoe, Tan, Puay Yok, Babovic, Vladan, & Balasubramanian, Rajasekhar. (2021). Bioretention systems for stormwater management: Recent advances and future prospects. *Journal of Environmental Management*, 292, 112766.
- Villarreal, Edgar L, & Dixon, Andrew. (2005). Analysis of a rainwater collection system for domestic water supply in ringdansen, norrköping, sweden. *Building and Environment*, 40(9), 1174-1184.
- Ville de Laval. (2025). *Info-règlements*. Retrieved 20 janvier from <https://info-reglements.laval.ca/consultation/cdu/stationnement/>
- Ville de Québec. (2017). *Gestion des eaux pluviales en milieu urbain : Vérification des calculs*. https://www.ville.quebec.qc.ca/gens_affaires/reglements_permis/docs/guide_gestion_eaux_pluviales_milieu_urbain.pdf
- Ville de Québec. (2024). *Taxe sur les grandes surfaces imperméables*. Retrieved 14 novembre from https://www.ville.quebec.qc.ca/citoyens/taxes_evaluation/compte_taxe/taxe-surfaces-impermeables.aspx
- Ville de Québec. (s.d). *Aire de biorétention ou jardin de pluie*. https://www.ville.quebec.qc.ca/gens_affaires/implantation-projets-immobiliers/projets-residentiels/docs/fiches_gestion_eaux_pluviales/1_aire_de_bioretention_ou_jardin_de_pluie.pdf
- Villeneuve, Vincent. (2020). *Caractérisation des variations saisonnière et spatiale des éléments nutritifs et de la prise de l'azote dissous dans l'estuaire du fleuve saint-laurent* Université Laval].
- Walters, Stuart Alan, & Stoelzle Midden, Karen. (2018). Sustainability of urban agriculture: Vegetable production on green roofs. *Agriculture*, 8(11), 168.
- Wang, Mo, Zhang, Dongqing, Adhityan, Appan, Ng, Wun Jern, Dong, Jianwen, & Tan, Soon Keat. (2016). Assessing cost-effectiveness of bioretention on stormwater in response to climate change and urbanization for future scenarios. *Journal of Hydrology*, 543, 423-432. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.10.019>
- Wanjiru, Evan M, Sichilalu, Sam M, & Xia, Xiaohua. (2017). Optimal control of heat pump water heater-instantaneous shower using integrated renewable-grid energy systems. *Applied Energy*, 201, 332-342.
- Ward, Sarah, Barr, Stewart, Memon, Fayyaz, & Butler, David. (2013). Rainwater harvesting in the uk: Exploring water-user perceptions. *Urban Water Journal*, 10(2), 112-126.
- Ward, Sarah, Memon, FA, & Butler, David. (2010). Harvested rainwater quality: The importance of appropriate design. *Water Science and Technology*, 61(7), 1707-1714.
- Water by Design. (2012). Bioretention technical design guidelines (version 1.1). *Health Waterways Ltd, Brisbane*.
- Waters, David, Van Zwieten, Lukas, Singh, Bhupinder Pal, Downie, Adriana, Cowie, Annette L, & Lehmann, Johannes. (2011). Biochar in soil for climate change mitigation and adaptation. In *Soil health and climate change* (pp. 345-368). Springer.
- Weather Spark. (2024a). *Climat et moyennes météorologiques tout au long de l'année pour gènes*. Retrieved 11 janvier from <https://fr.weatherspark.com/y/58985/M%C3%A9t%C3%A9o-moyenne-%C3%A0-G%C3%A0nes-Italie-tout-au-long-de-l'ann%C3%A9e>
- Weather Spark. (2024b). *Climat et moyennes météorologiques tout au long de l'année pour vienne*. Retrieved 11 janvier from <https://fr.weatherspark.com/y/81358/M%C3%A9t%C3%A9o-moyenne-%C3%A0-Vienne-Autriche-tout-au-long-de-l'ann%C3%A9e>
- Weather Spark. (2025). *Climate and average weather year round in québec*. <https://weatherspark.com/y/26469/Average-Weather-in-Qu%C3%A9bec-Quebec-Canada-Year-Round>
- Werner, Klaus Ulrich. (2017). Bâtiments, équipement et management durables-checklist.
- Whittinghill, Leigh J, Rowe, D Bradley, & Cregg, Bert M. (2013). Evaluation of vegetable production on extensive green roofs. *Agroecology and sustainable food systems*, 37(4), 465-484.

- William, Reshmina, Goodwell, Allison, Richardson, Meredith, Le, Phong V. V., Kumar, Praveen, & Stillwell, Ashlynn S. (2016). An environmental cost-benefit analysis of alternative green roofing strategies. *Ecological Engineering*, 95, 1-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.06.091>
- Wong, Nyuk Hien, Tay, Su Fen, Wong, Raymond, Ong, Chui Leng, & Sia, Angelia. (2003). Life cycle cost analysis of rooftop gardens in singapore. *Building and Environment*, 38(3), 499-509. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00131-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00131-2)
- Yan, Bing. (2011). The research of ecological and economic benefits for green roof. *Applied Mechanics and Materials*, 71, 2763-2766.
- Yang, Yan, Zhao, Yaqian, Liu, Ranbin, & Morgan, David. (2018). Global development of various emerged substrates utilized in constructed wetlands. *Bioresource technology*, 261, 441-452.

ANNEXE

1. Régression linéaire des précipitations liquides par saison

1.1. Automne

Tableau 22 : Résultats de la régression linéaire des précipitations liquides en automne sur 143 ans

Dep. Variable:	Automne	R-squared:	0.126
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.120
Method:	Least Squares	F-statistic:	20.27
Date:	Tue, 14 Nov 2023	Prob (F-statistic):	1.39e-05
Time:	14:14:27	Log-Likelihood:	-806.66
No. Observations:	143	AIC:	1617.
Df Residuals:	141	BIC:	1623.
Df Model:	1		
Covariance Type:	nonrobust		

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	-954.7321	269.709	-3.540	0.001	-1487.929	-421.536
Année	0.6249	0.139	4.503	0.000	0.351	0.899

Le coefficient de détermination (R^2) est de 0,126, ce qui signifie que le modèle de régression linéaire explique environ 12,6% de la variance observée dans les précipitations liquides pendant l'automne. Bien que ce R^2 ne soit pas très élevé, il indique néanmoins une certaine capacité du modèle à expliquer la variation des données. En outre, la pente observée est de 0,6249, avec une erreur standard de 0,139. Cela suggère que les précipitations liquides ont tendance à augmenter au fil des années étudiées. Cette relation est soutenue par le test de significativité (p -value < 0,001), indiquant que la pente est statistiquement significative. En termes simples, chaque augmentation d'une unité dans l'année est associée à une augmentation de 0,6249 unité dans les précipitations liquides pendant la saison d'automne. Cependant, il convient de noter que malgré la significativité statistique, la faible valeur de R^2 suggère que d'autres facteurs non inclus dans le modèle peuvent également influencer les précipitations liquides.

1.2. Hiver

Tableau 23 : Résultats de la régression linéaire des précipitations liquides en hiver sur 140 ans

Dep. Variable:	Hiver	R-squared:	0.007
Model:	OLS	Adj. R-squared:	-0.000
Method:	Least Squares	F-statistic:	0.9433
Date:	Mon, 13 Nov 2023	Prob (F-statistic):	0.333
Time:	19:31:17	Log-Likelihood:	-685.25
No. Observations:	138	AIC:	1374.
Df Residuals:	136	BIC:	1380.
Df Model:	1		
Covariance Type:	nonrobust		

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	-88.2100	144.040	-0.612	0.541	-373.059	196.639
Annee	0.0720	0.074	0.971	0.333	-0.075	0.218

Le test de significativité globale du modèle (Prob (F-statistic)) indique que le modèle n'est pas statistiquement significatif, avec une valeur de $p = 0,333$, supérieure au seuil de signification habituellement retenu de 0,05. En examinant les coefficients individuels, nous constatons que ni l'intercept (const) ni la variable "Année" ne sont statistiquement significatifs ($P > |t| > 0,05$). Cela suggère qu'il n'y a pas de tendance significative des précipitations liquides pendant les hivers sur la période étudiée. En résumé, la régression linéaire n'a pas réussi à identifier de relation claire entre l'année et les précipitations liquides pendant la saison d'hiver, indiquant une stabilité relative des précipitations liquides pendant cette période sur la période examinée.

1.3. Printemps

Tableau 24 : Résultats de la régression linéaire des précipitations liquides au printemps sur 142 ans

Dep. Variable:	Printemps	R-squared:	0.147
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.141
Method:	Least Squares	F-statistic:	24.19
Date:	Tue, 14 Nov 2023	Prob (F-statistic):	2.41e-06
Time:	12:50:26	Log-Likelihood:	-775.40
No. Observations:	142	AIC:	1555.
Df Residuals:	140	BIC:	1561.
Df Model:	1		
Covariance Type:	nonrobust		

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	-947.2651	227.233	-4.169	0.000	-1396.518	-498.012
Annee	0.5749	0.117	4.919	0.000	0.344	0.806

Le coefficient de détermination (R^2) de 0,147 suggère que le modèle explique environ 14,7% de la variance des précipitations liquides pendant le printemps. De plus, le test de significativité globale du modèle (Prob (F-

statistic)) montre une valeur extrêmement faible (2,41e-06), ce qui indique que le modèle est statistiquement significatif. En examinant les coefficients individuels, nous constatons que l'année est statistiquement significative ($P > |t| < 0,05$), avec un coefficient de 0,5749. Cela signifie qu'il existe une relation positive entre l'année et les précipitations liquides pendant le printemps, indiquant une tendance croissante au fil des années étudiées. Cette tendance est soutenue par la pente positive de la ligne de régression linéaire, visible sur le graphique. Ainsi, ces résultats confirment une claire tendance à l'augmentation des précipitations liquides pendant la saison de printemps sur la période examinée, ce qui souligne l'importance de surveiller de près les variations saisonnières dans les conditions météorologiques pour une planification et une gestion efficace des ressources.

1.4. Été

Tableau 25 : Résultats de la régression linéaire des précipitations liquides en été sur 142 ans

Dep. Variable:	Été	R-squared:	0.069			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.062			
Method:	Least Squares	F-statistic:	10.40			
Date:	Tue, 14 Nov 2023	Prob (F-statistic):	0.00157			
Time:	15:45:09	Log-Likelihood:	-837.14			
No. Observations:	142	AIC:	1678.			
Df Residuals:	140	BIC:	1684.			
Df Model:	1					
Covariance Type:	nonrobust					
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	-805.7479	351.002	-2.296	0.023	-1499.698	-111.798
Année	0.5822	0.181	3.224	0.002	0.225	0.939

Le coefficient de détermination (R^2) de 0.069 indique que le modèle explique environ 6.9% de la variance des précipitations liquides pendant l'été. Le test de significativité globale du modèle (Prob (F-statistic)) montre une valeur de p de 0.00157, ce qui indique que le modèle est statistiquement significatif. En examinant les coefficients individuels, nous constatons que l'année est statistiquement significative ($P > |t| < 0.05$), avec un coefficient de 0.5822. Cela signifie qu'il existe une relation positive entre l'année et les précipitations liquides pendant l'été, indiquant une tendance croissante au fil des années étudiées. Cette tendance est soutenue par la pente positive de la ligne de régression linéaire, visible sur le graphique. Ainsi, ces résultats confirment une petite tendance à l'augmentation des précipitations liquides pendant la saison estivale sur la période examinée, soulignant l'importance de surveiller de près les variations saisonnières dans les conditions météorologiques pour une planification et une gestion efficace des ressources en eau et des infrastructures.

2. Régression linéaire des précipitations solides par saison

2.1. Automne

Tableau 26 : Résultats de la régression linéaire des précipitations solides en automne sur 144 ans

Dep. Variable:	Automne	R-squared:	0.045
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.038
Method:	Least Squares	F-statistic:	6.719
Date:	Mon, 27 Nov 2023	Prob (F-statistic):	0.0105
Time:	18:31:56	Log-Likelihood:	-668.43
No. Observations:	144	AIC:	1341.
Df Residuals:	142	BIC:	1347.
Df Model:	1		
Covariance Type:	nonrobust		

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	294.8685	98.269	3.001	0.003	100.608	489.129
Année	-0.1310	0.051	-2.592	0.011	-0.231	-0.031

Le coefficient de détermination (R^2) de 0.045 suggère que le modèle explique environ 4.5% de la variance des précipitations solides pendant l'automne. Le test de significativité globale du modèle (Prob (F-statistic)) montre une valeur de p de 0.0105, ce qui indique que le modèle est statistiquement significatif. En examinant les coefficients individuels, nous constatons que l'année est statistiquement significative ($P>|t| < 0.05$), avec un coefficient de -0.1310. Cela signifie qu'il existe une relation négative entre l'année et les précipitations solides pendant l'automne, indiquant une tendance légèrement décroissante au fil des années étudiées. Cette tendance est soutenue par la pente négative de la ligne de régression linéaire, visible sur le graphique. Ainsi, ces résultats confirment une diminution graduelle des précipitations solides pendant la saison d'automne sur la période examinée, soulignant l'importance de surveiller de près les variations saisonnières dans les conditions météorologiques pour une planification et une gestion efficace des ressources en eau et des infrastructures.

2.2. Hiver

Tableau 27 : Résultats de la régression linéaire des précipitations solides en hiver sur 143 ans

Dep. Variable:	Hiver	R-squared:	0.007
Model:	OLS	Adj. R-squared:	-0.000
Method:	Least Squares	F-statistic:	0.9801
Date:	Fri, 01 Dec 2023	Prob (F-statistic):	0.324
Time:	13:16:55	Log-Likelihood:	-782.95
No. Observations:	141	AIC:	1570.
Df Residuals:	139	BIC:	1576.
Df Model:	1		
Covariance Type:	nonrobust		

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	-20.3013	251.269	-0.081	0.936	-517.106	476.503
Année	0.1279	0.129	0.990	0.324	-0.128	0.383

Le coefficient de détermination (R^2) de 0.007 suggère que le modèle explique seulement 0.7% de la variance des précipitations hivernales. De plus, le test de significativité globale du modèle (Prob (F-statistic)) montre une valeur de p de 0.324, ce qui indique que le modèle n'est pas statistiquement significatif. En examinant les coefficients individuels, nous constatons que ni l'année ni l'intercept ne sont statistiquement significatifs ($P > |t| > 0.05$). Cela signifie qu'il n'y a pas de relation significative entre l'année et les précipitations pendant la saison d'hiver sur la période examinée. La pente de la ligne de régression est très faible (0.1279), et son intervalle de confiance inclut zéro, ce qui suggère une stabilité des précipitations hivernales au fil des années étudiées. En résumé, la régression linéaire ne parvient pas à identifier une tendance significative dans les précipitations hivernales, soulignant l'importance de prendre en compte d'autres facteurs ou de considérer des méthodes d'analyse plus appropriées pour comprendre les variations des précipitations pendant cette saison.

2.3. Printemps

Tableau 28 : Résultats de la régression linéaire des précipitations solide en printemps sur 143 ans

Dep. Variable:	Printemps	R-squared:	0.010
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.003
Method:	Least Squares	F-statistic:	1.374
Date:	Tue, 14 Nov 2023	Prob (F-statistic):	0.243
Time:	15:54:57	Log-Likelihood:	-730.07
No. Observations:	143	AIC:	1464.
Df Residuals:	141	BIC:	1470.
Df Model:	1		
Covariance Type:	nonrobust		

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	261.4072	157.639	1.658	0.099	-50.234	573.049
Année	-0.0950	0.081	-1.172	0.243	-0.255	0.065

Le coefficient de détermination (R^2) de 0.010 suggère que le modèle explique seulement 1% de la variance des précipitations printanières. De plus, le test de significativité globale du modèle (Prob (F-statistic)) montre une valeur de p de 0.243, ce qui indique que le modèle n'est pas statistiquement significatif. En examinant les coefficients individuels, nous constatons que ni l'année ni l'intercept ne sont statistiquement significatifs ($P > |t| > 0.05$). Cela signifie qu'il n'y a pas de relation significative entre l'année et les précipitations pendant la saison de printemps sur la période examinée. La pente de la ligne de régression est très faible (coef = -0.0950), et son intervalle de confiance inclut zéro, ce qui suggère une stabilité des précipitations printanières au fil des années étudiées. En résumé, la régression linéaire ne parvient pas à identifier une tendance significative dans les précipitations printanières.

3. Régression linéaire des températures moyennes annuelles

3.1. Automne

Tableau 29 : Résultats de la régression linéaire des températures en automne sur 40 ans

Dep. Variable:	Automne	R-squared:	0.077				
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.052				
Method:	Least Squares	F-statistic:	3.072				
Date:	Sun, 07 Jul 2024	Prob (F-statistic):	0.0879				
Time:	13:42:44	Log-Likelihood:	-52.725				
No. Observations:	39	AIC:	109.4				
Df Residuals:	37	BIC:	112.8				
Df Model:	1						
Covariance Type:	nonrobust						
=====							
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]	-

const	-37.5591	25.251	-1.487	0.145	-88.722	13.604	
Annee	0.0221	0.013	1.753	0.088	-0.003	0.048	

Les résultats de cette régression montrent que le modèle utilisé pour prédire les températures en automne en fonction des années présente une capacité prédictive limitée. Le coefficient de détermination R^2 est de 0.077, ce qui indique que seulement 7.7% de la variation des températures en automne peut être expliquée par les variations annuelles selon ce modèle. Cela suggère que le modèle ne parvient pas à capturer efficacement les fluctuations saisonnières des températures en automne à partir des données sur les années.

L'ajustement du R^2 (Adj. R-squared) est de 0.052, ce qui indique que l'ajout d'autres variables explicatives pourrait potentiellement améliorer la précision du modèle. Le test F-statistic montre une valeur de 3.072 avec une probabilité associée de 0.0879, ce qui indique une tendance à la significativité statistique à un niveau de 0.1. Cependant, cette significativité n'est pas statistiquement robuste à un niveau de 0.05.

Les coefficients spécifiques du modèle indiquent que l'intercept (const) est estimé à -37.5591, avec une marge d'erreur de -88.722 à 13.604. Le coefficient pour l'année (Annee) est de 0.0221, suggérant une augmentation estimée de 0.0221 degré pour chaque année supplémentaire, bien que cette relation soit proche de la limite de significativité statistique.

3.2. Hiver

Tableau 30 : Résultats de la régression linéaire des températures hivernales sur 40 ans

Dep. Variable:	Hiver	R-squared:	0.128
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.103
Method:	Least Squares	F-statistic:	5.146
Date:	Sun, 07 Jul 2024	Prob (F-statistic):	0.0296
Time:	13:46:10	Log-Likelihood:	-68.320
No. Observations:	37	AIC:	140.6
Df Residuals:	35	BIC:	143.9
Df Model:	1		
Covariance Type:	nonrobust		

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	-107.1820	42.834	-2.502	0.017	-194.141	-20.223
Annee	0.0486	0.021	2.269	0.030	0.005	0.092

Les résultats de la régression linéaire montrent que le modèle utilisé pour prédire les températures hivernales en fonction des années présente une certaine amélioration par rapport au modèle précédent. Le coefficient de détermination R^2 est de 0.128, ce qui signifie que 12.8% de la variation des températures hivernales peut être expliquée par les variations annuelles selon ce modèle. Cela représente une capacité d'explication modeste, indiquant que d'autres facteurs non inclus dans le modèle pourraient également jouer un rôle important dans les variations des températures hivernales.

Le R^2 ajusté (Adj. R-squared) est de 0.103, suggérant que l'ajout d'autres variables explicatives pourrait potentiellement améliorer la précision du modèle. Le test F-statistic montre une valeur de 5.146 avec une probabilité associée de 0.0296, indiquant une significativité statistique à un niveau de 0.05. Cela signifie que l'année a un effet significatif sur les températures hivernales selon ce modèle.

Les coefficients spécifiques du modèle indiquent que l'intercept (const) est estimé à -107.1820, ce qui représente la valeur attendue des températures hivernales lorsque l'année est nulle, bien que cela ne soit pas interprétable dans ce contexte temporel. Le coefficient pour l'année (Annee) est de 0.0486, suggérant une augmentation estimée de 0.0486 degré pour chaque année supplémentaire.

3.3. Printemps

Tableau 31 : Résultats de la régression linéaire des températures printanières sur 40 ans

Dep. Variable:	Printemps	R-squared:	0.004			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	-0.023			
Method:	Least Squares	F-statistic:	0.1361			
Date:	Sun, 07 Jul 2024	Prob (F-statistic):	0.714			
Time:	13:46:25	Log-Likelihood:	-64.708			
No. Observations:	40	AIC:	133.4			
Df Residuals:	38	BIC:	136.8			
Df Model:	1					
Covariance Type:	nonrobust					
=====						
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]

const	-8.8868	32.909	-0.270	0.789	-75.508	57.735
Annee	0.0061	0.016	0.369	0.714	-0.027	0.039
=====						
Omnibus:	2.044	Durbin-Watson:	1.803			
Prob(Omnibus):	0.360	Jarque-Bera (JB):	1.339			
Skew:	0.442	Prob(JB):	0.512			
Kurtosis:	3.148	Cond. No.	3.32e+05			

Les résultats de cette régression montrent que le modèle utilisé pour prédire les températures printanières en fonction des années présente une faible capacité prédictive. Le coefficient de détermination R^2 est de seulement 0.004, ce qui signifie que seulement 0.4% de la variation des températures printanières est expliquée par les variations annuelles selon ce modèle. Cela suggère que le modèle ne parvient pas à capturer efficacement les fluctuations saisonnières des températures printanières à partir des données sur les années.

L'ajustement du R^2 (Adj. R-squared) est négatif à -0.023, ce qui indique que le modèle pourrait être surajusté et ne pas être approprié pour expliquer les données de manière robuste. Le test F-statistic montre une valeur de 0.1361 avec une probabilité associée de 0.714, ce qui est élevé. Cela suggère que le modèle dans son ensemble n'est pas statistiquement significatif pour prédire les températures printanières en fonction des années.

Les coefficients spécifiques du modèle indiquent que l'intercept (const) est estimé à -8.8868, avec une marge d'erreur importante (de -75.508 à 57.735), ce qui rend l'estimation peu fiable. Le coefficient pour l'année (Annee) est de 0.0061, ce qui suggère une augmentation estimée de seulement 0.0061 degré pour chaque année supplémentaire, bien que cette relation ne soit pas statistiquement significative.

En conclusion, cette analyse révèle que le modèle de régression linéaire utilisé ne parvient pas à fournir une explication significative des variations des températures printanières sur une période de 50 ans. D'autres

variables ou approches peuvent être nécessaires pour mieux comprendre et prédire les variations saisonnières des températures printanières dans cette région sur une longue période.

3.4. Été

Tableau 32 : Résultats de la régression linéaire des températures estivales sur 40 ans

Dep. Variable:	Ete	R-squared:	0.089				
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.064				
Method:	Least Squares	F-statistic:	3.535				
Date:	Sun, 07 Jul 2024	Prob (F-statistic):	0.0682				
Time:	13:45:18	Log-Likelihood:	-40.402				
No. Observations:	38	AIC:	84.80				
Df Residuals:	36	BIC:	88.08				
Df Model:	1						
Covariance Type:	nonrobust						
=====							
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]	-
const	-18.3628	19.389	-0.947	0.350	-57.686	20.960	
Annee	0.0182	0.010	1.880	0.068	-0.001	0.038	
=====							
Omnibus:	2.222	Durbin-Watson:	2.094				
Prob(Omnibus):	0.329	Jarque-Bera (JB):	1.778				
Skew:	-0.527	Prob(JB):	0.411				
Kurtosis:	2.894	Cond. No.	3.32e+05				

Les résultats de cette régression indiquent que le modèle utilisé pour prédire les températures estivales en fonction des années montre une certaine capacité prédictive, bien que modérée. Le coefficient de détermination R^2 est de 0.089, ce qui signifie que 8.9% de la variation des températures estivales peut être expliquée par les variations annuelles selon ce modèle. Cela indique une amélioration par rapport aux modèles précédents, bien que la capacité explicative reste limitée.

L'ajustement du R^2 (Adj. R-squared) est de 0.064, ce qui suggère que l'ajout d'autres variables explicatives pourrait potentiellement améliorer la précision du modèle. Le test F-statistic montre une valeur de 3.535 avec une probabilité associée de 0.0682, indiquant une tendance à la significativité statistique à un niveau de 0.1. Cela suggère que l'année pourrait avoir un effet significatif sur les températures estivales, bien que cela ne soit pas statistiquement significatif à un niveau de 0.05.

Les coefficients spécifiques du modèle indiquent que l'intercept (const) est estimé à -18.3628, avec une marge d'erreur de -57.686 à 20.960. Le coefficient pour l'année (Annee) est de 0.0182, suggérant une augmentation

estimée de 0.0182 degré pour chaque année supplémentaire, bien que cette relation soit proche de la limite de significativité statistique.

En résumé, bien que ce modèle montre une amélioration par rapport aux modèles précédents en termes d'ajustement (R^2), il reste limité dans son pouvoir explicatif. L'effet potentiel de l'année sur les températures estivales indique qu'il pourrait être intéressant d'explorer d'autres variables ou modèles pour mieux comprendre et prédire les variations saisonnières des températures estivales sur cette période de 50 ans.

4. Estimation des précipitation liquides annuelles jusqu'à 2075

Sur la base de la régression linéaire, il est possible de prédire les précipitations futures sur 50ans.

4.1. Automne

Tableau 33 : Estimation des précipitations liquides en automne jusqu'à 2075

Année	Précipitations (mm)	Intervalle de confiance	
		Inférieur	Supérieur
2025	310,62	285,44	335,81
2026	311,25	285,82	336,68
2027	311,87	286,20	337,55
2028	312,50	286,58	338,42
2029	313,12	286,95	339,29
2030	313,75	287,33	340,16
2035	316,87	289,21	344,53
2040	320	291,08	348,92
2045	323,12	292,94	353,31
2050	326,25	303,93	357,70
2075	341,87	303,93	379,8

4.2. Hiver

Tableau 34 : Estimation des précipitations liquides en hiver jusqu'à 2075

Année	Précipitations (mm)	Intervalle de confiance	
		Inférieur	Supérieur
2025	57,50	44,21	70,79
2026	57,57	44,15	70,99
2027	57,64	44,09	71,19
2028	57,72	44,03	71,40
2029	57,79	43,97	71,60
2030	57,86	43,91	71,81
2035	58,22	43,61	72,83
2040	58,58	43,29	73,87
2045	58,94	42,97	74,91
2050	59,3	42,65	75,95
2075	61,1	40,98	81,22

4.3. Printemps

Tableau 35 : Estimation des précipitations liquides en printemps jusqu'à 2075

Année	Précipitations (mm)	Intervalle de confiance	
		Inférieur	Supérieur
2025	216,95	195,87	238,03
2026	217,53	196,24	238,81
2027	218,10	196,98	239,59
2028	218,68	197,34	240,37
2029	219,25	197,71	241,16
2030	219,83	198,08	241,94
2035	222,70	199,54	245,86
2040	225,57	201,35	249,80
2045	228,45	203,16	253,74
2050	231,32	204,96	257,69
2075	245,7	213,88	277,52

4.4. Été

Tableau 36 : Estimation des précipitations liquides en été jusqu'à 2075

Année	Précipitations (mm)	Intervalle de confiance	
		Inférieur	Supérieur
2025	373,17	340,61	405,73
2026	373,75	340,88	406,63
2027	374,33	341,14	407,53
2028	374,92	341,40	408,43
2029	375,50	341,66	409,34
2030	376,08	341,92	410,24
2035	378,99	343,21	414,77
2040	381,90	344,49	419,32
2045	384,81	345,75	423,88
2050	387,72	347	428,45
2075	402,28	353,13	451,43

5. Estimation des précipitations solides annuelles jusqu'à 2075

5.1. Automne

Tableau 37 : Estimation des précipitations solides en automne jusqu'à 2075

Année	Précipitations (mm)	Intervalle de confiance	
		Inférieur	Supérieur
2025	29,52	20,38	38,66
2026	29,39	20,16	38,62
2027	29,12	19,94	38,57
2028	28,99	19,71	38,53
2029	28,86	19,49	38,49
2030	28,73	19,27	38,45
2035	28,21	18,17	38,25
2040	27,55	17,05	38,05
2045	26,90	15,94	37,85
2050	26,24	14,82	37,66
2075	22,97	9,19	36,74

5.2. Hiver

Tableau 38 : Estimation des précipitations solides en hiver jusqu'à 2075

Année	Précipitations (mm)	Intervalle de confiance	
		Inférieur	Supérieur
2025	238,74	215,59	261,90
2026	238,87	215,49	262,25
2027	239	215,39	262,61
2028	239,13	215,28	262,97
2029	239,25	215,18	263,68
2030	239,38	215,08	264,04
2035	240,02	214,56	265,48
2040	240,66	214,03	267,29
2045	241,30	213,49	269,11
2050	241,94	212,94	270,94
2075	245,14	210,11	280,17

5.3. Printemps

Tableau 39 : Estimation des précipitations solides au printemps jusqu'à 2075

Année	Précipitations (mm)	Intervalle de confiance	
		Inférieur	Supérieur
2025	68,96	54,40	83,53
2026	68,87	54,16	83,58
2027	68,77	53,92	83,63
2028	68,68	53,68	83,67
2029	68,58	53,44	83,72
2030	68,49	53,20	83,77
2035	68,01	52	84,02
2040	67,54	50,80	84,28
2045	67,06	49,58	84,54
2050	66,59	48,36	84,81
2075	64,21	42,21	86,21

6. Estimation des températures annuelles jusqu'à 2075

6.1. Automne

Tableau 40 : Estimation des températures en automne jusqu'à 2075

Année	Température (°C)	Intervalle de confiance	
		Inférieur	Supérieur
2025	7,28	6,54	8,02
2026	7,30	6,539	8,06
2027	7,32	6,538	8,11
2028	7,34	6,536	8,16
2029	7,37	6,535	8,20
2030	7,39	6,533	8,25
2035	7,50	6,52	8,48
2040	7,61	6,51	8,71
2045	7,72	6,49	8,94
2050	7,83	6,48	9,18
2075	8,3	6,41	10,3

6.2. Hiver

Tableau 41 : Estimation des températures en hiver jusqu'à 2075

Année	Température (°C)	Intervalle de confiance	
		Inférieur	Supérieur
2025	-8,77	-10	-7,54
2026	-8,72	-9,99	-7,45
2027	-8,67	-9,98	-7,37
2028	-8,62	-9,97	-7,28
2029	-8,58	-9,96	-7,19
2030	-8,53	-9,95	-7,10
2035	-8,28	-9,91	-6,65
2040	-8,04	-9,88	-6,20
2045	-7,8	-9,85	-3,02
2050	-7,56	-9,81	-5,3
2075	-6,3	-9,6	-3,02

6.3. Printemps

Tableau 42 : Estimation des températures au printemps jusqu'à 2075

Année	Température (°C)	Intervalle de confiance	
		Inférieur	Supérieur
2025	3,41	2,45	4,36
2026	3,41	2,43	4,40
2027	3,42	2,40	4,43
2028	3,42	2,38	4,47
2029	3,43	2,35	4,51
2030	3,44	2,33	4,54
2035	3,47	2,20	4,73
2040	3,50	2,07	4,92
2045	3,53	1,94	5,11
2050	3,56	1,81	5,3
2075	3,71	1,14	6,27

6.4. Été

Tableau 43 : Estimation des températures en été jusqu'à 2075

Année	Température (°C)	Intervalle de confiance	
		Inférieur	Supérieur
2025	18,57	18	19,15
2026	18,59	18	19,18
2027	18,61	18	19,18
2028	18,63	18	19,22
2029	18,64	18	19,26
2030	18,66	18	19,33
2035	18,75	18	18,1
2040	18,85	17,99	17,99
2045	18,94	17,99	17,99
2050	19,03	17,99	20,07
2075	19,48	17,96	21,01