



RÉSUMÉ DE MÉMOIRE PRÉSENTÉ PAR **SÉBASTIEN JACQUET** À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE



Performance énergétique d'une **TOITURE VÉGÉTALE** au centre-ville de Montréal

CRÉDITS

Auteur | Sébastien Jacquet

Jury d'évaluation | **M. Gabriel Lefebvre**, directeur de mémoire, Département de Génie de la Construction à l'École de technologie supérieure | **M. Owen Rose**, codirecteur, architecte et membre fondateur d'Atelier Tautem, président du Centre d'écologie urbaine de Montréal | **M. Mathias Glaus**, président du jury, Département de Génie de la Construction à l'École de technologie supérieure | **M. Marc-André Bovet**, membre du jury, président Simple Concept – BoneStructure

Images de la couverture | Centre d'écologie urbaine de Montréal (photos du projet pilote)

Quatrième publication dans la série sur les toits verts publiée par le Centre d'écologie urbaine de Montréal, cet ouvrage est un résumé du mémoire «Performance énergétique d'une toiture végétale extensive installée au centre-ville de Montréal» présenté par Sébastien Jacquet à l'École de technologie supérieure comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise en génie M. Ing.

La série de publications sur les toits verts par le Centre d'écologie urbaine de Montréal a été rendue possible grâce à la contribution de plusieurs personnes et partenaires que nous tenons à remercier | Maude Landreville | Jacob Nerenberg | Lucia Kowaluk | Antoine Trottier | Owen Rose | Sébastien Jacquet | L'École de technologie supérieure | Le Conseil national de recherches du Canada (CNRC) | Fondation Mountain Equipment Coop | Ville de Montréal | Le Fonds de l'environnement de Shell | Le programme ÉcoAction d'Environnement Canada | RHDCC Canada | L'Université du Québec à Montréal (UQÀM – service à la vie étudiante et service aux collectivités) | Associations étudiantes sectorielles de l'UQÀM (AESS, AFESH, AFESPED et AEESG) | Associations étudiantes de programmes à l'UQÀM (l'ASEMESE, 1^{er} et 2^e cycle en géographie) | Repto-UQAM | GRIP-UQÀM.

© Sébastien Jacquet et Centre d'écologie urbaine de Montréal – 2011 – Tous droits réservés

ISBN 978-2-9810129-8-2

www.ecologieurbaine.net/toits-verts

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	6	CHAPITRE 3	18
CHAPITRE 1		RÉSULTATS OBTENUS À MONTRÉAL	18
OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE	8	3.1	Température maximale au niveau de la membrane d'étanchéité 18
1.1	Objectifs de la recherche 8	3.2	Variation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité 20
1.2	Présentation de la toiture étudiée 8	3.3	Flux de chaleur traversant la toiture 22
1.3	Structure 8	3.4	Performance énergétique 25
1.4	Aménagement 9	3.4.1	Climatisation 25
1.5	Plantes 10	3.4.2	Chauffage 26
1.6	Paramètres enregistrés 12	3.4.3	Énergie cumulative 27
1.7	Méthodologie 13		
1.7.1	Température maximale au niveau de la membrane d'étanchéité 13	CHAPITRE 4	RÉSULTATS OBTENUS AILLEURS AU CANADA 28
1.7.2	Variation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité 13	4.1	FRF – Field Roof Facility, Ottawa, ON. 28
1.7.3	Flux de chaleur traversant le toit 13	4.2	GRRF – Green Roof Research Facility, Vancouver, CB. 29
1.7.4	Performance énergétique 14	4.3	ENCC – Eastview Neighbourhood Community Centre, Toronto, ON. 30
CHAPITRE 2		CHAPITRE 5	31
NOTIONS DE BASE	15	COMPARAISON DES RÉSULTATS	31
2.1	Types de toitures végétales et composantes 15	5.1	Comparaison de la température maximale au niveau de la membrane d'étanchéité 32
2.2	Les toitures végétales et leurs avantages 16	5.2	Comparaison de la variation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité 34
2.2.1	Efficacité énergétique des bâtiments 16	5.3	Comparaison du flux de chaleur traversant le toit 36
2.2.2	Prolongation de la durée de vie des toitures 16	5.4	Comparaison de la performance énergétique 37
2.2.3	Modération de l'effet d'îlot de chaleur urbain 16	5.5	Discussion des résultats et extrapolation 40
2.2.4	Réduction des eaux de ruissellement dans les égouts 17		
		CONCLUSION	42
		BIBLIOGRAPHIE	43

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 5.1 Éléments de design des quatre plateformes expérimentales comparées	31
TABLEAU 5.2 Comparaison des résultats pour la température maximale au niveau de la membrane d'étanchéité	32
TABLEAU 5.3 Comparaison des résultats pour la fluctuation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité	34
TABLEAU 5.4 Comparaison des résultats pour le flux de chaleur traversant la toiture – gains de chaleur	36
TABLEAU 5.5 Comparaison des résultats pour le flux de chaleur traversant la toiture – pertes de chaleur	37
TABLEAU 5.6 Comparaison des résultats pour la performance énergétique – demande en énergie de CLIMATISATION	38
TABLEAU 5.7 Comparaison des résultats pour la performance énergétique – demande en énergie de CHAUFFAGE	38

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1 Structure du toit du CÉUM	9
FIGURE 1.2 Les trois zones du toit du CÉUM	9
FIGURE 1.3 Coupe typique du toit du CÉUM	10
FIGURE 1.4 Les deux types de substrat du toit du CÉUM	11
FIGURE 1.5 Toit vert du CÉUM – période estivale	11
FIGURE 1.6 Toit vert du CÉUM – période automnale	11

FIGURE 1.7 Niveaux des sondes pour le toit du CÉUM	12
FIGURE 2.1 Exemple des deux types de toits verts	15
FIGURE 3.1 Température enregistrée au niveau de la membrane d'étanchéité pour une journée automnale typique	18
FIGURE 3.2 Température enregistrée au niveau de la membrane d'étanchéité pour une journée estivale typique	19
FIGURE 3.3 Températures maximales mensuelles moyennes au niveau de la membrane d'étanchéité	20
FIGURE 3.4 Variation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité	21
FIGURE 3.5 Flux de chaleur traversant la toiture pour une journée automnale typique (3 octobre 2007)	22
FIGURE 3.6 Flux de chaleur traversant la toiture pour une journée estivale typique (22 juillet 2007)	23
FIGURE 3.7 Flux de chaleur mensuel moyen traversant la toiture	24
FIGURE 3.8 Demande d'énergie de climatisation due à l'entrée de chaleur par le toit	25
FIGURE 3.9 Demande d'énergie de chauffage due à la sortie de chaleur par le toit	26
FIGURE 3.10 Demande totale cumulative d'énergie due à l'entrée et sortie de chaleur par le toit	27
FIGURE 4.1 FRF d'Ottawa	28
FIGURE 4.2 GRRF de Vancouver	29
FIGURE 4.3 ENCC de Toronto	30

FIGURE 5.1
Comparaison des résultats –
température maximale de la membrane **33**

FIGURE 5.2
Comparaison des résultats –
variation de la température de la membrane **35**

FIGURE 5.3
Comparaison des résultats –
énergie de climatisation **39**

FIGURE 5.4
Comparaison des résultats –
énergie de chauffage **39**

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

BCIT	British Columbia Institute of Technology
BTU	British Thermal Unit
CB	Colombie-Britannique
CÉUM	Centre d'écologie urbaine de Montréal
CNRC	Centre national de recherches Canada
CVCA	Chauffage ventilation climatisation de l'air
ENCC	Eastview Neighbourhood Community Centre
FRF	Field Roof Facility
GRRF	Green Roof Research Facility
LAI	Leaf Area Index
ON	Ontario
QC	Québec
TLT	Total Leaf Thickness

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS DE BASE

m	mètre
mm	millimètre

UNITÉS D'AIRE

m ²	mètre carré
pi ²	pié carré

UNITÉS CALORIFIQUES

°C	degré Celsius
K	Kelvin

UNITÉS DE PUISSANCE

W	watt
J	joule

UNITÉS D'ÉNERGIE, DE TRAVAIL ET DE CHALEUR

Cal	calorie (chaleur)
BTU	British Thermal Unit (chaleur)
KJ	Kilojoule (chaleur)
Wh	wattheure (énergie)
kWh	kilowattheure (énergie)



MOT DE PRÉSENTATION

À l'instar du développement des toits verts ailleurs dans le monde, le Centre d'écologie urbaine de Montréal (CÉUM) a conclu en 2004 qu'il fallait étudier les avantages de l'implantation de toits verts dans le contexte montréalais. D'abord, le CÉUM a fait ses recherches et a publié *Toitures vertes à la montréalaise*, rédigé par Maude Landreville, en 2005. Le rapport souligne, entre autres, les bienfaits des toits verts tels que leur capacité de contrer l'effet d'îlot de chaleur urbain et les épisodes de smog (climatisation naturelle), de gérer les eaux de ruissellement, de prolonger la durée de vie des membranes de toiture, d'accroître l'efficacité énergétique du bâtiment, de filtrer les polluants atmosphériques, d'insonoriser et réduire les nuisances phoniques, de favoriser la biodiversité et de créer de la beauté.

Avec les résultats de nos recherches, nous nous sommes lancés dans la réalisation du projet-pilote de toit vert sur un duplex de la rue Jeanne-Mance au centre-ville de Montréal à l'été 2005. En passant des idées à l'action, nous avons pris soin de documenter toutes les étapes de la réalisation du projet, pour ensuite mettre à la disposition du public une deuxième publication *Projet-pilote de toit vert*, rédigée par Jacob Nerenberg, à l'automne 2005.

Le CÉUM fait de la sensibilisation sur les toits verts depuis 2005. Afin d'améliorer nos connaissances et de faire une mise à jour de l'avancement des toits verts à Montréal, nous avons collaboré avec le GRIP-UQÀM pour la publication de *Toitures végétales : implantation de toits verts en milieu institutionnel*, rédigée par Antoine Trottier, en 2008. En 2011, nous espérons que les villes du Québec révisent leurs politiques en matière de toits verts afin de les encourager et de les encadrer pour assurer des réalisations durables et de qualité.

C'est avec la publication du mémoire, *Étude de la performance énergétique d'une toiture végétale extensive installée au centre-ville de Montréal*, de Sébastien Jacquet, que nous fermons la boucle des recherches scientifiques sur notre projet-pilote de toit vert. Ce mémoire a été initialement supervisé et publié par l'École de technologie supérieure (ÉTS) dans le cadre de la maîtrise en génie de l'environnement de Sébastien Jacquet, en 2010. Nous sommes donc fiers de vous présenter cette version abrégée qui aidera les professionnels de la construction, les administrations publiques, les gestionnaires immobiliers ainsi que les citoyens à mieux comprendre les toits verts sur une base scientifique, et ce, afin de chiffrer leurs bienfaits en termes énergétiques.

La captation des données scientifiques et leur analyse reposent sur un travail d'équipe qui s'est déroulé sur plusieurs années. En plus de reconnaître tous les intervenants dans la réalisation du projet-pilote en 2005, j'aimerais remercier plus particulièrement le Conseil national de recherches du Canada (CNRC) pour avoir fait le suivi scientifique du projet-pilote, Jacob Nerenberg pour avoir été un chargé de projet polyvalent et inépuisable, Lucia Kowaluk qui était la Coordinatrice du CÉUM à l'époque du projet-pilote, tous les bailleurs de fonds qui nous ont appuyé et bien sûr, Sébastien Jacquet, qui a choisi de dédier son mémoire de maîtrise à analyser et mettre en perspective les données scientifiques avec enthousiasme et intelligence!

M. Owen Rose, codirecteur, architecte et membre fondateur d'Atelier Tautem, président du Centre d'écologie urbaine de Montréal

CENTRE D'ÉCOLOGIE URBAINE DE MONTRÉAL

LE CENTRE D'ÉCOLOGIE URBAINE DE MONTRÉAL (CÉUM) EST UN ORGANISME À BUT NON LUCRATIF INDÉPENDANT FONDÉ EN 1996 QUI A POUR MISSION DE DÉVELOPPER ET DE PARTAGER UNE EXPERTISE QUANT AUX APPROCHES LES PLUS VIABLES ET DÉMOCRATIQUES DE DÉVELOPPEMENT URBAIN DURABLE. LE CÉUM EST RECONNU POUR SA CAPACITÉ À INITIER ET À METTRE EN ŒUVRE DES PROJETS NOVATEURS, NOTAMMENT EN MATIÈRE DE VERDISSEMENT ET DE LUTTE AUX ÎLOTS DE CHALEUR URBAINS.

INTRODUCTION

La conception et le design des habitations est en constante évolution et ce, depuis la nuit des temps. Il y a longtemps, lorsque l'énergie domestique n'était pas disponible ou difficilement accessible, les habitations étaient adaptées à leur environnement ce qui leur permettait d'atteindre des conditions climatiques intérieures relativement acceptables. Comme le soulignent Hutcheon et Handegord (1989), avec l'avènement de l'énergie domestique et le développement d'appareils modernes, les bâtiments ont perdu cette considération environnementale puisqu'alors il était possible de pallier aux contraintes climatiques par l'utilisation massive d'énergie. Ainsi, les bâtiments étaient peu ou pas isolés contre le froid et des quantités importantes d'énergie étaient consommées pour conserver des conditions climatiques intérieures acceptables. Avec l'accroissement de la consommation énergétique, le prix de l'énergie s'est élevé de même que les considérations environnementales et le souci des changements climatiques.

Plusieurs solutions technologiques sont continuellement développées pour augmenter l'efficacité énergétique des bâtiments et ultimement réduire leur impact sur l'environnement. Un design de bâtiment efficace énergétiquement inclut la plupart du temps une diminution des charges énergétiques de chauffage et de climatisation, sans pour autant réduire la qualité de vie des occupants. Ainsi, l'augmentation de l'efficacité de l'isolant des murs, l'efficacité thermique des fenêtres, l'énergie solaire passive et l'orientation du bâtiment font toutes parties des solutions visant à augmenter l'efficacité énergétique des habitations.

Les toits verts représentent un élément de design efficace en ce qui a trait à la diminution de la consommation d'énergie de climatisation et de chauffage. Plusieurs études menées dans l'ouest des États-Unis et en Europe ont démontré le pouvoir «climatisant» des toitures végétales et avancent des pourcentages de réduction de la consommation énergétique assez alléchants. Bien qu'un certain nombre d'études aient été publiées au Canada, l'adoption des toits verts à grande échelle est ralentie par le manque de données pour le contexte canadien (Bass et Baskaran, 2003). Ainsi, aucun toit vert n'a jamais été instrumenté et étudié à long terme à Montréal.

L'objectif ultime de cette recherche est donc d'étudier l'impact énergétique d'un toit vert extensif installé sur un bâtiment résidentiel situé en plein cœur de la ville de Montréal et d'évaluer les résultats en comparaison aux études similaires ayant été réalisées dans diverses villes canadiennes.

Cette recherche permettra aux professionnels œuvrant dans le domaine de la construction de faire des choix éclairés en ce qui concerne les toitures végétales dans un contexte urbain tel que celui de la ville de Montréal.

CHAPITRE 1 > OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

1.1 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

La présente recherche porte sur l'étude de la performance thermique d'un toit vert expérimental installé sur un bâtiment résidentiel situé au cœur de la ville de Montréal. Deux aspects majeurs seront regardés à savoir le vieillissement de la membrane d'étanchéité et les échanges thermiques de la toiture.

Dans le cadre de cet examen, la présentation des résultats enregistrés à Montréal, mis en relation avec ceux obtenus dans le cadre des études canadiennes semblables, permettra de valider les avantages répertoriés des toitures végétales et de voir comment ces derniers sont comparables avec ce qui a été observé ailleurs au Canada.

1.2 PRÉSENTATION DE LA TOITURE ÉTUDIÉE

C'est en 2005 que le Centre d'écologie urbaine (CÉUM) de Montréal, conjointement avec le CNRC, procède à l'installation d'une toiture végétale extensive sur le toit d'un duplex d'une coopérative d'habitation dans le quartier Milton-Parc au centre de Montréal. Ce projet de démonstration, situé au 3518, rue Jeanne-Mance et d'une superficie d'environ 99 m², sert d'exemple concret des avantages et inconvénients que représente la construction d'une toiture végétale dans un milieu urbain de l'est du Canada et plus précisément à Montréal qui possède son climat bien particulier.

La toiture a été conçue et réalisée par une équipe pluridisciplinaire comportant des architectes, un ingénieur en structure, un entrepreneur général, un couvreur, une représentante de la compagnie Soprema qui a fourni une partie des matériaux et plantes du toit vert, ainsi qu'une multitude de bénévoles.

La toiture ainsi réalisée se divise en trois différentes sections à savoir :

1. une section de référence qui ne comporte aucun toit vert (REF),
2. une section de toit vert extensif non irrigué (VERT NON IRRIGUÉ),
3. une section de toit vert intensif irrigué (VERT IRRIGUÉ).

Les deux sections contenant les systèmes de toits verts ont une superficie d'environ 42 m² chacune, tandis que la superficie de la section de référence est d'environ 15 m².

1.3 STRUCTURE

Afin de pouvoir supporter le surplus de poids apporté par l'installation des deux systèmes de toits verts, la structure existante de la toiture du duplex a été renforcée. De nouvelles fermes de toit ont été ajoutées et les pentes ont été modifiées (2%) afin de pouvoir accueillir le système de toit vert de la compagnie Soprema.

Cette typologie de construction résidentielle consiste en une toiture ventilée qui comporte un espace d'air entre le pontage et l'isolant. Cet espace permet l'évacuation de la chaleur et de l'humidité accumulées dans l'entre toit. Ainsi, l'ajout d'une toiture végétale sur un tel type de construction voit ses avantages diminués du point de vue thermique puisque presque aucun pont thermique n'existe entre le toit vert et l'intérieur du bâtiment. Les gains thermiques des toits verts sont donc beaucoup plus intéressants dans les cas de pontages d'acier ou de béton, là où aucun espace d'air n'est présent. Toutefois, les performances thermiques de la toiture végétale du projet du CÉUM peuvent être transposées à des constructions sans espace d'air puisque les mesures de température ont été faites à travers les différentes couches qui composent la plateforme du toit vert (de la couche des plantes à la membrane d'étanchéité).

La figure 1.1 présente une coupe du toit du projet du CÉUM avec la nouvelle structure superposée à celle existante.

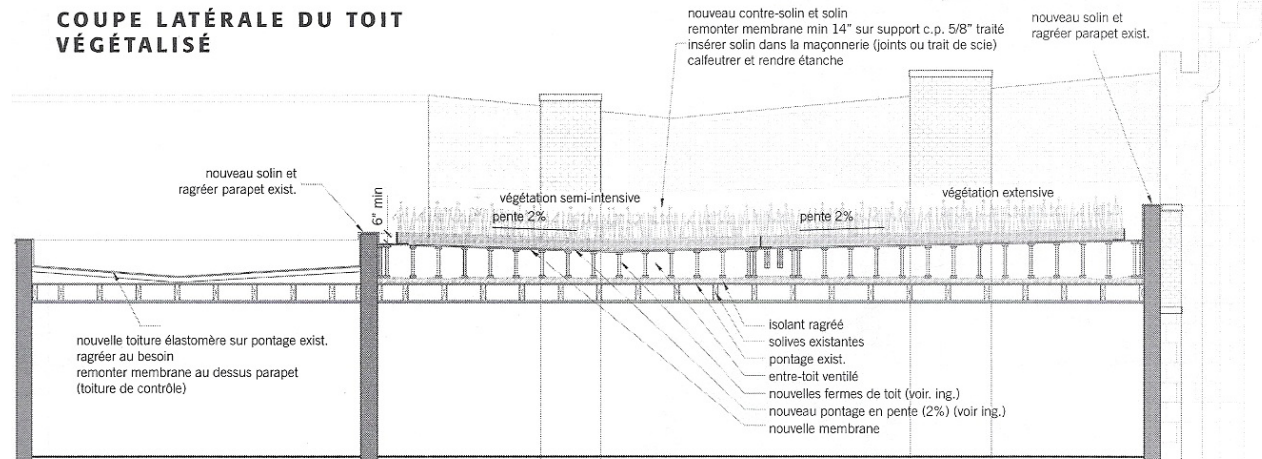


Figure 1.1 Structure du toit du CÉUM.

1.4 AMÉNAGEMENT

Tel que mentionné plus haut, le toit étudié a été divisé en trois sections distinctes afin d'évaluer l'impact d'un terreau humide comparativement à celui d'un terreau sec (toit vert irrigué versus non irrigué), le tout en référence avec un toit plat conventionnel. Le découpage de ces sections a été fait tel que présenté dans la vue de plan de la figure 1.2.

La zone de référence consiste en une toiture à membrane élastomère typique qui en assure l'étanchéité et qui est placée directement sur un contre-plaqué au dessus de la couche d'isolant thermique. Ce système bicouche élastomère est soudé et recouvert de gravier pour en assurer la stabilité.

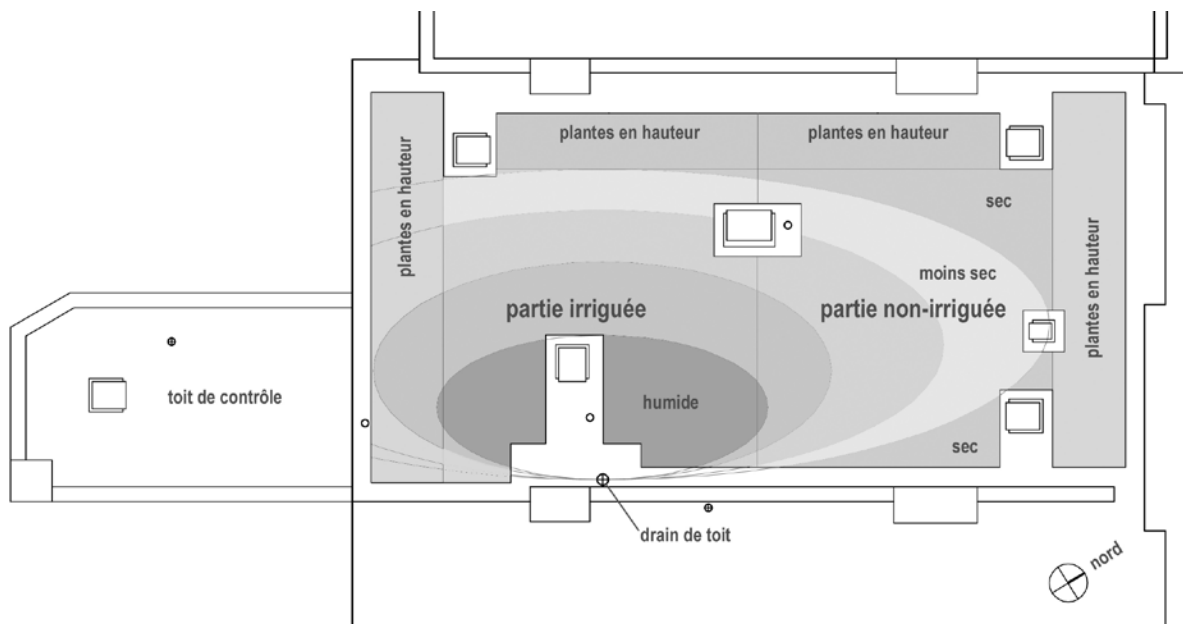


Figure 1.2 Les trois zones du toit du CÉUM.

Les deux sections de toit végétal ont été ajoutées par-dessus la membrane élastomère et ont été conçues selon le système *Sopranature™* de la compagnie *Soprema*. Ce système consiste en quatre éléments de base à savoir :

1. une membrane de drainage (*Sopradrain 10-G™*) composée de panneaux gaufrés de polyéthylène haute densité, d'une épaisseur totale de 10mm,
2. un matelas capillaire (*Aquamat Jardin™*) composé d'une membrane anti-racines, un système d'irrigation intégré goutte à goutte, un matelas de rétention d'eau et une membrane géotextile ; le tout d'une épaisseur très faible,
3. 150 mm (6 pouces) de substrat de culture léger (*Sopraflor™*) fait de brique concassée, de sable et de compost,
4. la végétation.

La figure 1.3 montre une coupe typique du système *Sopranature™* et ses différents éléments.

1.5 PLANTES

Dans le cas de la section du toit qui n'est pas irriguée, les plantes ont été sélectionnées pour leur résistance à la sécheresse. Les variétés de sedum qui sont des plantes à feuilles grasses et certains petits arbustes et fleurs ont donc été sélectionnés. Le terreau requis doit être riche en minéraux et son contenu organique possède une faible rétention d'eau.

Pour ce qui est de la section du toit qui est irriguée, une plus grande variété de plantes est disponible compte tenu de l'apport d'eau qui est assuré par un système d'irrigation intégré. Ainsi, les graminées et autres vivaces variées ont été utilisées. Dans ce cas-ci, le contenu organique du terreau est plus important que pour la section non-irriguée. La figure 1.4 ci-dessous présente les deux types de substrat utilisés dans le projet de toit vert du CÉUM.

Les figures 1.5 et 1.6 montrent la plateforme expérimentale du projet du CÉUM une fois les plantes installées.

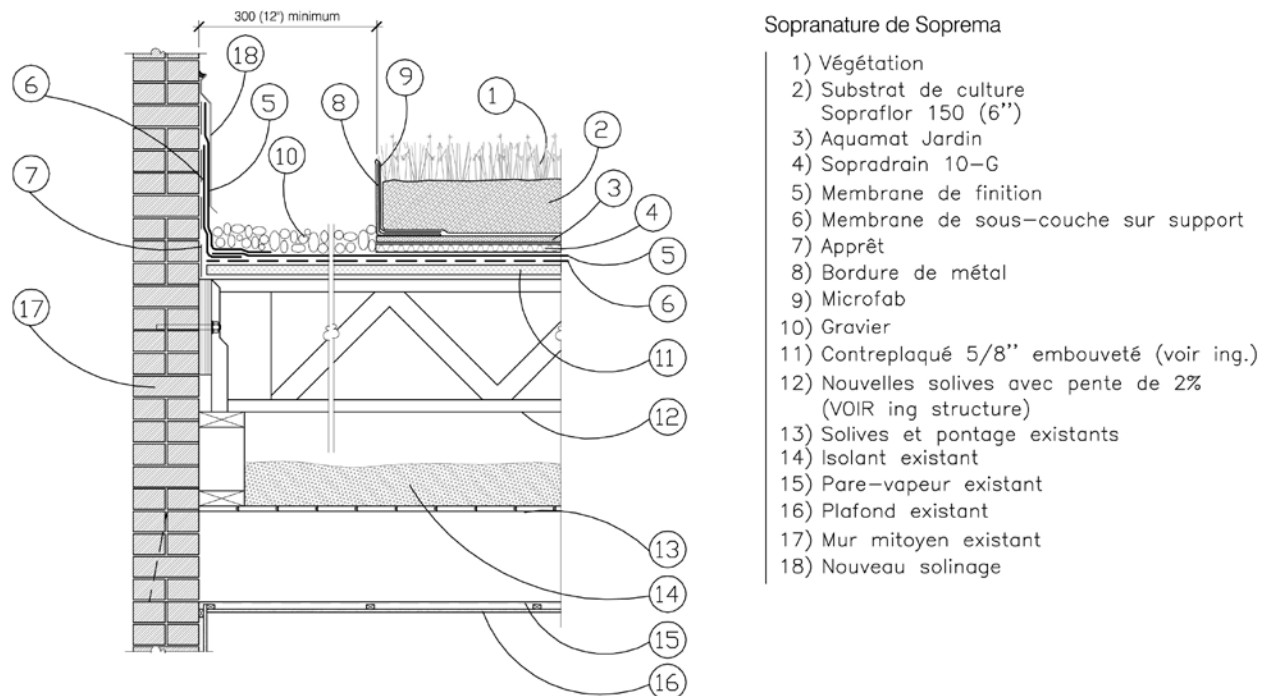


Figure 1.3



Figure 1.4 Les deux types de substrat du toit du CÉUM.

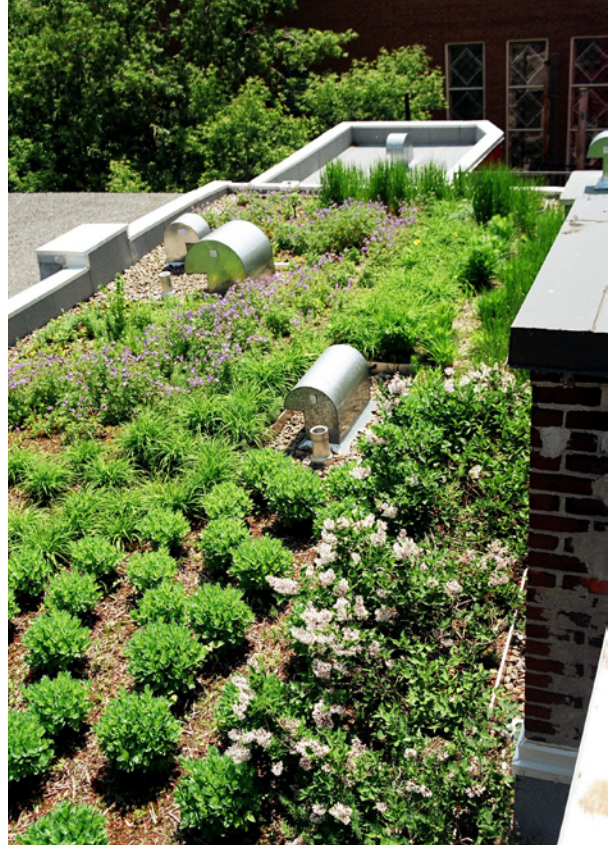


Figure 1.5 Toit vert du CÉUM – période estivale.



Figure 1.6 Toit vert du CÉUM – période automnale.

1.6 PARAMÈTRES ENREGISTRÉS

Afin d'étudier la performance thermique du toit vert, plusieurs sondes ont été intégrées à la construction. Ces sondes ont permis d'enregistrer la température à plusieurs niveaux du toit ainsi que l'échange de chaleur entre le bâtiment et son environnement. Une station météorologique fixe a aussi été installée afin d'obtenir en tout temps la température extérieure ambiante et le taux d'humidité relative dans l'air.

Ces valeurs permettront d'évaluer l'influence des conditions climatiques sur la performance thermique du toit.

Chacune des trois sections du toit (référence, toit vert non irrigué et toit vert irrigué) possède deux locations d'enregistrement de températures divisées en 7 niveaux tels que présentés à la figure 1.7.

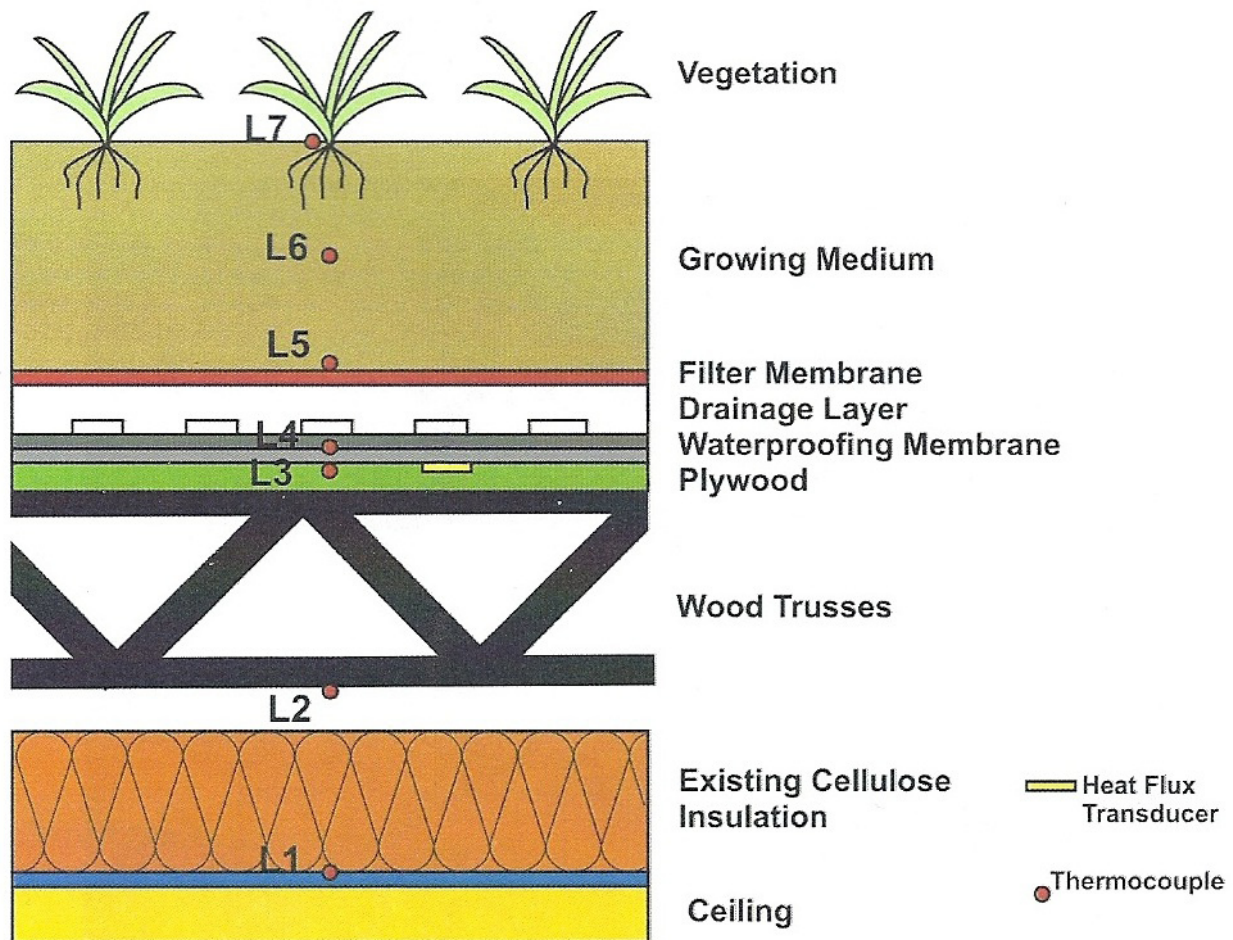


Figure 1.7 Niveaux des sondes pour le toit du CÉUM.

1.7 MÉTHODOLOGIE

Toutes les sondes ont été raccordées à un système d'acquisition de données en continu et ont enregistré des mesures de température, flux de chaleur et humidité relative pendant plusieurs mois, et ce à toutes les 15 minutes. Seules les données récoltées pendant l'année 2007 sont utilisées pour cette étude.

L'analyse de ces données se fera sur quatre éléments principaux à savoir : la température maximale au niveau de la membrane d'étanchéité du toit, la fluctuation de cette température de membrane et le flux de chaleur traversant le toit, ce dernier dictant la performance énergétique du toit vert.

1.7.1 Température maximale au niveau de la membrane d'étanchéité

La membrane élastomère d'une toiture plate représente un élément très important pour le bâtiment puisque c'est cette couche qui en assure la protection contre les intempéries et la pénétration de l'eau. Cette couche, souvent coûteuse, doit être remplacée ou réparée dès qu'un défaut, même minime, est décelé.

Un des avantages des toits verts souvent cité est l'augmentation de la durée de vie des membranes d'étanchéité des toitures qui utilisent cette technologie (Landreville, 2005). En effet, la diminution des températures maximales au niveau de cette dernière minimiserait les mouvements d'expansion et de contraction des membranes et contribuerait à une augmentation de la durée de vie utile de ces dernières (Bass et Baskaran, 2003).

Ainsi, le premier élément étudié est la température maximale subie par la membrane d'étanchéité. Ceci permettra, en relation avec la toiture de référence, de mettre en évidence les différences du choc thermique subi par la membrane d'étanchéité entre un toit conventionnel et un toit vert.

1.7.2 Variation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité

Un autre aspect susceptible de permettre l'augmentation de la durée de vie des membranes bitumineuses, outre la diminution de la température maximale subie par cette dernière, est la diminution des écarts entre la température maximale et la température minimale au niveau de la membrane, c'est-à-dire l'amointrissement des fluctuations de température dans la membrane d'étanchéité. Les toits verts permettraient une telle diminution et contribueraient donc à l'augmentation de la durée de vie des membranes. La toiture végétale agit comme un amortisseur qui ralentit les effets des fluctuations de la température ambiante extérieure et de l'exposition à la radiation solaire parfois forte.

Ainsi, le deuxième élément étudié sera la fluctuation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité de la toiture en fonction du temps et des conditions climatiques extérieures et ce pour chacun des trois toits (référence, toit vert non irrigué, toit vert irrigué).

1.7.3 Flux de chaleur traversant le toit

La quantité d'énergie nécessaire au maintien de conditions de température stable dans un bâtiment est directement reliée à la quantité d'énergie qui pénètre et qui quitte le bâtiment. La toiture représente une partie importante de l'enveloppe du bâtiment en ce qui concerne les échanges de chaleur de ce dernier avec l'environnement.

Dans plusieurs cas, les toits verts ont démontré leur pouvoir de « climatisation » par le processus endothermique de croissance des plantes (Palomo del Barrio, 1998). Ainsi, le flux de chaleur pénétrant la toiture d'un bâtiment qui possède une couverture végétale se voit inférieur à celui d'un même bâtiment avec une toiture conventionnelle et ce pendant les mois chauds. Aussi, lorsque la température extérieure diminue et que les heures d'ensoleillement décroissent, le toit vert peut servir d'isolant additionnel et réduire les pertes énergétiques du bâtiment.

1.7.4 Performance énergétique

La consommation énergétique d'un bâtiment, tant au niveau de la climatisation qu'au niveau du chauffage est directement reliée à la quantité de chaleur qui entre ou qui sort de son enveloppe. Tel que mentionné dans la section précédente, il a été démontré que les toits verts participent à diminuer les échanges de chaleur entre un bâtiment et son environnement. Ainsi, le toit vert ralentit l'entrée de chaleur dans le bâtiment pendant les mois les plus chauds et réduit aussi légèrement la sortie de la chaleur pendant les mois plus frais. Le quatrième élément étudié est donc la performance énergétique du toit, à savoir la quantité d'énergie économisée, tant au point de vue climatisation que chauffage.

Pour ce faire, le nombre moyen de kWh/m² entrant ou sortant de la toiture sera calculé pour chaque mois à partir du flux de chaleur mesuré à chaque 15 minutes. Cela revient donc à intégrer la courbe du flux de chaleur sur le temps ou encore à calculer l'aire sous la courbe du flux de chaleur. Le nombre quotidien de kWh/m² entrant et sortant de la toiture est donc l'intégrale de la courbe du flux de chaleur sur la durée d'une journée, à savoir 24 heures.

Une fois le nombre de kWh/m² entrant et sortant de la toiture obtenu pour chaque jour, une moyenne par mois sera calculée afin de simplifier la présentation des résultats. Ainsi une comparaison entre les différents types de toitures sera possible. Une valeur positive représente une entrée de chaleur par le toit (donc un besoin de climatisation) tandis qu'une valeur négative représente une perte de chaleur par le toit (donc un besoin de chauffage).

Pour présenter la demande en énergie nécessaire pour pallier à l'entrée ou la sortie d'énergie par la toiture du bâtiment, nous assumons qu'un système de climatisation et chauffage avec une efficacité de 100% (hypothèse conservatrice puisque aucun système n'est parfaitement efficace) consommera, pour assurer une température constante à l'intérieur du bâtiment, le même nombre de kWh que l'énergie qui est entrée ou sortie par la toiture du bâtiment et pour la même période de temps. Ainsi, si pour un mois donné il est entré 200 kWh dans le bâtiment par la toiture, nous assumons que 200 kWh ont été dépensés par le système de climatisation pour garder la température constante à l'intérieur des pièces du bâtiment. De la même façon, si 100 kWh ont été perdus par la toiture pendant un mois frais de l'automne, nous assumons que 100 kWh de chauffage ont été dépensés par le système pour conserver une température constante à l'intérieur du bâtiment.

CHAPITRE 2 > NOTIONS DE BASE

2.1 TYPES DE TOITURES VÉGÉTALES ET COMPOSANTES

On retrouve en général deux types principaux de toits verts. Le type «extensif» et le type «intensif» (figure 2.1). Le type extensif requiert un entretien minimal et ne nécessite souvent pas d'apport en eau autre que les précipitations normales. Sur ce type de toit, l'épaisseur de terre est faible et la végétation implantée sera choisie en fonction de sa résistance aux conditions de sécheresse et aux maladies.

Le toit vert de type intensif nécessite quant à lui beaucoup plus d'entretien et requiert la plupart du temps un système complet d'irrigation. L'épaisseur de terre est grande et la variété des plantes y est beaucoup plus importante. Ce type de toit peut ressembler beaucoup plus à un jardin dans lequel pousseront plantes, arbustes et même des arbres.

Les toitures vertes extensives ont l'avantage d'être meilleur marché pour couvrir de grandes surfaces et conviennent même à des toits avec une pente de 0 à 30 degrés. De plus, l'expertise technique nécessaire à son installation est moins cruciale puisque les

charges que supportera le toit sont plus faibles (moins de terre) et aucun système d'irrigation n'est nécessaire. Par contre, son efficacité énergétique et son pouvoir de rétention des eaux de pluies sont moindres. Aussi, le choix des plantes est plus restreint et il est rarement possible d'utiliser ce type de toit pour les loisirs ou autres fonctions (terrasse, jardin, etc.).

Les toitures vertes intensives permettent quant à elles une variété plus grande de plantes et d'habitats et possèdent de bonnes propriétés isolantes. Leur efficacité énergétique et leur pouvoir de rétention des eaux de pluies sont supérieurs à ceux des toits extensifs. Par contre, l'expertise technique requise pour l'implantation d'un tel toit est beaucoup plus complexe puisque les charges sont élevées et plusieurs systèmes sont requis. Il va de soi que ce type de toit est beaucoup plus onéreux (Landreville, 2005).

Dépendamment du type de toit, le nombre de couches composant le système de toiture verte peut varier. Toutefois, on retrouve dans tous les cas une couche dite structurale, une couche de substrat de culture et une couche de plantes.

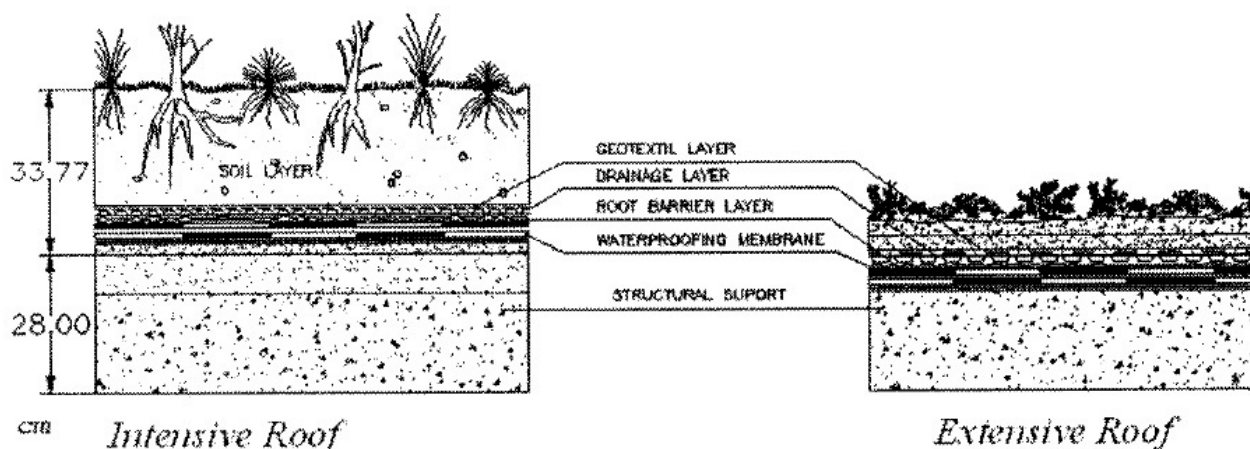


Figure 2.1 Exemple des deux types de toits verts. Tirée de Saiz Alcazar (2004, p. 7)

2.2 LES TOITURES VÉGÉTALES ET LEURS AVANTAGES

L'installation d'une toiture végétale sur un bâtiment peut avoir des impacts à l'échelle du bâtiment lui-même comme l'augmentation de l'efficacité énergétique du bâtiment ou la prolongation de la vie utile de la membrane d'étanchéité de la toiture, mais aussi à des échelles plus grandes, comme celle d'une ville entière par exemple. En effet, la diminution de la quantité d'eau de ruissellement déversée dans les égouts ou la réduction de l'effet d'îlot de chaleur urbain représentent des avantages offerts par les toits verts et dont les bénéfices sont distribués à l'ensemble de la société. D'autres avantages tels que l'ajout de surface habitables ou cultivables, la captation des poussières en suspension dans l'air ou la création d'habitats pour la faune et la flore urbaine représentent des contributions significatives des toitures végétales à la qualité de vie des résidents (Connelly et Liu, 2006).

2.2.1 Efficacité énergétique des bâtiments

Un des avantages les plus étudiés des toits verts est l'efficacité énergétique de ces derniers. En effet, la présence d'un toit vert sur un bâtiment peut engendrer une diminution remarquable des gains de chaleur de ce dernier pendant les mois d'été et peut contribuer à augmenter l'isolation du bâtiment pendant les mois frais (Christian, Petrie, 1996). Selon les statistiques (Landreville, 2005) une baisse de 3°C à 7°C de la température intérieure d'un bâtiment représente des économies en énergie de climatisation de l'ordre de 10%. Plusieurs études ainsi que leurs résultats sont présentés au chapitre 2 de ce document.

2.2.2 Prolongation de la durée de vie des toitures

Grâce à la réduction des températures extrêmes, des fluctuations de température au niveau de la membrane d'étanchéité et à la protection contre les rayons ultra-violet, l'implantation d'un toit vert peut augmenter la vie utile de la membrane d'étanchéité. L'étude de Liu et Baskaran (2003) sur un toit vert extensif installé à Ottawa montre une réduction de 45°C de la température maximale de la membrane dans le cas d'un toit vert extensif ainsi qu'une diminution de la fluctuation de cette température (11°C de fluctuation pour le toit vert contre 45°C pour le toit de référence). Des résultats similaires ont été obtenus par Connelly et Liu (2005) sur un toit vert extensif expérimental installé en Colombie-Britannique. Cette stabilisation de la température de la membrane d'étanchéité du toit diminue les stress thermique dans la membrane et ralentit le vieillissement des éléments bitumineux, ce qui pourrait donc permettre une vie utile plus longue. Ceci reste encore à valider à l'aide d'une étude à long terme, tel qu'énoncé dans la recherche de Liu et Baskaran (2003).

2.2.3 Modération de l'effet d'îlot de chaleur urbain

La présence de plantes sur les toits d'édifices permet de dissiper une certaine portion de la chaleur absorbée et réémise par la grande quantité de béton et d'asphalte qu'on retrouve dans les grands centres urbains. De plus, les plantes captent les poussières en suspension dans l'air et enrichissent cet air en oxygène grâce à leurs fonctions biologiques (Liu et Baskaran, 2003).

En plus d'un confort accru, la baisse de seulement 1°C de l'effet d'îlot de chaleur urbain entraînerait une diminution de la consommation énergétique globale de 5% selon Krayenhoff et al. (2002). Dans leur étude, les auteurs présentent les résultats expérimentaux d'une modélisation numérique du climat de la région métropolitaine de la ville de Toronto. Le but de cette modélisation est de montrer les effets bénéfiques des toits verts et des toitures réfléchissantes sur l'îlot de chaleur urbain observé à Toronto.

2.2.4 Réduction des eaux de ruissellement dans les égouts

Une étude allemande démontre que 75% des eaux pluviales peuvent être retenues par un toit vert (Fisher, 2004). De plus, une étude menée par le CNRC (Conseil national de recherches Canada) à Ottawa (Boivin, 2002) et comparant le pouvoir de rétention des eaux de pluies de différents toits verts montre que ces derniers peuvent retarder le début du ruissellement du toit, réduire le débit de ce ruissellement et finalement diminuer substantiellement le débit et le volume total envoyé à l'égout. Ainsi, les plantes et la couche de terre d'un toit vert servent de réservoir aux eaux de pluies et contribuent à ne pas surcharger les stations de traitement des eaux usées lors de fortes précipitations. La capacité de rétention des eaux de pluies des toits verts dépend du type de plantes et surtout de l'épaisseur et le niveau de saturation du substrat de culture qui est utilisé (Boivin, 2002).

CHAPITRE 3 > RÉSULTATS OBTENUS À MONTRÉAL

Dans cette section, nous présentons les résultats obtenus par l'analyse des données recueillies tout au long de l'année 2007 dans les différentes couches de la toiture du CÉUM. Seules les données continues de l'année 2007 sont considérées, c'est-à-dire du 16 février au 31 décembre 2007.

Quatre éléments majeurs qui caractérisent la performance thermique des toits verts sont donc étudiés : la température maximale rencontrée par la membrane d'étanchéité, la fluctuation de cette température, les flux de chaleur traversant la toiture et la performance énergétique qui en découle. Ces quatre éléments se retrouvent dans les études similaires menées au Canada et présentées plus haut.

Les résultats sont présentés en deux périodes distinctes à savoir la période estivale et la période automnale. La période estivale est caractérisée par les plus hautes températures et l'ensoleillement maximal. De plus, c'est durant cette période que les plantes sont le plus développées. La période automnale, quant à elle, est caractérisée par des températures légèrement plus basses, des heures d'ensoleillement plus courtes et un couvert végétal en déclin.

Afin de représenter ces périodes, des journées typiques ont été sélectionnées pour leurs conditions de température et humidité proches de la moyenne de la période visée. Ces journées montrent donc des conditions représentatives de ces périodes. Pour la période automnale, la journée du 3 octobre a été sélectionnée tandis que la journée du 22 juillet a été choisie pour représenter la période estivale.

3.1 TEMPÉRATURE MAXIMALE AU NIVEAU DE LA MEMBRANE D'ÉTANCHÉITÉ

Les figures 3.1 et 3.2 présentent la température enregistrée au niveau de la membrane d'étanchéité pour les trois systèmes de toiture et pour une journée typique de la période automnale (3 octobre 2007) et estivale (22 juillet 2007).

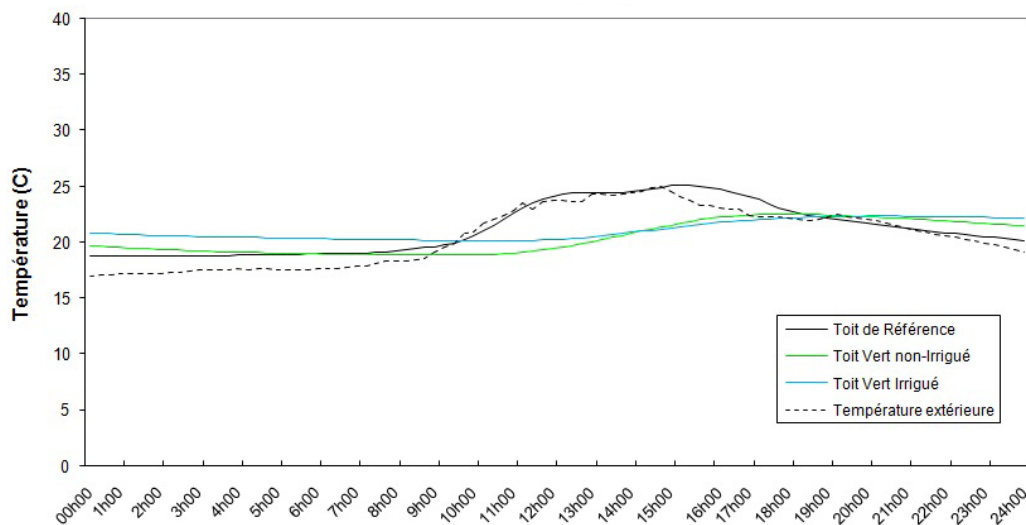


Figure 3.1 Température enregistrée au niveau de la membrane d'étanchéité pour une journée automnale typique.

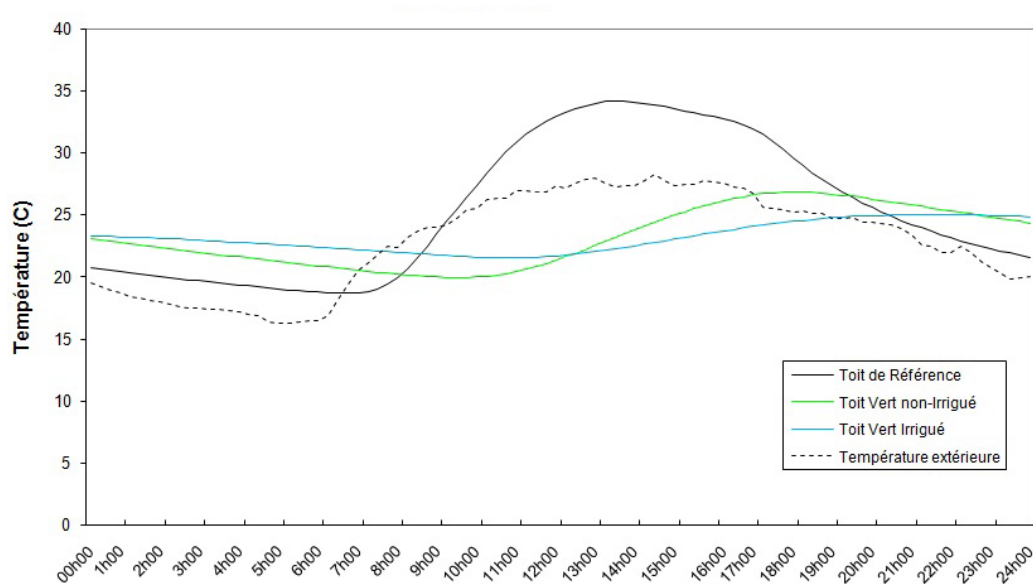


Figure 3.2 Température enregistrée au niveau de la membrane d'étanchéité pour une journée estivale typique.

La figure 3.3 présente les résultats en termes de température maximale mensuelle moyenne mesurée au niveau de la membrane d'étanchéité et pour toute la durée de l'étude et pour les trois types de toiture. Le toit vert non irrigué a permis de faire passer la

température maximale de la membrane de 36.5°C à 27.3°C, ce qui représente une diminution de 25%. Le toit vert irrigué a quant à lui enregistré une diminution de 27% avec un maximum moyen de 26.7°C.

	Toit de Référence	Toit Vert Non Irrigué	Toit Vert Irrigué	Extérieur
Température maximale (moyenne mensuelle)	36.5°C	27.3°C	26.7°C	28.3°C
Réduction/Référence	N/A	-25%	-27%	N/A

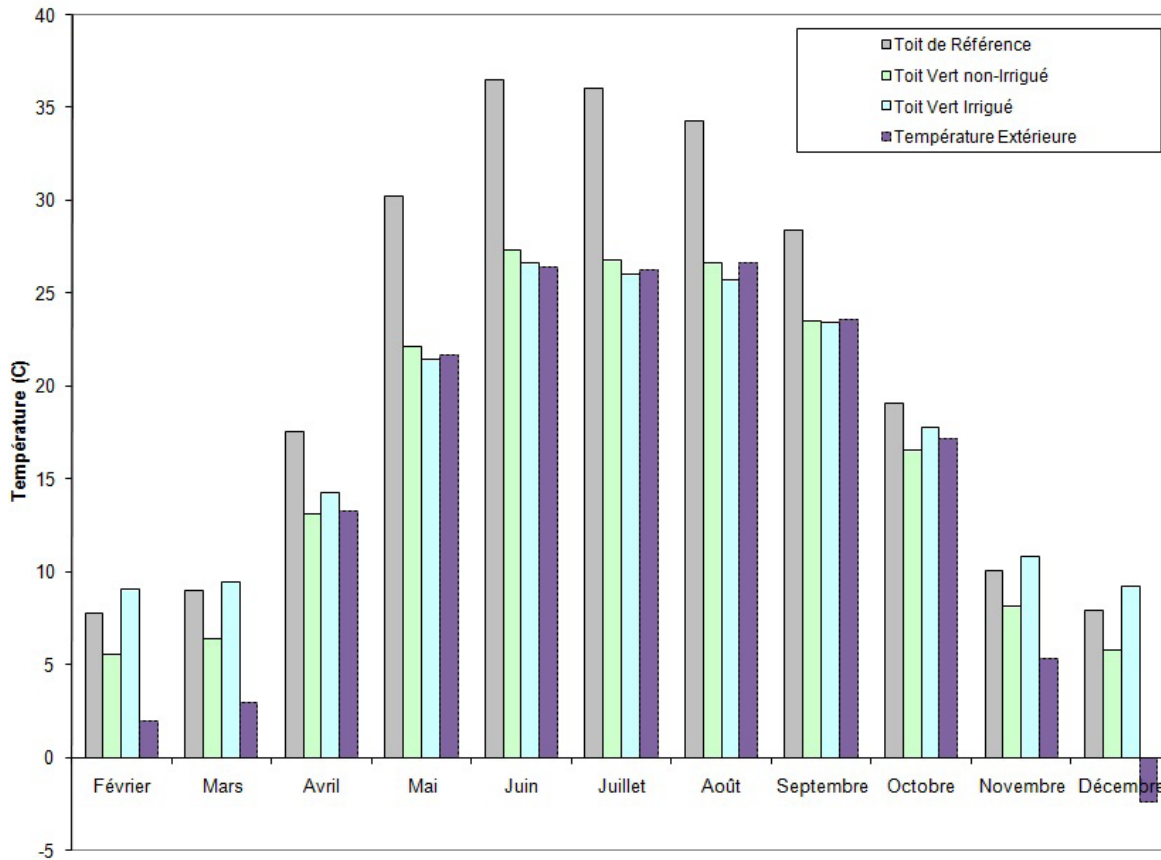


Figure 3.3 Températures maximales mensuelles moyennes au niveau de la membrane d'étanchéité

3.2 VARIATION DE LA TEMPÉRATURE AU NIVEAU DE LA MEMBRANE D'ÉTANCHÉITÉ

Les fluctuations de température subies par la membrane d'étanchéité d'une toiture induisent des stress à l'intérieur de cette dernière et ces contraintes accélèrent le vieillissement de la membrane. Le deuxième élément étudié dans cette recherche est donc la fluctuation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité et l'impact de l'installation d'un toit vert sur cette fluctuation.

La figure 3.4 présente la fluctuation mensuelle moyenne pour chaque type de toit. Ainsi, le toit vert non-irrigué a enregistré une fluctuation moyenne de 6.0°C au mois de juin contre 17.8°C pour le toit de référence, cela représente une diminution de 66% de la fluctuation.

Le toit vert irrigué a quant à lui enregistré une fluctuation moyenne de 4.0°C au mois de juin ce qui représente une diminution de 77% par rapport au toit de référence. Il est à noter que pour le mois de juin, la fluctuation moyenne de la température extérieure a été de 11.4°C.

	Toit de Référence	Toit Vert Non Irrigué	Toit Vert Irrigué	Extérieur
Température maximale (moyenne mensuelle)	17.8°C	6.0°C	4.0°C	11.4°C
Réduction/Référence	N/A	-66%	-77%	N/A

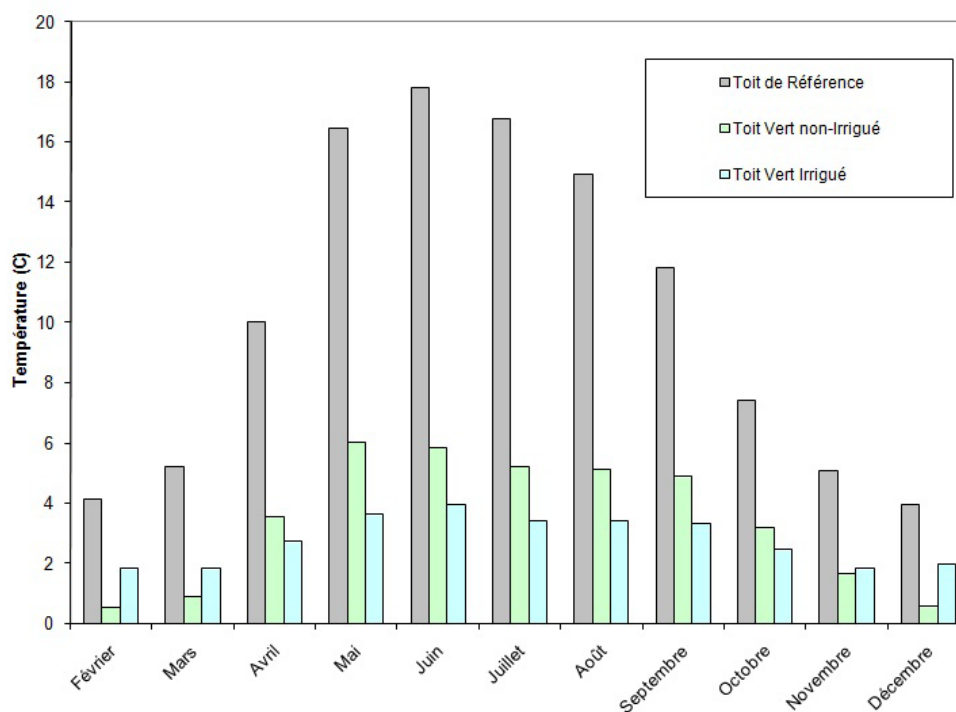


Figure 3.4 Variation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité.

3.3 FLUX DE CHALEUR TRAVERSANT LA TOITURE

Le troisième élément étudié est le flux de chaleur traversant le toit. Les sondes de mesure du flux de chaleur ont été calibrées de telle sorte qu'une valeur négative représente une perte de chaleur par le toit du bâtiment tandis qu'une valeur positive représente un gain de chaleur.

Les figures 3.5 et 3.6 présentent les courbes du flux de chaleur traversant les trois types de toit pour une journée automnale et estivale typique à savoir le 3 octobre 2007 et le 22 juillet 2007.

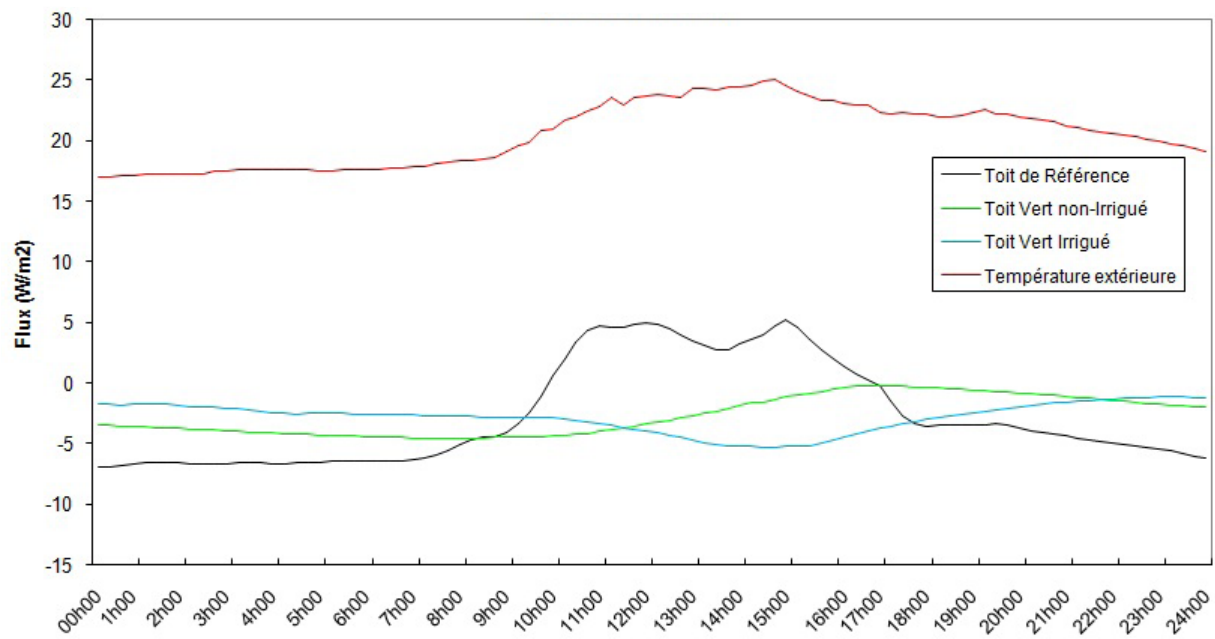


Figure 3.5 Flux de chaleur traversant la toiture pour une journée automnale typique (3 octobre 2007).

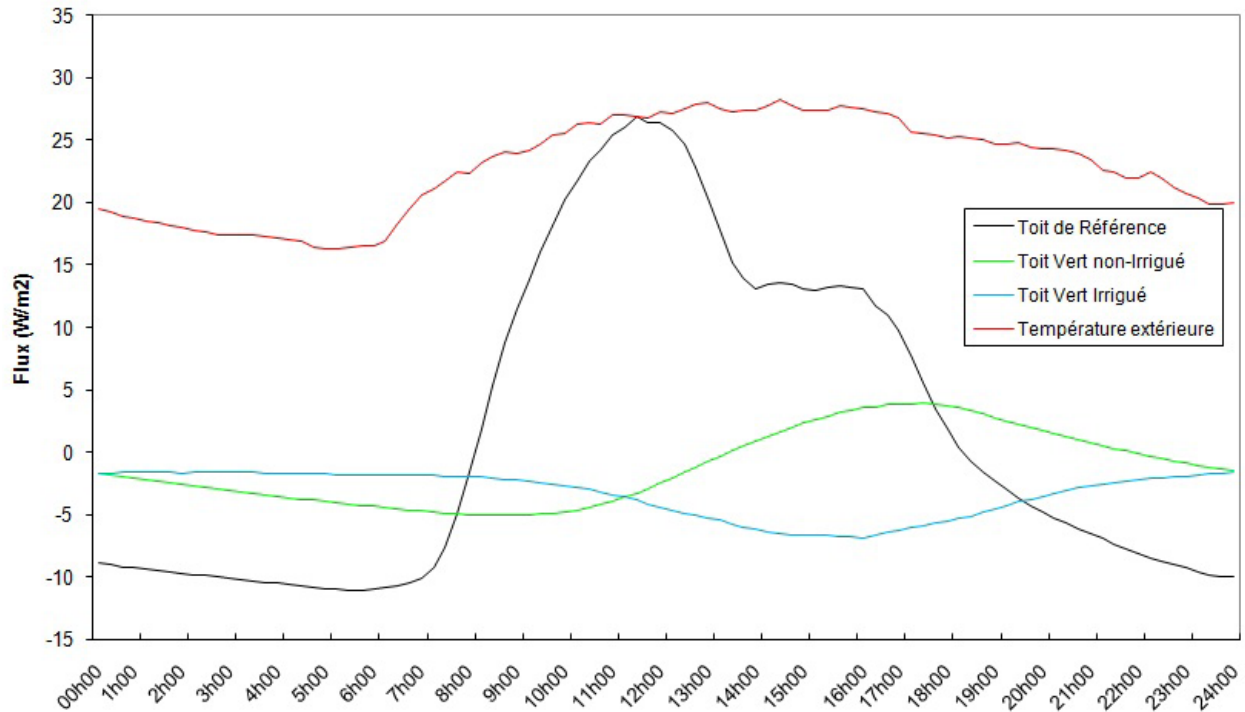


Figure 3.6 Flux de chaleur traversant la toiture pour une journée estivale typique (22 juillet 2007).

La figure 3.7 présente les flux de chaleur moyens mensuels traversant les trois types de toitures. Cette figure permet une vue d'ensemble sur les pertes et les gains de chaleur des trois types de toits étudiés et ce, pour toute la durée de l'étude.

Le toit vert non irrigué a grandement diminué les gains de chaleur. En effet, le flux mensuel moyen maximal enregistré pour l'année étudiée est de +1.8 W/m² et est rencontré au mois de juin. Tout comme pour le toit de référence, le flux négatif maximal (pertes de chaleur) est rencontré au mois de mars avec une valeur de -15.1 W/m². Le toit vert non irrigué a permis l'entrée de chaleur à un taux moyen annuel de +0.7 W/m² et a laissé la chaleur sortir à un taux

annuel moyen de -7.8 W/m². En comparaison avec le toit de référence, ces valeurs représentent une réduction de plus de 83% pour les gains de chaleur et une réduction de presque 32% pour les pertes de chaleur.

Le toit vert irrigué a lui aussi beaucoup diminué les gains de chaleur et significativement contribué à la réduction des pertes de chaleur. Le flux mensuel moyen positif et maximal est lui aussi enregistré au mois de juin avec une valeur d'à peine +0.4 W/m². Le flux négatif maximal (pertes de chaleur) est rencontré au mois de mars, tout comme les deux autres toits, avec une valeur sensiblement moins élevée que celle du toit vert non irrigué avec -12.0 W/m².

	Toit de Référence	Toit Vert Non Irrigué	Toit Vert Irrigué
Flux de chaleur maximal mensuel moyen (gains de chaleur)	+10.2 W/m ²	+1.8 W/m ²	+0.4 W/m ²
Réduction/Référence	N/A	82.3%	96.2%
Flux de chaleur maximal mensuel moyen (pertes de chaleur)	-18.0 W/m ²	-15.1 W/m ²	-12.0 W/m ²
Réduction/Référence	N/A	15.8%	33.0%

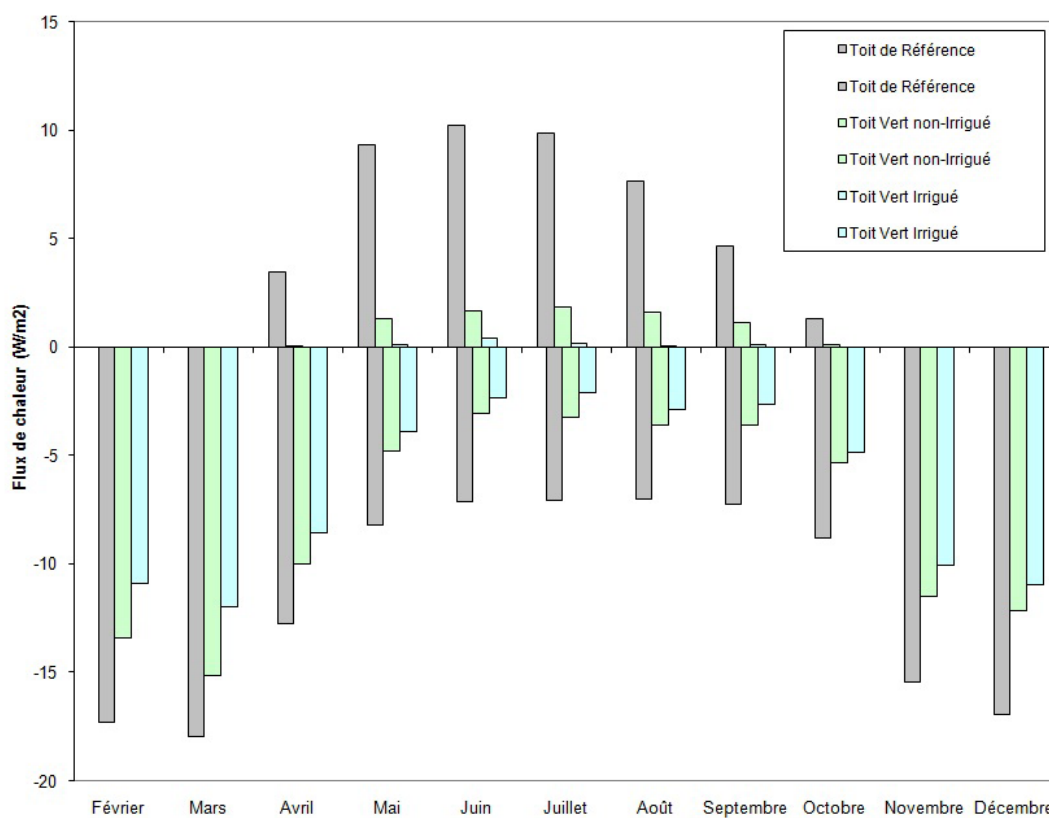


Figure 3.7 Flux de chaleur mensuel moyen traversant la toiture.

3.4 PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE

Le dernier aspect étudié est la performance énergétique, à savoir l'impact du type de toit (référence, toit vert non irrigué ou toit vert irrigué) sur la consommation énergétique du bâtiment.

3.4.1 Climatisation

La figure 3.8 compare la demande moyenne mensuelle en énergie de climatisation pour les trois types de toiture étudiés. Ainsi, seuls les flux de chaleur positifs (pénétration de chaleur) sont pris en compte et on considère qu'un kWh qui pénètre dans le bâtiment par la toiture doit être compensé par un même kWh d'énergie de climatisation.

La figure 3.8 montre clairement la diminution des besoins d'énergie de climatisation dus au type de toiture. Ainsi, le toit de référence a requis la dépense d'énergie de climatisation durant 7 mois sur les 11 étudiés pour l'année 2007. Le toit vert non irrigué a permis de diminuer de presque 91 % la demande en énergie de climatisation due au toit. Le toit vert irrigué quant à lui a presque annulé cette demande avec une réduction de presque 99 %.

	Toit de Référence	Toit Vert Non Irrigué	Toit Vert Irrigué
Demande mensuelle moyenne en énergie de climatisation	0.031 kWh/m ²	0.003 kWh/m ²	0.000 kWh/m ²
Réduction/Référence	N/A	90.8%	98.9%

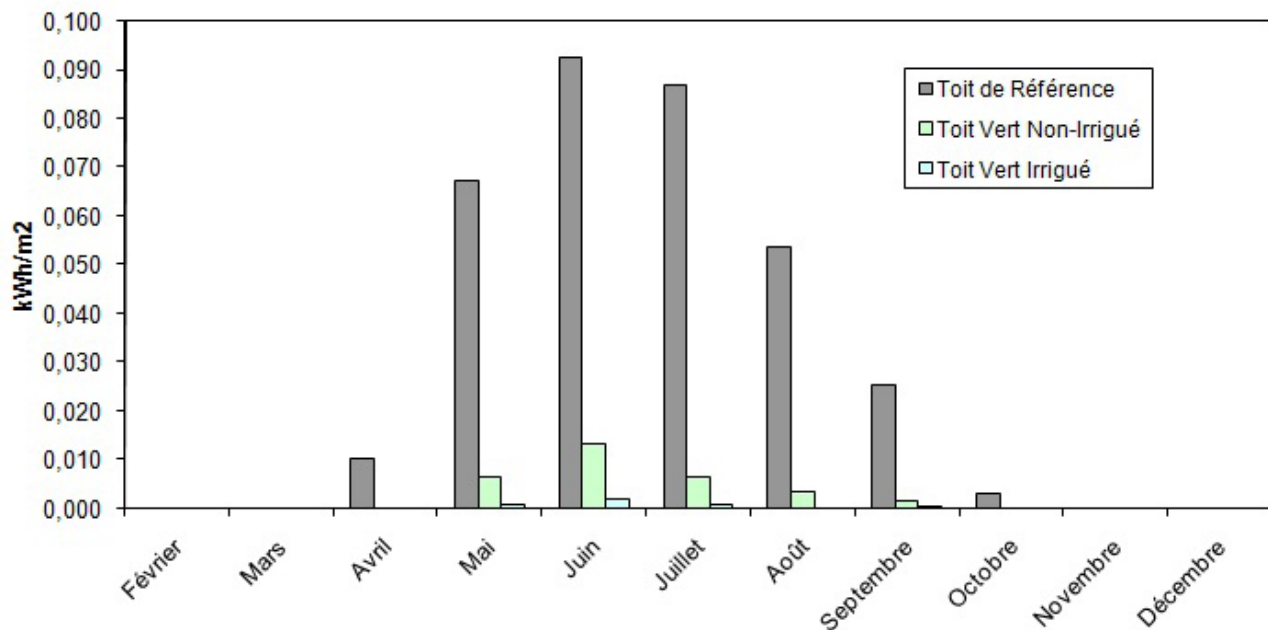


Figure 3.8 Demande d'énergie de climatisation due à l'entrée de chaleur par le toit.

3.4.2 Chauffage

La figure 3.9 présente quant à elle la demande moyenne mensuelle en énergie de chauffage pour conserver une température stable à l'intérieur du bâtiment. Ainsi, seuls les flux de chaleur négatifs (pertes de chaleur) sont pris en compte et on considère qu'un kWh qui quitte le bâtiment par la toiture doit être compensé par un même kWh d'énergie de chauffage.

La figure 3.9 montre une diminution de la demande d'énergie de chauffage par les deux toits verts comparativement au toit de référence. Par contre on note que la diminution n'est pas aussi importante que pour l'énergie de climatisation. Le toit vert non irrigué a enregistré une diminution de plus de 27% et le toit vert irrigué a permis une diminution de plus de 38% de l'énergie de chauffage due aux pertes de chaleur par le toit.

	Toit de Référence	Toit Vert Non Irrigué	Toit Vert Irrigué
Demande mensuelle moyenne en énergie de chauffage	0.249 kWh/m ²	0.181 kWh/m ²	0.154 kWh/m ²
Réduction/Référence	N/A	27.4%	38.3%

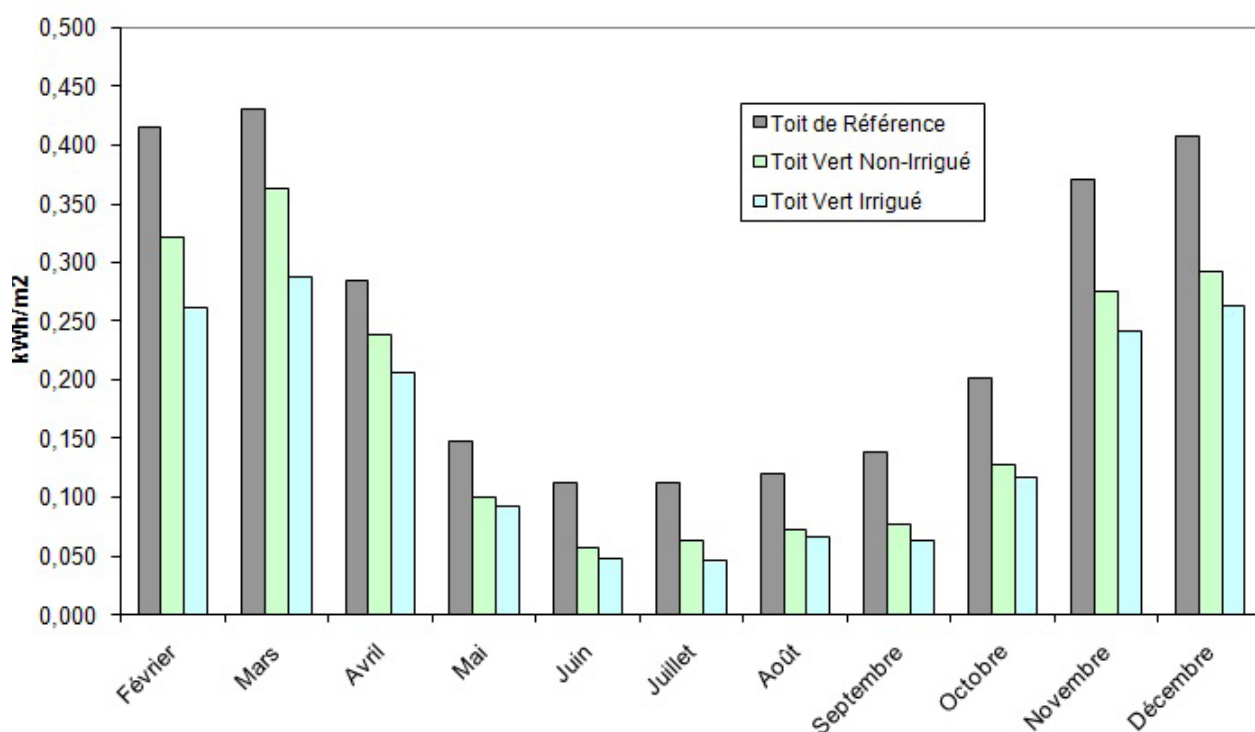


Figure 3.9 Demande d'énergie de chauffage due à la sortie de chaleur par le toit.

3.4.3 Énergie cumulative

Finalement, la figure 3.10 présente l'énergie cumulative dépensée pour conserver des conditions de température constante à l'intérieur du bâtiment et ce, pour chaque type de toiture étudié. L'énergie cumulative est la somme de l'énergie de climatisation et de chauffage dépensée à chaque mois.

Le toit vert non irrigué a diminué de plus de 37% la consommation d'énergie nécessaire à la conservation de conditions de température constante à l'intérieur du bâtiment. Le toit vert irrigué a quant à lui presque coupé de moitié la consommation énergétique due aux échanges de chaleur à travers la toiture avec une diminution de plus de 47% par rapport au toit de référence.

	Toit de Référence	Toit Vert Non Irrigué	Toit Vert Irrigué
Demande énergétique totale (année 2007)	77.71 kWh/m ²	48.43 kWh/m ²	41.07 kWh/m ²
Réduction/Référence	N/A	37.7%	47.2%

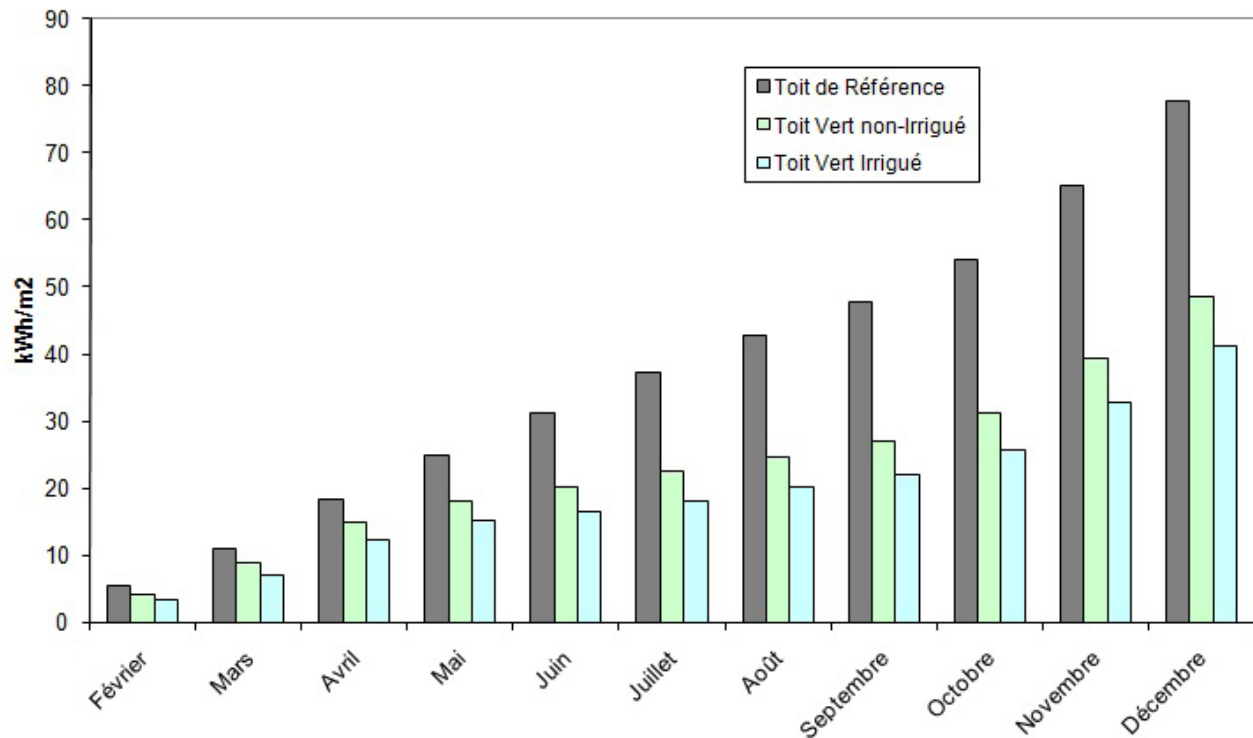


Figure 3.10 Demande totale cumulative d'énergie due à l'entrée et sortie de chaleur par le toit.

CHAPITRE 4 > RÉSULTATS OBTENUS AILLEURS AU CANADA

La performance thermique des toits verts a été évaluée expérimentalement en plusieurs endroits du monde sur des bâtiments existants. Des toits expérimentaux exclusivement bâtis pour la recherche ont aussi été mis sur pieds afin d'étudier le comportement thermique des toits verts. C'est le cas du toit de l'institut de recherche en construction du CNRC à Ottawa en Ontario (le FRF – *Field Roof Facility*), du toit de l'Université BCIT (*British Columbia Institute of Technology*) à Vancouver en Colombie-Britannique (le GRRF – *Green Roof Research Facility*) et du toit expérimental du CNRC à Toronto en Ontario (le ENCC – *Eastview Neighbourhood Community Centre*).

Tel que mentionné plus haut, les résultats obtenus sur la plateforme expérimentale de Montréal seront comparés aux études canadiennes similaires. Les résultats obtenus dans ces études sont résumés ci-dessous.

4.1 FRF – FIELD ROOF FACILITY, OTTAWA, ON.

L'étude du FRF, menée par Bass et Baskaran (2003) a été mise en place en 2000 afin de quantifier les performances thermiques et l'efficacité énergétique des toits verts au Canada. Le FRF est le premier site expérimental instrumenté au pays contenant à la fois une plateforme de toiture végétale et de toiture conventionnelle à membrane bitumineuse. Le CNRC a construit ces installations d'une superficie de 800 pi² sur son campus d'Ottawa.

Le toit du FRF a été divisé en deux parties égales : une avec un toit vert extensif, l'autre avec une toiture standard de couleur foncée. L'étanchéité du toit de référence et du toit vert est assurée par une membrane bitumineuse. La toiture végétale expérimentale se compose ensuite d'une couche de drainage en panneaux de polystyrène expansé, d'une membrane filtre en polyéthylène/polyester puis de 150 mm de terreau allégé et irrigué. Les plantes utilisées se composent de fleurs sauvages natives de la province de l'Ontario et plusieurs variétés de sedums que l'on retrouve communément dans les systèmes de toits verts.

L'étude du toit vert de la plateforme expérimentale du FRF d'Ottawa a obtenu les résultats suivants quant à la différence entre le toit de référence et le toit vert :

1. Température maximale membrane : 64% de réduction (25°C versus 70°C)
2. Variation température membrane : 86% de réduction (7°C versus 50°C)
3. Performance énergétique
 - 90% de réduction de l'énergie de climatisation (pour le toit seulement)
 - 15% de réduction de l'énergie de chauffage (pour le toit seulement)



Figure 4.1 FRF d'Ottawa.

4.2 GRRF – GREEN ROOF RESEARCH FACILITY, VANCOUVER, CB.

En 2003, une étude similaire au FRF d'Ottawa a été menée à Vancouver en Colombie-Britannique (CB) au BCIT conjointement avec le CNRC sur une plateforme d'étude appelée GRRF (*Green Roof Research Facility*).

Le GRRF est un bâtiment expérimental d'une superficie de 100 m² dédiée à la recherche et à la prise de données pour la rétention des eaux de pluies et la performance thermique des toits verts. Cette plateforme est située dans une zone industrielle de Vancouver où aucun bâtiment ni aucune végétation n'empêche un ensoleillement total de la toiture et ce, en tout temps dans l'année. Le toit du GRRF a été divisé en trois sections de superficies égales : une section de référence sans toit vert et deux sections de toit vert avec une épaisseur de substrat de culture et des espèces de plantes différentes. Le premier type de toit vert, appelé GR-1, a une épaisseur de substrat de culture de 75 mm sur laquelle ont été plantés des sedums seulement. Le deuxième type, appelé GR-2, a pour sa part une épaisseur de substrat de culture

de 150 mm et des variétés d'herbes et de fétuques (*Festuca L.*), graminées dont plusieurs espèces sont cultivées comme plantes fourragères. La différence entre les deux systèmes de toits verts a pour but de permettre l'analyse des écarts amenés non pas seulement par l'épaisseur de la couche de substrat de culture, mais aussi les différences dues à la végétation plantée. Le GRRF ne possède pas de système d'irrigation permanent.

L'étude du toit vert de la plateforme expérimentale du GRRF à Vancouver a obtenu les résultats suivants quant à la différence entre le toit de référence et le toit vert :

1. Température maximale membrane :
7% de réduction (30°C vs 70°C)
2. Variation température membrane :
>90% de réduction (5°C vs 48°C)
3. Performance énergétique
 - 95% de réduction de l'énergie de climatisation (pour le toit seulement)
 - 40% de réduction de l'énergie de chauffage (pour le toit seulement)



Figure 4.2 GRRF de Vancouver

4.3 ENCC – EASTVIEW NEIGHBOURHOOD COMMUNITY CENTRE, TORONTO, ON.

Cette étude, menée en 2002 et 2003 par le CNRC en partenariat avec Environnement Canada (Liu et Bass, 2005) s'est déroulée dans la ville de Toronto sur une période de deux ans. Cette étude visait à mesurer le potentiel énergétique des toits verts extensifs, à réduire le gain de chaleur dans les bâtiments et à vérifier l'hypothèse que ce type de toiture permet de diminuer l'effet d'îlot de chaleur urbain.

La plateforme expérimentale est située en zone urbaine et est entourée de bâtiments commerciaux de faible hauteur, permettant un ensoleillement assez grand. Les 460 m² de surface de toit ont été divisés dans le sens de la longueur en deux parties égales recevant toutes deux un système de toit vert extensif léger, la structure existante du bâtiment ne permettant pas un toit vert intensif beaucoup plus lourd. La zone adjacente du toit contenant les systèmes mécaniques du bâtiment n'a pas été recouverte d'un système végétal et a servi de référence.

Le premier système de toit vert, appelé «système G», consiste en une couche composite polymérique semi-rigide assurant le rôle de couche de filtre

et de drainage. Cette couche est recouverte par une membrane servant à l'accroche des racines des plantes ainsi que 100 mm de terreau allégé (granules pâles) et irrigué.

Le deuxième système de toit vert, appelé «système S», consiste pour sa part en une couche de panneaux de polystyrène expansé servant au drainage et d'une toile géotextile. Ceci est couvert par 75 mm de terreau allégé (granules de céramique poreuse) et irrigué.

L'étude du toit vert de la plateforme expérimentale du ENCC à Toronto a obtenu les résultats suivants quant à la différence entre le toit de référence et le toit vert :

1. Température maximale membrane : >42% de réduction (38°C vs 66°C)
2. Variation température membrane : 80% de réduction (10°C vs 50°C)
3. Performance énergétique
 - 95% de réduction de l'énergie de climatisation (pour le toit seulement)
 - 23% de réduction de l'énergie de chauffage (pour le toit seulement)



Figure 4.3 ENCC de Toronto

CHAPITRE 5 > COMPARAISON DES RÉSULTATS

La performance thermique d'une toiture végétale est attribuable aux éléments qui la constituent, tels que l'épaisseur et le type de substrat de culture, les plantes et leur couverture, mais aussi à l'environnement dans lequel le bâtiment est installé. Ainsi, dans une zone exposée où l'on retrouve très peu d'ombrage et où la toiture est constamment irradiée par le soleil, les températures de pointe sont très élevées et le refroidissement éolien faible. À l'opposé, dans une zone ombragée, où de grands arbres matures côtoient le bâtiment, la toiture ne subit pas les mêmes quantités de radiations solaires, ni les mêmes températures extrêmes. De plus, la position géographique a aussi un impact certain sur la performance thermique d'un toit vert. En effet, le climat local, la quantité de précipitations, les différentes températures des saisons, la durée de l'ensoleillement et l'incidence de la radiation solaire sont toutes des variables qui influencent grandement la performance thermique

d'un toit vert et sa capacité à diminuer la quantité d'énergie utilisée pour conserver des conditions de température stable à l'intérieur du bâtiment.

Nous avons examiné les résultats expérimentaux de trois plateformes de toiture verte situées dans des villes du Canada : le FRF d'Ottawa, l'ENCC de Toronto et le GRRF de Vancouver. Bien que toutes situées à peu près à la même latitude, ces trois villes ont des climats qui peuvent différer. Les résultats expérimentaux de notre étude présentés au chapitre précédent sont ceux d'un toit situé à Montréal, ville canadienne elle aussi mais qui n'en diffère pas moins des trois autres par son climat.

Le tableau 5.1 dresse un résumé des différences entre les éléments de design de chaque toit vert étudié. Ces éléments permettront d'expliquer les différences entre les résultats de chaque étude.

Éléments de design					
Localisation	Système	Années	Superficie (m ²)	Épaisseur de substrat de culture (mm)	Irrigation
FRF, Ottawa, ON	Toit vert	2000-2001	37	150	oui
ENCC, Toronto, ON	Toit vert «System S»	2002-2003	230	75	oui
	Toit vert «System G»		230	100	oui
GRRF, Vancouver, CB	Toit vert GR1	2005	33	75	non
	Toit vert GR2		33	150	non
CÉUM, Montréal, QC	Toit Vert Non irrigué	2007	42	150	non
	Toit Vert Irrigué		42	150	oui

Tableau 5.1 Éléments de design des quatre plateformes expérimentales comparées

5.1 COMPARAISON DE LA TEMPÉRATURE MAXIMALE AU NIVEAU DE LA MEMBRANE D'ÉTANCHÉITÉ

Le tableau 5.2 et la figure 5.1 présentent les différents résultats obtenus pour ce qui est de la température maximale enregistrée au niveau de la membrane d'étanchéité pour les trois études canadiennes. Les résultats des deux types de toit du CÉUM sont aussi présentés.

On note tout d'abord que le toit du CÉUM a enregistré la plus faible température de membrane pour le toit de référence avec un maximum de 46.6°C contre des valeurs proches de 70°C pour les trois autres plateformes. Cela est probablement dû au fait que seule la toiture de référence du toit du CÉUM possède une membrane d'étanchéité recouverte d'un ballast de pierres concassées (voir section type à la figure 3.3). Ainsi, la radiation solaire se voit partiellement absorbée par le ballast, ce qui a pour effet de diminuer la quantité d'énergie emmagasinée par la membrane d'étanchéité et donc de diminuer la température ultime de cette dernière.

Une autre cause de la baisse de la température de la membrane du toit de référence est le fait que les deux zones de prise de température pour cette zone se situent juste à l'intérieur de la partie irriguée du

toit vert. Les thermocouples de cette zone étant installés directement sur la membrane élastomère du toit, il est probable que ces derniers aient bénéficié du refroidissement apporté par le passage du surplus d'eau d'irrigation, s'écoulant par la membrane de drainage et se dirigeant vers le drain principal du toit. La figure 3.8 montre la position des sondes de la partie de référence et comment ces dernières sont situées dans la partie irriguée du toit.

Il est probable que si la membrane de la partie référence du toit du CÉUM n'avait pas été recouverte du ballast de pierres concassées et que ses thermocouples avaient été installés en dehors de la zone irriguée du toit vert, la température maximale de cette membrane aurait atteint un maximum du même ordre de grandeur que les autres études.

Pour ce qui est de la température maximale atteinte par les membranes des toits verts, la différence entre les résultats est plus petite. Ainsi, pour tous les toits verts excepté le FRF d'Ottawa, la température maximale atteinte par la membrane d'étanchéité des toits verts se situe entre 30°C et 38°C. Le FRF d'Ottawa a quant à lui diminué cette température pour atteindre un maximum de seulement 25°C. On note que pour le toit du ENCC de Toronto, plus l'épaisseur de substrat de culture n'est grande, plus la diminution de température de membrane est notable. Tous les

Température maximale annuelle au niveau de la membrane d'étanchéité					
Localisation	Nom	Extérieur	Toiture de Référence	Toit Vert	
		°C	°C	°C	% Réduction
FRF, Ottawa, ON	Toit vert	35.0	70.0	25.0	64%
ENCC, Toronto, ON	Toit vert «System S»	non mentionné	66.0	38.0	42%
	Toit vert «System G»	non mentionné	66.0	36.0	45%
GRRF, Vancouver, CB	Toit vert GR1	24.7	70.0	30.0	57%
	Toit vert GR2	24.7	70.0	30.0	57%
CÉUM, Montréal, QC	Toit Vert Non irrigué	33.6	46.6	34.4	26%
	Toit Vert Irrigué	33.6	46.6	31.4	33%

Tableau 5.2 Comparaison des résultats pour la température maximale au niveau de la membrane d'étanchéité

toits verts comparés ont des systèmes d'irrigation permanents sauf la partie non irriguée du toit du CÉUM. On note alors pour ce dernier, que la présence d'irrigation permet de diminuer un peu plus la température extrême subie par la membrane d'étanchéité du toit. Cela est attribuable à l'augmentation de l'évaporation du contenu en eau dans le substrat de culture (phénomène endothermique) et à l'accroissement de la masse thermique que représente un substrat de culture humidifié de même qu'à la présence d'eau fraîche circulant sur le toit. Pour le toit du CÉUM, la diminution de température de membrane supplémentaire qu'apporte le système d'irrigation est de l'ordre de 3°C, ce qui est relativement petit compte tenu de l'investissement et de la consommation d'eau que représente un système d'irrigation.

Les pourcentages de réduction de température maximale de membrane se situent aux alentours de 40% à 60% sauf pour le toit du CÉUM avec des pourcentages plus bas de l'ordre de 25% à 30%. Comme expliqué plus haut, la température de référence de notre étude est inférieure aux autres puisqu'un ballast

est présent par-dessus la membrane d'étanchéité du toit de référence. Ainsi, la diminution de température amenée par les systèmes de toits verts est moins importante. Si nous assumons que, sans le ballast, la température maximale de la toiture de référence aurait été similaire à celle des autres études (autour de 70°C) les pourcentages de réduction de la température maximale de la membrane des toits verts du CÉUM auraient été du même ordre de grandeur que les autres études soit entre 50% et 55%.

Ainsi, les résultats obtenus par les systèmes de toits verts du CÉUM semblent en accord avec les trois autres études. L'ajout d'un toit vert permet de diminuer grandement la température maximale subie par la membrane d'étanchéité et donc ultimement de prolonger la vie utile de cette dernière. La température de la membrane d'étanchéité ne dépasse alors que très rarement la température extérieure ambiante. Le toit vert irrigué a montré la réduction la plus grande avec 33% et un maximum annuel de 31.4°C tandis que le toit non irrigué a permis une réduction de 26% avec un maximum annuel de 34.4°C.

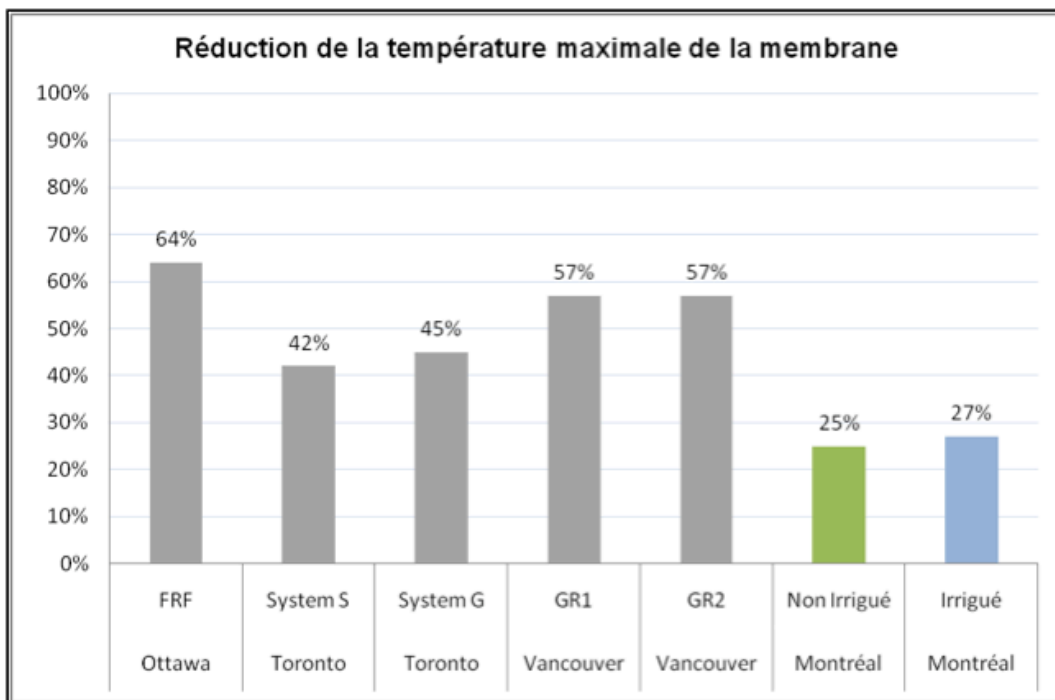


Figure 5.1 Comparaison des résultats – température maximale de la membrane

5.2 COMPARAISON DE LA VARIATION DE LA TEMPÉRATURE AU NIVEAU DE LA MEMBRANE D'ÉTANCHÉITÉ

Le tableau 5.3 et la figure 5.2 ci-dessous présentent la comparaison des résultats des quatre études canadiennes au niveau de la fluctuation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité des toitures. Tout comme pour la température maximale (voir section 5.1) et pour les mêmes raisons, c'est l'étude du CÉUM qui présente la diminution de la fluctuation la plus faible avec un maximum de 61 % pour le toit vert non irrigué et de 71 % pour le toit vert irrigué. Ainsi, tel que mentionné, la présence d'une couche de ballast rocheux au dessus de la membrane a pour effet de diminuer la température maximale atteinte par la membrane en limitant la radiation solaire absorbée par cette dernière mais aussi a pour effet d'augmenter la température minimale de la membrane puisque l'énergie emmagasinée dans le ballast pendant la journée est retransmise par conduction et radiation à la membrane pendant les heures les plus froides. Ainsi, la fluctuation de la température de la membrane du toit de référence étant déjà légèrement diminuée par l'ajout du ballast, l'effet du toit vert s'en voit légèrement effacé.

Toutefois, la fluctuation de la température des deux toits verts du CÉUM se retrouve dans le même ordre de grandeur que les autres études canadiennes. La fluctuation maximale de la température de la membrane d'étanchéité du toit vert irrigué du CÉUM est de 7.6°C ce qui est presque identique à l'étude menée à Ottawa avec une valeur de 7.0°C. Le FRF d'Ottawa est assez semblable au toit vert irrigué du CÉUM. Une même épaisseur de substrat de culture, la présence d'un système d'irrigation dans les deux cas et la proximité des deux villes (environ 165 km) ont très certainement participé au fait que les résultats de ces deux plateformes expérimentales sont semblables.

Les deux systèmes de toit vert du ENCC de Toronto démontrent une fluctuation maximale du même ordre de grandeur que celle du toit vert non irrigué du CÉUM. Dans ce cas, l'épaisseur du substrat de culture est moindre à Toronto qu'à Montréal, mais il y a présence d'un système d'irrigation. Il est probable que pour le ENCC de Toronto l'ajout d'irrigation ait compensé pour la masse thermique plus faible.

Fluctuation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité					
Localisation	Nom	Extérieur	Toiture de Référence	Toit Vert	
		°C	°C	°C	% Réduction
FRF, Ottawa, ON	Toit vert	12.0 (été)	50.0 (été)	7.0 (été)	86%
ENCC, Toronto, ON	Toit vert «System S»	non mentionné	50.0 (été)	10.0 (été)	80%
	Toit vert «System G»				
GRRF, Vancouver, CB	Toit vert GR1	10.0 (été)	48.0 (été)	5.0 (été)	89% (été)
	Toit vert GR2			2.0 (été)	96% (été)
CÉUM, Montréal, QC	Toit Vert Non irrigué	11.4 (été)	26.0 (été)	10.2 (été)	61% (été)
	Toit Vert Irrigué			7.6 (été)	71% (été)

Tableau 5.3 Comparaison des résultats pour la fluctuation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité

Tout comme pour les températures maximales présentées à la section précédente, les résultats obtenus sur le GRRF de Vancouver diffèrent des autres. En effet, le GRRF de Vancouver a enregistré la plus grande diminution de la fluctuation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité avec des valeurs supérieures à 89% et une fluctuation maximale de l'ordre de 5.0°C en été, ce qui est environ deux fois moins que dans les autres plateformes expérimentales. Outre le fait que le climat de Vancouver soit très différent des trois autres villes (Montréal, Ottawa et Toronto se situent dans un rayon d'environ 500 km tandis que Vancouver est dans une toute autre zone climatique), il serait intéressant de comparer le niveau d'irrigation des différents toits (fréquence, durée, volume). La ville de Vancouver est reconnue pour recevoir beaucoup de précipitations annuellement. Ainsi, avec un substrat de culture plus humide, les deux toits verts du GRRF de Vancouver ont une masse thermique plus grande et une évaporation accrue, ce qui diminue autant les températures maximales rencontrées par la membrane d'étanchéité que la fluctuation de ces températures et favorise la croissance des plantes.

En résumé, les résultats obtenus avec les toits verts du CÉUM semblent concordants avec ceux des autres villes canadiennes, en tenant compte des différences au niveau du design des différents systèmes et des différences au niveau du climat des quatre villes comparées. Ainsi, l'ajout d'un toit vert extensif a permis dans tous les cas de diminuer grandement la fluctuation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité. Cette diminution est de l'ordre de 60% à 90% dépendant des éléments de design du toit vert, tel que l'épaisseur de substrat de culture et la présence ou non d'un système d'irrigation. Selon les résultats présentés au tableau 5.3, plus l'épaisseur de substrat de culture est grande, plus la diminution est importante. Il en va de même pour la présence d'un système d'irrigation. Dans le cas du CÉUM, l'ajout d'un système d'irrigation a permis une diminution additionnelle d'environ 10% de la fluctuation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité du toit pendant les mois les plus chauds de l'année.

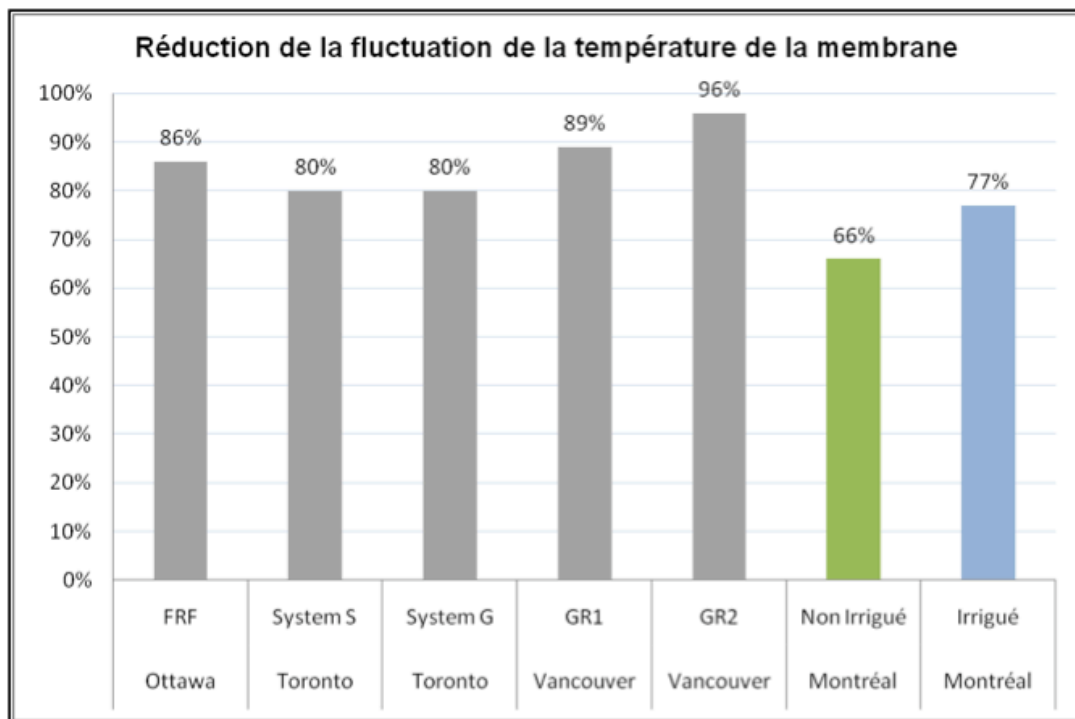


Figure 5.2 Comparaison des résultats – variation de la température de la membrane

5.3 COMPARAISON DU FLUX DE CHALEUR TRAVERSANT LE TOIT

Le flux de chaleur représente l'entrée et la sortie de chaleur par la toiture du bâtiment. La performance énergétique (quantité de chaleur traversant le toit) est donc directement reliée à cet élément. Les trois études canadiennes revues et comparées à celle du CÉUM ont toutes montré une diminution de 80% à 100% de l'entrée de chaleur dans le bâtiment pendant les mois les plus chauds et une diminution moindre des pertes de chaleur pendant les mois frais (jusqu'à 30%). Le toit vert non irrigué du CÉUM a enregistré une diminution de 83% environ des gains de chaleur (mesurée au mois où le flux entrant était le plus fort, c'est-à-dire juin) et une diminution de presque 16% des pertes de chaleur (mesurée au mois où le flux sortant était le plus fort, c'est-à-dire mars). Pour sa part, le toit vert irrigué du CÉUM a enregistré une diminution de presque la totalité des gains de chaleur dans les périodes chaudes (réduction de plus de 96%) et d'environ 33% pour les pertes de chaleur dans les mois plus frais. Tout comme pour les autres résultats déjà revus (variation et extrême de la température de la membrane d'étanchéité), les résultats du CÉUM pour le toit vert irrigué sont très proches de ceux du FRF d'Ottawa. Encore une fois, ces deux toitures étant très semblables sur le plan du design et les deux villes étant relativement proches, on peut affirmer que les résultats de Montréal sont validés par ceux obtenus à Ottawa.

Les toits verts permettent donc une grande diminution de l'entrée de chaleur à travers la toiture pendant les mois les plus chauds et peuvent parfois complètement annuler cet échange de chaleur. La masse thermique supplémentaire que représentent les différentes couches du toit vert, le phénomène d'évaporation du contenu en eau du substrat de culture, le phénomène d'évapotranspiration des plantes ainsi que l'ombrage que permettent ces dernières sont quelque-uns des éléments qui contribuent à cette réduction importante. La diminution des pertes de chaleur dans les mois les plus froids est toutefois moins importante et ne se produit que lorsque le substrat de culture n'est pas encore gelé. La masse thermique supplémentaire que représentent les couches du toit vert, et notamment la couche de substrat de culture non-gelé offre, tout comme dans les périodes chaudes, une isolation accrue de la toiture et peut diminuer ses pertes de chaleur de 15% à 30% selon le type de toit vert utilisé.

Les tableaux 5.4 et 5.5 présentent un résumé des résultats obtenus pour les études canadiennes revues quant au flux de chaleur traversant le toit.

Flux de chaleur traversant la toiture – GAINS de chaleur					
Localisation	Nom	Toiture de Référence		Toit Vert	
		W/m ²	W/m ²	W/m ²	% Réduction
FRF, Ottawa, ON	Toit vert	30.0		≈ 0.0	100%
ENCC, Toronto, ON	Toit vert «System S»	15.0		2.5	83%
	Toit vert «System G»			2.5	83%
GRRF, Vancouver, CB	Toit vert GR1	17.0		≈ 0.0	100%
	Toit vert GR2			≈ 0.0	100%
CÉUM, Montréal, QC	Toit Vert Non irrigué	10.2		1.8	83%
	Toit Vert Irrigué			0.4	96%

Tableau 5.4 Comparaison des résultats pour le flux de chaleur traversant la toiture – gains de chaleur

Flux de chaleur maximal traversant la toiture – PERTES de chaleur				
Localisation	Nom	Toiture de Référence		Toit Vert
		W/m ²	W/m ²	% Réduction
FRF, Ottawa, ON	Toit vert	-10.0	-7.0	30%
ENCC, Toronto, ON	Toit vert «System S»	N/A	N/A	N/A
	Toit vert «System G»		N/A	N/A
GRRF, Vancouver, CB	Toit vert GR1	-2.0	-2.0	0%
	Toit vert GR2		-2.0	0%
CÉUM, Montréal, QC	Toit Vert Non irrigué	-18.0	-15.1	16%
	Toit Vert Irrigué		-12.0	33%

Tableau 5.5 Comparaison des résultats pour le flux de chaleur traversant la toiture – pertes de chaleur

5.4 COMPARAISON DE LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE

Tel que mentionné à la section précédente, la consommation énergétique d'un bâtiment est largement influencée par les flux de chaleur qui pénètrent son enveloppe. Nous avons vu aussi que l'ajout d'un toit vert a pour effet de diminuer grandement (de 80% à 100%) les flux de chaleur entrant par la toiture ainsi que de limiter légèrement (de 15% à 30%) les flux sortants.

La consommation énergétique est l'intégrale de la courbe du flux de chaleur traversant le toit en fonction du temps. Les pourcentages de réduction des flux de chaleur présentés à la section précédente sont basés sur des moyennes mensuelles. Le calcul de la consommation énergétique s'est fait tel qu'expliqué au chapitre 3 (méthodologie) et est basé sur des intervalles de 15 minutes. Ainsi, la précision de la consommation énergétique est plus grande que celle des flux présentés plus haut. Toutefois, puisque la consommation d'énergie et les flux traversant la toiture sont intimement liés, il est normal de retrouver des pourcentages de réduction très proches pour ces deux caractéristiques.

En termes de consommation énergétique, le toit vert non irrigué du CÉUM a permis au mois de juin, soit le mois où les gains de chaleurs étaient les plus hauts,

une réduction de 86% de la consommation d'énergie nécessaire à la climatisation. Le toit vert irrigué a pour ainsi dire complètement annulé le besoin de climatisation avec une diminution de la consommation énergétique dépassant les 98%. Tout comme pour les flux de chaleur, ces résultats sont tout à fait comparables à ceux obtenus à Ottawa, Toronto et Vancouver et sont attribuables à la masse thermique supplémentaire que représentent les différentes couches du toit vert, au phénomène d'évaporation du contenu en eau du substrat de culture, au phénomène d'évapotranspiration des plantes ainsi qu'à l'ombrage que projettent ces dernières sur la toiture.

Pour ce qui est de la consommation d'énergie de chauffage due aux pertes de chaleur, le toit vert non irrigué du CÉUM a permis une réduction de 16% au mois de mars, soit le mois où les pertes de chaleurs étaient les plus hautes contre 33% pour le toit vert irrigué. Les autres plateformes expérimentales canadiennes offrent des pourcentages équivalents à celui du toit vert non irrigué.

Les tableaux 5.6 et 5.7 ainsi que les figures 5.3 et 5.4 résument les résultats obtenus pour chaque expérience de toit vert et démontrent comment les résultats obtenus à Montréal s'inscrivent auprès de ceux d'Ottawa, Toronto et Vancouver.

Performance énergétique – demande en énergie de CLIMATISATION		
Localisation	Nom	% Réduction
FRF, Ottawa, ON	Toit vert	90%
ENCC, Toronto, ON	«System S» et «System G»	95%
GRRF, Vancouver, CB	GR1 et GR2	95%
CÉUM, Montréal, QC	Non irrigué	86%
	Irrigué	98%

Tableau 5.6 Comparaison des résultats pour la performance énergétique – demande en énergie de CLIMATISATION

Performance énergétique – demande en énergie de CHAUFFAGE		
Localisation	Nom	% Réduction
FRF, Ottawa, ON	Toit vert	15%
ENCC, Toronto, ON	«System S» et «System G»	23%
GRRF, Vancouver, CB	GR1 et GR2	32%
CÉUM, Montréal, QC	Non irrigué	16%
	Irrigué	33%

Tableau 5.7 Comparaison des résultats pour la performance énergétique – demande en énergie de CHAUFFAGE

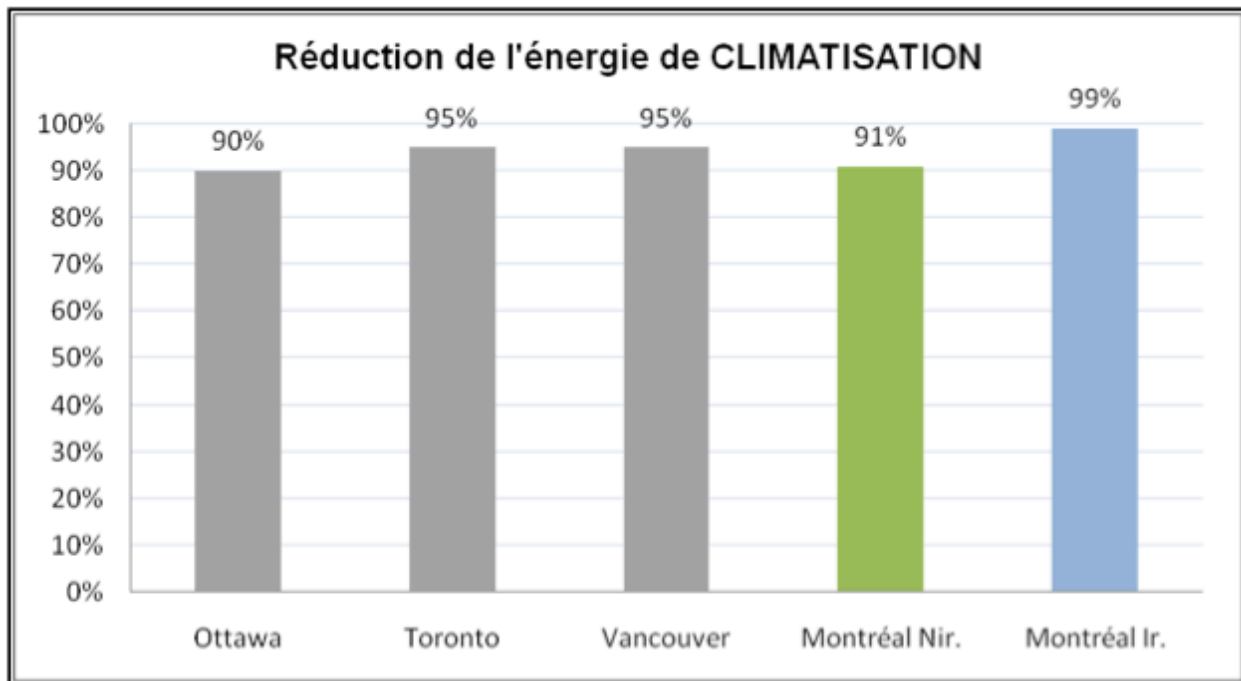


Figure 5.3 Comparaison des résultats – énergie de climatisation

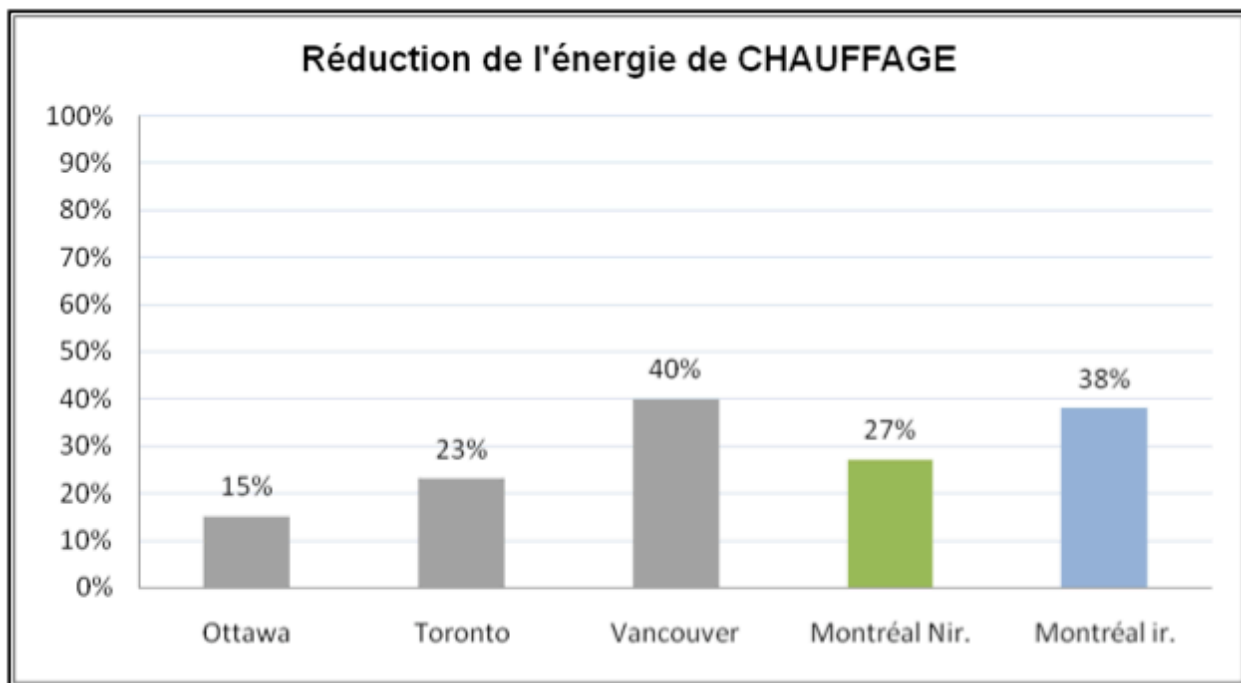


Figure 5.4 Comparaison des résultats – énergie de chauffage

5.5 DISCUSSION DES RÉSULTATS ET EXTRAPOLATION

L'étude expérimentale du CÉUM a montré une diminution des gains de chaleur par la toiture du bâtiment variant de 86% à 98% grâce à l'ajout d'un toit vert de même qu'une réduction des pertes de chaleur pendant les périodes de chauffage de l'ordre de 16% à 33%. Ces diminutions entraînent par le fait même une réduction de la consommation énergétique du bâtiment et ultimement une réduction des dépenses reliées à la conservation de conditions de température stable à l'intérieur du bâtiment.

Ainsi, basé sur l'année 2007, le toit vert non irrigué a réduit la demande moyenne en énergie de climatisation de 91% et la demande en énergie de chauffage de 27% ce qui a permis de diminuer de 37.7% la

quantité d'énergie totale dépensée pour contrer les pertes et les gains thermiques du toit en abaissant la consommation de 77.71 kWh/m² à 48.43 kWh/m² (29.28 kWh/m² économisés, voir Annexe V).

Pour sa part le toit vert irrigué a réduit la demande en énergie de climatisation et de chauffage de 99% et 38% respectivement ce qui donne une diminution de 47.2% de l'énergie totale traversant la toiture. En effet, la consommation a été réduite de 77.71 kWh/m² à 41.07 kWh/m² (36.64 kWh/m² économisés, voir Annexe V) pour la même période par l'ajout du toit vert irrigué.

Si on assume que le bâtiment du CÉUM, d'une superficie totale de 99 m², est recouvert au complet d'une toiture verte, l'économie d'énergie pour une période de 10 ans peut être calculée comme suit :

Toit vert non irrigué :

$29.28 \text{ kWh/m}^2/\text{an} \times 99 \text{ m}^2 \times 10 \text{ ans} = 29\ 000 \text{ kWh environ.}$

Toit vert irrigué :

$36.64 \text{ kWh/m}^2/\text{an} \times 99 \text{ m}^2 \times 10 \text{ ans} = 36\ 300 \text{ kWh environ.}$

Si on assume un prix du kWh domestique stable de 0.08\$/kWh pour toute cette période (tarif D selon Hydro-Québec) les économies en argent représentent :

Toit vert non irrigué :

$29\ 000 \text{ kWh} \times 0.08 \text{ \$/kWh} = 2320 \text{ \$ sur 10 ans.}$

Toit vert irrigué :

$36\ 300 \text{ kWh} \times 0.08 \text{ \$/kWh} = 2904 \text{ \$ sur 10 ans.}$

Tel que mentionné dans les chapitres précédents, le duplex utilisé par le CÉUM pour son étude possède une toiture ventilée. Les économies d'énergie calculées ne seront donc pas perçues pour ce bâtiment puisque toute chaleur traversant la plateforme du toit vert se voit évacuée par la ventilation de la toiture. Par contre dans le cas d'une structure de toiture «en sandwich» où aucune ventilation ne sépare la plateforme du toit vert et l'intérieur du bâtiment, la demande en énergie de climatisation et chauffage due à l'entrée et sortie de chaleur à travers le toit se verra réduite tel que démontré par les résultats du toit expérimental du CÉUM.

Il est certain que la toiture n'est pas la seule composante à influencer la consommation énergétique d'un bâtiment. Les montants calculés ci-haut ne sont qu'un exercice purement fictif mais toutefois basé sur des hypothèses conservatrices et ont pour but de montrer l'ordre de grandeur des économies d'énergie réalisables avec un toit vert extensif installé sur un bâtiment résidentiel.

Cet exercice permet aussi de montrer que les économies d'énergie sont directement reliées à la superficie de la toiture du bâtiment. Ainsi, plus cette dernière dimension est importante, plus la quantité de kWh économisés par le toit vert sera grande. Il en va de même pour le coût de l'électricité : si ce dernier augmente, les gains du toit vert seront plus importants.

Outre la diminution de sa consommation énergétique, la plateforme expérimentale du CÉUM a démontré, de même que les autres études canadiennes, que la membrane d'étanchéité située sous le toit vert est soumise à des chocs thermiques beaucoup plus faibles qu'une toiture conventionnelle. Ainsi, avec une diminution de 25% à 27% de la température maximale moyenne atteinte par la membrane pour le toit vert non irrigué et le toit vert irrigué, de même qu'une diminution de 66% à 77% de la fluctuation moyenne de cette température, il est à penser que la durée de vie de la membrane est augmentée. Cette hypothèse a été avancée par plusieurs chercheurs dont Bass et Baskaran (2003) et représente un avantage important des toits verts, considérant les coûts de réfection importants d'une toiture à membrane élastomère.



CONCLUSION

Nous avons montré qu'il existe beaucoup d'études menées pour quantifier la performance énergétique des toitures végétales, et ce, à travers le monde. Toutefois, chaque région du globe possède ses propres conditions climatiques et ces dernières ont une influence directe sur le comportement thermique du toit vert. Ainsi, l'objectif principal de cette étude était d'étudier l'impact énergétique d'un toit vert extensif installé sur un bâtiment résidentiel situé en plein cœur de la ville de Montréal, étude qui jusqu'à ce jour n'avait pas encore été réalisée.

Cette étude porte donc sur quatre aspects particuliers du toit vert, à savoir la température maximale atteinte par la membrane d'étanchéité, la fluctuation de cette température, les flux de chaleur entrant et sortant par la toiture et finalement, la performance énergétique. Les deux toits verts installés sur la plateforme expérimentale du CÉUM ont montré des résultats du même ordre de grandeur que trois autres études canadiennes menées à Ottawa, Toronto et Vancouver. Cette comparaison a permis de valider les résultats montréalais et d'expliquer pourquoi certains d'entre eux diffèrent des autres études.

L'étude des résultats démontre que les deux types de toits verts installés à Montréal ont permis de diminuer grandement la consommation énergétique requise pour la climatisation du bâtiment. De même, les pertes de chaleur pendant les mois plus frais ont aussi été réduites mais de façon moins prononcée. Dans les deux cas, le toit vert irrigué a démontré une performance environ 10% à 15% supérieure à celle du toit vert non irrigué.

De plus, les résultats ont démontré combien l'ajout d'un toit vert diminue le choc thermique subi par la membrane d'étanchéité de la toiture ainsi que la fatigue thermique de cette dernière due à la fluctuation de sa température. En effet, les membranes d'étanchéité des deux toits verts du CÉUM ont enregistré une température non seulement relativement stable mais avec un maximum de 10°C à 15°C plus bas que la partie du toit représentant une toiture conventionnelle. Ces résultats ont aussi été comparés aux études canadiennes semblables et une convergence des résultats est observée.

Cette étude a aussi permis de mettre en valeur certains domaines qu'il serait intéressant et profitable d'approfondir. Ainsi, il serait intéressant de mesurer la consommation énergétique réelle du bâtiment du CÉUM avant et après l'implantation du toit vert et de comparer les résultats empiriques avec ce qui a été calculé dans cette recherche. Il est certain que la toiture n'est pas le seul élément à avoir un impact sur la consommation énergétique du bâtiment et cet exercice permettrait de connaître l'apport du toit vert sur la consommation globale du bâtiment.

Au niveau de la membrane d'étanchéité, bien que l'on mesure une réduction importante de la température à laquelle cette dernière est soumise et que cela sous-entende une augmentation de sa vie utile, aucune étude n'a calculé ou mesuré l'augmentation de la durée de vie des membranes situées sous une toiture végétale. Ces résultats permettraient de conclure sur cet avantage supposé des toits verts.

Finalement, les résultats présentés répondent à l'objectif principal de cette recherche et sont appuyés par la comparaison des études canadiennes similaires. Les professionnels œuvrant dans le domaine du bâtiment ont maintenant accès à des critères quantifiables pour poser des choix éclairés en matière de toiture végétale et ce pour la région de Montréal.

BIBLIOGRAPHIE

- Akbari, H., D.M. Kurn, S.E. Bretz et J.W. Hanford.** 1997. «Peak power and cooling energy savings of shade trees». *Energy and Buildings*, vol. 25, p. 139-148.
- Akbari, H., M. Pomerantz et H. Taha.** 2001. «Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban area». *Solar Energy*, vol. 70, p. 295-310.
- Alexandri, E., et P. Jones.** 2007. «Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment : comparison with experimental results». *Building and Environment*, vol. 42, p. 2835-2849.
- Al-Sanea, Sami A.** 2002. «Thermal performance of building roof elements». *Building and Environment*, vol. 37, p. 665-675.
- Baskaran, B.A., D. Van Reenen, J. Overton et K. Liu.** 2009. Engineering performance of garden roofs in North (Canadian) climate – 5 years of field data. NRCC-50856. Ottawa : National Research Council Canada, 6 p.
- Bass, Brad.** 2002. «Modelling the impact of green roof infrastructure on the urban heat island in Toronto». *The Green Roof Infrastructure Monitor*, vol. 4, no 1, p. 2-4.
- Bass, Brad, et Bas Baskaran.** 2003. Evaluating Rooftop and Vertical Gardens as an Adaptation Strategy for Urban Areas. NRCC-46737. Ottawa : Institut de Recherche en Construction du CNRC, 111 p.
- Berdhal, P., et S.E. Bretz.** 1997. «Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials». *Energy and Buildings*, vol. 25, no 2, p. 149-158.
- Boivin, Marie-Anne.** 2002. «NRC's Institute for Research in Construction studying plant survivability and stormwater management at Ottawa test site». *The Green Roof Infrastructure Monitor*. Vol. 4, no 1, p. 7.
- Capelli, M., C. Cianfrini et M. Corcicone.** 1998. «Effects of vegetation roof on indoor temperatures». *Heat Environment*, vol. 16, no 2, p. 85-90.
- Christian, J.E., Petrie, T.W.** 1996. «Sustainable roofs with real energy savings». In, sous la dir. de Laboratory, Oak Ridge National. proceedings of the sustainable low-slope roofing workshop. Oak Ridge (Tennessee) : Desjarlais.
- Clarke, J.A.** 1985. *Energy simulation in building design*. Bristol : Adam Hilger, 362 p.
- Connelly, M.** 2003. «The BCIT green roof research facility». *The Green Roof Infrastructure Monitor*, vol. 5, no 2, p. 14.
- Connelly, M.** 2004. «New West Coast green roof research facility launched». *The Green Roof Infrastructure Monitor*, vol. 6, no 1 (automne), p. 1.

- Connelly, M., et K. Liu.** 2005. «Green roof research in British Columbia – an overview». Vancouver (B.C.) : British Columbia Institute of Technology and National Research Council of Canada. <<http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ircpubs>>.
- Connelly, M., et K. Liu.** 2005. Green roof research in British Columbia – an overview. NRCC-48203. Ottawa : National Research Council Canada, 12 p.
- Di, H.F., et D.N. Wang.** 1999. «Cooling effect of ivy on a wall». *Experimental Heat Transfer*, vol. 12, p. 235-245.
- Eumorfopoulou, E., Aravantinos, D.** 1998. «The contribution of a planted roof to the thermal protection of building in Greece». *Energy and Buildings*, vol. 27.
- Fang, Chih-Fang.** 2007. «Evaluating the thermal reduction effect of plant layers on rooftops». *Energy and Buildings*.
- Fisher, Susan.** 2004. «Des toitures vertes et des billets verts : Un nouveau secteur d'activité au Canada». En ligne. Société Canadienne de l'Habitation et du Logement (SCHL). <<http://www.cmhc-schl.gc.ca>>.
- Gaffin, Stuart, Cynthia Rosenzweig, Lily Parshall, David Beattie, Robert Berghage, Greg O'Keefe et Dan Braman.** 2004. Energy Balance Modeling Applied to a Comparison of White and Green Roof Cooling Efficiency. en ligne. New York : Center for Climate Systems Research – Columbia University, 11 p.
- Good, W.** 1990. «Factors in planted roof design». *Construction Specific*, vol. 43, no 11, p. 132-137.
- Hake, Aubrey.** 2007. «Promoting Sustainable Green Roofs Through Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)». Manhattan, Kansas, Kansas State University, 158 p.
- Hoyano, A.** 1988. «Climatological uses of plants for solar control and the efforts on the thermal environment of a building». *Energy and Buildings*, vol. 11, p. 29-36.
- Hutcheon, N.P., Handegord, G.O.P.** 1989. Building Science – For a cold climate, National Research Council of Canada. Construction Technology Centre Atlantic Inc., 440 p.
- Krayenhoff, E. Scott, Alberto Martilli, Brad Bass et Roland B Stull.** 2002. Mesoscale simulation of urban heat mitigation strategies in Toronto, Canada. London, Ontario : University of Western Ontario, Department of Geography, 4 p.
- Kumar, Rakesh, et S.C. Kaushik.** 2005. «Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings». *Building and Environment*, vol. 40, p. 1505-1511.
- Landreville, Maude.** 2005. Toitures vertes à la montréalaise : Rapport de recherche sur l'implantation des toits verts à Montréal (2eme impression). Montréal : Centre d'écologie urbaine de Montréal, 106 p.

- Lazzarin, Renato M., Francesco Castelotti et Filippo Busato.** 2005. «Experimental measurements and numerical modelling of a green roof». *Energy and Buildings*, vol. 37, p. 1260-1267.
- Lazzarin, R.M., A. D'Ascanio et A. Gasparella.** 2003. «Analysis of a green roof application to an industrial building». *International Journal of Ambient Energy*, vol. 24, p. 35-43.
- Liu, K.** 2003. *Engineering performance of rooftop gardens through field evaluation*. NRCC-46294. Ottawa : National Research Council Canada, 15 p.
- Liu, Karen, Baskaran, Bas.** 2003. «Thermal performance of green roofs through field evaluation». En ligne. Ottawa (Ont.) : Institute for Research in Construction of the NRC. <<http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ircpubs>>.
- Liu, K.** 2006. «British Columbia Institute of Technology's green roof activities – an update». *The Green Roof Infrastructure Monitor*, vol. 8, no 2 (automne), p. 41.
- Liu, K.** 2006. *Green, reflective, and photovoltaic roofs*. NRCC-48692. Ottawa : National Research Council Canada, 19 p.
- Liu, Karen, et Bas Baskaran.** 2005. «Using Garden Roof Systems to Achieve Sustainable Building Envelopes». *Construction Technology Update*, no 65, p. 1-6.
- Liu, K., et B.A. Baskaran.** 2005. *Thermal performance of extensive green roofs in cold climates*. NRCC-48202. Ottawa : National Research Council Canada, 9 p.
- Liu, K., et J. Minor.** 2005. *Performance Evaluation of an Extensive Green Roof*. NRCC-48204. Ottawa : Institut de Recherche en Construction du CNRC, 11 p.
- Liu, K., et J. Minor.** 2005. *Performance evaluation of an extensive green roof*. NRCC-48204. Ottawa : National Research Council Canada, 11 p.
- Meier, A.K.** 1991. «Strategic landscaping and air-conditioning savings : a literature review». *Energy and Buildings*, vol. 16, p. 479-486.
- Nerenberg, Jacob.** 2005. *Projet pilote de toit vert : démarche d'une construction écologique*. Montréal : Centre d'écologie urbaine de Montréal, 60 p.
- Niachou, A., K. Papakonstantinou, M. Santamouris, A. Tsangrassoulis et G. Mihalakakou.** 2001. «Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance». *Energy and Buildings*, vol. 33, p. 719-729.
- Oberndorfer, Erica, Jeremy Lundholm, Brad Bass, Reid R. Coffman, Hitesh Doshi, Nigel Dunnett, Stuart Gaffin, Manfred Köhler, Karen Liu et Bradley Rowe.** 2007. «Green Roofs as Urban Ecosystems : Ecological Structures, Functions and Services». *BioScience*, vol. 57, no 10 (Novembre), p. 823-833.
- Onmura, S., S. Matsumoto et S. Hokoi.** 2001. «Study on evaporative cooling effect of lawn gardens». *Energy and Buildings*, vol. 33, p. 653-666.

- Palomo del Barrio, E.** 1998. «Analysis of the green roofs cooling potential in buildings». *Energy and Buildings*, vol. 27.
- Palomo, E.** 1999. «Roof components models simplification via statistical linearization and model reduction techniques». *Energy and Buildings*, vol. 29, p. 259-281.
- Saiz Alcazar, S.** 2004. «Greening the dwelling : a life energy analysis of green roofs in residential buildings». Mémoire de maîtrise en génie civil, Toronto, University of Toronto, 170 p.
- Santamouris, M., N. Papanikolaou, I. Livada, I. Koronakis, C. Georgakis et A. Argiriou.** 2001. «On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings». *Solar Energy*, vol. 70, p. 201-216.
- Santamouris, M., C. Pavlou, P. Doukas, G. Mihalakakou, A. Synnefa, A. Hatzibiros et P. Patargias.** 2007. «Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece». *Energy* vol. 32, p. 1781-1788.
- SCHL.** 2006. «Performance des toits verts sur la côte Ouest dans les installations de recherche sur les toits verts de la BCIT». *Le Point En Recherche*. En ligne. no 06-106 (novembre), p. 1-4.
- Shaharuddin, A., M.H. Noorazuan et J. Yaakub.** 2006. «Best management practices for stormwater and heat reduction using green roof : the Bangi experimental plot». In (Singapoure, 28-30 novembre 2006), sous la dir. de NIE-SEAGA Conference 2006, Sustainability and Southeast Asia. En ligne.
- Simpson, J.R., et E.G. McPherson.** 1996. «Potential of tree shade for reducing residential energy use in California». *Journal of Arboriculture*, vol. 22, no 1.
- Sonne, Jeffrey K.** 2006. «Energy Performance Aspects of a Florida Green Roof». Cocoa, Floride : Florida Solar Energy Center.
- Spala, A., H.S. Bagiorgas, M.N. Assimakopoulos, J. Kalavrouziotis, D. Matthopoulos et G. Mihalakakou.** 2008. «On the green roof system : Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece». *Renewable Energy*, vol. 33, p. 173-177.
- Takakura, T., S. Kitade et E. Goto.** 2000. «Cooling effect of greenery cover over a building». *Energy and Buildings*, vol. 31, p. 1-6.
- Theodosiou, Theodore G.** 2003. «Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique». *Energy and Buildings*, vol. 35, p. 909-917.
- TRNSYS 15.1 A transient system simulation program developed from Solar Energy Laboratory.** 2002. University of Wisconsin-Madison and Transsolar of Stuttgart. <<http://www.trnsys.com>>.

- Trottier, Antoine.** 2008. Toitures végétales : implantation des toits verts en milieu institutionnel – Étude de cas : UQAM. Montréal : Centre d'écologie urbaine de Montréal, 80 p.
- Wong, N.H., Y. Chen, C.L. Ong et A. Sia.** 2003. «Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment». *Building and Environment*, vol. 38, p. 261-270.
- Wong, N.H., D.K.W. Cheong, H. Yan, J. Soh, C.L. Ong et A. Sia.** 2003. «The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore». *Energy and Buildings*, vol. 35, p. 353-364.
- Zhang, Weijie, Jinshun Wu, Yiran Wei et Xudong Gao.** 2006. «Research on the Effect of a Planting Roof on the Thermal Load of a Business Building». *Envelope technologies for Building Energy Efficiency*. Vol. II-4-2, p. 1-5.

