

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE
M.Ing.

PAR
Sébastien JACQUET

ÉTUDE DE LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE D'UNE TOITURE VÉGÉTALE
EXTENSIVE INSTALLÉE AU CENTRE-VILLE DE MONTRÉAL

MONTRÉAL, LE 8 NOVEMBRE 2010

© Tous droits réservés, Sébastien Jacquet 2010

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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*

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*

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 20 OCTOBRE 2010

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont soutenu durant les nombreux mois qu'a duré cette étude. Je remercie particulièrement ma conjointe sans laquelle toute cette belle aventure n'aurait été possible, de même que mes enfants et parents pour leurs encouragements sincères.

Je remercie aussi mon directeur et mon co-directeur de recherche pour leurs précieux apports et conseils et pour le temps qu'ils ont consacré aux questions de mon travail. Mes remerciements sincères vont aussi aux membres de mon jury qui ont eu la bonté de m'accorder un peu de leur temps précieux afin d'évaluer le fruit de mon travail.

Finalement, je souhaite remercier l'École de technologie supérieure pour la pertinence de l'enseignement qui m'a été donné et la qualité des équipements auxquels j'ai eu accès.

ÉTUDE DE LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE D'UNE TOITURE VÉGÉTALE EXTENSIVE INSTALLÉE AU CENTRE-VILLE DE MONTRÉAL

Sébastien JACQUET

RÉSUMÉ

Les toitures végétales représentent une solution technologique visant à augmenter l'efficacité énergétique des bâtiments. Bien que plusieurs études quantitatives aient été menées à travers le monde, l'implantation à grande échelle des toits verts semble ralentie au Canada en partie par le manque de données techniques relatives au contexte environnemental canadien.

Cette étude porte sur l'analyse de la performance énergétique d'un toit vert extensif installé sur une plateforme expérimentale située dans la ville de Montréal, QC, Canada. Ce toit vert comporte une section irriguée, une section sèche et une section de référence. La recherche porte plus particulièrement sur la capacité du toit vert à augmenter la durée de vie de la membrane d'étanchéité ainsi que sur la réduction des besoins en énergie de climatisation et chauffage nécessaire à la conservation de conditions climatiques stables à l'intérieur du bâtiment.

Le toit vert montréalais démontre ainsi une réduction efficace de la température maximale atteinte par la membrane d'étanchéité (diminution de 25% et 27% pour le toit non irrigué et le toit irrigué) ainsi qu'une stabilisation de la variation de cette température (diminution de 66% et 77% de la fluctuation). De même, la présence du toit vert induit une réduction drastique de l'entrée de chaleur dans le bâtiment (91% et 99%) impliquant une diminution de la consommation énergétique reliée à la climatisation. Une réduction moins grande est enregistrée pour les pertes de chaleur (27% et 38%), ce qui se traduit par des gains en énergie de chauffage du même ordre de grandeur.

Les résultats obtenus dans cette recherche sont comparables dans bien des cas à ceux obtenus sur les autres plateformes expérimentales canadiennes et plus particulièrement celles situées à Ottawa et Toronto.

Mots clés : toit vert, évaluation, énergie, performance

STUDY OF THE ENERGY EFFICIENCY OF AN EXTENSIVE GREEN ROOF INSTALLED IN DOWNTOWN MONTREAL

Sébastien JACQUET

ABSTRACT

Green roofs represent a technological solution to energy efficient buildings. Although several quantitative studies have been performed around the world, the widespread implementation of green roofs in Canada is slowed in part by the lack of technical data relative to the Canadian environmental context.

This study is about the analysis of the energy efficiency of an extensive green roof installed on an experimental platform located in the city of Montreal, QC, Canada. The green roof comprises an irrigated zone, a dry zone and a reference zone. This research focuses particularly on the capability of green roofs to increase the lifetime of the roof membrane and to reduce the cooling and heating load required to keep stable temperature conditions inside the building.

The Montreal green roof shows an efficient reduction of the maximum temperature reached by the membrane (reduction of 25% and 27% for dry and irrigated roofs) as well as a stabilisation of this temperature fluctuation (reduction of 66% and 77%). Moreover, the green roof induces a dramatic reduction of the heat entering the building through the roof (91% and 99%) which implies great savings in cooling loads. Lower savings are recorded for heat loss (27% and 38%) with equivalent energy savings.

Results presented in this study are comparable to those of other Canadian experimental platforms and particularly with the city of Ottawa and Toronto.

Key words: green roof, evaluation, energy, performance

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	2
CHAPITRE 1 NOTIONS DE BASE	4
1.1 Types de toitures végétales et composantes.....	4
1.1.1 Couche structurale	5
1.1.2 Substrat de culture.....	6
1.1.3 Couche des plantes.....	6
1.2 Les toitures végétales et leurs avantages	8
1.2.1 Efficacité énergétique des bâtiments	8
1.2.2 Prolongation de la durée de vie des toitures	8
1.2.3 Modération de l'effet d'îlot de chaleur urbain	9
1.2.4 Réduction des eaux de ruissellement dans les égouts.....	9
1.3 Transfert de Chaleur	10
1.3.1 Unités	10
1.3.2 Les trois modes de transfert de chaleur.....	11
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE	20
2.1 Évaluations expérimentales de la performance thermique des toitures végétales au Canada.....	20
2.1.1 FRF – <i>Field Roof Facility</i> , Ottawa, ON.....	20
2.1.2 GRRF – <i>Green Roof Research Facility</i> , Vancouver, CB	28
2.1.3 ENCC – <i>Eastview Neighbourhood Community Centre</i> , Toronto, ON	37
2.2 Modélisations mathématiques du transfert de chaleur dans une toiture végétale	45
2.3 Simulations logicielles	48
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE.....	53
3.1 Objectifs de la recherche.....	53
3.2 Présentation de la toiture étudiée	53
3.3 Structure	54
3.4 Aménagement	55
3.5 Plantes	58
3.6 Paramètres enregistrés	61
3.7 Collecte de données	64
3.8 Méthodologie de recherche.....	65
3.8.1 Température maximale au niveau de la membrane d'étanchéité	65
3.8.2 Variation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité	66
3.8.3 Flux de chaleur traversant le toit.....	67
3.8.4 Performance énergétique	69

CHAPITRE 4 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS.....	72
4.1 Température maximale au niveau de la membrane d'étanchéité.....	73
4.2 Variation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité.....	80
4.3 Flux de chaleur traversant la toiture.....	85
4.4 Performance énergétique	91
4.4.1 Climatisation.....	94
4.4.2 Chauffage.....	96
4.4.3 Énergie cumulative	98
CHAPITRE 5 DISCUSSION DES RÉSULTATS.....	101
5.1 Comparaison de la température maximale au niveau de la membrane d'étanchéité .	103
5.2 Comparaison de la variation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité.....	106
5.3 Comparaison du flux de chaleur traversant le toit	109
5.4 Comparaison de la performance énergétique.....	111
5.5 Comparaison avec les études théoriques.....	113
5.6 Discussion des résultats et extrapolation	114
CONCLUSION.....	117
ANNEXE I JOURNÉES TYPIQUES	119
ANNEXE II TEMPÉRATURE DE LA MEMBRANE D'ÉTANCHÉITÉ.....	122
ANNEXE III FLUCTUATION DE LA TEMPÉRATURE DE LA MEMBRANE	124
ANNEXE IV FLUX DE CHALEUR TRAVERSANT LA TOITURE	129
ANNEXE V PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE	132
BIBLIOGRAPHIE.....	135

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Résumé des équations du transfert de chaleur	16
Tableau 3.1 Plantes utilisées pour les toits verts du CEU de Montréal	59
Tableau 3.2 Définition des différents niveaux instrumentés pour le toit du CEU de Montréal	61
Tableau 4.1 Résumé des résultats pour la température maximale au niveau de la membrane d'étanchéité	79
Tableau 4.2 Résumé des résultats pour la fluctuation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité.....	84
Tableau 4.3 Résumé des résultats pour le flux de chaleur traversant la toiture	90
Tableau 4.4 Résumé des résultats pour la performance énergétique – climatisation.....	99
Tableau 4.5 Résumé des résultats pour la performance énergétique – chauffage	99
Tableau 4.6 Résumé des résultats pour la performance énergétique – énergie cumulative	100
Tableau 5.1 Éléments de design des quatre plateformes expérimentales comparées	102
Tableau 5.2 Comparaison des résultats pour la température maximale au niveau de la membrane d'étanchéité	103
Tableau 5.3 Comparaison des résultats pour la fluctuation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité	108
Tableau 5.4 Comparaison des résultats pour le flux de chaleur traversant la toiture – gains de chaleur.....	110
Tableau 5.5 Comparaison des résultats pour le flux de chaleur traversant la toiture – pertes de chaleur.....	110
Tableau 5.6 Comparaison des résultats pour la performance énergétique - demande en énergie de CLIMATISATION	112
Tableau 5.7 Comparaison des résultats pour la performance énergétique - demande en énergie de CHAUFFAGE.....	112

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Exemple des deux types de toits verts.....	4
Figure 1.2 Bilan énergétique pour une surface opaque.	17
Figure 1.3 Échange énergétique pour une toiture verte.....	18
Figure 2.1 FRF - Détails de la construction.....	21
Figure 2.2 FRF – Température de la membrane d'étanchéité (16 Juillet 2001).....	23
Figure 2.3 FRF – Fluctuation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité.	24
Figure 2.4 FRF – Flux de chaleur pénétrant le toit (16 juillet 2001).....	25
Figure 2.5 FRF - Demande énergétique.	27
Figure 2.6 GRRF – coupe typique et position des sondes.....	29
Figure 2.7 GRRF – profils de température (1 ^{er} août 2005).	30
Figure 2.8 GRRF – fluctuation de la température de la membrane d'étanchéité pour l'année 2005.	32
Figure 2.9 GRRF – flux de chaleur traversant le toit (1er août 2005).....	34
Figure 2.10 GRRF – Demande énergétique pour l'année 2005.	36
Figure 2.11 ENCC - Coupe typique des systèmes de toit vert étudiés.....	38
Figure 2.12 ENCC - Profils de température (26 Juin 2003).	40
Figure 2.13 ENCC – Fluctuation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité.	41
Figure 2.14 ENCC – Flux de chaleur traversant la toiture (26 Juin 2003).	43
Figure 2.15 ENCC – Demande énergétique mensuelle moyenne.	44
Figure 2.16 Transfert de chaleur dans le modèle de Lazzarin et al.	46
Figure 2.17 Valeur R de la couche de plantes.	51
Figure 3.1 Structure du toit du CEU de Montréal.....	55

Figure 3.2	Les trois zones du toit du CEU de Montréal.....	56
Figure 3.3	Coupe typique du toit du CEU de Montréal.....	57
Figure 3.4	Les deux types de substrat du toit du CEU de Montréal.....	58
Figure 3.5	Toit vert du CEU de Montréal – période estivale.	60
Figure 3.6	Toit vert du CEU de Montréal – période automnale.....	60
Figure 3.7	Niveaux des sondes pour le toit du CEU de Montréal.	62
Figure 3.8	Position des sondes du toit du CEU de Montréal.....	63
Figure 3.9	Méthodologie pour la température maximale de la membrane.....	66
Figure 3.10	Méthodologie pour la fluctuation de la température de la membrane.....	67
Figure 3.11	Méthodologie pour le flux de chaleur traversant la toiture.	68
Figure 3.12	Méthodologie pour la performance énergétique.	70
Figure 4.1	Température enregistrée au niveau de la membrane d'étanchéité pour une journée automnale typique.	76
Figure 4.2	Température enregistrée au niveau de la membrane d'étanchéité pour une journée estivale typique.	76
Figure 4.3	Températures maximales quotidiennes au niveau de la membrane d'étanchéité.	77
Figure 4.4	Températures maximales mensuelles moyennes au niveau de la membrane d'étanchéité.	78
Figure 4.5	Température maximale et minimale quotidienne enregistrée au niveau de la membrane d'étanchéité – toit de référence.....	81
Figure 4.6	Température maximale et minimale quotidienne enregistrée au niveau de la membrane d'étanchéité – toit vert non irrigué.	82
Figure 4.7	Température maximale et minimale quotidienne enregistrée au niveau de la membrane d'étanchéité – toit vert irrigué.	82
Figure 4.8	Variation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité.	83
Figure 4.9	Flux de chaleur traversant la toiture pour une journée automnale typique (3 Octobre 2007).	87

Figure 4.10	Flux de chaleur traversant la toiture pour une journée estivale typique (22 Juillet 2007).	88
Figure 4.11	Flux de chaleur mensuel moyen traversant la toiture.....	89
Figure 4.12	Toit de Référence - demande d'énergie due à l'entrée et sortie de chaleur par le toit.....	93
Figure 4.13	Toit Vert Non irrigué - demande d'énergie due à l'entrée et sortie de chaleur par le toit.....	93
Figure 4.14	Toit Vert Irrigué - demande d'énergie due à l'entrée et sortie de chaleur par le toit.....	94
Figure 4.15	Demande d'énergie de climatisation due à l'entrée de chaleur par le toit.	95
Figure 4.16	Demande d'énergie de chauffage due à la sortie de chaleur par le toit.....	96
Figure 4.17	Demande totale cumulative d'énergie due à l'entrée et sortie de chaleur par le toit.....	98

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

BCIT	<i>British Columbia Institute of Technology</i>
BTU	<i>British Thermal Unit</i>
CB	Colombie Britannique
CEU	Centre d'Écologie Urbaine
CNRC	Centre National de Recherche du Canada
CVCA	Chauffage Ventilation Climatisation de l'Air
ENCC	<i>Eastview Neighbourhood Community Centre</i>
FRF	<i>Field Roof Facility</i>
GRRF	<i>Green Roof Research Facility</i>
LAI	<i>Leaf Area Index</i>
ON	Ontario
QC	Québec
TLT	<i>Total Leaf Thickness</i>

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Unités de base

m	mètre
mm	millimètre

Unités d'aire

m^2	mètre carré
pi^2	pieds carré

Unités calorifiques

$^\circ\text{C}$	degré Celsius
K	Kelvin

Unités de puissance

W	watt
J	Joule

Unités d'énergie, de travail et de chaleur

Ca	calorie (chaleur)
BTU	<i>British Thermal Unit</i> (chaleur)
kJ	kilo Joule (chaleur)
Wh	wattheure (énergie)
kWh	kilowattheure (énergie)

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 permettaient 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 du tout 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.

Selon plusieurs études qui seront présentées dans le cadre de la présente étude, 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 sur une longue période de temps 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 autres études canadiennes.

Ce mémoire se compose de cinq grandes parties regroupées en autant de chapitres. Tout d'abord, les notions de base nécessaires à la bonne compréhension des résultats présentés seront revues. Par la suite, nous ferons un survol de la littérature existante concernant la performance thermique des toits verts en nous attardant plus particulièrement aux études menées au Canada. Ces dernières nous permettront de comparer les résultats obtenus à Montréal avec ceux des autres villes canadiennes afin de faire ressortir les similitudes et les disparités.

La troisième partie détaille précisément la méthodologie utilisée dans la présente recherche. Les méthodes de calcul et d'extraction des résultats seront présentées ainsi que tous les détails du design de la plateforme expérimentale étudiée. Par la suite, les résultats obtenus par le toit vert de Montréal seront présentés et comparés aux autres études canadiennes mais aussi aux modèles mathématiques ou simulations informatiques existantes. Cette comparaison permettra de valider les résultats traités et d'expliquer les éléments semblables et ceux qui diffèrent.

Finalement, basé sur les résultats et l'analyse des chapitres précédents, nous conclurons sur les avantages et les inconvénients que représente l'installation d'une toiture végétale sur un bâtiment situé dans une zone urbaine. Cette recherche permettra aux professionnels œuvrant dans le domaine de la construction en général de faire des choix éclairés en ce qui concerne les toitures végétales dans un contexte tel que celui de la ville de Montréal.

CHAPITRE 1

NOTIONS DE BASE

1.1 Types de toitures végétales et composantes

On retrouve en général deux types principaux de toits verts. Le type « extensif » et le type « intensif » (figure 1.1). 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 arbres.

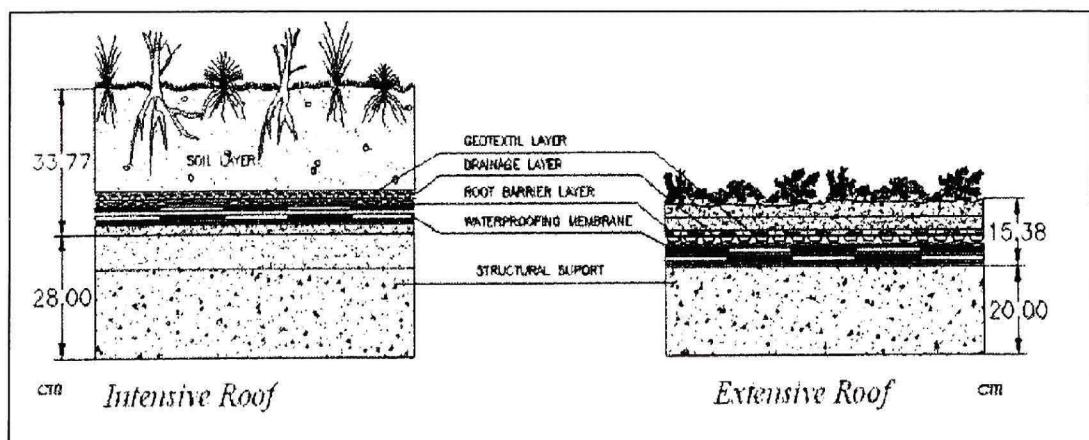


Figure 1.1 Exemple des deux types de toits verts.

Tirée de Saiz Alcazar (2004, p. 7)

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 tout les cas une couche dite structurale, une couche de substrat de culture et une couche de plantes.

1.1.1 Couche structurale

La couche structurale est celle qui soutient le toit vert. Elle peut se composer de béton armé ou pontage d'acier, comme dans le cas de bâtiments institutionnels ou bien de solives en bois, comme on retrouve souvent dans les constructions résidentielles au Canada. Cette section du toit est isolée thermiquement selon le code du bâtiment en vigueur, ce qui contribue à augmenter ses propriétés. Selon le type de toit vert réalisé, cette structure aura une capacité plus ou moins grande en termes de charges. Dans l'étude de l'efficacité énergétique des toits verts, cette couche est très souvent considérée comme homogène et ayant des propriétés physico thermiques stables (Palomo Del Barrio, 1998).

1.1.2 Substrat de culture

Le substrat de culture sert de soutien à la couche végétale et lui fournit les éléments nécessaires à la croissance et la multiplication des plantes. Selon le type de toit vert, l'épaisseur de terre peut varier de 2 à 6 pouces (50 à 150 mm) pour un toit extensif et de 8 à 24 pouces (200 à 600 mm) pour un toit intensif.

Les propriétés physico thermiques de cette couche dépendent largement du type de substrat mais aussi du degré d'humidité de la terre. Selon Lazzarin (2005), les gains énergétiques apportés par un toit vert sont plus grands lorsque le sol est humide. Plus le sol est épais plus la résistance thermique est grande. Selon Wong et al. (2003), cette augmentation du coefficient R se fait de façon plus rapide pour un sol sec que pour un sol humide (40% humide). Cela s'explique par le fait qu'un sol sec est moins conducteur à la chaleur. Aussi, plus l'épaisseur de terre est grande, plus les plantes offrent de l'ombrage et meilleure est la protection thermique offerte par la toiture végétale. La couche de terre est surtout avantageuse en été, puisque son pouvoir de protection thermique est largement réduit lorsque la terre est gelée en hiver (Eumorfopoulou et Aravantinos, 1998).

1.1.3 Couche des plantes

La couche des plantes est celle qui est directement exposée à la radiation solaire. Il s'agit donc de la première barrière que cette énergie rencontre. Le choix des plantes se fait dépendamment du type de toit vert. Un toit vert intensif permet une variété plus grande de plantes et la grande épaisseur de terre permet d'avoir des plantes hautes avec un grand feuillage. Un toit vert extensif, utilise le plus souvent des plantes très courtes et très résistantes à la sécheresse. Les différents types de sedum, de mousse, de gazon ou de courtes graminées sont les plus souvent utilisés (Landreville, 2005). Les propriétés physico thermiques de la couche de plantes sont dynamiques et dépendent de plusieurs paramètres tels que la température extérieure, l'humidité relative, la vitesse du vent, etc.

L'étude de Fang, (2007) au niveau du choix des plantes pour un toit vert met en lumière deux paramètres fondamentaux en ce qui a trait à la caractérisation de la couche de plantes et qui ont un effet direct sur la performance énergétique du toit vert :

1. Le LAI (*Leaf Area Index*) qui représente le pourcentage de surface ombragée par les plantes,
2. Le TLT (*Total Leaf Thickness*) qui est l'épaisseur totale des feuilles des plantes superposées en plusieurs couches.

Takakura et al. (2000) ont quant à eux étudié l'effet thermique de différents types de toits végétaux de façon expérimentale mais aussi de façon théorique à l'aide de simulation logicielle. Leurs résultats ont démontré que le LAI a un effet très important sur la quantité de chaleur qui traverse le toit et qui rejoint l'intérieur du bâtiment (LAI > 3 pour un effet marqué). Plus le LAI est grand, plus la capacité à diminuer la transmission de chaleur du toit vers l'intérieur du bâtiment est bonne. Cette observation est corrélée aussi par Theodosiou (2003).

Les effets de l'évapotranspiration, de la photosynthèse et de l'ombrage jouent un grand rôle dans le transfert de chaleur ; rôle qui est difficile à décrire mathématiquement. Selon Theodosiou (2003), le second paramètre le plus influent après le LAI est l'humidité relative puisqu'elle dicte les fonctions d'évapotranspiration des plantes.

1.2 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).

1.2.1 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 présentées au chapitre 2 de ce document.

1.2.2 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-violets, 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).

1.2.3 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.

1.2.4 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 (Centre National de Recherche du 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).

1.3 Transfert de Chaleur

Le transfert de chaleur se fait par trois mécanismes très distincts: la conduction, la convection et la radiation. Ces trois phénomènes dictent les échanges d'énergie entre les différents éléments constituant l'enveloppe d'un bâtiment et son environnement.

1.3.1 Unités

Le transfert de chaleur traite ultimement d'un transfert d'énergie. En effet, toute énergie produit de la chaleur. Lorsque l'on parle du transfert de chaleur pour un bâtiment, on parle donc d'un échange d'énergie entre le bâtiment et son environnement. Le processus peut être endothermique pour le bâtiment (le bâtiment absorbe de la chaleur de son environnement) ou exothermique (le bâtiment perd de la chaleur). Les caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment dicteront le taux de transfert de chaleur (la puissance) de ce dernier.

Chaleur :

Les unités couramment utilisées pour caractériser la chaleur sont la calorie et le BTU (*British Thermal Unit*). Une calorie correspond à la chaleur nécessaire pour augmenter de 1°C la température d'une masse d'eau de un gramme. Le BTU, similairement, correspond à la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter de 1°F la température d'une masse d'eau de une livre. Ainsi, un BTU représente environ 252 calories. L'unité internationale la plus utilisée pour caractériser la chaleur est le Joule avec une calorie = 4.185 Joules.

Puissance :

La puissance se définit comme étant le taux de production ou de consommation d'énergie. L'unité employée est le Watt qui représente un Joule par seconde. Ainsi, une ampoule de 100 Watt consomme 100 Joules par secondes et 360 kJ par heure.

Énergie consommée ou produite :

L'énergie totale consommée (ou produite) est calculée à partir de la puissance (en Watt) multipliée par le temps (en heures) pour obtenir des Wattheures (Wh). Pour la même ampoule de 100 W de puissance, lorsque laissée allumée pendant 24 heures, un total de 2400 Wh ou 2.4 kWh d'énergie sera consommée.

1.3.2 Les trois modes de transfert de chaleur

L'environnement tend constamment à l'équilibre. Ainsi des transferts de chaleur ont lieu entre des objets de différente température et ce, jusqu'à ce que l'équilibre énergétique soit atteint. Ces transferts d'énergie se font principalement par trois grands mécanismes : la conduction, la convection et la radiation.

Conduction :

L'équation de base pour la conduction est donnée par la loi de Fourier :

$$\boxed{\frac{dq}{d\theta} = -kA \frac{dt}{dx}} \quad (1.1)$$

où $dq/d\theta$ est le gradient de chaleur, A la surface traversée, dt/dx le gradient de température et finalement k le coefficient de conductivité thermique (W/mK) défini comme la quantité d'énergie (W) traversant un mètre cube uniforme d'un matériel donné ayant deux faces opposées avec une différence de température de un Kelvin.

Le coefficient de conductivité k est une constante propre à chaque matériau. Ce coefficient est directement relié au pouvoir qu'à un matériau donné à laisser l'énergie le traverser pour rétablir un équilibre de température. Ainsi, plus le coefficient de conductivité est petit, meilleur isolant est le matériau, c'est-à-dire que l'équilibre sera atteint dans un temps plus grand que si le coefficient de conductivité k est grand. Plusieurs tables sont disponibles et répertorient la valeur de la conductivité thermique pour les différents matériaux (Hutcheon et Handegord, 1989).

Lorsqu'un objet possède des températures différentes sur deux faces opposées, un flux de chaleur se produit à l'intérieur de ce dernier pour rétablir l'équilibre. Le flux de chaleur se dirige par conduction de la face chaude vers la face froide. Pour un transfert de chaleur constant par conduction dans une direction seulement, on peut réécrire l'équation de Fourier comme suit :

$$q = A \frac{k}{l} (t_1 - t_2) \quad (1.2)$$

Le flux de chaleur q représente la vitesse (en W) à laquelle l'énergie traverse la couche d'épaisseur l , de surface A et dont les deux faces ont des températures différentes (t_1 et t_2).

Dans le cas d'une construction multicouches où différents matériaux et différentes épaisseurs sont présentes, on utilise le coefficient de conductance (C), plus pratique que la conductivité thermique (k) et qui se définit comme étant $C = k/l$ en $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$.

Le coefficient « U » d'une section composite représente en quelques sortes la conductance résultante de la section et est calculée comme suit :

$$U_{\text{section}} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots} \text{ en } \text{W}/\text{m}^2\text{K}. \quad (1.3)$$

L'équation de transfert de chaleur pour une section en multicouches devient :

$$\boxed{q = A \times U \times \Delta T} \quad (1.4)$$

A = aire de la surface

U = coefficient de conduction

ΔT = différence de température entre les faces

Convection :

La convection est directement dépendante du fluide avec lequel la surface est en contact. Les propriétés de convection du fluide varient en fonction de la température, de l'orientation de la surface, de son inclinaison, de sa dimension, etc.

Pour décrire la convection, on utilise le coefficient h_c , en $\text{W/m}^2\text{K}$. Contrairement à la conduction, la convection est décrite par des équations empiriques obtenues par expérimentation. Ainsi, des tables d'équations empiriques sont disponibles pour calculer la valeur du coefficient h_c pour un cas donné.

Le transfert de chaleur par convection se définit alors par :

$$\boxed{q_c = A \times h_c \times \Delta T} \quad (1.5)$$

A = aire de la surface

h_c = coefficient de convection

ΔT = différence de température entre la surface et le fluide l'entourant

Radiation :

La radiation thermique est un phénomène omniprésent dans l'environnement. Tous les corps émettent et reçoivent des radiations thermiques qui seront par la suite réfléchies, absorbées ou transmises dépendamment des caractéristiques du corps irradié. Dans le contexte des bâtiments, la radiation thermique est le moyen par lequel l'énergie solaire parvient sur terre. Cette énergie réchauffe les matériaux (est absorbée), est réfléchie ou bien transmise (à travers une fenêtre par exemple).

L'énergie libérée par un corps noir pour une longueur d'onde donnée est définie selon l'équation de Planck :

$$W_{h\lambda} = \frac{3.741\lambda^{-5} \times 10^8}{e^{14400/\lambda T} - 1} \quad (W / (m^2 \times \mu m)) \quad (1.6)$$

Pour connaître l'énergie totale émise par un corps, on intègre l'équation de Planck selon $d\lambda$ pour $\lambda=0$ à l'infini et on obtient l'équation de Stefan-Boltzmann :

$$W_b = \sigma T^4 \quad (W / m^2), \quad \sigma = 5.670 \times 10^{-8} \quad W / (m^2 K^4) \quad (1.7)$$

Pour les surfaces autres que les corps noirs on a :

$$W\lambda = W_{h\lambda} \times \epsilon_\lambda \quad \text{et} \quad \alpha + \tau + \rho = 1 \quad (1.8)$$

ϵ_λ = émittance (fraction de l'énergie émise d'un corps noir)

α = fraction de l'énergie absorbée = absorbance

τ = fraction de l'énergie transmise = transmittance

ρ = fraction de l'énergie réfléchie = réflectance

Ces constantes sont connues pour plusieurs matériaux que l'on retrouve dans les constructions de bâtiments.

L'échange entre deux corps non noirs est donné par:

$$q_{1-2} = F_E \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \text{ en Watt} \quad (1.9)$$

où $F_E = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1}$ est appelé le facteur d'émissivité.

L'échange de chaleur par radiation est donné par la même équation que pour la radiation thermique (équation de Planck):

$$\boxed{\frac{q_r}{A} = \sigma \varepsilon (T_s^4 - T_a^4)} \quad (1.10)$$

où σ est la constante de Stefan-Boltzmann (5.670×10^{-8}), ε est l'émissivité et T_s , T_a les températures de la surface et de l'air ambiant (en Kelvin). On définit alors le coefficient de radiation h_r (en $\text{W/m}^2\text{K}$) avec :

$$h_r = \frac{\varepsilon \sigma (T_s^4 - T_a^4)}{T_s - T_a} = \varepsilon \sigma (T_s^2 + T_a^2)(T_s + T_a) \quad (1.11)$$

Le transfert de chaleur par radiation est donc donné par :

$$\boxed{q_r = A \times h_r \times \Delta T} \quad (1.12)$$

A = aire de la surface

h_r = coefficient de radiation

ΔT = différence de température entre la surface et l'air ambiant

Bilan énergétique pour les surfaces opaques:

Le bilan énergétique, pour une surface opaque inclut les trois modes de transfert de chaleur décrits plus haut, à savoir la conduction, la convection et la radiation. Le tableau 1.1 ci-dessous présente un résumé des équations générales décrivant ces trois modes de transfert de chaleur.

Tableau 1.1 Résumé des équations du transfert de chaleur

Mode de transfert	Équation générale	
Conduction	$q = A \times U \times \Delta T$	(équation 1.4)
Convection	$q_c = A \times h_c \times \Delta T$	(équation 1.5)
Radiation	$q_r = A \times h_r \times \Delta T$	(équation 1.12)

La figure 1.2 présente de façon graphique les échanges de chaleur d'une surface opaque par les trois modes de transfert de chaleur. Ainsi, une partie de la radiation reçue par le corps est absorbée par conduction, perdue par convection, reflétée et réémise par radiation.

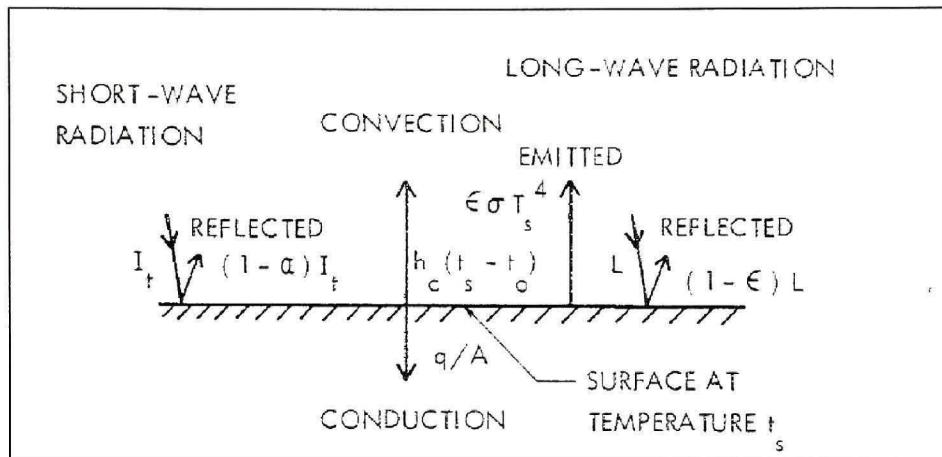


Figure 1.2 Bilan énergétique pour une surface opaque.

Tirée de Hutcheon et Handegord (1989, p. 118)

En regroupant les équations du tableau 1.1, la portion d'énergie atteignant la surface opaque et transmise par conduction au couches sous-jacentes est :

$$\frac{q}{A} = \alpha I_t - h_c (t_s - t_o) + (\epsilon L - \epsilon \sigma T_s^4) \quad (1.13)$$

α = absorbance

I_t = énergie solaire au niveau de la surface (radiations d'onde courtes)

h_c = coefficient de la surface pour le transfert de chaleur par convection

t_s, t_o = températures en surface et température de l'air extérieur ($^{\circ}\text{C}$)

ϵ = émissivité de la surface

L = énergie solaire diffuse (radiations d'ondes longues)

σ = constante de Stefan-Boltzmann

T_s = température en surface (K)

La figure 1.3 résume graphiquement l'échange d'énergie entre la toiture d'un bâtiment et son environnement. Ainsi, l'énergie solaire totale (courtes et grandes longueurs d'ondes) reçue par la toiture du bâtiment est partiellement réfléchie, partiellement absorbée et réémise, partiellement perdue par convection et évapotranspiration (dans le cas d'un toit vert) et finalement en partie transmise vers l'intérieur du bâtiment par le phénomène de conduction.

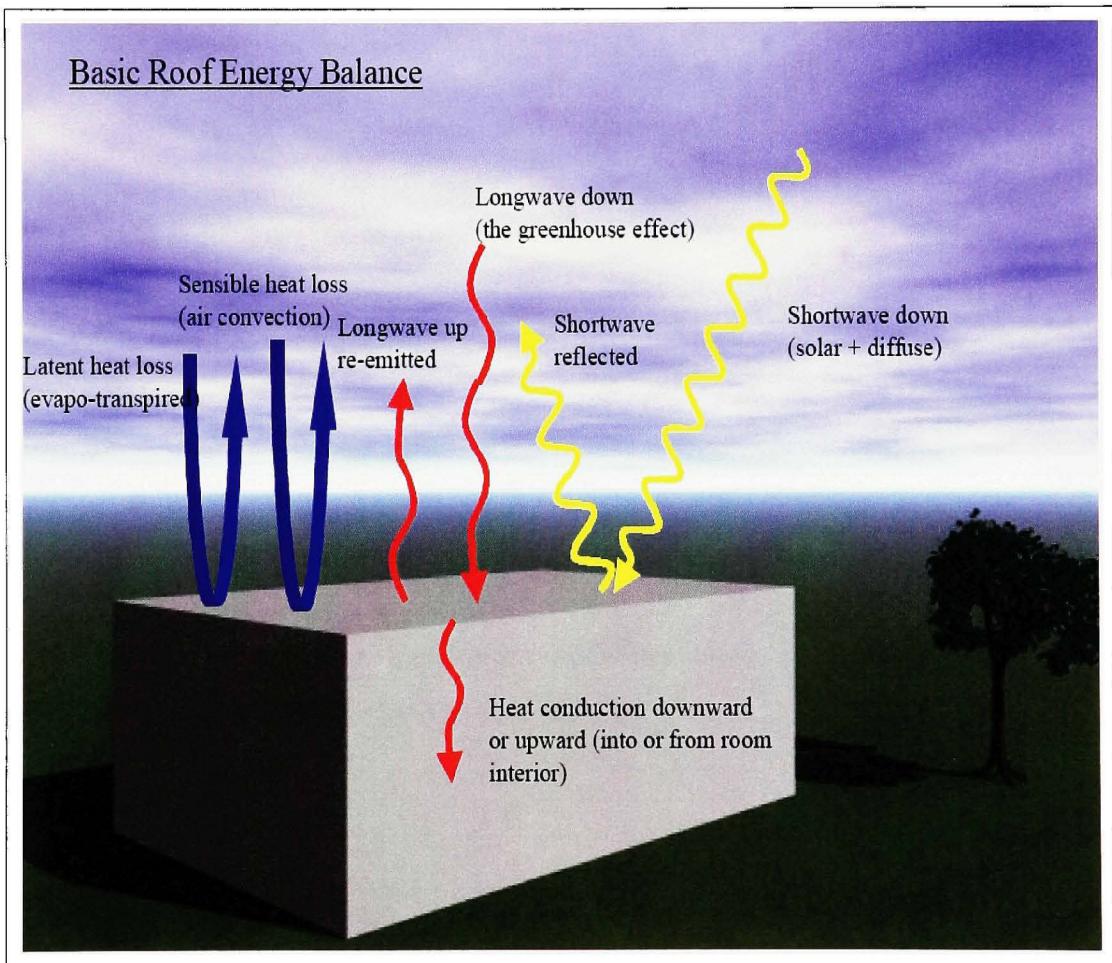


Figure 1.3 Échange énergétique pour une toiture verte.
Tirée de Gaffin et al. (2004, p. 2)

Ce premier chapitre nous a donc permis de revoir les notions de base qu'il est important de maîtriser pour la compréhension de ce travail.

Nous avons vu les différentes composantes des toits verts ainsi que les avantages principaux de ces derniers. Ainsi, une toiture verte se compose de trois couches principales, à savoir, la couche structurale, la couche de substrat de culture et la couche des plantes. Les avantages principaux des toits verts sont l'augmentation de l'efficacité énergétique des bâtiments, la prolongation de la durée de vie des toitures, la modération de l'effet d'îlot de chaleur urbain et finalement, la réduction des eaux de ruissellement dans les égouts.

Par la suite, nous avons montré que dans le transfert de chaleur, la puissance est exprimée en Watt (ou kW) et que l'énergie consommée s'exprime en Wattheures (ou kWh).

Finalement, nous avons vu que l'énergie ou la chaleur est échangée entre les corps par trois modes principaux. Nous avons donc présenté les équations régissant la conduction, la convection et la radiation. Une fois assemblées, ces trois équations représentent le transfert de chaleur entre deux corps, ou dans le cas qui nous concerne l'échange de chaleur entre un bâtiment et l'environnement extérieur.

Le chapitre suivant mettra en lumière les différentes études canadiennes portant sur les toitures végétales ainsi que les résultats obtenus.

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Évaluations expérimentales de la performance thermique des toitures végétales 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 bâties 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*).

2.1.1 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 plate forme 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 dans un environnement naturel, exempt de bâtiments et de haute végétation pouvant offrir de l'ombrage, ce qui aurait grandement influencé les résultats de l'étude. La prise de données s'est effectuée de novembre 2000 à septembre 2001.

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. La figure ci-dessous présente une coupe typique des deux sections du FRF présentées dans l'étude de Bass et Baskaran (2003).

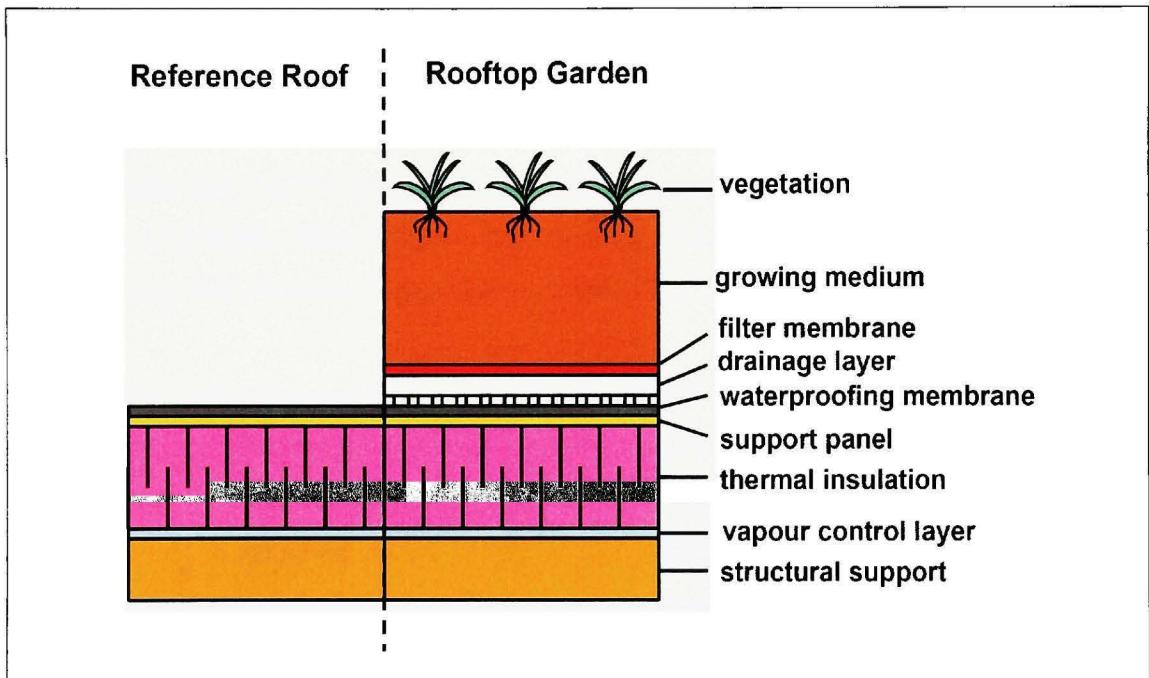


Figure 2.1 FRF - Détails de la construction.

Tirée de Bass et Baskaran (2003, p. 46)

Instrumentation :

Les deux sections du FRF ont été instrumentées de façon à pouvoir recueillir des données de température à différents niveaux, de flux de chaleur traversant le toit, de réflectance solaire, de pourcentage d'humidité dans le terreau ainsi que de conditions climatiques ambiantes (température, humidité relative et radiation solaire totale). L'enregistrement des données s'est fait à chaque minute avec une moyenne pour chaque 15 minutes.

La température interne du bâtiment a été maintenue stable tout au long de l'étude à l'aide d'un système CVCA (Chauffage Ventilation Climatisation de l'Air), lequel a enregistré sa consommation énergétique tout au long de cette même période. La réflectance solaire a aussi été mesurée grâce à des sondes placées au dessus de chacun des 2 toits et mesurant la quantité d'énergie solaire réfléchie par la surface des toits. Ainsi, la quantité d'énergie solaire absorbée par le toit peut être obtenue en soustrayant l'énergie reflétée par la toiture à la radiation solaire totale incidente.

Résultats - Profils de température au niveau de la membrane d'étanchéité :

Pour les mois frais (automne et hiver), les auteurs ont divisé les résultats en deux périodes distinctes. La première traite des jours précédents la chute des premières neiges tandis que la deuxième regroupe les jours où une épaisse couche de neige était présente.

Pendant la période exempte de neige, la température extérieure a varié entre -10°C et 0°C. La température de la membrane du toit de référence a enregistré une valeur plus basse le matin (environ -15°C) mais cette dernière a atteint un maximum de 10°C l'après-midi dû à l'absorption de la radiation solaire incidente. Par contre, la membrane d'étanchéité du toit vert a conservé une température stable pour toute cette période avec une valeur d'environ 5°C. Les auteurs attribuent cet effet au terreau non gelé qui agit comme un isolant par dessus la membrane d'étanchéité.

Pendant la période où une épaisse couche de neige recouvrait les deux toits, le terreau gelé n'offrait aucune isolation mais réduisait légèrement les pertes de chaleur par convection. C'est pourquoi, pendant cette période, la température de la membrane du toit de référence a enregistré une valeur stable proche de 0°C tandis que celle du toit vert a enregistré une valeur stable aux alentours de 3-4°C.

Pour les mois chauds (printemps et été), la température extérieure a varié entre 10°C et 30°C au printemps et 10°C et 35°C en été. La membrane d'étanchéité du toit de référence a

enregistré un maximum de plus de 55°C au printemps et 70°C en été. Le toit vert a pour sa part permis de réduire largement ce maximum avec des températures maximales de membrane stables entre 16°C et 21°C durant le printemps et autour de 25°C l'été. Cette réduction est principalement due, selon les auteurs, à l'effet d'isolant et de masse thermique que permettent la couche de substrat de culture et ses plantes. L'effet d'évaporation de l'eau contenue dans le substrat de culture (phénomène endothermique) contribue aussi mais de façon moindre. La figure 2.2 présente les profils de température des membranes du FRF pour une journée estivale typique.

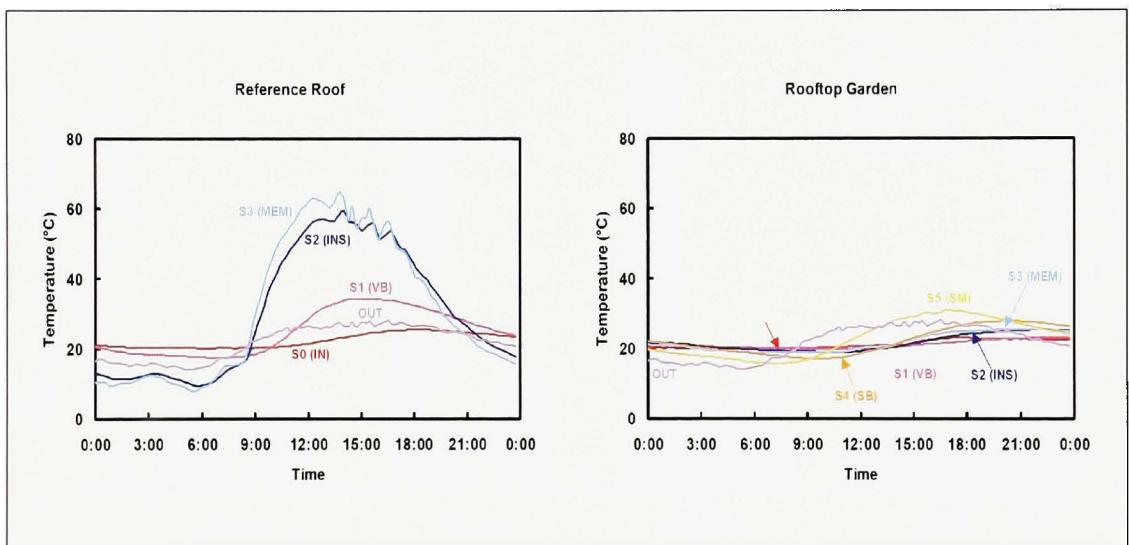


Figure 2.2 FRF – Température de la membrane d'étanchéité (16 Juillet 2001).
Tirée de Bass et Baskaran (2003, p. 59)

Résultats – Fluctuation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité :

Le premier phénomène observé par les auteurs au niveau des fluctuations de température de la membrane d'étanchéité est que la température de la membrane du toit de référence suit les variations de la température extérieure ambiante. Les fluctuations sont par contre beaucoup diminuées par une couverture de neige qui offre un bon coefficient d'isolation (moins de 10°C de variation dans ces périodes). Durant la période estivale la membrane du toit de référence a subi des fluctuations de l'ordre de presque 50°C dues à l'absorption des

radiations solaires pendant la journée et à la réémission de cette énergie pendant la nuit. Les variations de température rencontrées par la membrane du toit vert sont significativement plus basses (de l'ordre de 7°C) et sont aussi plus faibles que les variations de température extérieure ambiante (12°C pendant l'été). La figure 2.3 présente la valeur de la fluctuation médiane de la température mesurée au niveau de la membrane d'étanchéité pour chaque saison.

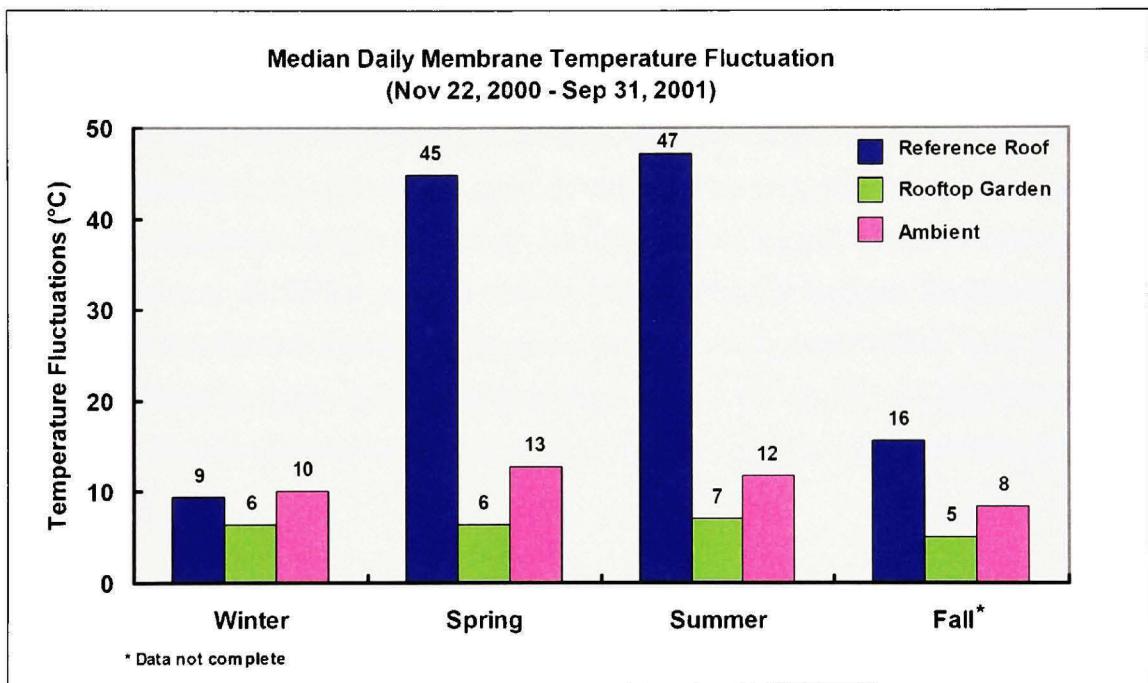


Figure 2.3 FRF – Fluctuation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité.

Tirée de Bass et Baskaran, (2003, p. 61)

Résultats – Flux de chaleur traversant le toit :

Pour la période froide (automne et hiver), la température à l'intérieur du bâtiment a été gardée constante par le système de chauffage. Ainsi, le bâtiment a surtout perdu de la chaleur pendant cette période et donc les flux enregistrés par les sondes étaient négatifs. Comme pour les fluctuations de température, l'arrivée de la neige a réduit les pertes de chaleur du bâtiment en offrant un matelas isolant supplémentaire à la toiture. Ainsi, pour l'automne, le toit de

référence a enregistré des pertes de chaleur de l'ordre de 10W/m^2 tôt le matin et devenant légèrement positives (gains de chaleur) aux alentours de midi. Le toit vert quant à lui a enregistré une perte de chaleur constante (flux négatif) pendant toute la période et s'élevant à environ 7W/m^2 . La réduction des pertes de chaleur par le toit vert est attribuée, selon les auteurs, au coefficient d'isolation supérieur offert par le substrat de culture non gelé. Par la suite, pendant les mois les plus froids de l'hiver, les deux types de toit ont conservé la même perte de chaleur moyenne de 8W/m^2 .

Pour la période chaude (printemps et été), les différences entre le toit de référence et le toit vert ont été beaucoup plus significatives. En effet, pendant une journée de printemps typique, le toit de référence a enregistré une perte de chaleur d'environ 10W/m^2 tôt le matin et se changeant rapidement en gain de chaleur. Le toit vert pour sa part a conservé une perte de chaleur constante de 5W/m^2 pendant toute la journée. Pendant les jours les plus chauds de l'été, le toit de référence a enregistré un gain de chaleur maximal de 30W/m^2 alors que le toit vert a maintenu les pertes et les gains de chaleur très proches de zéro. La figure ci-dessous présente le flux de chaleur traversant le toit et mesuré lors d'une journée estivale typique (16 Juillet 2001).

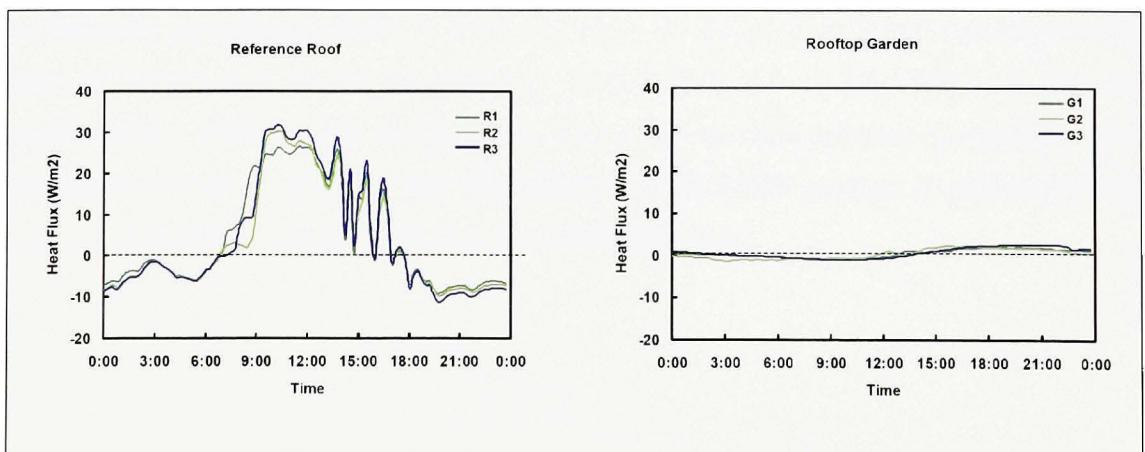


Figure 2.4 FRF – Flux de chaleur pénétrant le toit (16 juillet 2001).
Tirée de Bass et Baskaran (2003, p. 65)

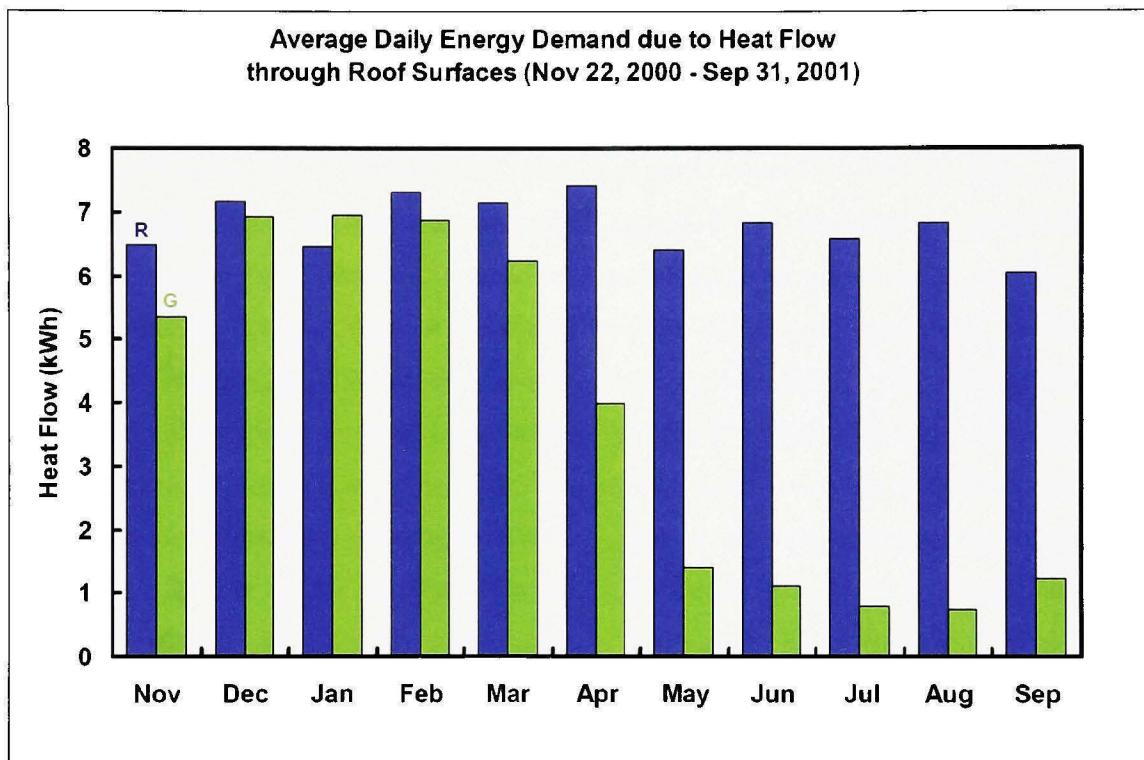
Résultats – Performance énergétique :

Pour calculer la quantité totale de chaleur traversant le toit vert et le toit de référence, les courbes de flux de chaleur sont intégrées en fonction du temps. Le résultat obtenu est une quantité d'énergie par unité de surface (kWh/m^2) pour une période donné. Si on multiplie cette valeur par la superficie de la toiture en m^2 , on obtient la quantité totale d'énergie qui a traversé le toit pendant la période.

Les résultats enregistrés pour le toit vert ont démontré que ce dernier, pour les mois d'été, ne gagnait que 1 kWh pendant la journée et perdait moins de 1 kWh pendant la nuit. Il est à noter que pendant les mois de l'étude, les plantes ne couvraient que 60% à 70% de la surface du toit et que les performances de ce dernier étaient beaucoup plus attribuables aux propriétés thermiques du substrat de culture qu'aux plantes elles-mêmes. L'effet d'ombrage et d'évapotranspiration par les plantes n'a donc pas joué un grand rôle dans la performance thermique du FRF. Pendant la période hivernale, les résultats montrent que les deux toits ont perdu environ la même quantité d'énergie soit 6 à 8 kWh par jour mais le toit vert a diminué les pertes de chaleur pendant les quelques mois où le substrat de culture n'était pas gelé.

La demande énergétique totale, incluant chauffage et climatisation a été constante tout au long de l'étude pour le toit de référence, variant entre 6.0 et 7.5 kWh/j. Le toit vert expérimental a démontré une diminution de 10% à 15% de cette demande énergétique totale pendant la période hivernale et une diminution de 75% à 90% pendant la période estivale avec une demande moyenne en dessous de 1.5 kWh par jour.

La figure 2.5 présente graphiquement la quantité d'énergie entrant et sortant des deux types de toitures du FRF pour toute la période de l'étude. On peut y observer les nettes différences entre le toit de référence (R) et le toit vert (G).



Toit de référence (R) et toit vert (G).

Figure 2.5 FRF - Demande énergétique.

Tirée de Bass et Baskaran, (2003, p. 65)

2.1.2 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 dédié 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 ou 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.

Instrumentation :

Chaque section du GRRF a été instrumentée de façon à pouvoir mesurer à chaque minute les profils de températures dans les différentes couches des toits, le flux de chaleur traversant le toit, la réflectance solaire, le pourcentage d’humidité dans le substrat de culture ainsi que les conditions climatiques environnantes comme la température ambiante, l’humidité relative et la radiation solaire totale. La mesure des températures aux différentes locations des trois toits se fait aussi selon les différentes épaisseurs des couches composant le toit. La figure 2.6 ci-dessous montre une coupe typique du GRRF.

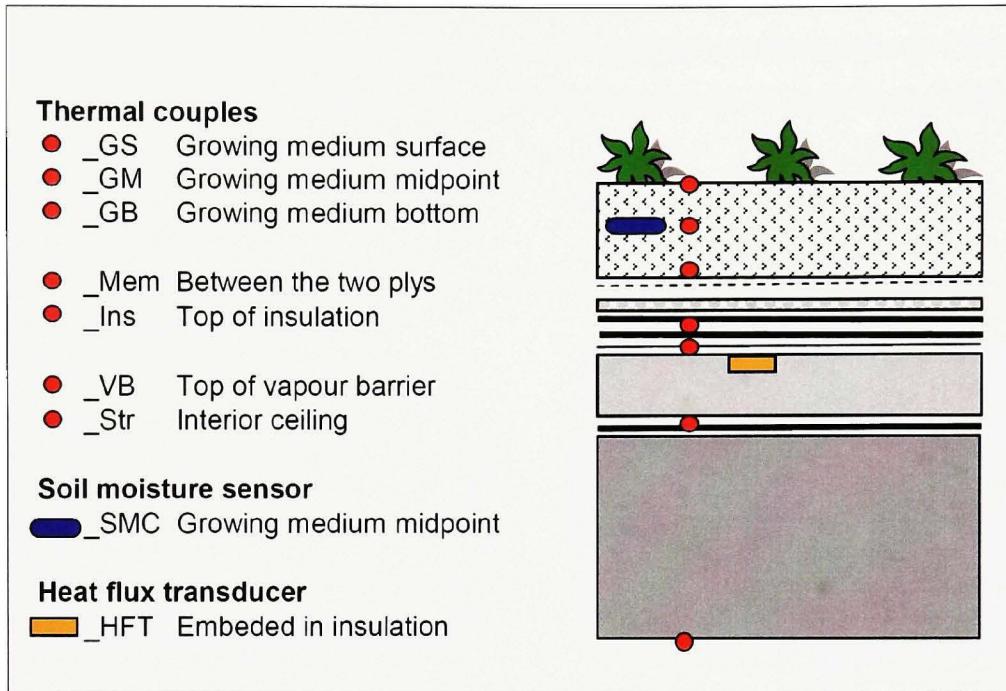


Figure 2.6 GRRF – coupe typique et position des sondes.

Tirée de Connally et Liu (2006, p. 31)

Les résultats présentés dans le rapport d'étude (Connally et Liu, 2006) sont basés sur la compilation des données de l'année 2005 pour les trois sections du GRRF et pour un couvert végétal bien établi sur tous les systèmes.

Résultats - Température maximale de la membrane d'étanchéité :

La température maximale enregistrée au niveau de la membrane d'étanchéité du toit de référence s'est située entre 60°C et 70°C pendant 11% des 365 jours de l'année 2005. Aussi, cette température maximale a été plus haute que 50°C pendant 27% de l'année 2005 et plus haute que 40°C pendant 43% de la durée totale de l'étude. En ce qui concerne les deux systèmes de toit vert étudiés, la membrane d'étanchéité de ces derniers a enregistré une température maximale entre 0°C et 30°C pendant 99% de l'année 2005 pour le toit GR-1 et pendant 100% du temps pour le toit GR-2. Il est à noter que la température extérieure

maximale enregistrée pour l'année 2005 est de 24.7°C. La figure 2.7 présente la température de la membrane d'étanchéité des trois toits pour une journée estivale typique de l'année 2005 (1^{er} août 2005). On peut y comparer les maximums atteints par les membranes d'étanchéité pour chaque type de toit.

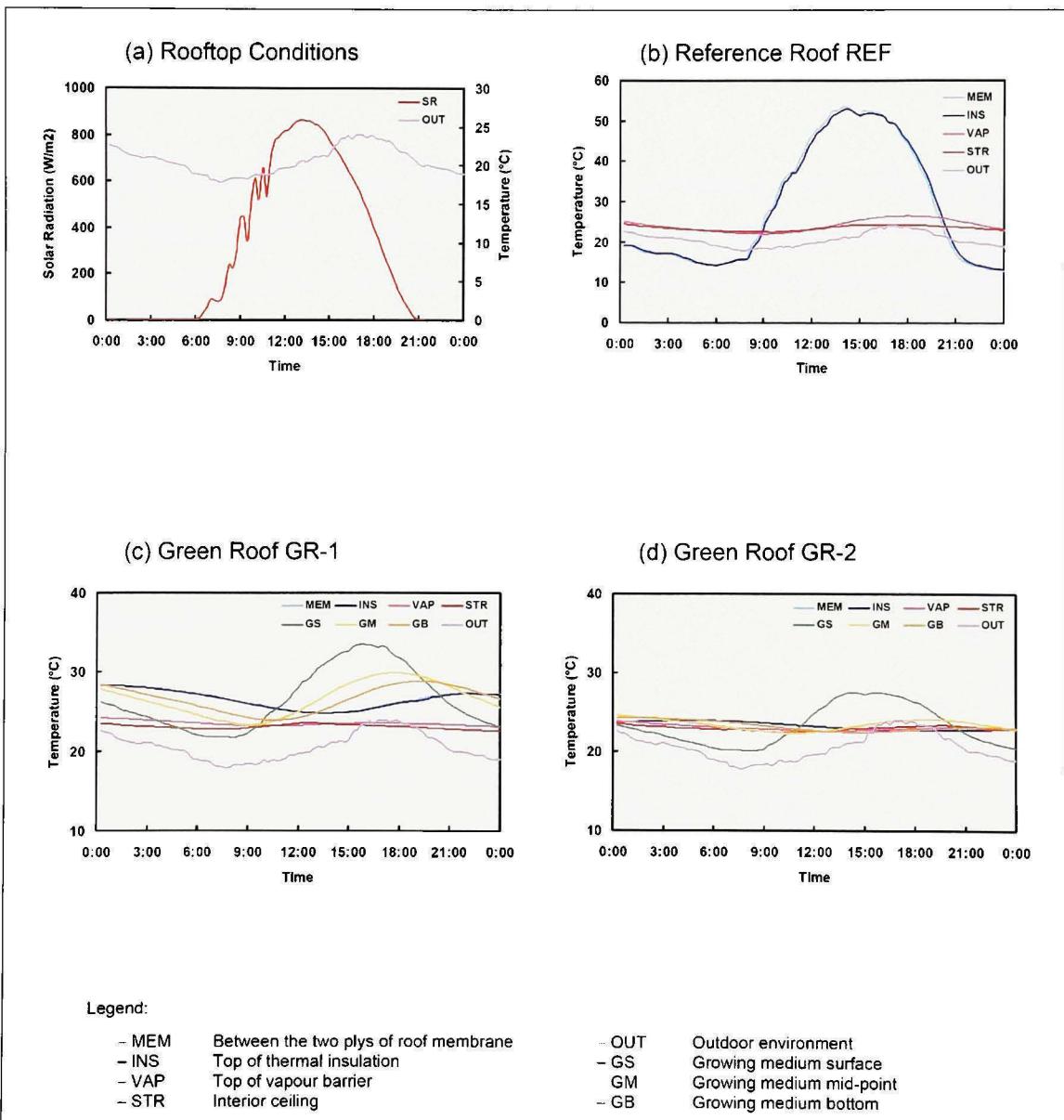


Figure 2.7 GRRF – profils de température (1^{er} août 2005).
Tirée de Connelly et Liu (2006, p. 45)

Résultats – Fluctuation de la température de la membrane d'étanchéité :

Pour la durée de l'étude, on a observé que la température maximale de la membrane d'étanchéité du toit de référence a été généralement toujours plus haute que la température ambiante, avec une fluctuation variant entre 40°C et 60°C pour la période estivale. En comparaison, les deux systèmes de toit vert ont beaucoup diminué cette fluctuation en abaissant la température maximale de la membrane de même qu'en augmentant la température minimale de cette dernière.

Ainsi, la fluctuation moyenne enregistrée pour le toit de référence a été de 43-48°C pour la période estivale et 16-19°C pour la période hivernale. Le toit vert GR-1 a réduit cette fluctuation à moins de 5°C en période estivale et moins de 2°C pour la période hivernale. Le toit vert GR-2 a enregistré une fluctuation de température de membrane d'étanchéité de moins de 2°C pour toute l'année 2005.

Il est à noter que la fluctuation de température diurne, définie comme la différence entre la température ambiante maximale et la température ambiante minimale observée pour une journée, a été mesurée à environ 10°C dans la période estivale et à environ 5°C pendant la période hivernale.

La figure 2.8 résume les résultats obtenus en ce qui a trait à la fluctuation de la température de la membrane d'étanchéité pour l'année 2005.

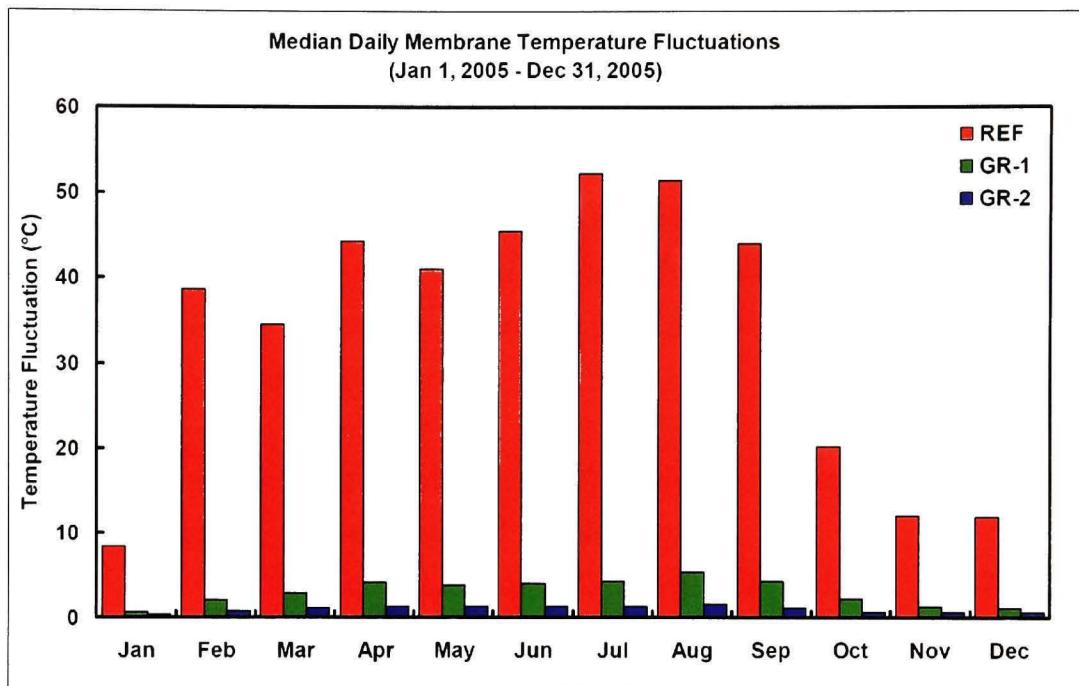


Figure 2.8 GRRF – fluctuation de la température de la membrane d'étanchéité pour l'année 2005.

Tirée de Connelly et Liu (2006, p. 49)

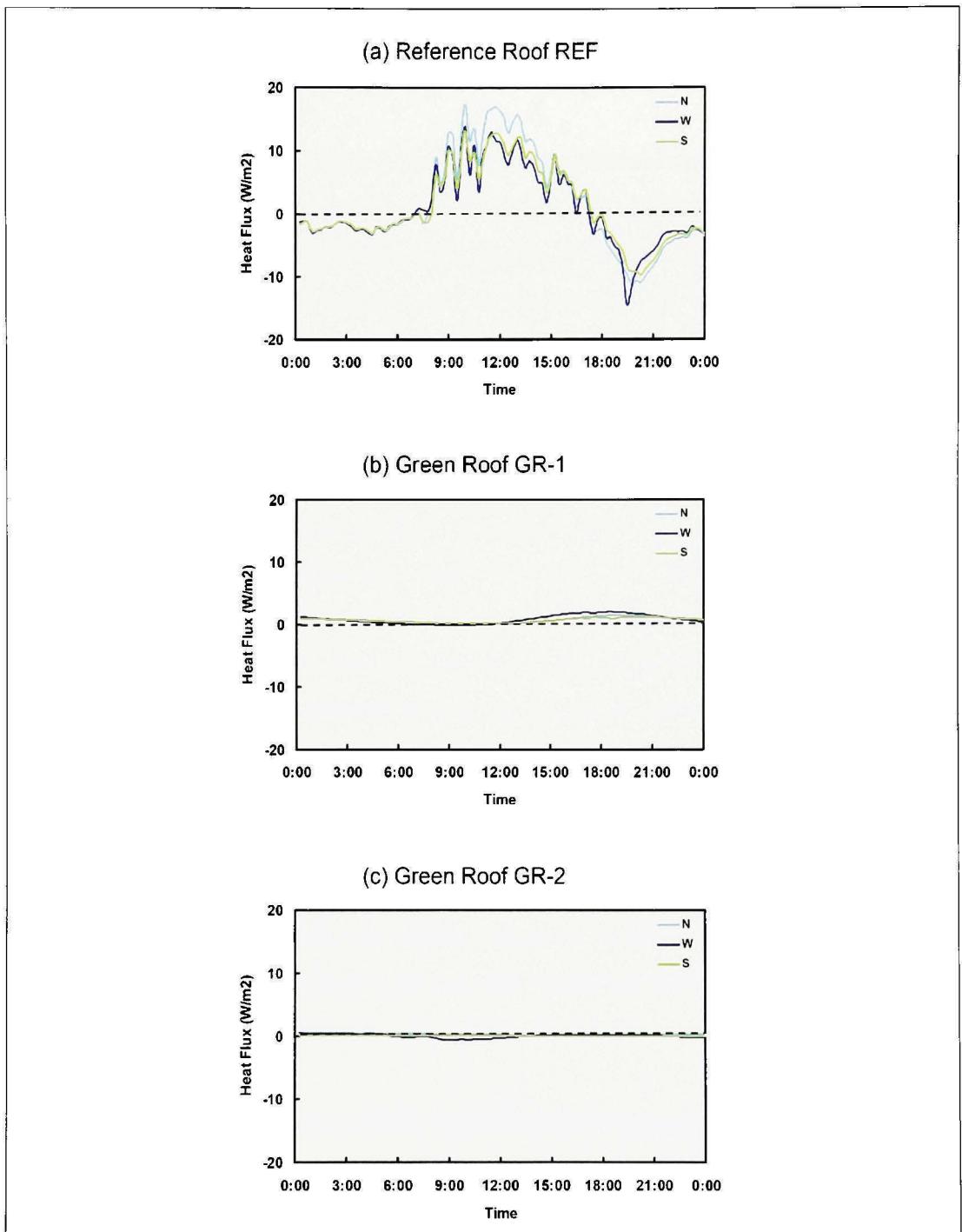
Résultats - Flux de chaleur traversant le toit:

La température à l'intérieur du bâtiment a été maintenue à une valeur constante de 21°C à l'aide d'un système de climatisation et chauffage. Pendant la période hivernale, puisque la température extérieure était plus faible que celle à l'intérieur du bâtiment, un flux de chaleur négatif a été enregistré (la chaleur quitte le bâtiment). Le toit de référence a perdu de la chaleur à un taux d'environ 2 W/m² tôt en matinée. Au cours de la journée, absorbant l'énergie solaire, cette perte de chaleur a été réduite à environ 1W/m². Pour ce qui est des deux systèmes de toit vert, le taux de perte de chaleur a été constant à environ 2 W/m².

pendant toute la journée. Il est à noter qu'aucune différence majeure n'a été mesurée entre les toits GR-1 et GR-2 pour cette période.

En période estivale, les auteurs ont observé que le flux de chaleur traversant la toiture était grandement influencé par l'intensité de la radiation solaire. Ainsi, le toit de référence a enregistré une faible perte de chaleur en début de journée due à la radiation de sa chaleur mais rapidement, la chaleur a commencé à entrer dans le toit pour atteindre un maximum de 17W/m^2 en après-midi. En ce qui concerne les toits verts, le flux de chaleur enregistré a été beaucoup plus faible et stable. En effet, les toits verts ont presque réduit à zéro l'entrée de chaleur dans le bâtiment pendant les heures les plus chaudes et ont retardé les pertes de chaleur pendant les heures les plus fraîches.

La figure 2.9 ci-dessous montre la variation du flux de chaleur à travers les trois types de toiture pour une journée estivale typique (1^{er} août 2005).



**Figure 2.9 GRRF – flux de chaleur traversant le toit (1er août 2005).
Tirée de Connelly et Liu (2006, p. 46)**

Résultats – Performance énergétique:

Tout comme pour le FRF, l'intégration selon le temps des courbes de flux de chaleur permet de calculer l'énergie totale qui entre et sort du bâtiment. En supposant que toute l'énergie qui sort de la toiture doit être compensée par la même quantité d'énergie de chauffage et que toute l'énergie qui pénètre le bâtiment par la toiture doit être compensée par la même quantité d'énergie de climatisation, on obtient la consommation d'énergie nécessaire au maintien des conditions de température stable à l'intérieur du bâtiment.

Pour la période hivernale (octobre à mars), la moyenne quotidienne des pertes de chaleur par la toiture de référence a été calculée à 0.075 kWh/m^2 et les gains de chaleur à 0.015 kWh/m^2 . Les deux toits verts ont légèrement réduit les pertes de chaleur avec une moyenne quotidienne de 0.051 kWh/m^2 pour GR-1. Ceci représente une diminution de 32%. GR-2 a été 8% plus efficace encore pour ce qui est des réductions de pertes de chaleur. De plus, pour les gains de chaleur, les deux systèmes de toit vert ont réduit à zéro l'entrée de chaleur par le toit dans le bâtiment pour cette période (réduction de 100%).

Pour la période estivale (avril à septembre), les pertes et les gains de chaleur pour le toit de référence ont été à peu près les mêmes avec une moyenne quotidienne de 0.060 kWh/m^2 . Les toits GR-1 et GR-2 ont grandement réduit l'entrée et la sortie de chaleur. La moyenne quotidienne pour l'entrée de chaleur a été calculée à 0.003 kWh/m^2 (diminution de 95%) et à 0.020 kWh/m^2 (diminution de 66%) pour les pertes de chaleur.

Ainsi, si on regarde la demande annuelle d'énergie requise pour conserver des conditions de température stable à l'intérieur du bâtiment, cette demande s'élève à 39.0 kWh/m^2 pour la section du toit de référence et pour l'année 2005. Le toit vert GR-1 a réduit cette demande de 26.1 kWh/m^2 et le toit vert GR-2 de 25.9 kWh/m^2 . Ceci correspond donc à une réduction de la demande énergétique d'environ 66% pour chaque toit vert. Il est à noter qu'au total, sur un an, les deux systèmes de toit vert ont démontré environ la même performance énergétique.

La figure 2.10 présente la demande énergétique des trois types de toiture du GRRF pour l'année 2005. Le toit de référence est représenté en rouge (REF), le toit vert (GR-1) en vert et le toit vert (GR-2) en bleu.

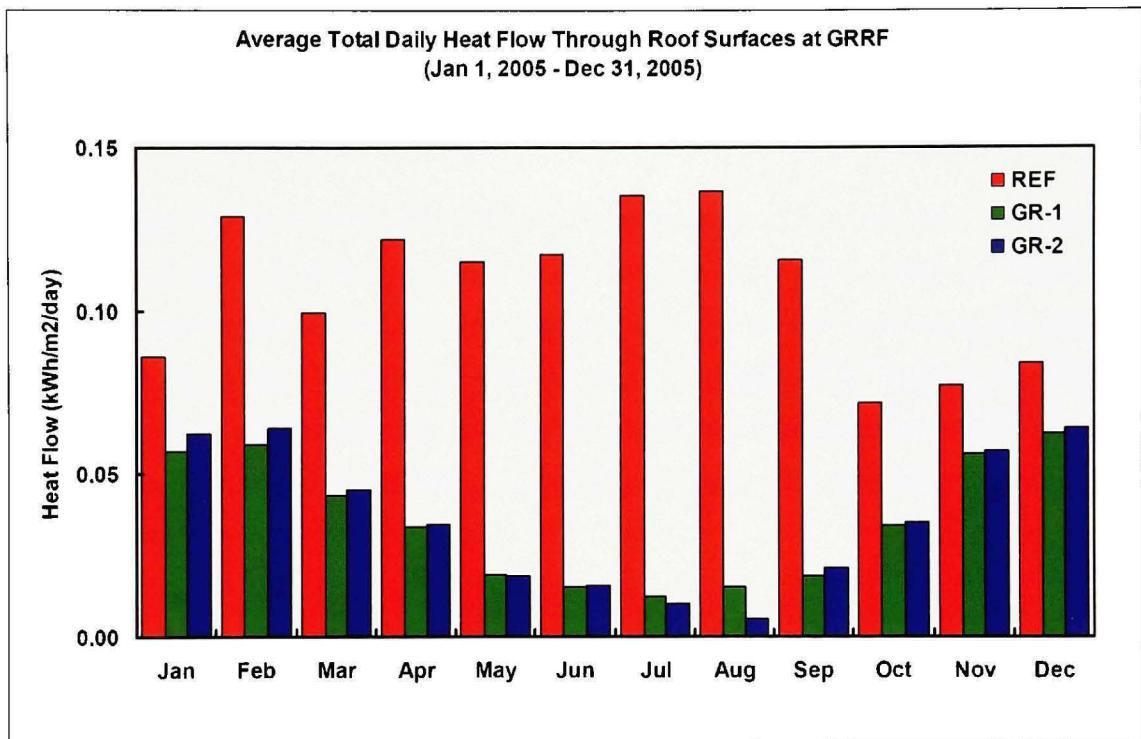


Figure 2.10 GRRF – Demande énergétique pour l'année 2005.
Tirée de Connelly et Liu (2006, p. 53)

2.1.3 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.

Description des deux toits verts étudiés :

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 allégée (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.

La figure 2.11 présente une coupe de chaque système du ENCC.

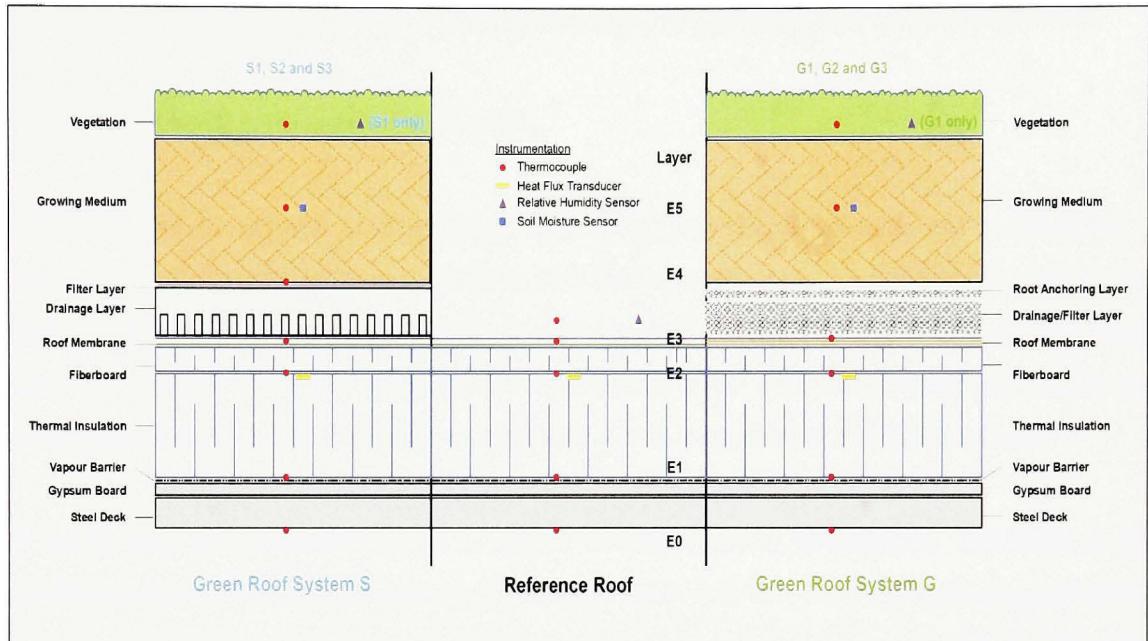


Figure 2.11 ENCC - Coupe typique des systèmes de toit vert étudiés.
Tirée de Liu et Bass (2005, p. 12)

Prise de données :

La période d'observation s'est étendue du mois de mai 2002 au mois de juin 2003, période pendant laquelle les plantes des deux systèmes de toit vert n'étaient pas beaucoup développées et ne procuraient qu'une couverture d'environ 5%. Les trois sections de toiture (G, S et Référence) ont été instrumentées de façon à pouvoir enregistrer les profils de température dans chaque couche, le flux de chaleur traversant le toit et le pourcentage d'humidité contenu dans la terre. D'autres sondes ont permis d'enregistrer les conditions climatiques ambiantes telles que l'intensité de la radiation solaire, la température et l'humidité relative.

Il est à noter que, la couverture végétale étant très faible durant l'étude (5%), la performance thermique enregistrée est largement attribuable au substrat de culture et au phénomène d'isolation et d'évaporation plutôt qu'aux plantes et leur phénomène d'évapotranspiration.

Température de la membrane d'étanchéité :

Durant la période estivale, la température de la membrane d'étanchéité du toit de référence a atteint un maximum de 66°C aux environs de 14h00, l'après-midi. La température interne du bâtiment à cette même période a quant à elle atteint un maximum de 38°C. Les deux toits verts ont significativement diminué ces maximums avec une température maximale de membrane de 38°C et 36°C pour le « système S » et le « système G » respectivement.

Il est à noter que contrairement à la toiture de référence, la température maximale de la membrane d'étanchéité est atteinte en fin d'après-midi, soit vers les 19h00 en moyenne pour les toits verts. Cela est principalement dû au fait que la couche de terre ralenti le transfert de chaleur entre l'extérieur et la surface de la membrane d'étanchéité grâce aux mécanismes d'absorption, d'isolation et d'évaporation. Il est observé que plus l'épaisseur de la couche de terre augmente, plus la pénétration de la chaleur dans cette dernière est lente et plus son facteur d'isolation est grand. C'est pourquoi la membrane d'étanchéité du « système G » qui a 100 mm de substrat de culture a enregistré la température maximale la plus faible.

La figure 2.12 présente les courbes de variation de température pour les différents types de toitures et aux différents niveaux de mesure pour une journée estivale typique (26 Juin 2003). La diminution de la température maximale de la membrane d'étanchéité y est mise en évidence.

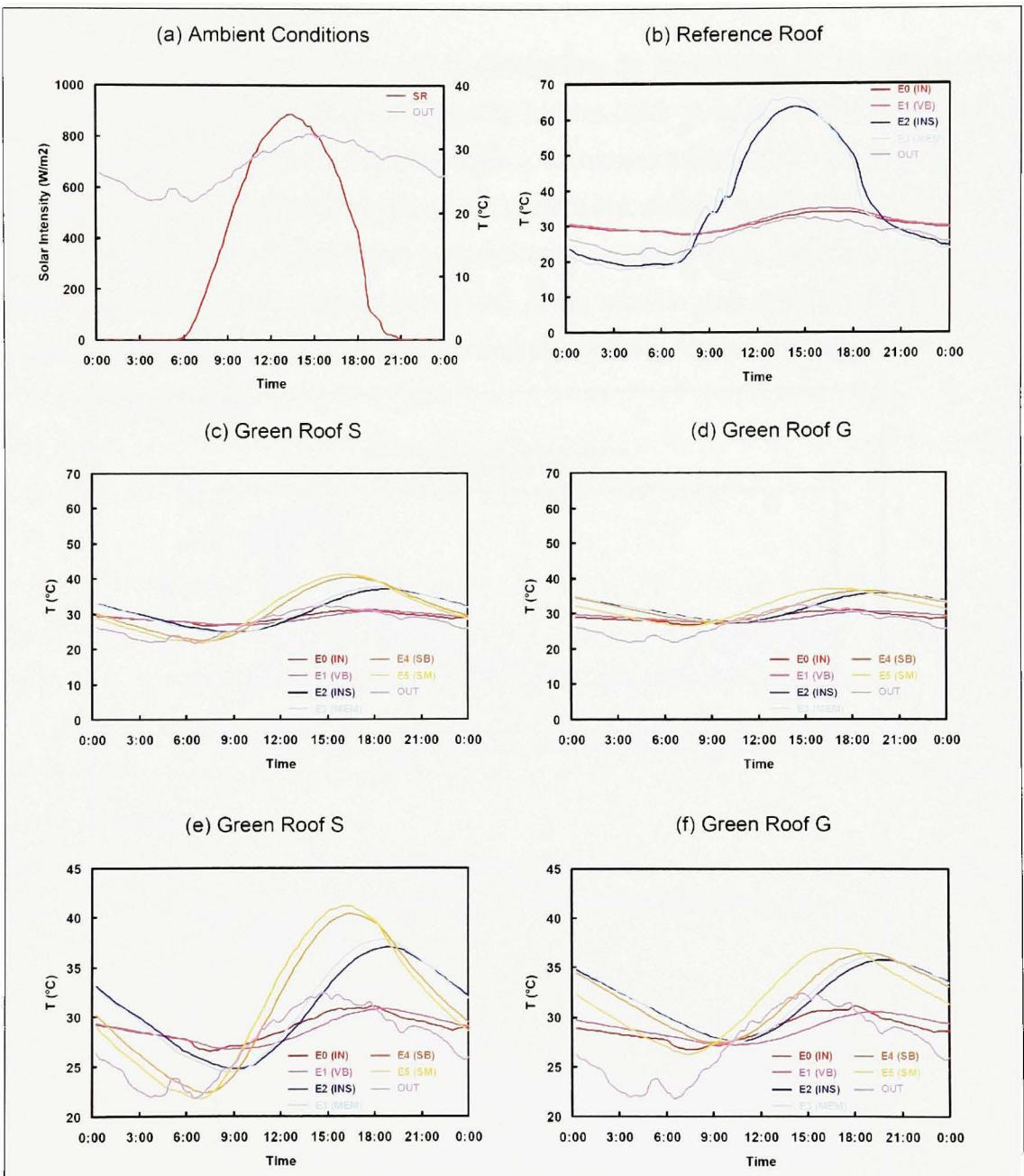


Figure 2.12 ENCC - Profils de température (26 Juin 2003).
Tirée de Liu et Bass (2005, p. 15)

Fluctuation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité :

C'est durant la période estivale que la fluctuation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité a été la plus grande. L'écart entre la température maximale et la température minimale pour une même journée a été mesuré à plus de 50°C pour la toiture de référence. Les deux systèmes de toit vert ont quant à eux réduit cet écart à environ 10°C. La figure 2.13 présente la fluctuation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité avant et après l'ajout des systèmes de toit vert. Ainsi, avant le mois de juillet, aucun système de toit vert n'étant installé, l'écart est beaucoup plus grand qu'après cette date.

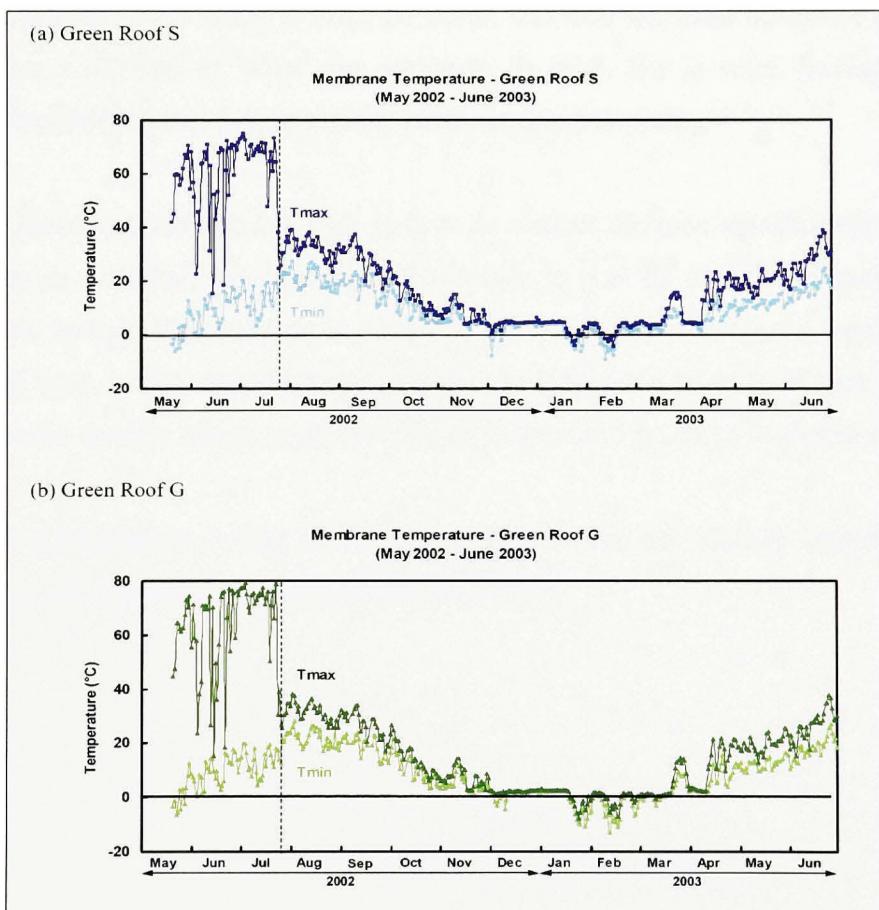


Figure 2.13 ENCC – Fluctuation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité.
Tirée de Liu et Bass (2005, p. 14)

Flux de chaleur traversant le toit :

Les sondes installées au niveau de l'isolant du toit ont enregistré l'échange de chaleur entre le bâtiment et l'environnement extérieur durant toute la période de l'étude. Ces instruments ont mesuré le flux de chaleur entrant et sortant du toit ; une valeur positive représentant de la chaleur qui entre dans le bâtiment et une valeur négative représentant une perte de chaleur à travers la toiture.

Pour le toit de référence et durant la période estivale, la chaleur commence à entrer dans le bâtiment peu de temps après le lever du soleil, soit vers les 6h00 du matin. Le maximum enregistré est environ 15 W/m^2 aux alentours de midi. Par la suite, la chaleur continue d'entrer dans le bâtiment jusque vers les 18h00 en début de soirée.

Pour les deux systèmes de toit vert, le flux de chaleur diminue significativement avec un maximum de 2.5W/m^2 . Pour les deux toits verts, le gain de chaleur ne commence qu'en après-midi, lorsque l'intensité de la radiation solaire est la plus forte. En matinée, pour les deux toits verts, le flux de chaleur est négatif et le bâtiment perd de la chaleur. Ceci indique que la couche de terre ralenti le gain de chaleur et le retarde par rapport au toit de référence.

La figure 2.14 présente le flux de chaleur enregistré pour une journée estivale typique (26 Juin 2003) sur la plateforme expérimentale du ENCC.

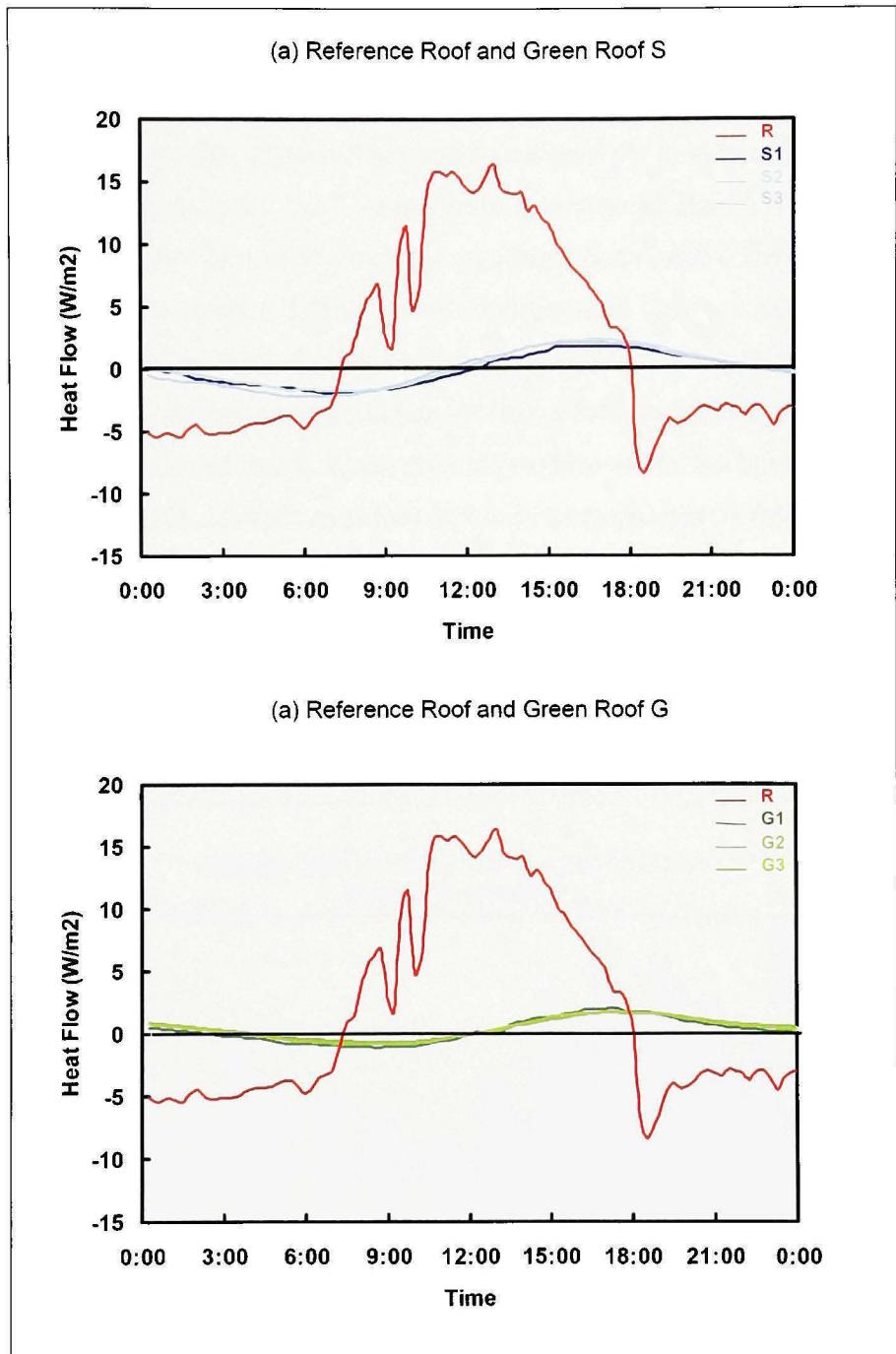


Figure 2.14 ENCC – Flux de chaleur traversant la toiture (26 Juin 2003).

Tirée de Liu et Bass (2005, p. 15)

Efficacité Énergétique :

Si on assume que la température à l'intérieur du bâtiment doit être gardée constante, toute chaleur qui entre ou sort du bâtiment doit être compensée par la même quantité d'énergie de climatisation et de chauffage. Ainsi, en intégrant la courbe du flux de chaleur sur le temps (cela revient à calculer l'aire sous la courbe) on obtient la quantité d'énergie nécessaire pour garder la température stable à l'intérieur du bâtiment. Les deux systèmes de toit vert ont diminué de façon constante la quantité de chaleur traversant le toit pendant toute la durée de l'étude. La réduction s'élève à un maximum de 90% pendant la période estivale contre 10% à 30% pendant la période hivernale. Ainsi, pour la première année de l'étude et sur une base de consommation annuelle, les deux systèmes de toit vert ont diminué la demande en énergie de climatisation (entrée de chaleur) de 95% tandis qu'ils ont diminué la demande en énergie de chauffage (pertes de chaleur) de 23%. La figure 2.15 présente la consommation d'énergie moyenne de climatisation et de chauffage nécessaire pour garder la température constante à l'intérieur du bâtiment pour une année.

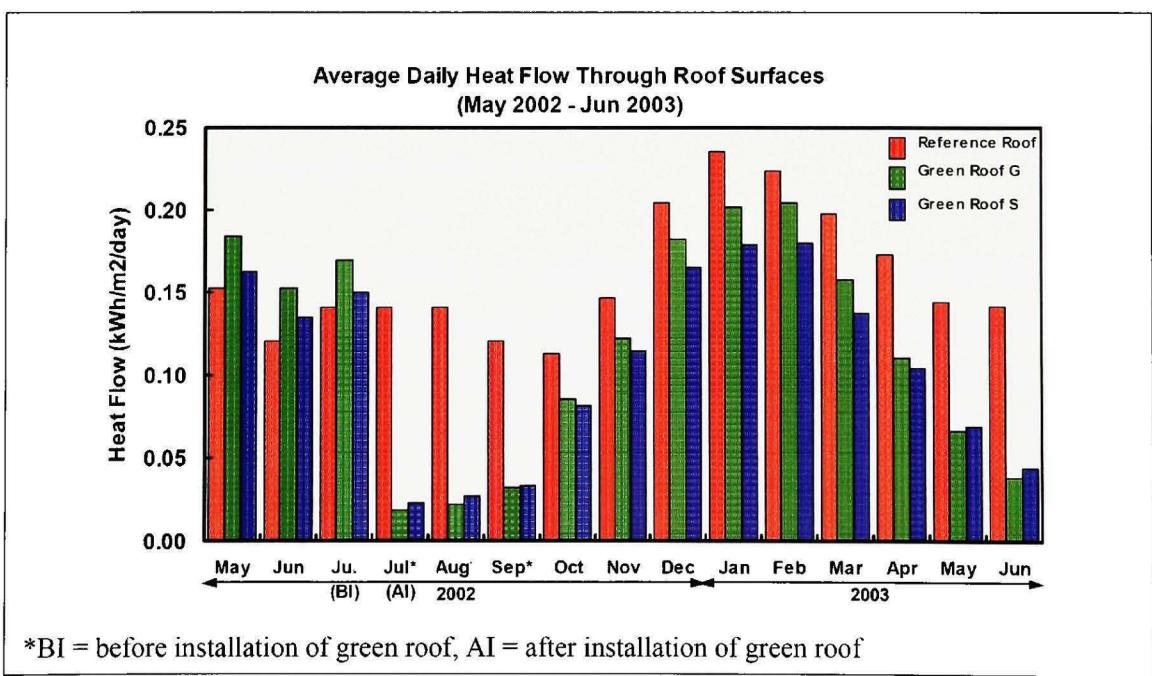


Figure 2.15 ENCC – Demande énergétique mensuelle moyenne.
Tirée de Liu et Bass (2005, p. 16)

2.2 Modélisations mathématiques du transfert de chaleur dans une toiture végétale

La plupart des modèles mathématiques utilisés pour représenter les toits verts utilisent le concept de transfert de chaleur à travers les différentes couches du toit, lesquelles possèdent des caractéristiques physico thermiques stables ou dynamiques, comme dans le cas de la couche des plantes (Gaffin et al., 2004), (Lazzarin, 2005). Ces modèles sont complétés et validés à l'aide de données expérimentales obtenues sur des vrais toits verts ou sur des modèles expérimentaux. Le toit étudié est la plupart du temps divisé en plusieurs couches représentant les éléments principaux de sa construction tels que la couche de plantes, la couche terre et la couche structurale.

La performance thermique des toits verts peut donc se caractériser en fonction de ses trois couches principales. Tel que mentionné plus haut, la couche structurale est souvent considérée comme homogène (Palomo Del Barrio, 1998) tandis que la couche végétale (constituée de la terre et des plantes) est plus complexe car elle implique de nombreux mécanismes tels que l'absorption de chaleur par les plantes, la radiation diffuse des plantes (énergie solaire réémise par les plantes), la convection incluant l'évapotranspiration, procédé par lequel les plantes perdent de la chaleur par transpiration des feuilles et finalement la conduction de la chaleur aux couches sous-jacentes.

La couche végétale est donc difficile à modéliser avec précision. Le problème principal réside en la complexité et l'hétérogénéité de cette couche. Le comportement thermique de la couche de végétation peut alors être évalué empiriquement en se servant de données expérimentales plutôt que d'une équation mathématique (Lazzarin, 2005); (Wong et al. 2003). Cependant, de nombreuses équations ont été développées pour décrire le comportement thermique dynamique d'un couvert végétal. Les équations de Palomo Del Barrio (1998) entre autres, ont été utilisées par d'autres chercheurs dans l'élaboration d'un modèle mathématique complet.

Chacun des quatre mécanismes de transfert de chaleur mentionnés plus haut participe à diminuer la quantité d'énergie transférée entre le toit vert et le bâtiment sous-jacent. Selon Eumorfopoulou et Aravantinos (1998), la protection thermique d'un bâtiment, grâce à un toit vert, est due à 27% à la réflexion de la chaleur par les plantes et à 60% à l'absorption de l'énergie solaire par les plantes et le sol ainsi qu'à l'évapotranspiration. Il en découle que seulement 13% de l'énergie solaire est transmise à travers le toit.

L'étude de Lazzarin et al. (2005) démontre quant à elle que dans le cas d'un bâtiment protégé par un toit vert, 23% de l'énergie solaire reçue par le toit est réfléchie, 39% est absorbée, 24% est réémise et 12% est perdue par évapotranspiration (voir figure 2.16).

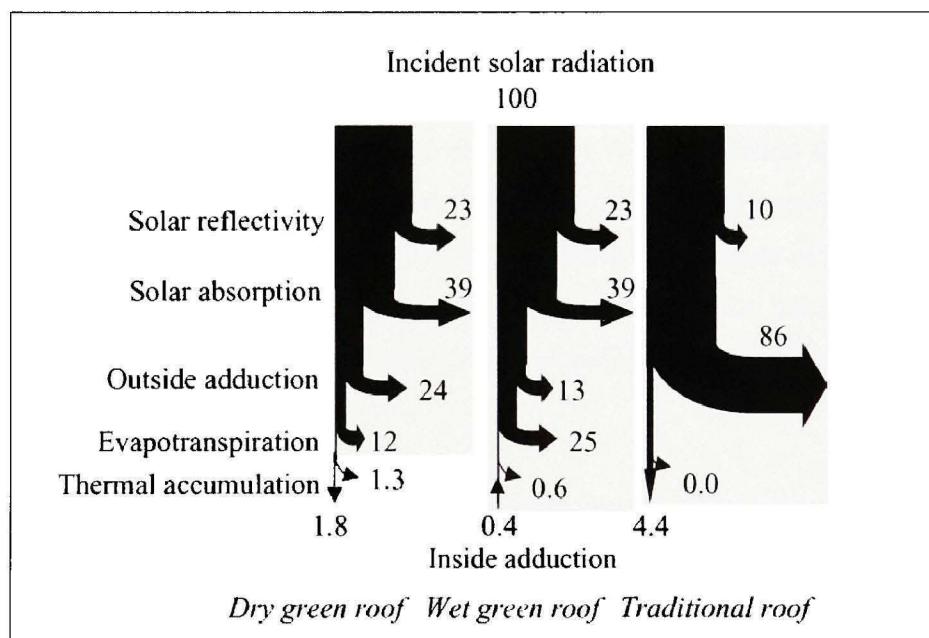


Figure 2.16 Transfert de chaleur dans le modèle de Lazzarin et al.
Tirée de Lazzarin et al. (2005, p. 1265)

Pour ce qui est des couches sous-jacentes à la couche végétale, chacune est modélisée par une équation d'équilibre énergétique dynamique basée entre autres sur la chaleur spécifique du matériau concerné, l'épaisseur de la couche, sa conductivité thermique, le pourcentage

d'humidité contenue dans la couche, etc. Les équations sont couplées ensemble avec les conditions frontières pour représenter au total, l'ensemble du toit vert.

Afin de résoudre les équations assemblées décrivant le comportement thermique du toit, des méthodes mathématiques itératives telles que la méthode des différences finies (Lazzarin, 2005 et Rakesh & Kaushik, 2005) utilisant le concept de nœud ou la méthode des éléments finis (Theodosiou, 2003) peuvent être utilisées. Ces méthodes permettent de déterminer la température à chaque nœud dépendamment des conditions frontières de la première couche (couche de végétation) et de la dernière (représentant l'intérieur du bâtiment).

Dans leur modèle par différences finies, Rakesh et Kaushik (2005) ont démontré une convergence des résultats prédictifs et mesurés avec une erreur de $\pm 3.3\%$ pour la température dans la couche de plantes et de $\pm 6.1\%$ pour la température à l'intérieur du bâtiment. Le toit vert modélisé réduit la température interne du bâtiment d'un maximum de 7.2°C dans les périodes les plus chaudes de la journée. Dans leur étude, les auteurs montrent que la densité de végétation (LAI) semble être le paramètre le plus important affectant le microclimat de la couche des plantes et qui a un effet direct sur la quantité de chaleur qui est transmise aux couches sous-jacentes. Ceci a aussi été observé dans d'autres études du même type (Lazzarin, 2005).

D'autres modèles, comme celui de Al-Sanea (2002), restent généraux en ce qui a trait au nombre de couches modélisées. Ces modèles ont l'avantage de pouvoir être adaptés à toutes sortes de constructions. Dans son étude, l'auteur a comparé 6 toitures différentes avec les conditions climatiques de l'Arabie Saoudite. Chaque couche a des propriétés physiques et thermiques différentes. Les équations de chaque couche composant le toit sont assemblées en utilisant la méthode des volumes finis et la résolution du modèle mathématique se fait de façon itérative par la méthode de *Gauss-Seidel* avec comme variables d'entrée, la température extérieure, l'humidité relative extérieure, la radiation solaire et la vitesse du vent. La simulation des 6 types de toits étudiés a permis de comparer l'effet thermique des différents éléments constituant la toiture. Les résultats démontrent que les gains de chaleur

proviennent principalement de la radiation solaire absorbée par les couches. Cette énergie est réémise (radiation diffuse), perdue par convection et transmise aux couches sous jacentes. En général, on observe que les pertes de chaleur par convection sont deux fois moins grandes que celles par radiation diffuse. Les différents matériaux de la construction du toit (béton, isolant, membranes, plâtre, etc.) jouent tous un rôle important dans la quantité de chaleur qui est transmise de couche en couche à travers le toit.

2.3 Simulations logicielles

Lorsqu'un modèle valide est obtenu, ce dernier peut être intégré à des logiciels de simulation de bâtiments complets afin de déterminer les gains énergétiques globaux apportés par le toit vert.

Selon Theodosiou (2003), plusieurs études proposent différents modèles mathématiques pour décrire le comportement thermique des toits verts mais ces modèles sont limités lorsqu'il s'agit de les intégrer à des simulations de bâtiments complets. Dans son étude, le toit est divisé en deux parties : la couche construction (*structure*) et la couche verte (*gardening*). Ces deux couches sont celles intégrées au logiciel de simulation choisi pour cette étude (*Suncode P.C.*). Le logiciel considère donc les deux couches comme deux zones thermiques additionnelles du modèle, avec un volume et une capacité thermique égaux à zéro. La température dans ces zones fictives est dictée par les équations du modèle mathématique qui calcule la température aux nœuds des couches. Ainsi, les données entrées dans le logiciel sont celles calculées analytiquement pour chaque intervalle de temps et qui prennent en considération tout les aspects thermiques du toit vert ainsi que les conditions environnementales.

La validation des résultats de simulation avec des données expérimentales démontre une corrélation dans tous les cas avec une erreur de $\pm 5\%$. C'est la température au niveau du substrat de culture qui semble être la plus difficile à prédire, avec une erreur de $\pm 15\%$. Ceci

s'explique, selon l'auteur, par la complexité de la couche verte ainsi que par les nombreuses hypothèses nécessaires à la résolution des équations.

Les modèles validés et couplés à des logiciels de simulation de bâtiments complets peuvent être utilisés dans le cadre d'études paramétriques visant à déterminer les paramètres du design des toits verts les plus influents sur les économies énergétiques que permettent ces derniers.

L'étude paramétrique de Theodosiou (2003) s'est faite sur les sept aspects suivants :

1. Hauteur des plantes (de 0.05m à 0.5m)
2. Densité des plantes (LAI) (de 1 à 6)
3. Épaisseur du sol (de 0.05m à 0.5m)
4. Type de toit vert (*low, medium, high* – extensif à intensif)
5. Épaisseur de la couche isolante (0m à 0.15m)
6. Humidité relative (-50% à +50% des données environnementales)
7. Vitesse du vent (-50% à +50% des données environnementales)

Les résultats ont montré que le paramètre le plus influent est la densité des plantes (LAI). Par la suite, les conditions environnementales (humidité, vent) jouent aussi un rôle très important dans la réponse thermique du toit vert. Tel que mentionné plus haut, c'est l'humidité relative qui est la plus influente puisqu'elle dicte les fonctions d'évapotranspiration des plantes. Finalement, la hauteur des plantes ne semble pas cruciale et l'épaisseur de terre est le paramètre le moins influent.

La même recherche démontre que l'isolant qu'on retrouve dans la couche structurale ne joue pas un grand rôle dans le pouvoir climatisant du toit vert et semble même bloquer le transfert de chaleur de l'intérieur du bâtiment vers le toit lorsque ce dernier est plus froid que l'intérieur du bâtiment.

Santamouris et al. (2007) présentent une simulation logicielle du comportement thermique d'un toit vert installé sur un bâtiment en Grèce. L'étude utilise les mesures expérimentales d'un toit vert intensif irrigué installé sur une école ainsi que le logiciel TRNSYS 15.1. Les données sources de ce logiciel sont notamment : les éléments constituant le bâtiment, la géométrie du bâtiment, les conditions environnementales (température extérieure, humidité relative, radiation solaire, vents), les gains et les pertes internes en énergie du bâtiment, la ventilation, etc. Le programme calcule de façon dynamique la température intérieure du bâtiment pour chacune de ses zones ainsi que l'énergie de chauffage et de climatisation utilisée.

L'étude démontre que les températures internes prédites par le logiciel sont très proches de celles observées sur le terrain (moins de 1°C de différence avec un coefficient de corrélation de 0.92) ainsi que des gains en énergie de climatisation allant de 12% à 76% pour le dernier étage, ce qui représente 7% à 33% de l'énergie de climatisation pour tout le bâtiment. À titre indicatif, le bâtiment simulé consomme au plus 11.88 kWh/m² sans toit vert.

Wong et Al. (2003) ont utilisé le logiciel de simulation *DOE-2* pour déterminer les gains énergétiques apportés par un toit vert intensif installé sur un bâtiment commercial hypothétique de 5 étages situé à Singapour. La résistance thermique (valeur R) des différentes plantes étudiées a été obtenue à partir de mesures expérimentales sur un véritable toit vert.

Le logiciel *DOE-2* analyse les échanges d'énergie d'un bâtiment modélisé avec son environnement. Le bâtiment hypothétique possède 5 étages et une surface de toiture de 966 m². Trois cas ont été considérés :

1. Le toit de référence sans terre ni plantes
2. Le toit vert avec terre seulement
3. Le toit vert avec terre et plantes (plusieurs tailles de plantes)

Pour le cas du toit vert avec plantes, la valeur de la résistance thermique de la couche de plantes provient d'une étude empirique des mêmes auteurs dans laquelle ils ont mesuré la température au dessus et au dessous des plantes et en ont déduit la valeur R tel que montré ci-dessous :

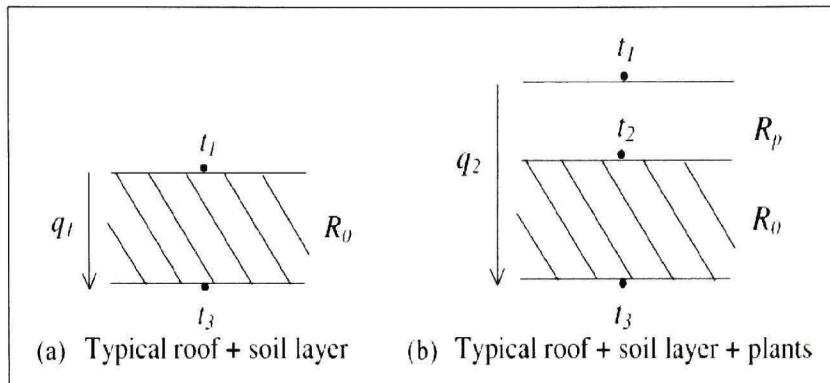


Figure 2.17 Valeur R de la couche de plantes.
Tirée de Wong et al. (2003, p. 359)

La couche des plantes est considérée comme homogène et possède le gradient de température t_1-t_2 . Ainsi, en condition d'équilibre, le flux d'énergie qui traverse la couche des plantes est égal au flux qui traverse la couche sol + structure, et donc :

$$q_{1-2} = q_{2-3} \rightarrow \frac{1}{R_p} (t_1 - t_2) = \frac{1}{R_o} (t_2 - t_3) \quad (2.1)$$

et finalement :

$$R_p = R_o ((t_1 - t_2) / (t_2 - t_3)) \quad (2.2)$$

Grâce aux données expérimentales de température, le coefficient R est calculé pour chaque type de plantes étudié.

Pour chacun des cas de toit vert simulé, la valeur totale de la résistance thermique R est calculée en additionnant toutes les résistances thermiques de chaque couche composant la toiture.

Les différentes simulations ont permis de conclure que le type de végétation joue un rôle important pour la protection thermique du toit et que plus la densité de cette végétation (LAI) est grande, meilleure est la protection. Ainsi, la consommation énergétique totale du bâtiment est directement influencée par le type de plantes établies sur la toiture végétale. Les résultats de simulation à l'échelle du bâtiment montrent une consommation de 200 MWh pour un bâtiment avec un toit conventionnel (référence), 181 MWh pour un bâtiment dont la toiture est couverte de gazon (diminution de 9.5%) comparativement à 171 MWh pour de petits arbustes (diminution de 14.5%) et 174 MWh pour de petits arbres (diminution de 13%). Le toit vert intensif avec petits arbustes représente donc les gains d'énergie les plus grands avec environ 15% sur la consommation énergétique totale du bâtiment.

Takakura et al. (2000) ont aussi utilisé un modèle de simulation en utilisant le logiciel CSMP. La performance thermique du couvert végétal a été obtenue de façon empirique à l'aide de modèles expérimentaux représentants différents types de couvertures. Selon les auteurs, les valeurs obtenues par expérimentation et par simulation sont très proches lorsque l'évapotranspiration est faible compte tenu du fait que la simulation n'en tient pas compte.

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté trois plateformes expérimentales similaires à celle de cette étude et situées au Canada, à savoir le FRF de Ottawa, le GRRF de Vancouver et le ENCC de Toronto. Ces trois études serviront de base de comparaison pour les résultats obtenus dans cette recherche.

Nous avons aussi présenté quelques modèles mathématiques et outils de simulation informatique servant à prédire le comportement thermique d'un toit vert. Là encore, les résultats de notre étude seront comparés avec ces modèles.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

3.1 Objectifs de la recherche

La présente recherche porte sur l'étude de la performance thermique d'un toit vert expérimental installé sur un bâtiment 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 autres 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.

3.2 Présentation de la toiture étudiée

C'est en 2005 que le Centre d'Écologie Urbaine (CEU) 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 propre 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.

3.3 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 presqu'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 CEU de Montréal 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 3.1 présente une coupe du toit du projet du CEU de Montréal avec la nouvelle structure superposée à celle existante.

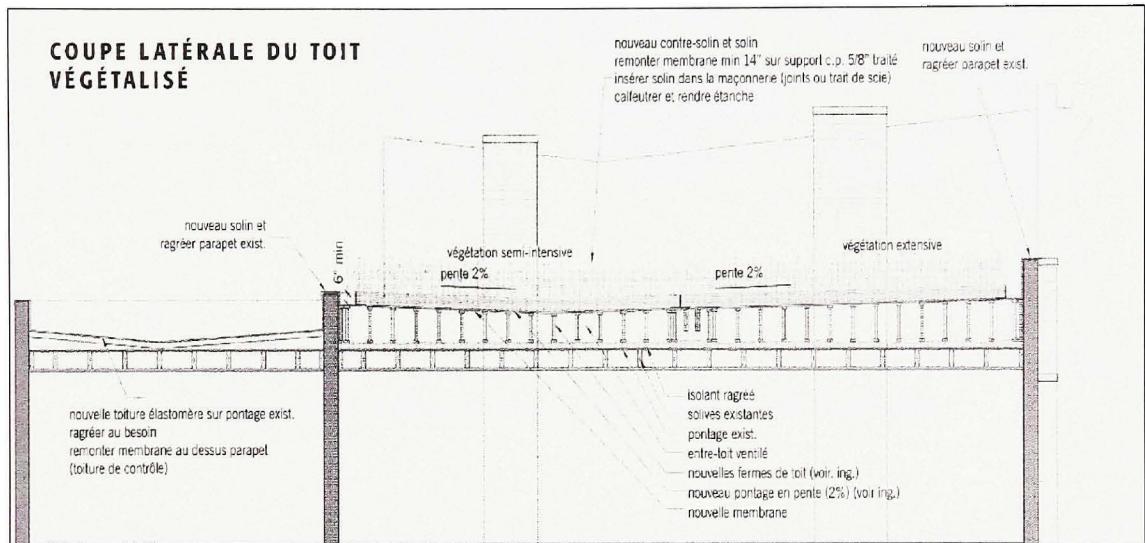


Figure 3.1 Structure du toit du CEU de Montréal.

3.4 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 3.2.

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-plaquée au dessus de la couche d'isolant thermique. Ce système bicouche élastomère est soudé et recouverte de gravier pour en assurer la stabilité.

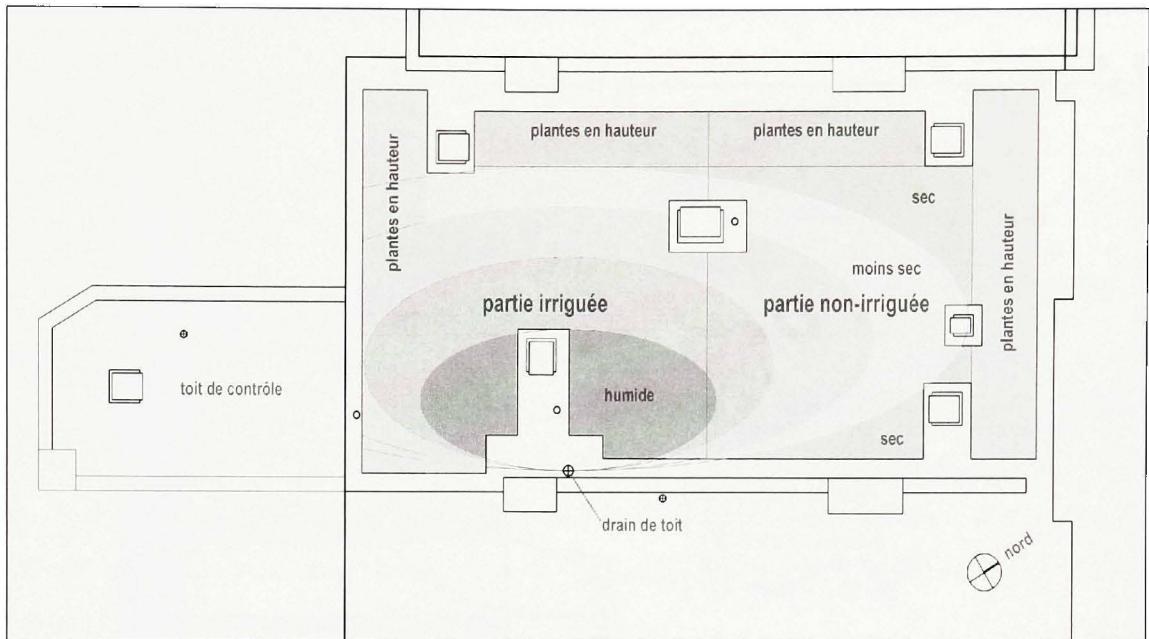


Figure 3.2 Les trois zones du toit du CEU de Montréal.

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 3.3 montre une coupe typique du système *Sopranature™* et ses différents éléments.

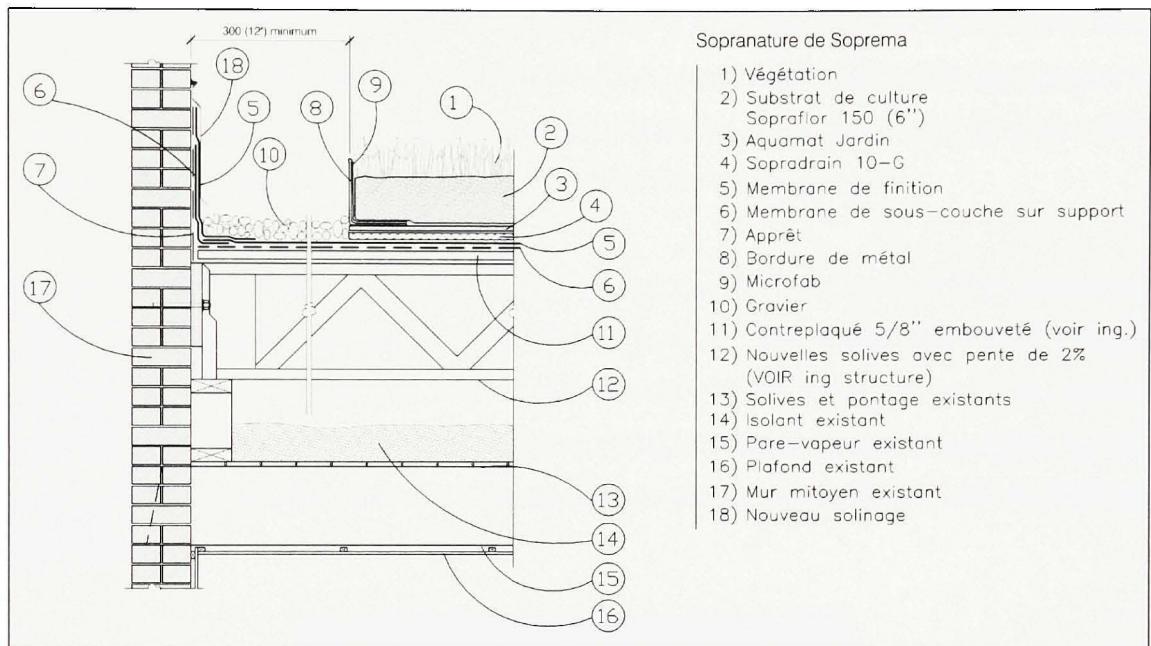


Figure 3.3 Coupe typique du toit du CEU de Montréal.

3.5 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 sélectionnées. 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 3.4 ci-dessous présente les deux types de substrat utilisés dans le projet de toit vert du CEU de Montréal.

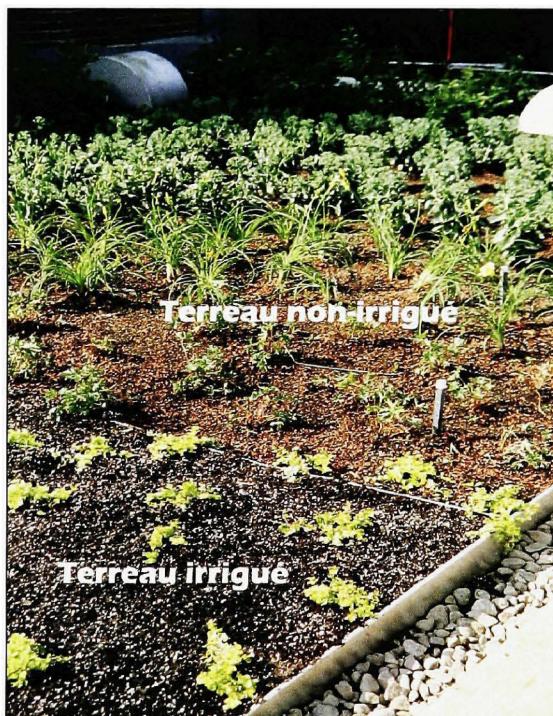


Figure 3.4 Les deux types de substrat du toit du CEU de Montréal.

Le tableau 3.1 ci-dessous énumère les types et espèces des plantes utilisées dans le projet de toit vert. Les figures 3.5 et 3.6 montrent la plateforme expérimentale du projet du CEU de Montréal une fois les plantes installées.

Tableau 3.1 Plantes utilisées pour les toits verts du CEU de Montréal

Espèce	Nom français	Type de plante	Nombre de plantes	Toit Vert	
				IRRIGUÉ	NON IRRIGUÉ
<i>Syringa patula</i> Miss Kim	Lilas nain	Arbuste	29	×	×
<i>Calamagrostis x acutiflora</i> Karl Foerster	Calamagrostis	Graminée	34	×	
<i>Liatris spicata</i> Kobold	Liatride à épis	Vivace	9	×	
<i>Lysimachia numularia</i> Aurea	Lysimaque	Vivace	16	×	×
<i>Geranium x Brookside</i>	Géranium	Vivace	55	×	×
<i>Hemerocallis Stella Di Oro</i>	Hémérocalle	Vivace	34	×	×
<i>Artemisia schmidtiana</i> Silver Mound	Armoise	Vivace	16		×
<i>Sedum spectabilis</i> Autumn Fire	Sedum	Vivace	38	×	×

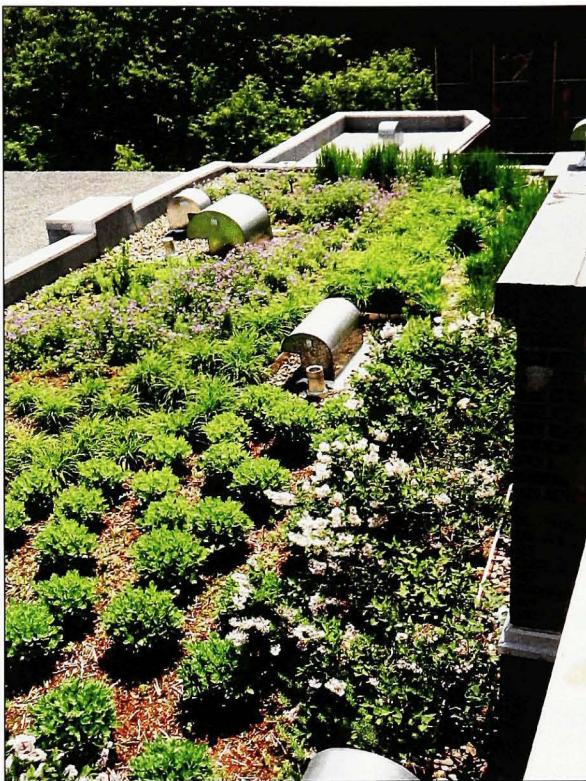


Figure 3.5 Toit vert du CEU de Montréal – période estivale.

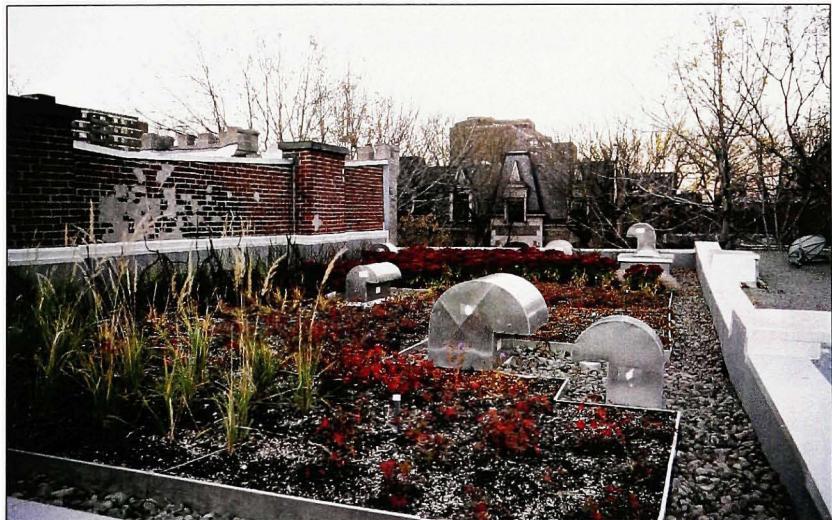


Figure 3.6 Toit vert du CEU de Montréal – période automnale.

3.6 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 dans le tableau 3.2 ci-dessous ainsi qu'à la figure 3.7.

Tableau 3.2 Définition des différents niveaux instrumentés pour le toit du CEU de Montréal

Niveau	Nom	Description	Toit Référence	Toits Verts
1	L1	Au niveau du plafond intérieur du bâtiment	×	×
2	L2	Au dessus de l'isolant thermique, sous les solives	×	×
3	L3	Au niveau du contre-plaquée du toit	×	×
4	L4	Au niveau de la membrane d'étanchéité	×	×
5	L5	Au niveau de la membrane anti-racine des toits verts		×
6	L6	Environ au centre de la couche de substrat de culture		×
7	L7	Au dessus de la couche de substrat de culture		×

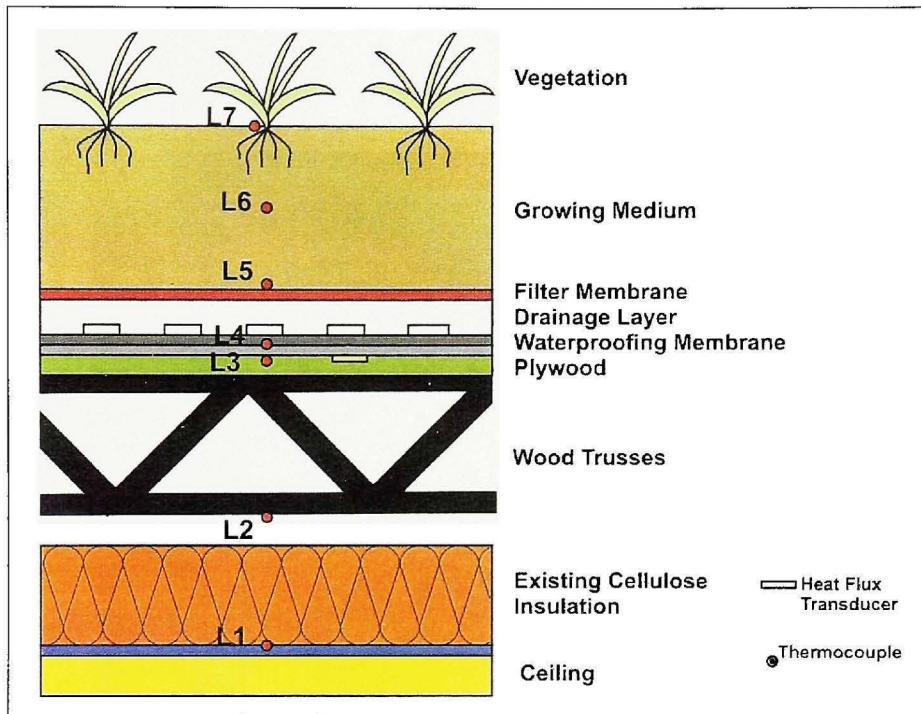


Figure 3.7 Niveaux des sondes pour le toit du CEU de Montréal.

Une nomenclature bien précise a été attribuée à chaque sonde selon son enregistrement (température ou flux de chaleur), sa zone (toit de référence, toit vert non irrigué ou toit vert irrigué) et le niveau auquel la mesure est faite (L1 à L7 selon tableau 3.2).

Les sondes du toit de référence portent le préfixe « C », celles du toit vert non irrigué portent le préfixe « S » et celles du toit vert irrigué le préfixe « H ». Comme chacun des types de toiture est doté de 2 zones de prises de données, on retrouve les zones C1, C2, S1, S2, H1 et H2. La position géographique de chaque sonde pour chacune des zones étudiées est montrée à la figure 3.8 ci-dessous.

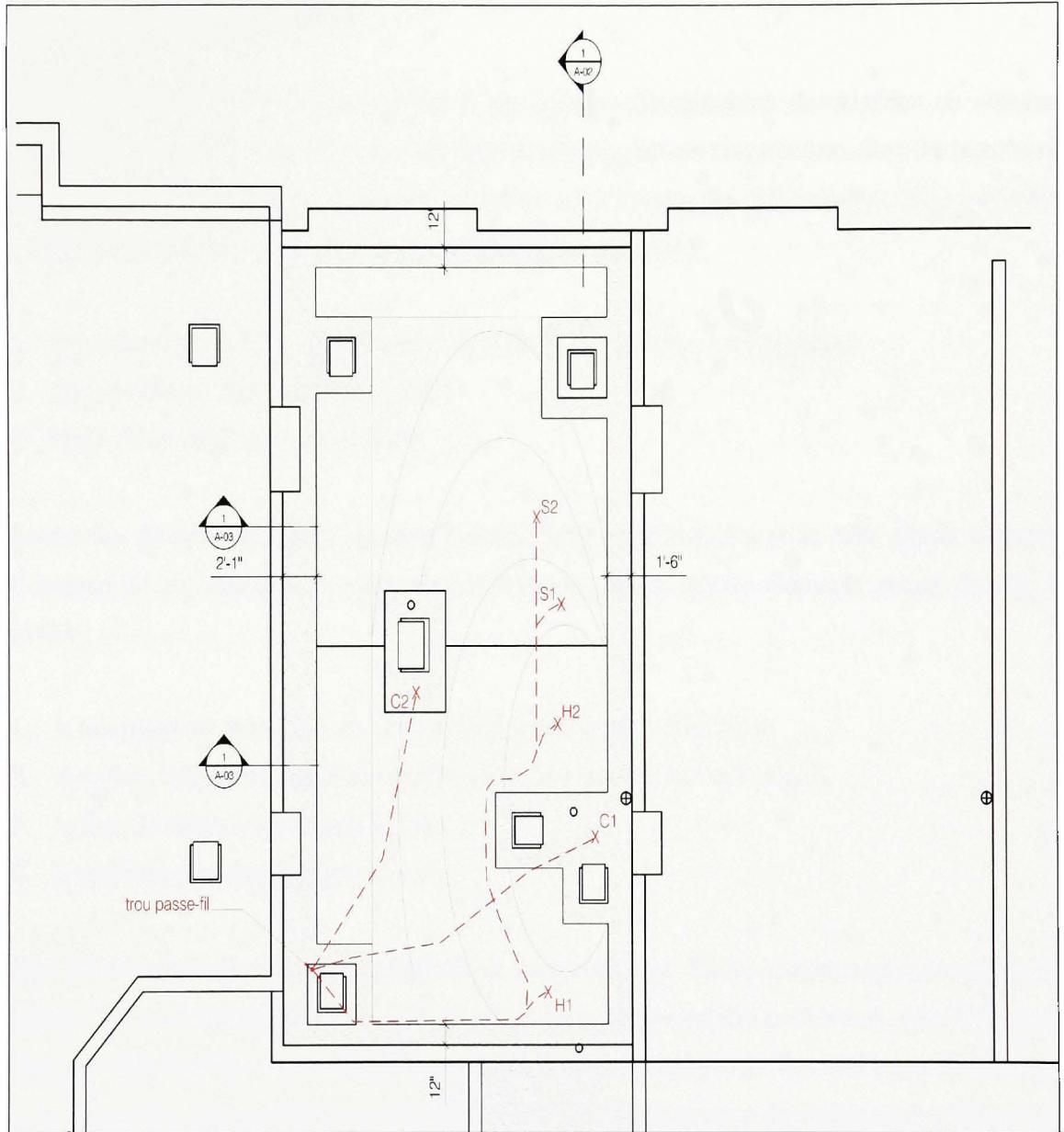


Figure 3.8 Position des sondes du toit du CEU de Montréal.

3.7 Collecte de données

Toutes les sondes ont été raccordées à un système d'acquisition de données en continu (*Campbell Scientific CR23X*) et ont enregistré des mesures de température, flux de chaleur et humidité relative pendant plusieurs mois, et ce à toutes les 15 minutes. Les périodes continues couvertes par la prise de données sont les suivantes :

1. Du 3 Novembre 2006 au 5 Novembre 2006 (période de test du système)
2. Du 16 Février 2007 au 5 Mars 2007
3. Du 5 Avril 2007 au 7 Avril 2008

Seules les données récoltées pendant l'année 2007 sont utilisées pour cette étude. Suivant l'analyse de ces données, et pour chaque type de toiture, quatre éléments seront étudiés à savoir :

1. la température maximale au niveau de la membrane d'étanchéité,
2. la variation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité,
3. le flux de chaleur traversant le toit,
4. la performance énergétique du toit.

Ces éléments seront présentés, analysés et comparés aux études canadiennes similaires et portant sur la performance thermique des toits verts (voir chapitre précédent) afin d'évaluer si le toit vert du CEU de Montréal se compare à ceux d'Ottawa, de Toronto et de Vancouver et de démontrer les apports des toits verts quant à la performance énergétique des bâtiments en milieu urbain.

3.8 Méthodologie de recherche

3.8.1 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 cités 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 minimiseraient les mouvements d'expansion et de contraction des membranes bitumineuses 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. Pour ce faire, les données récoltées sont utilisées afin d'extraire la température maximale rencontrée par la membrane d'étanchéité pour chaque journée de la période de prise de données. Les thermocouples installés au niveau de la membrane d'étanchéité sont ceux du niveau L4 (voir tableau 3.2 et figure 3.7). Deux localisations sont utilisées pour chaque type de toit. Ainsi, en faisant la moyenne des deux localisations de niveau L4 pour le toit de référence, le toit vert non irrigué et le toit vert irrigué, deux figures présentant la température enregistrée au niveau de la membrane d'étanchéité peuvent être extraites pour représenter une journée automnale typique et une journée estivale typique.

Par la suite, à partir des mêmes données, une moyenne des températures maximales sera calculée pour chaque mois et les résultats seront montrés dans un troisième graphique présenté au chapitre suivant.

Le diagramme à la figure 3.9 résume la méthodologie utilisée pour analyser et présenter la température maximale au niveau de la membrane d'étanchéité.

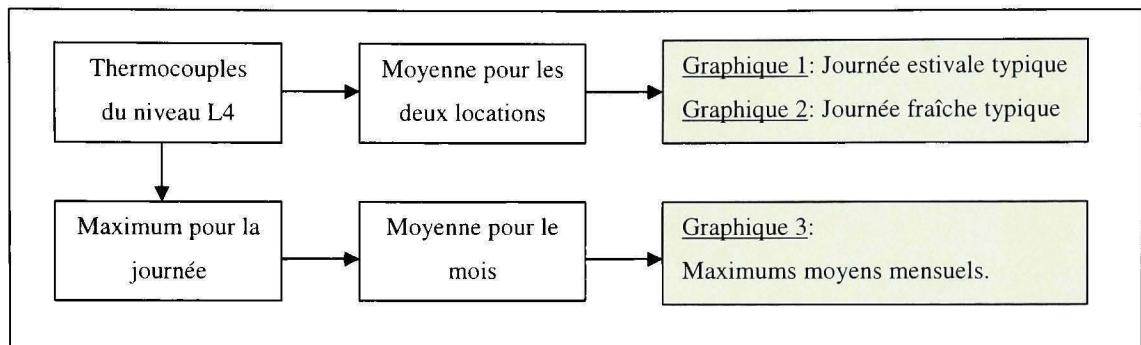


Figure 3.9 Méthodologie pour la température maximale de la membrane.

3.8.2 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'amoindrissement 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).

Pour ce faire, un peu comme pour la température maximale, les données récoltées seront utilisées afin d'extraire la température maximale et la température minimale rencontrées par

la membrane d'étanchéité pour chaque journée de la période de prise de données. Ensuite une moyenne sera calculée pour chaque mois et les résultats seront présentés de façon graphique. Par la suite, en soustrayant la température minimale à la température maximale moyenne pour chaque mois, l'amplitude moyenne de la fluctuation sera obtenue et présentée dans un dernier graphique.

Le diagramme à la figure 3.10 résume la méthodologie utilisée pour analyser et présenter la fluctuation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité.

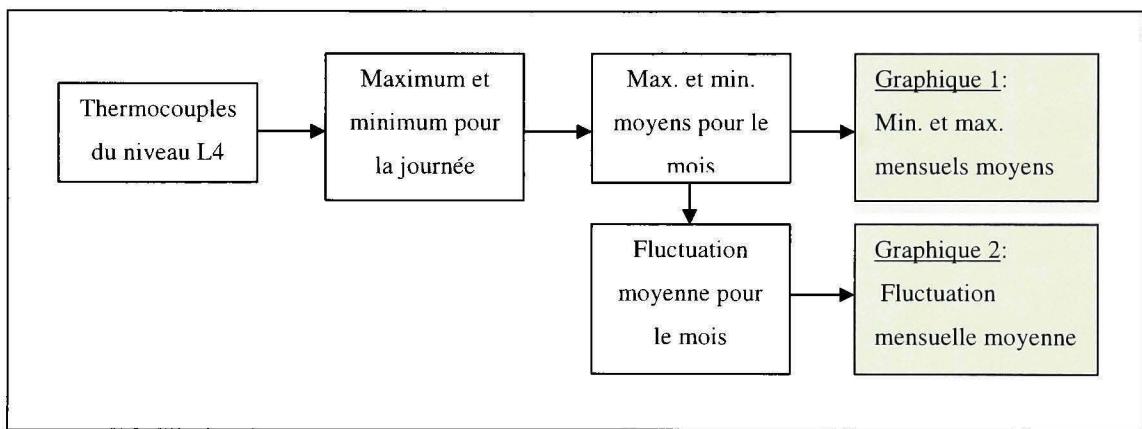


Figure 3.10 Méthodologie pour la fluctuation de la température de la membrane.

3.8.3 Flux de chaleur traversant le toit

La quantité d'énergie reliée 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 certaines études présentées au chapitre 2, 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.

Le troisième élément étudié est donc le flux de chaleur total entrant ou quittant le toit. Les données des six sondes d'enregistrement (deux par zones, trois zones) seront utilisées pour extraire cette information. Pour ce faire, le taux moyen d'entrée ou sortie de chaleur sera calculé pour chaque journée de l'étude en faisant la moyenne journalière des taux instantanés enregistrés par les six sondes du toit. Cette moyenne sera présentée de façon graphique dans la section suivante. Par la suite, pour permettre une vue plus globale, une moyenne mensuelle sera extraite de la même manière et aussi présentée de façon graphique dans la section suivante.

Le diagramme à la figure 3.11 résume la méthodologie utilisée pour analyser et présenter le flux de chaleur traversant le toit.

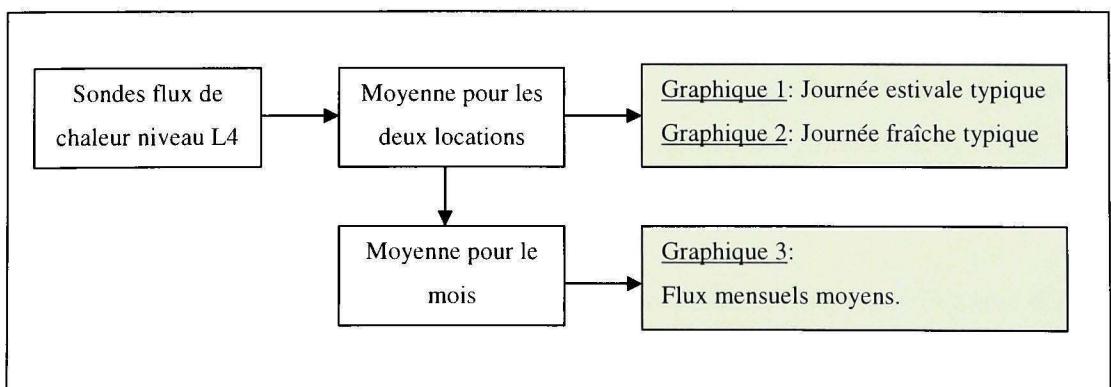


Figure 3.11 Méthodologie pour le flux de chaleur traversant la toiture.

3.8.4 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/m^2 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/m^2 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/m^2 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.

La demande en énergie sera présentée de façon graphique pour chaque mois de la période étudiée, basé sur la moyenne quotidienne de la demande en énergie. De plus, la demande en énergie sera aussi présentée de façon cumulative pour montrer la différence totale de consommation énergétique entre un bâtiment avec un toit vert et un bâtiment avec un toit conventionnel et ce, pour toute la période de l'étude. Le diagramme à la figure 3.12 résume la méthodologie utilisée pour analyser et présenter la performance énergétique des toitures étudiées.

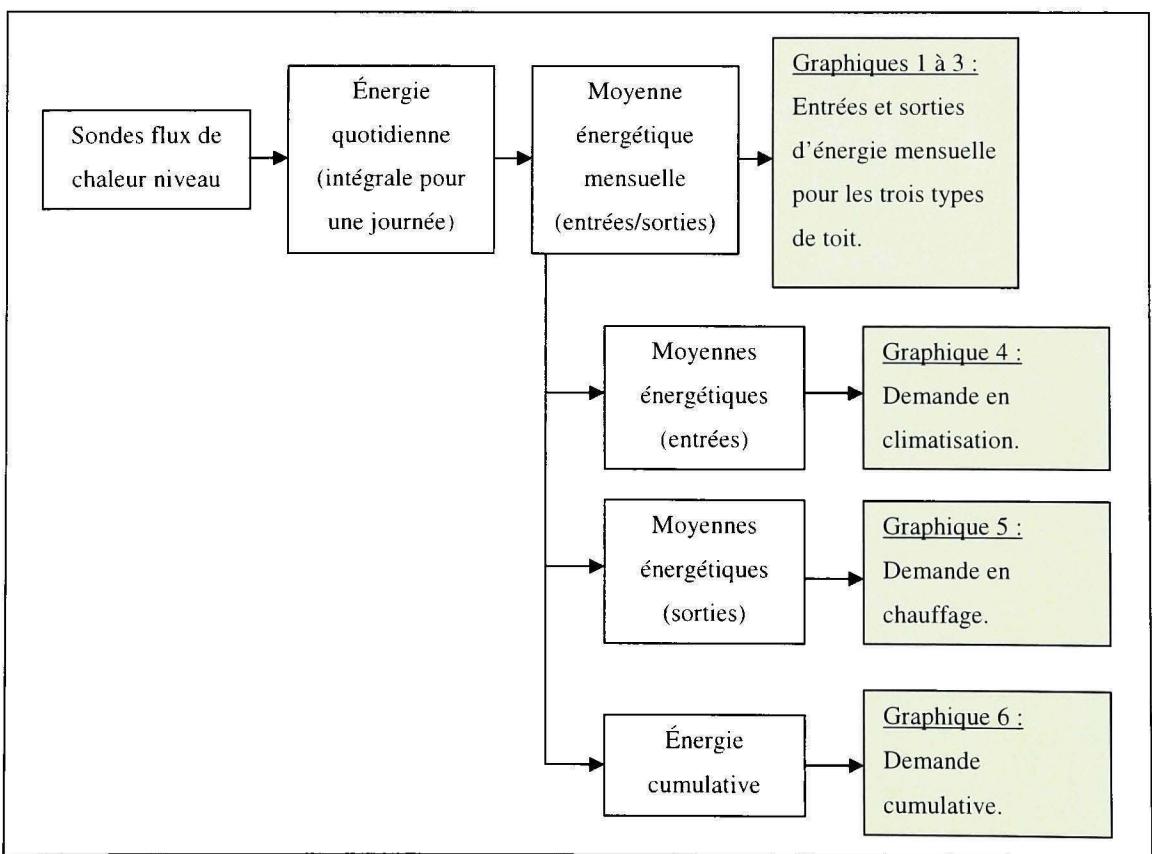


Figure 3.12 Méthodologie pour la performance énergétique.

Cette troisième section nous a permis de présenter les objectifs de cette recherche, à savoir l'étude de la performance thermique d'un toit vert de type extensif installé sur un bâtiment situé en plein cœur de la ville de Montréal.

La toiture verte du projet de CEU de Montréal a été détaillée au niveau de sa structure, de son aménagement, des différentes plantes utilisées ainsi qu'au niveau des paramètres enregistrés.

Nous avons aussi présenté la méthodologie de recherche pour les quatre éléments étudiés, à savoir : la température maximale au niveau de la membrane d'étanchéité, la variation de la température de la membrane d'étanchéité, le flux de chaleur traversant le toit et finalement la performance énergétique du toit vert. Ces quatre éléments seront comparés aux études similaires revues au chapitre 2.

CHAPITRE 4

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

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 CEU de Montréal. Seules les données continues de l'année 2007 sont considérées, c'est-à-dire du jour 47 au jour 365 à savoir du 16 février au 31 décembre 2007.

La présentation des résultats est inspirée des études similaires menées au Canada et présentées au chapitre 2, à savoir celle du FRF d'Ottawa, celle du GRRF de Vancouver et celle du ENCC de Toronto. Quatre éléments majeurs qui caractérisent les avantages des toits verts sont donc étudiés. Le premier traite de la diminution du choc thermique subi par la membrane d'étanchéité des toitures plates conventionnelles à membrane élastomère. Ainsi, nous regarderons la température maximale enregistrée au niveau de la membrane d'étanchéité et comment l'ajout d'un toit vert influence cette dernière. Par la suite, nous regarderons l'amplitude de fluctuation de la température de la membrane d'étanchéité. Ensuite, nous regarderons la performance thermique en tant que telle avec la comparaison des flux de chaleur traversant (entrant et sortant) les différents types de toitures pour finir avec la compilation de la consommation d'énergie nécessaire pour conserver des conditions de température stables à l'intérieur du bâtiment expérimental. Ces quatre éléments se retrouvent dans les études similaires menées au Canada et mentionnées plus haut. Le fait d'utiliser un canevas de présentation similaire à ces études facilitera la comparaison des résultats du toit du CEU de Montréal avec celles citées plus haut. Cette analyse sera présentée en détail dans le chapitre 5.

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 d'une période et non des extrêmes. 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.

4.1 Température maximale au niveau de la membrane d'étanchéité

Le premier élément étudié est la température maximale subie par la membrane d'étanchéité de la toiture. Les données des thermocouples du niveau L4 sont donc utilisées pour les trois types de construction de toiture. Puisque deux thermocouples sont utilisés en deux endroits différents pour chaque type de toit, une moyenne des deux données est utilisée.

Période automnale:

La figure 4.1 présente la température enregistrée au niveau de la membrane d'étanchéité par les thermocouples du niveau L4 (voir tableau 3.2) pour les trois systèmes de toiture et pour une journée typique de la période automnale (3 octobre 2007). Les résultats détaillés se retrouvent à l'Annexe I.

Le toit de référence a enregistré une température de membrane légèrement supérieure à la température ambiante extérieure et ce pendant presque toute la durée de la journée. La température de la membrane du toit de référence augmente en suivant l'augmentation de la température extérieure et passe de 18.8°C dans la nuit pour atteindre un maximum de 25.2°C

aux alentours de 15h15 alors que la température extérieure atteint son maximum de 25.0°C légèrement avant la membrane du toit de référence, soit vers 14h45.

Les deux toitures vertes ont enregistré des températures de membrane légèrement supérieures à la température ambiante pour les heures non-ensoleillées, mais légèrement inférieures pour les heures où l'ensoleillement est plus présent (10h00 à 18h00 environ). Ainsi, le maximum enregistré pour les toits verts est de 22.5°C pour la partie non irriguée et de 22.4°C pour la partie irriguée. Contrairement au toit de référence, les toits verts décalent l'arrivée de leur température maximale par rapport à l'augmentation de la température extérieure. Ainsi la température maximale atteinte par les membranes des deux toitures vertes est enregistrée vers les 18h30 pour le toit vert non irrigué et vers les 20h00 pour le toit vert irrigué. Tel que mentionné plus haut, le maximum enregistré pour la température extérieure pour cette même journée se produit vers 14h45. Ce décalage d'environ 4 heures pour le toit vert non irrigué et d'environ 5 heures pour le toit vert irrigué est attribuable à la masse thermique que représentent les couches des toits verts. La partie du toit irrigué possède la masse thermique la plus grande puisque son substrat de culture possède un contenu en humidité (eau) beaucoup plus grand que le côté non irrigué.

Période estivale :

La figure 4.2 présente la température enregistrée au niveau de la membrane d'étanchéité pour une journée estivale typique (22 Juillet 2007). Les résultats détaillés sont présentés à l'Annexe I.

Le toit de référence a enregistré une température de membrane supérieure à la température ambiante extérieure pendant toute la journée à l'exception de la période entre 7h00 et 9h00 le matin. La température de la membrane du toit de référence augmente rapidement en suivant l'augmentation de la température extérieure et passe de 18.7°C tôt le matin (6h30) pour atteindre un maximum de 34.2°C aux alentours de 15h30 alors que la température extérieure atteint son maximum de 28.2°C légèrement plus tard.

Les deux toitures vertes ont enregistré des températures de membrane considérablement plus stables et des maximums bien en dessous de ceux du toit de référence. Ainsi, le maximum enregistré pour les toits verts est de 26.9°C pour la partie non irriguée et de 25.0°C pour la partie irriguée. Pour les heures où l'ensoleillement est maximal, les températures extrêmes enregistrées par les deux toits verts sont toujours plus basses que la température ambiante. Tout comme pour la période automnale, les toits verts décalent l'arrivée de leur température maximale par rapport à l'augmentation de la température extérieure. Ainsi la température maximale atteinte par les membranes des deux toitures vertes est enregistrée vers les 18h00 pour le toit vert non irrigué et vers les 21h30 pour le toit vert irrigué soit peu de temps après le coucher du soleil. Le maximum enregistré pour la température extérieure pour cette même journée se produit vers 14h30. Le décalage est donc environ de 3.5 heures pour le toit vert non irrigué et environ de 7 heures pour le toit vert irrigué. Tout comme pour la journée automnale décrite plus haut, ce décalage est attribuable à la masse thermique que représentent les couches des toits verts. La partie irriguée possède le plus grand décalage puisque le contenu en eau de son substrat de culture est plus grand et son couvert végétal plus développé.

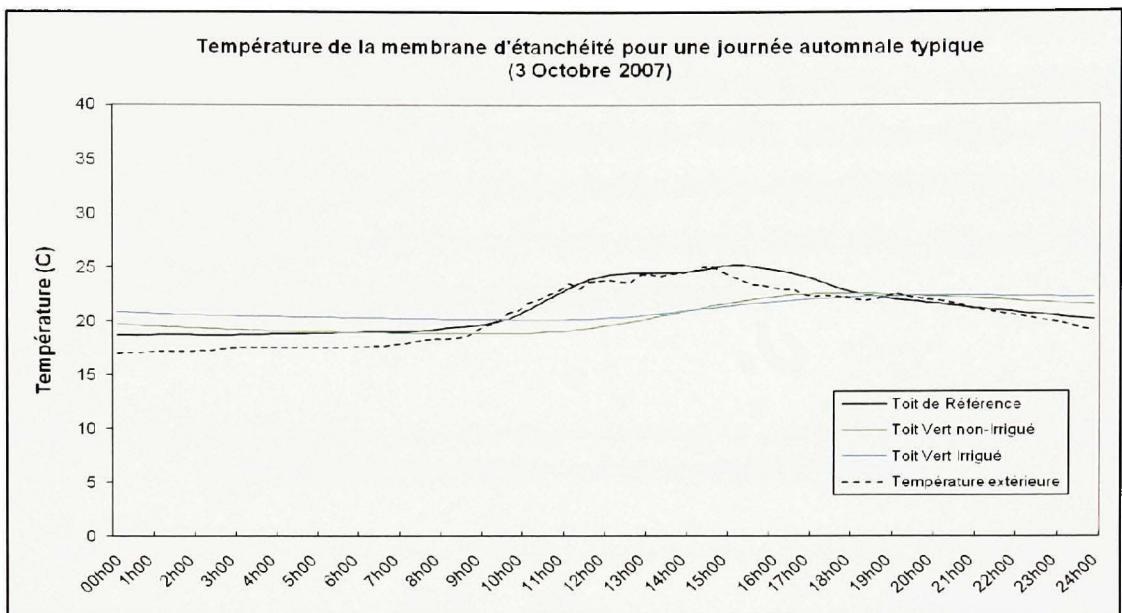


Figure 4.1 Température enregistrée au niveau de la membrane d'étanchéité pour une journée automnale typique.

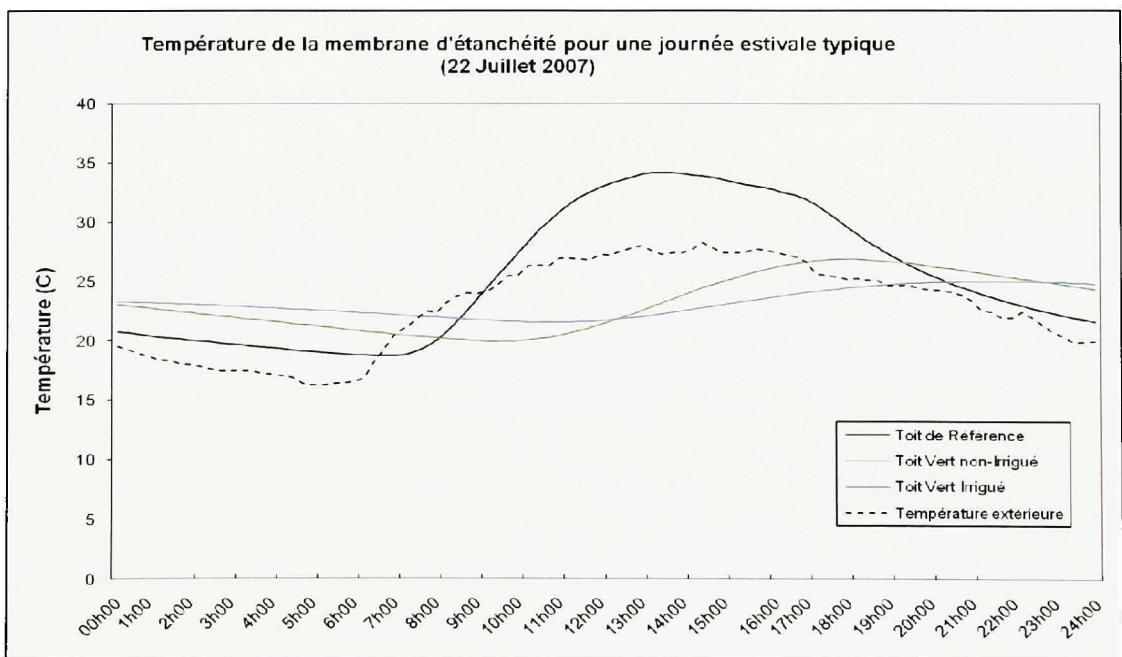


Figure 4.2 Température enregistrée au niveau de la membrane d'étanchéité pour une journée estivale typique.

La figure 4.3 présente la température maximale quotidienne enregistrée au niveau de la membrane d'étanchéité pour toute l'année 2007. Pour toute cette période, le toit de référence a enregistré une température maximale de membrane de 46.6°C. Les deux toitures végétales ont diminué ce maximum absolu à 34.4°C pour le toit vert non irrigué et à 31.4°C pour le toit vert irrigué. La température extérieure maximale rencontrée durant cette même période se situe à 33.6°C. Les résultats détaillés se retrouvent à l'Annexe II.

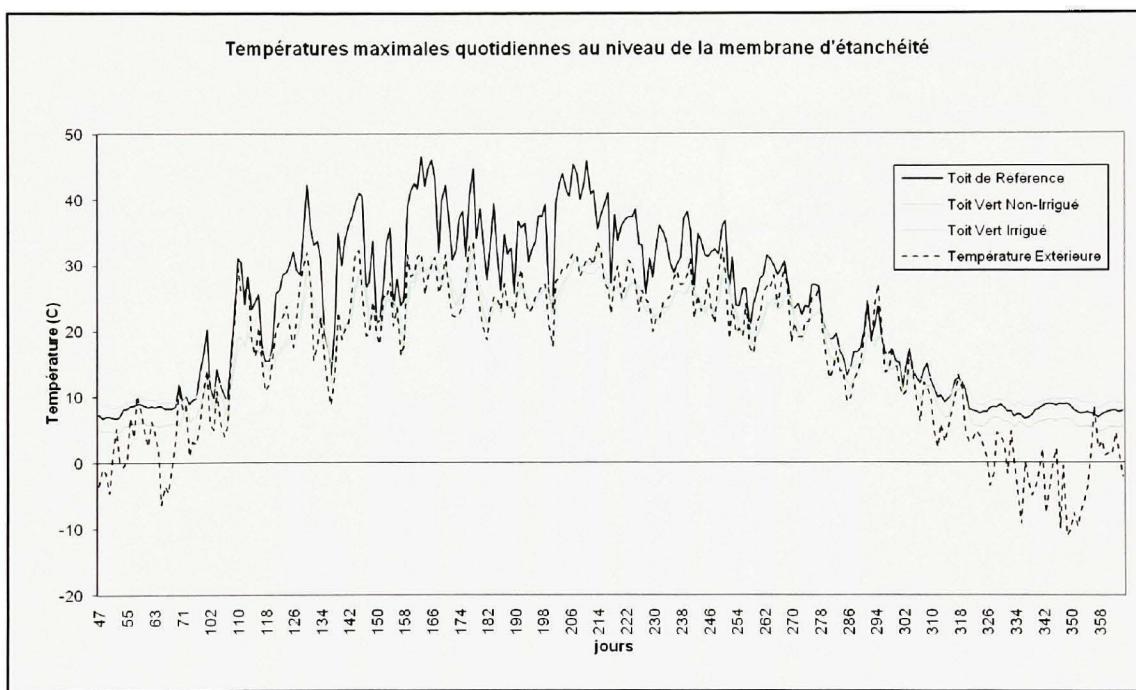


Figure 4.3 Températures maximales quotidiennes au niveau de la membrane d'étanchéité.

Par la suite, tel que mentionné à la section 3.4, à partir de la température quotidienne maximale, une moyenne mensuelle des ces températures est obtenue. La figure 4.4 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. Ainsi, le maximum mensuel moyen atteint par la membrane de la toiture de référence est de

36.5°C pour l'année 2007 comparativement à 27.3°C pour le toit vert non irrigué et à 26.7°C pour le toit vert irrigué. Il est à noter que la moyenne mensuelle pour la température extérieure maximale est de 28.3°C. Ainsi, les deux types de toit vert ont amené la température maximale de la membrane quelques degrés en dessous de la température maximale moyenne de l'air ambiant et ce pour la majorité des mois les plus chauds de l'année 2007.

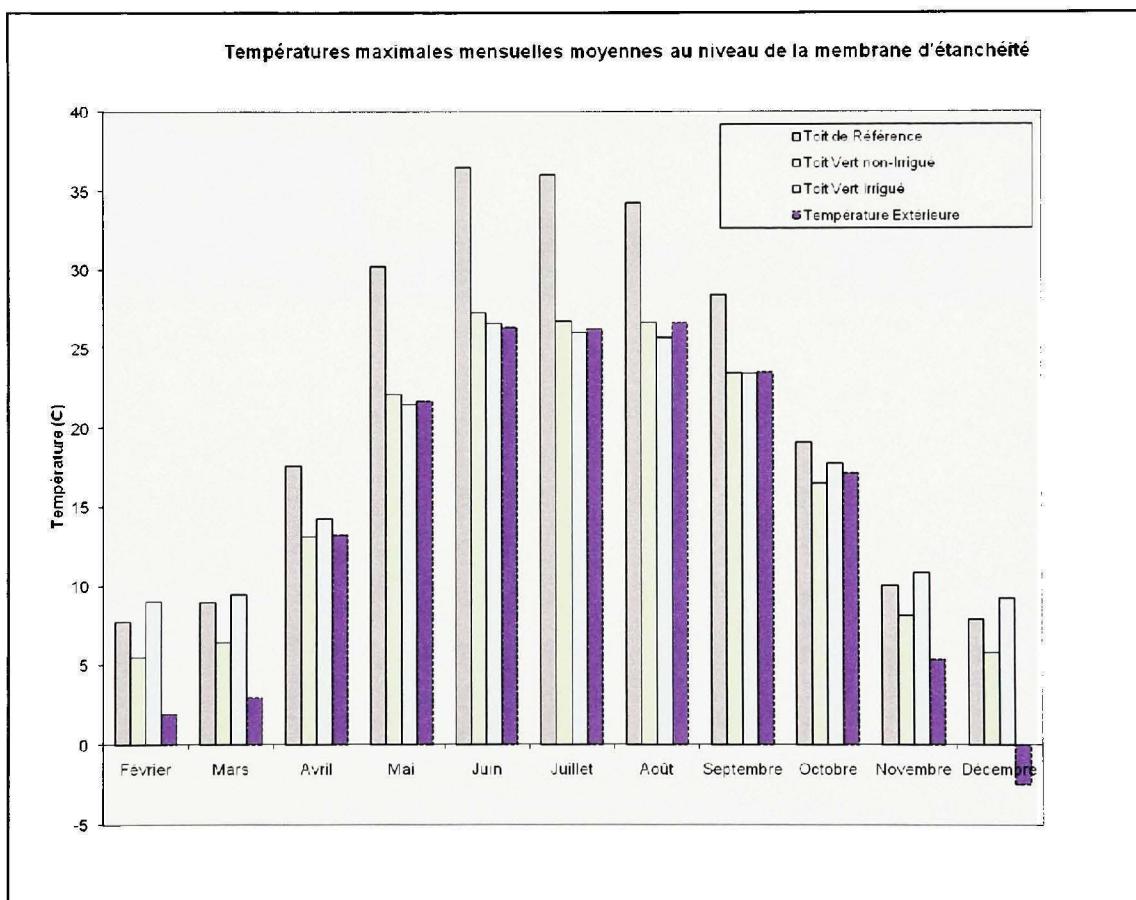


Figure 4.4 Températures maximales mensuelles moyennes au niveau de la membrane d'étanchéité.

Le tableau 4.1 résume les résultats obtenus dans l'étude du paramètre de la température maximale enregistrée au niveau de la membrane d'étanchéité.

Tableau 4.1 Résumé des résultats pour la température maximale au niveau de la membrane d'étanchéité

	Toit de Référence	Toit Vert Non Irrigué	Toit Vert Irrigué	Extérieur
Température maximale (annuelle)	46.6°C	34.4°C	31.4°C	33.6°C
Réduction / Référence	N/A	-26%	-33%	N/A
Température maximale (moyenne mensuelle)	36.5°C	27.3°C	26.7°C	28.3°C
Réduction / Référence	N/A	-25%	-27%	N/A

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

Tel qu'indiqué à la section 3.5, 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. Les figures 4.5 à 4.7 ci-dessous présentent les températures maximales et minimales quotidiennes enregistrées au niveau de la membrane d'étanchéité pour la toiture de référence et pour les deux toits verts. La température extérieure maximale et minimale quotidienne y est aussi représentée pour fins de comparaison.

Tel que montré à la figure 4.5, la membrane du toit de référence a enregistré une température maximale et minimale presque toujours supérieure aux maximums et minimums de la température ambiante. Ceci est du au fait que la membrane du toit de référence est directement exposée à la radiation solaire et, tout au long de la journée, cette dernière accumule de l'énergie ce qui fait augmenter sa température. Par la suite, lorsque l'ensoleillement décline, la membrane réemet cette énergie emmagasinée ce qui a pour conséquence de diminuer sa température. Ainsi de grands écarts sont mesurés entre la température maximale et minimale de la membrane du toit de référence pour une journée donnée. Cette fluctuation quotidienne maximale et mesurée durant l'année 2007 s'élève à plus de 26.0°C et s'est produite durant les mois de juin et juillet. La figure 4.8 présente la fluctuation moyenne mensuelle de la température au niveau de la membrane d'étanchéité des trois toits étudiés. Pour le toit de référence, cette fluctuation moyenne mensuelle s'élève à 17.8°C pour le mois de juin. La fluctuation de la température de la membrane diminue dans les mois plus frais pour atteindre un minimum mensuel moyen d'environ 4°C durant le mois de décembre.

Pour ce qui est des deux toits verts étudiés, les fluctuations enregistrées sont beaucoup plus faibles. Les figures 4.6 et 4.7 présentent les températures maximales et minimales

quotidiennes enregistrées au niveau de la membrane d'étanchéité des deux toits verts. On note que, pour toute la durée de l'étude, la température maximale atteinte au niveau de la membrane d'étanchéité ne dépasse que très rarement la température maximale ambiante et que la température minimale de la membrane est presque toujours supérieure à la température ambiante minimale. En comparaison avec les courbes de la figure 4.5 pour le toit de référence, on s'aperçoit que la température maximale atteinte par la membrane d'étanchéité des toits verts est diminuée tandis que la température minimale est augmentée par la présence des couches des toits verts. Ainsi, la fluctuation de la température de la membrane se voit elle aussi diminuée. Ce phénomène est du à la masse thermique des composants des toits verts, notamment le substrat de culture et la couche des plantes.

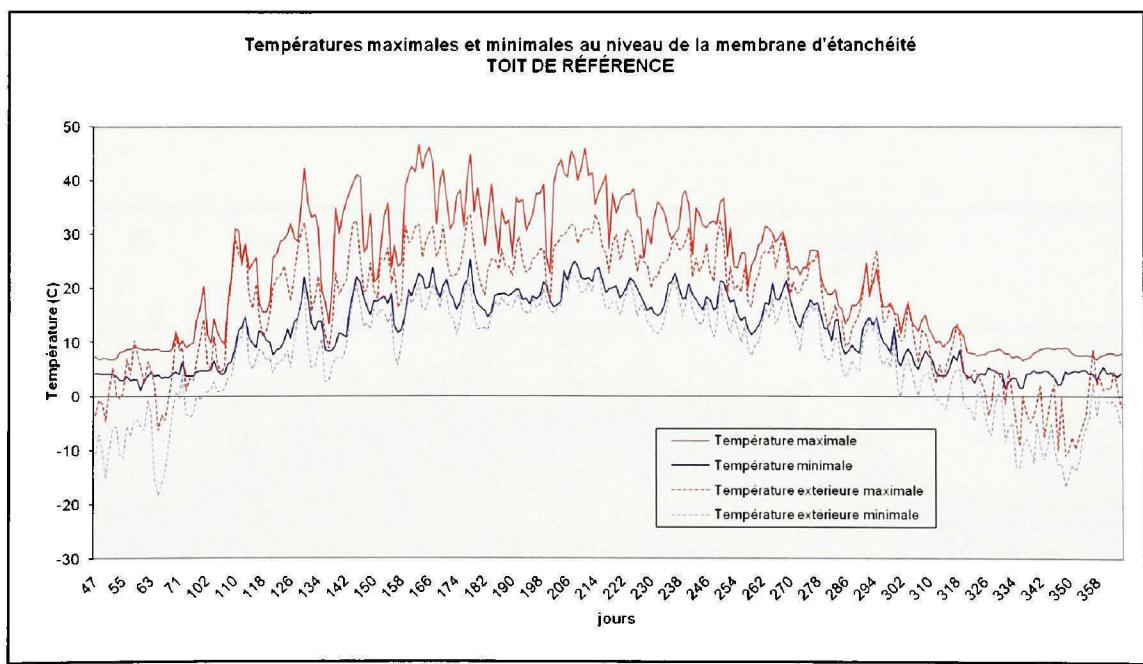


Figure 4.5 Température maximale et minimale quotidienne enregistrée au niveau de la membrane d'étanchéité – toit de référence.

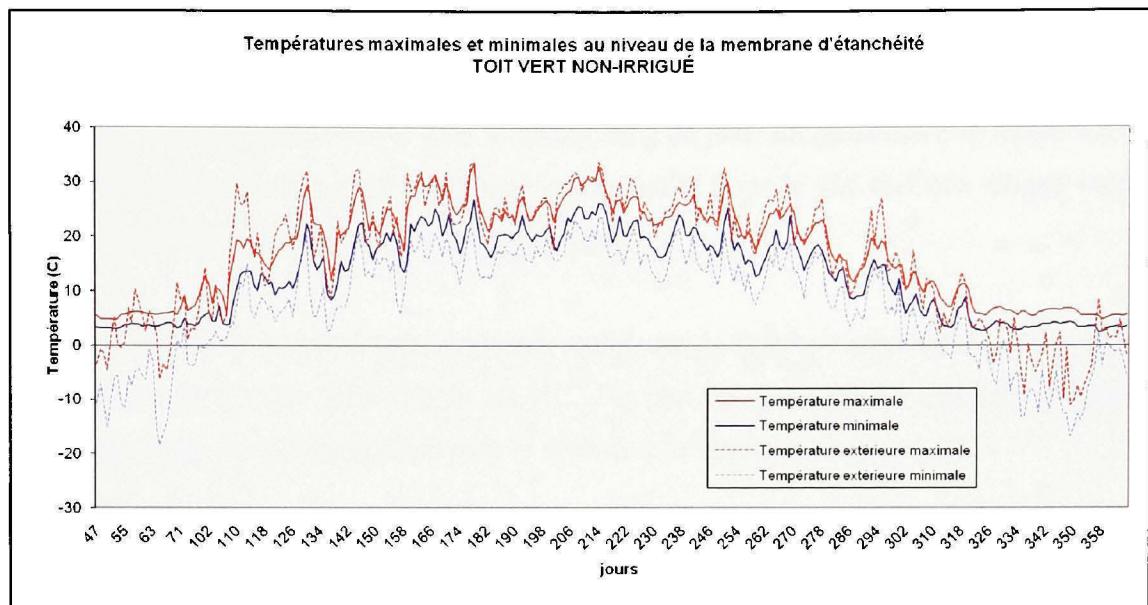


Figure 4.6 Température maximale et minimale quotidienne enregistrée au niveau de la membrane d'étanchéité – toit vert non irrigué.

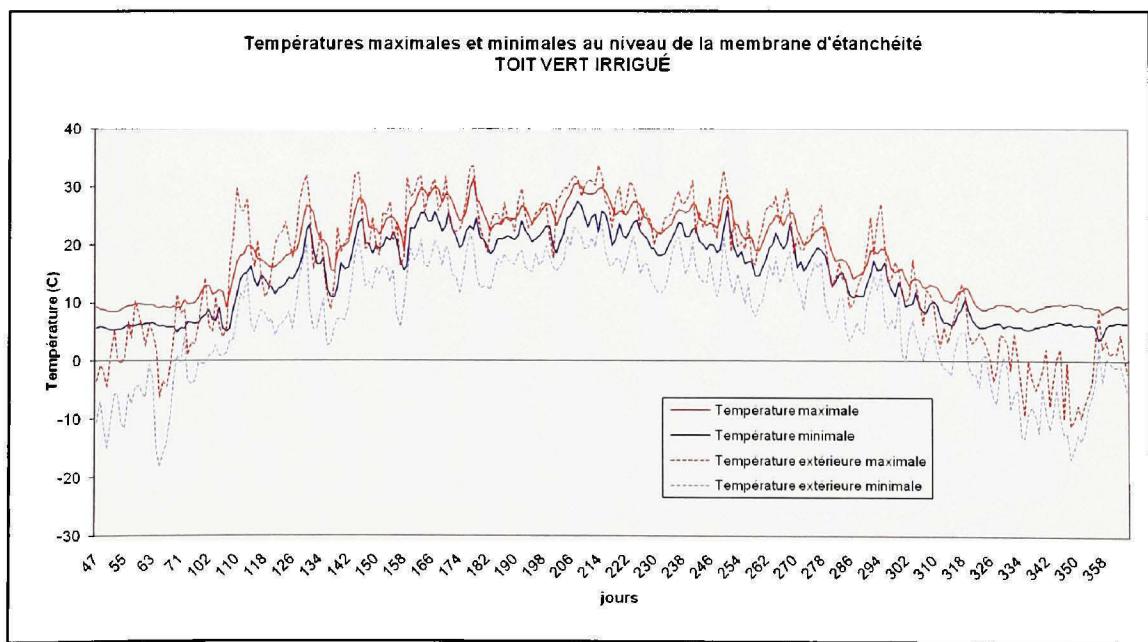


Figure 4.7 Température maximale et minimale quotidienne enregistrée au niveau de la membrane d'étanchéité – toit vert irrigué.

Pour l'année 2007, le toit vert non irrigué a enregistré une fluctuation quotidienne maximale de 10.2°C au mois de juin. Pour sa part, le toit vert irrigué a réduit cette même fluctuation maximale à une valeur de 7.6°C pour le même mois de juin. En référence à la figure 4.8, la fluctuation mensuelle moyenne maximale est de 6.0°C pour le toit vert non irrigué tandis qu'elle est d'environ 4.0°C pour le toit vert irrigué.

En ce qui concerne la température ambiante extérieure, la fluctuation quotidienne maximale mesurée durant l'année 2007 est de 22.4°C. De plus, la fluctuation mensuelle moyenne maximale est de 11.4°C enregistrée pour le mois de mai 2007.

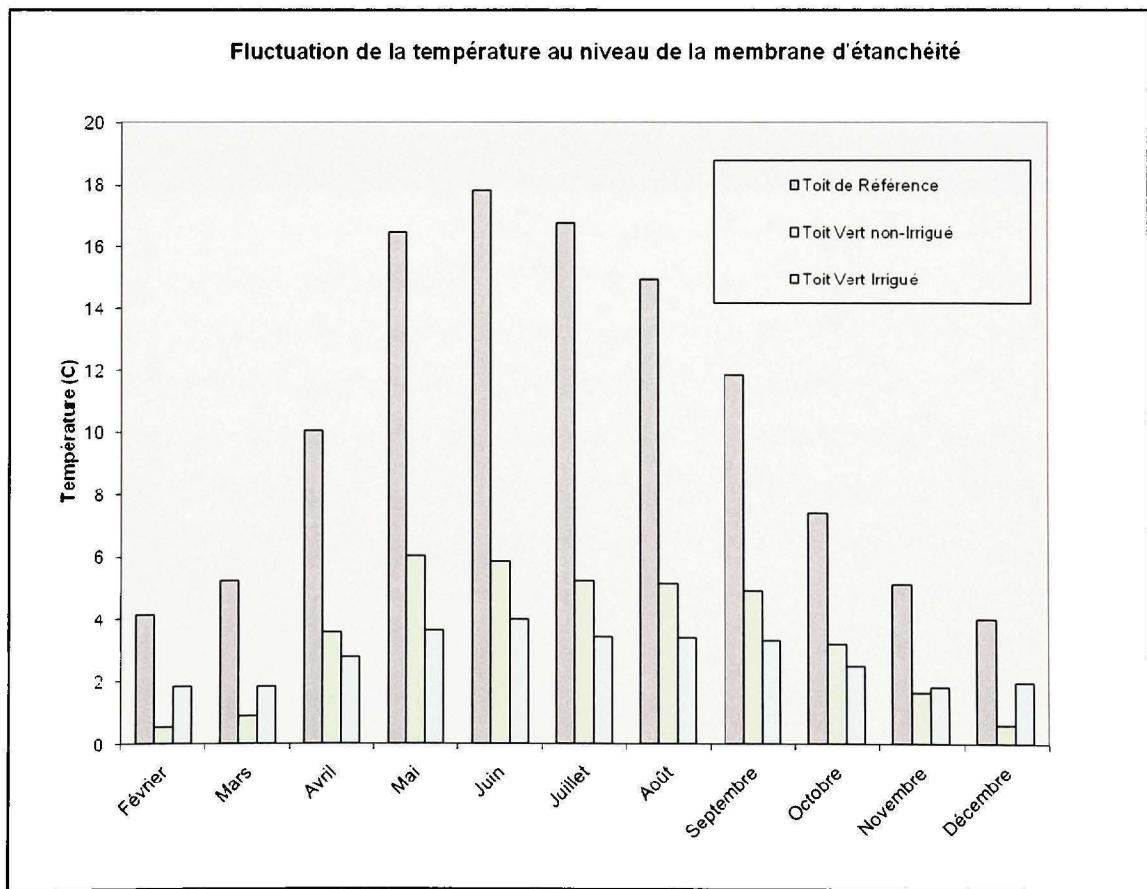


Figure 4.8 Variation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité.

Le tableau 4.2 résume les résultats obtenus dans l'étude du paramètre de la variation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité. Les résultats détaillés se retrouvent à l'Annexe III.

Tableau 4.2 Résumé des résultats pour la fluctuation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité

	Toit de Référence	Toit Vert Non irrigué	Toit Vert Irrigué	Extérieur
Fluctuation maximale (quotidienne)	26.0°C	10.2°C	7.6°C	22.4°C
Réduction / Référence	N/A	-61%	-71%	N/A
Fluctuation maximale (mensuelle moyenne)	17.8°C	6.0°C	4.0°C	11.4°C
Réduction / Référence	N/A	-66%	-77%	N/A

4.3 Flux de chaleur traversant la toiture

Le troisième élément étudié est le flux de chaleur traversant le toit. Tel que mentionné plus tôt, le flux de chaleur a été mesuré en deux endroits différents pour chacun des trois types de toiture étudiés (toit de référence, toit vert non irrigué et toit vert irrigué). 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.

Période automnale :

La figure 4.9 présente les courbes du flux de chaleur traversant les trois types de toit pour une journée automnale typique à savoir le 3 octobre 2007. Le toit de référence a enregistré un flux négatif (perte de chaleur par le toit) pendant toute la nuit mais le flux est rapidement passé à des valeurs positives (gain de chaleur par le toit) aux alentours de 10h00 pour atteindre un maximum de $+5.2 \text{ W/m}^2$ à 15h00 en après-midi. Par la suite, le flux de chaleur a diminué de façon constante et rapide jusque tôt en soirée (18h00) pour ensuite diminuer constamment mais moins rapidement jusqu'à minuit. Si on superpose la courbe de la température extérieure à la courbe de flux de chaleur traversant le toit de référence, on s'aperçoit que la variation de flux de chaleur suit la variation de la température extérieure. Ainsi, pour la journée du 3 octobre 2007, la température ambiante extérieure a atteint son maximum (25.0°C) à 14h45, juste un peu avant le flux maximal enregistré pour le toit de référence. Si on s'intéresse aux entrées et sorties de chaleur du toit de référence, la figure 4.9 montre que pour la journée présentée, le toit a gagné de la chaleur pendant environ 7 heures tandis qu'il en a perdu pendant le reste de la journée, soit 17 heures. Ainsi, les gains de chaleur du toit de référence sont enregistrés pendant 29% de la durée de la journée.

Pour ce qui est du toit vert non irrigué, ce dernier a réduit considérablement le gain de chaleur par le toit mais a aussi sensiblement réduit les pertes de chaleur durant les heures les plus fraîches. Ainsi, le toit vert non irrigué a enregistré une perte de chaleur relativement

constante entre minuit et 11h00 le matin avec une valeur avoisinant les -4.5 W/m^2 . Par la suite, le flux a augmenté lentement pour atteindre son maximum de -0.2 W/m^2 à 17h00, soit environ 2 heures après l'enregistrement de la température extérieure maximale. Par la suite, le flux a diminué de façon lente et constante pour rejoindre une valeur semblable à celle du début de la journée. Ainsi, le toit vert non irrigué a empêché l'entrée de chaleur pendant 100% du temps de la journée présentée à la figure 4.9.

Le toit vert-irrigué a lui aussi diminué le flux de chaleur entrant et sortant de la toiture. Le flux de chaleur enregistré pour la journée du 3 octobre 2007 est pratiquement constant pour toute la journée mais variant légèrement autour d'une valeur moyenne de -2.8 W/m^2 . Il est à noter que le flux minimal enregistré par ce toit (-5.4 W/m^2) se produit aux alentours de 15h00, heure où la température extérieure est la plus haute. On peut attribuer ce phénomène à l'évaporation de l'eau contenue dans le substrat de culture qui est maximale lorsque l'énergie solaire reçue par le toit est aussi maximale. Ce phénomène ne s'observe pas pour le toit vert non irrigué puisque son contenu en eau est beaucoup moindre. Par contre, tout comme le toit vert non irrigué, le toit vert irrigué a permis de réduire à zéro les gains de chaleur pour la journée présentée à la figure 4.9.

Période estivale :

La figure 4.10 présente les courbes du flux de chaleur traversant les trois types de toit pour une journée estivale typique à savoir le 22 juillet 2007. Tout comme pour la journée automnale typique présentée à la figure 4.9, les gains et pertes de chaleur du toit de référence ont suivi l'évolution de la température ambiante extérieure. Ainsi, le toit de référence a enregistré un flux de chaleur de l'ordre de -10 W/m^2 pendant la nuit pour rapidement augmenter à un maximum de $+26.9 \text{ W/m}^2$ à 11h30 le matin. La température extérieure maximale enregistrée pour cette même journée est de 28.2°C en début d'après midi. Basé sur les courbes de la figure 4.10, le toit de référence a gagné de la chaleur pendant près de 10 heures soit près de la moitié de la journée.

Pour sa part, le toit vert non irrigué à largement réduit les gains de chaleur avec un maximum de $+3.9 \text{ W/m}^2$ à 17h30. On note le même décalage d'environ 2 heures entre l'enregistrement de la température extérieure maximale et celle du flux de chaleur maximal traversant le toit vert non irrigué. Aussi, les pertes de chaleur (flux négatif) ont été réduites par rapport au toit de référence. Le flux de chaleur négatif pour le toit vert non irrigué ne descend pas plus bas que -5.0 W/m^2 à tout moment de la journée. Le nombre d'heures pendant lesquelles le toit a gagné de la chaleur est d'environ 7, soit presque 30% de la journée.

Le toit vert irrigué a quant à lui annulé les gains de chaleur pour la journée du 22 juillet 2007. En effet, le maximum enregistré pour ce toit et cette journée est de -1.6 W/m^2 . Les pertes de chaleur sont à peu près du même ordre de grandeur que celles du toit vert non irrigué et varient entre -1.6 W/m^2 et -6.8 W/m^2 . Tout comme pour la période automnale décrite plus haut, le toit vert irrigué voit ses pertes de chaleur diminuer pendant la période la plus chaude de la journée.

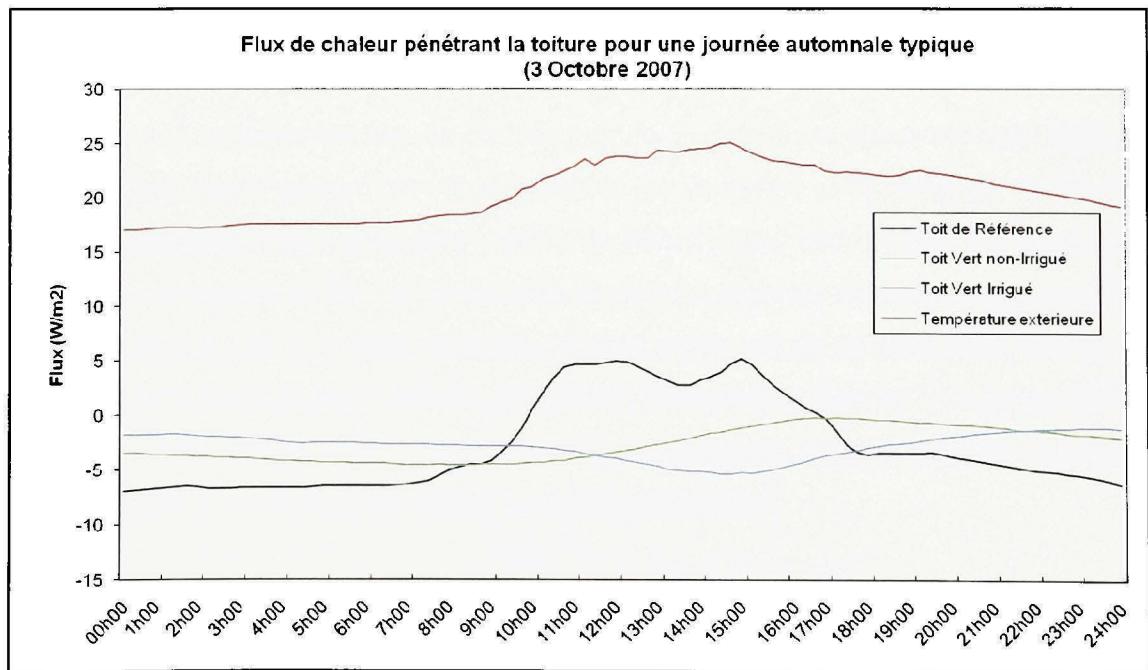


Figure 4.9 Flux de chaleur traversant la toiture pour une journée automnale typique (3 Octobre 2007).

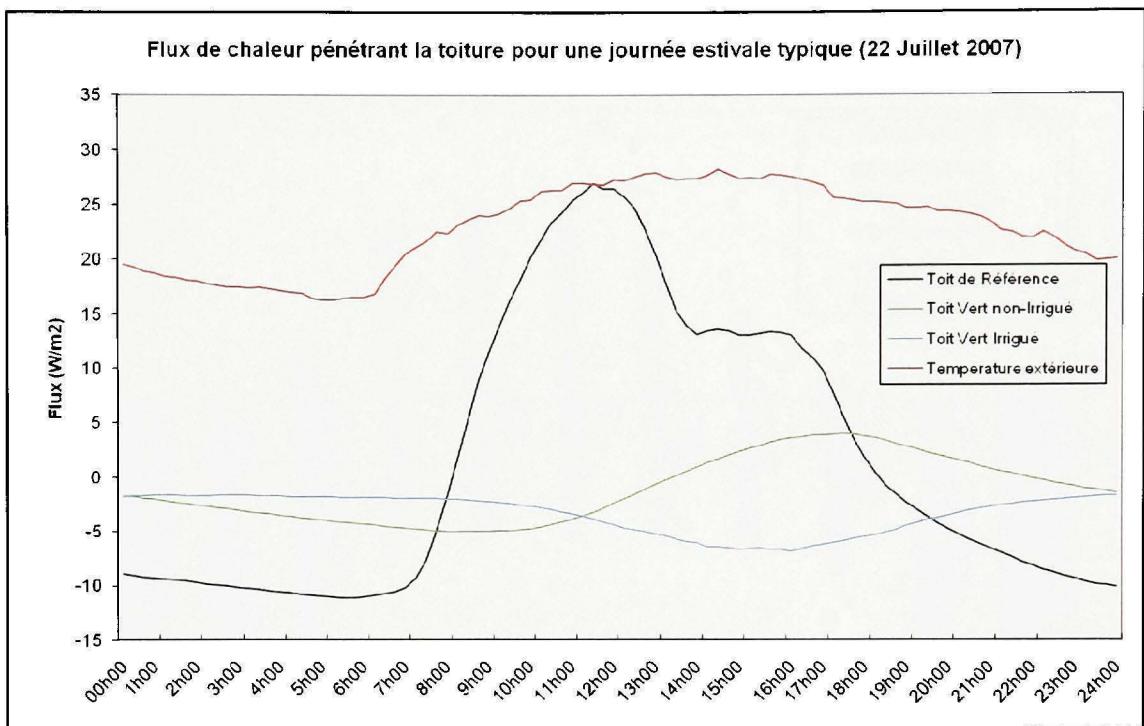


Figure 4.10 Flux de chaleur traversant la toiture pour une journée estivale typique (22 Juillet 2007).

La figure 4.11 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. Pour l'année 2007, le toit de référence a enregistré un flux de pénétration de chaleur maximal mensuel moyen de +10.2 W/m² au mois de juin. Les pertes de chaleur pour ce même toit ont été maximales au mois de mars avec une moyenne mensuelle de -18.0 W/m². En moyenne pour les 11 mois étudiés de l'année 2007, le toit de référence a gagné de la chaleur à un taux moyen annuel de +4.2 W/m² et a perdu de la chaleur à un taux moyen annuel de -11.4 W/m².

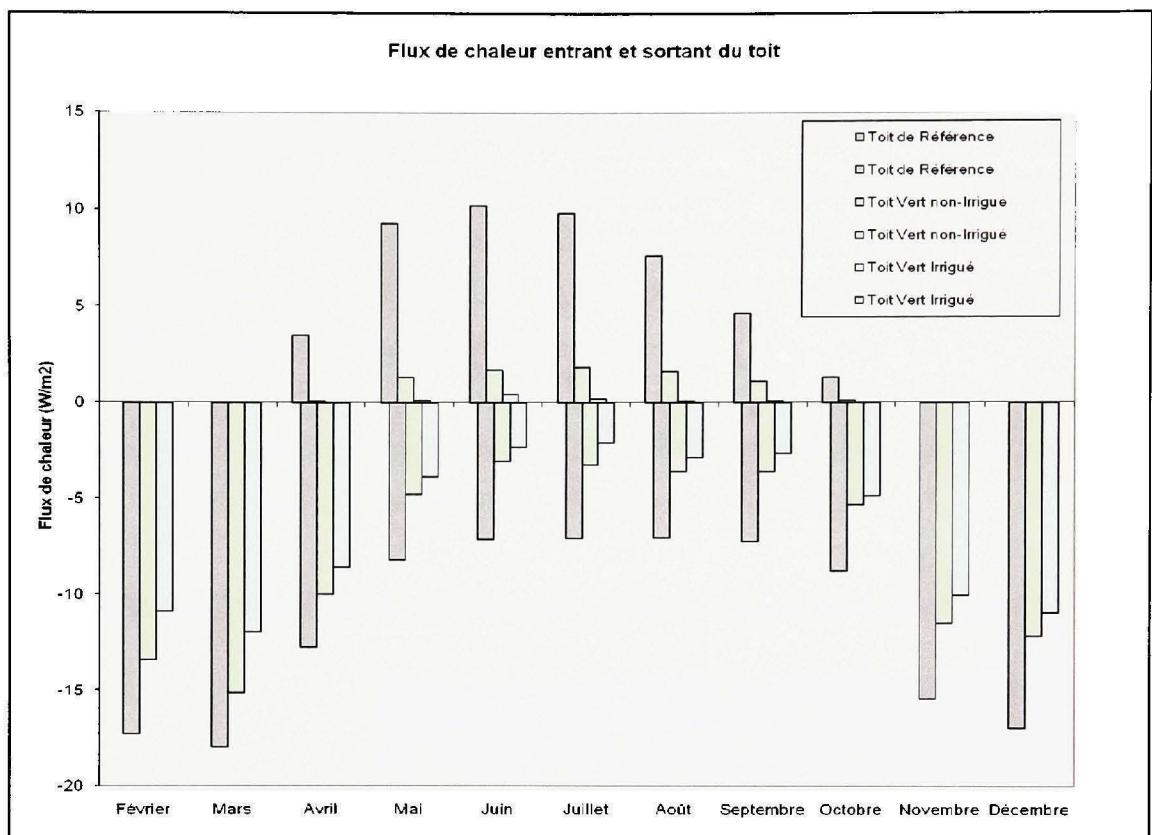


Figure 4.11 Flux de chaleur mensuel moyen traversant la toiture.

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 $+1.8 \text{ W/m}^2$ et est rencontré au mois de juillet. 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/m^2 . Le toit vert non irrigué a permis l'entrée de chaleur à un taux moyen annuel de $+0.7 \text{ W/m}^2$ et a laissé la chaleur sortir à un taux annuel moyen de -7.8 W/m^2 . 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. Le toit vert irrigué a réduit l'entrée de chaleur par la toiture à un taux moyen annuel de +0.1 W/m² et a laissé la chaleur sortir à un taux annuel moyen de -6.5 W/m². Comparativement au toit de référence, le toit vert irrigué a diminué les gains de chaleur de plus de 98% et les pertes de chaleur aux alentours de 44%.

Le tableau 4.3 résume les résultats obtenus dans l'étude du paramètre du flux de chaleur traversant la toiture. Les résultats détaillés se retrouvent à l'Annexe IV.

Tableau 4.3 Résumé des résultats pour le flux de chaleur traversant la toiture

	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 %
Flux de chaleur annuel moyen (gains de chaleur)	+4.21 W/m ²	+0.69 W/m ²	+0.08 W/m ²
Réduction / Référence	N/A	83.6 %	98.2 %
Flux de chaleur annuel moyen (pertes de chaleur)	-11.45 W/m ²	-7.81 W/m ²	-6.47 W/m ²
Réduction / Référence	N/A	31.8 %	43.5 %

4.4 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. Dans cette section, les résultats de consommation d'énergie ne concernent que l'énergie dépensée pour compenser les pertes et les gains de chaleur de la toiture. Il va sans dire que la consommation énergétique globale d'un bâtiment dépend largement de son enveloppe, laquelle comprend la toiture mais aussi un bon nombre d'autres éléments tels que les murs, les planchers, les ouvertures, etc. Cet aspect sera discuté plus longuement dans le chapitre suivant.

Afin de calculer la quantité d'énergie nécessaire pour conserver des conditions de température stable à l'intérieur du bâtiment, nous utilisons le flux de chaleur, présenté dans la section précédente. Les flux positifs (gain de chaleur par le bâtiment) et les flux négatifs (pertes de chaleur par le bâtiment) sont intégrés séparément sur la durée de chaque journée afin d'obtenir les gains et les pertes de chaleur quotidiens en kWh/m^2 . Cette intégration revient à calculer l'aire sous la courbe du flux de chaleur instantané en fonction du temps.

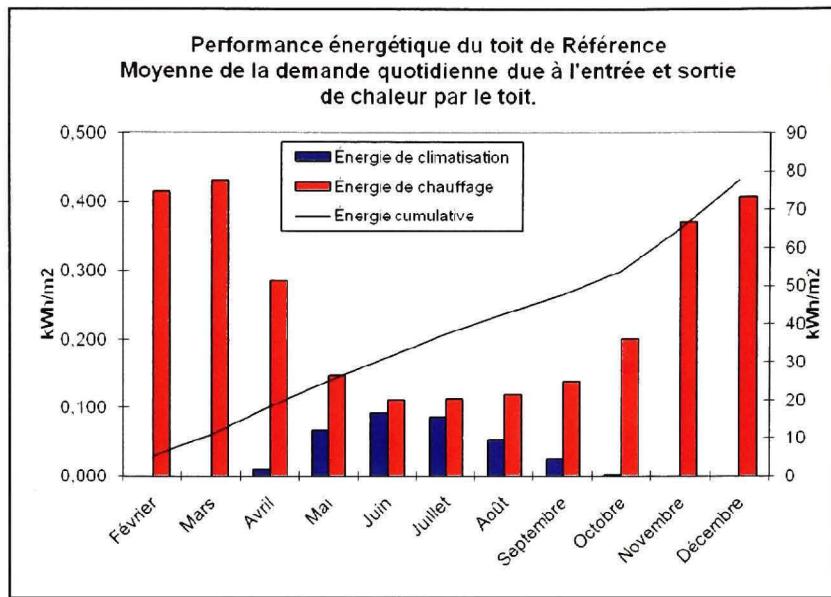
La performance énergétique étant présentée dans les figures ci-dessous en termes de consommation mensuelle, une moyenne des gains et pertes de chaleur est calculée quotidiennement et pour chaque mois. Les valeurs obtenues suivent la même convention de signes que pour le flux de chaleur, à savoir, une valeur négative représente une perte de chaleur par le bâtiment et une valeur positive représente un gain de chaleur par le bâtiment.

Tel qu'expliqué à la section 3.7, la demande en énergie pour conserver des conditions de température stable à l'intérieur du bâtiment est considérée comme égale à la quantité d'énergie qui entre et qui sort du bâtiment. Les gains d'énergie (flux positif, réchauffement de l'intérieur du bâtiment) sont compensés par le système de climatisation tandis que les pertes d'énergie (flux négatif, refroidissement de l'intérieur du bâtiment) sont compensées par le système de chauffage. Il est assumé que la performance du système de climatisation et

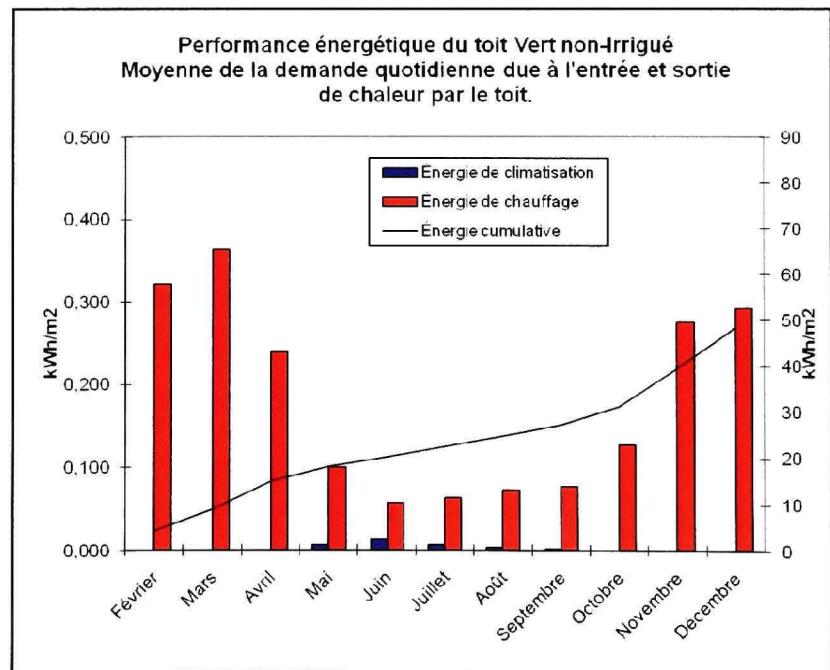
chauffage (CVCA) est de 100%, ce qui est une hypothèse conservatrice. De plus, tel que mentionné à la section 3.3, la structure du toit vert du projet du CEU est de type ventilée, c'est-à-dire que la chaleur qui traverse la plateforme du toit vert est évacuée par la ventilation de l'entre-toit. Ainsi, les gains énergétiques mesurés dans cette étude ne reflètent que la plateforme du toit vert et non l'ensemble de la toiture du duplex utilisé dans l'étude du CEU de Montréal. Toutefois, tel qu'expliqué à la section 3.3, les résultats obtenus sont transposables aux constructions de toiture dites « en sandwich » comme on retrouve souvent dans les bâtiments commerciaux ou industriels.

Les figures 4.12, 4.13 et 4.14 présentent la demande d'énergie de climatisation et de chauffage pour chacun des trois types de toiture étudiés et calculée tel que décrit plus haut.

Une quantité moyenne maximale de 0.092 kWh/m^2 a pénétré le bâtiment par la toiture de référence pendant le mois de juin 2007. Pour ce même toit, la quantité moyenne d'énergie perdue est de 0.431 kWh/m^2 au mois de mars de la même année. Le toit vert non irrigué a diminué ces valeurs avec une quantité moyenne maximale d'énergie pénétrant le toit de 0.013 kWh/m^2 au mois de juin et une quantité moyenne maximale d'énergie perdue par le toit de 0.363 kWh/m^2 au mois de mars. De la même façon, le toit vert irrigué a enregistré des valeurs moyennes maximales de 0.002 kWh/m^2 au mois de juin pour la pénétration de chaleur et de 0.287 kWh/m^2 au mois de mars pour les pertes de chaleur.



**Figure 4.12 Toit de Référence - demande d'énergie
due à l'entrée et sortie de chaleur par le toit.**



**Figure 4.13 Toit Vert Non irrigué - demande
d'énergie due à l'entrée et sortie de chaleur par le toit.**

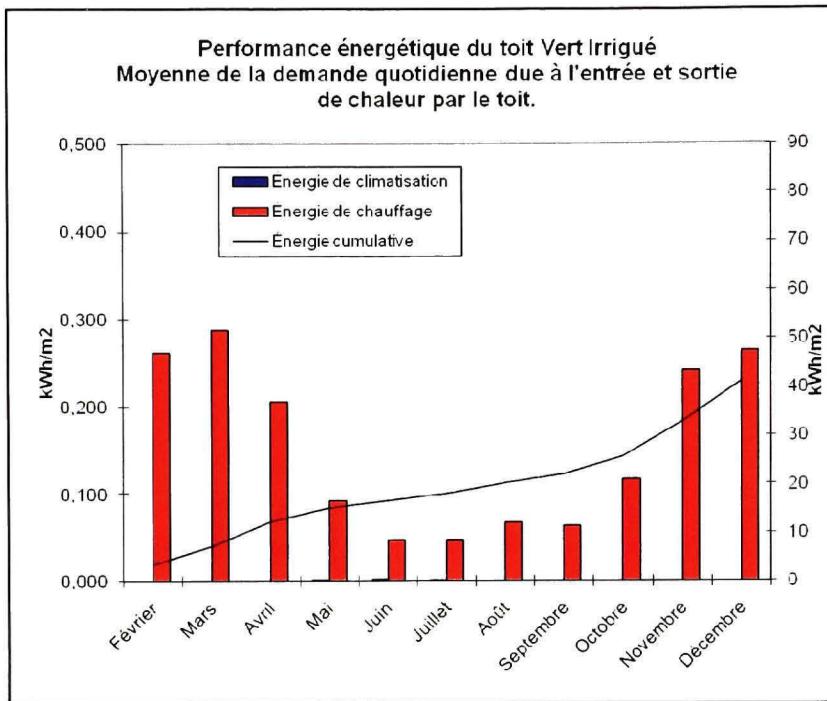


Figure 4.14 Toit Vert Irrigué - demande d'énergie due à l'entrée et sortie de chaleur par le toit.

4.4.1 Climatisation

La figure 4.15 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 4.15 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. Tel que mentionné plus haut, cette demande a été maximale au mois de juin avec $0,092 \text{ kWh/m}^2$. La moyenne de la consommation mensuelle d'énergie de climatisation se situe à $0,031 \text{ kWh/m}^2$ pour le toit de référence.

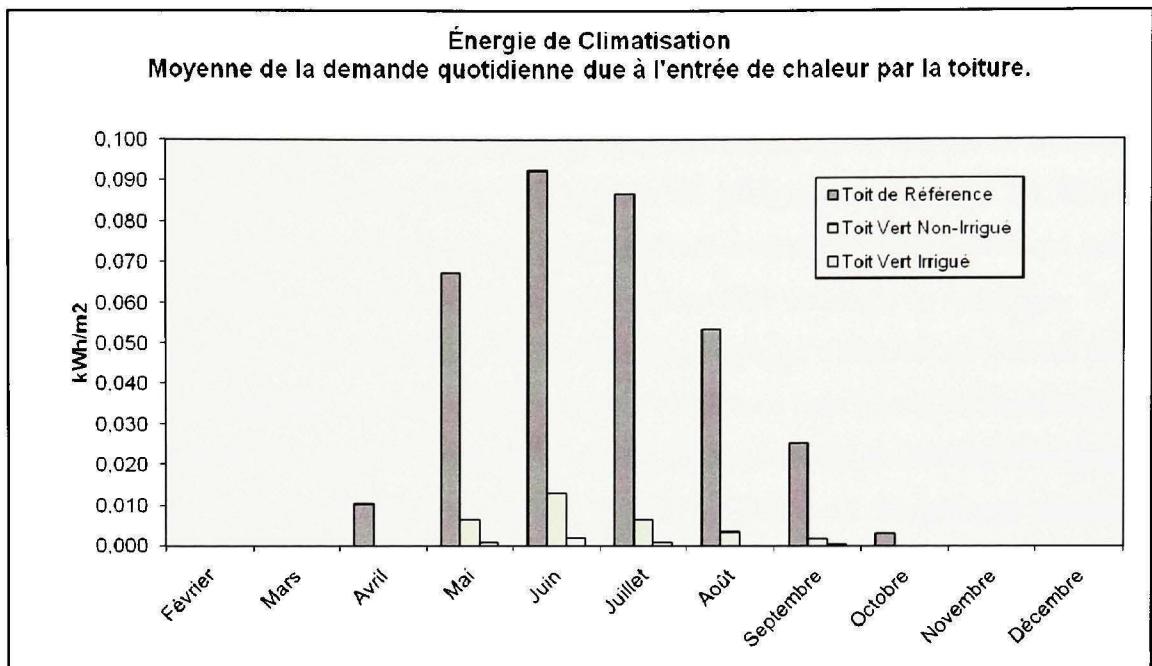


Figure 4.15 Demande d'énergie de climatisation due à l'entrée de chaleur par le toit.

Le toit vert non irrigué a nécessité un faible ajout d'énergie de climatisation pour les 5 mois les plus chauds de l'année 2007 seulement (mai à septembre). La demande maximale moyenne a aussi été enregistrée au mois de juin avec 0.013 kWh/m^2 ce qui est presque 86% moins que le toit de référence. La moyenne annuelle de la consommation en énergie de climatisation est de 0.003 kWh/m^2 pour le toit vert non irrigué, ce qui est presque 91% moins élevé que le toit de référence.

Le toit vert irrigué a quant à lui presque annulé la pénétration de chaleur par la toiture, réduisant à très peu la demande en énergie de climatisation due à la partie « toiture » du bâtiment. Cette demande se répartie sur 4 mois seulement et atteint son maximum au même moment que les deux autres toitures, à savoir au mois de juin. La demande maximale mensuelle est de 0.002 kWh/m^2 seulement ce qui représente une réduction de presque 98% par rapport au toit de référence. Ainsi, la moyenne annuelle de la demande en énergie de climatisation est très proche de 0 kWh/m^2 et le toit vert irrigué enregistre une réduction de cette demande annuelle de presque 99% par rapport au toit de référence.

4.4.2 Chauffage

La figure 4.16 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 4.16 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. Les trois types de toiture ont requis l'apport d'énergie de chauffage pour maintenir des conditions de température stables à l'intérieur du bâtiment. Tel que mentionné plus haut, le toit de référence a enregistré une demande maximale de 0.431 kWh/m^2 au mois de mars et la moyenne mensuelle de la consommation d'énergie de chauffage pour toute l'année est de 0.249 kWh/m^2 .

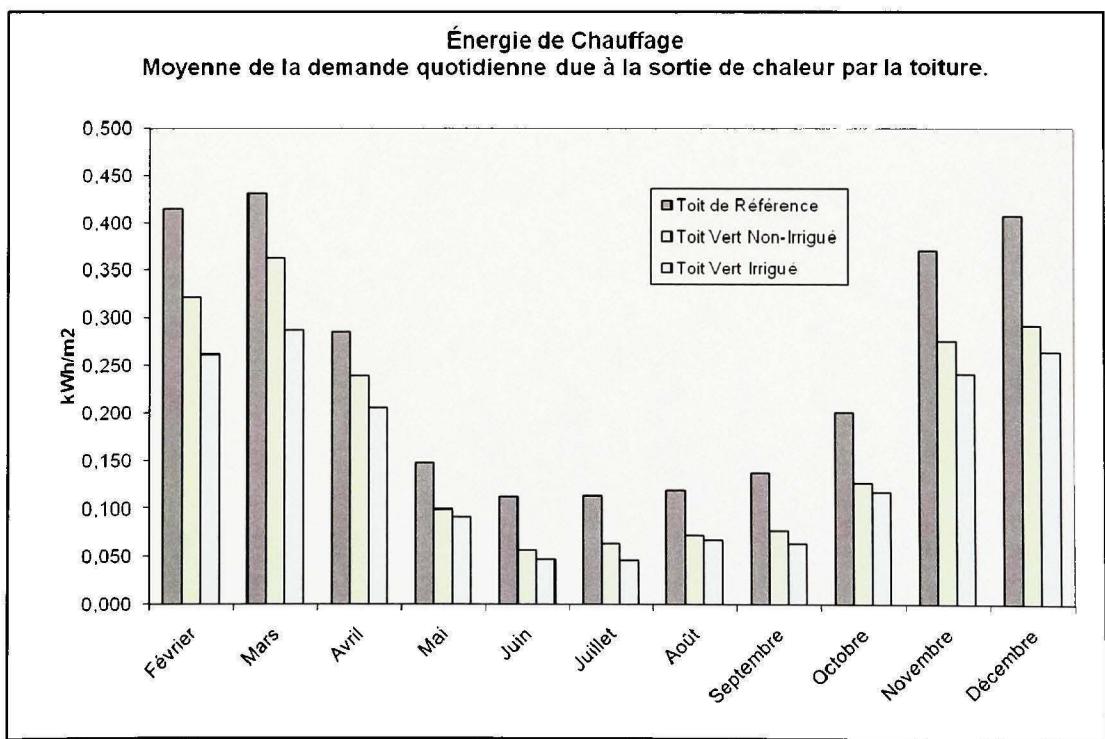


Figure 4.16 Demande d'énergie de chauffage due à la sortie de chaleur par le toit.

Le toit vert non irrigué a enregistré une consommation d'énergie de chauffage maximale de 0.363 kWh/m² au mois de mars ce qui représente une diminution de 15.8% par rapport au toit de référence. La moyenne mensuelle de consommation d'énergie de chauffage par le toit vert non irrigué est de 0.181 kWh/m² pour l'année 2007, ce qui représente une réduction avoisinant les 27% par rapport au toit de référence.

Le toit vert irrigué présente quant à lui une demande mensuelle maximale de 0.287 kWh/m² au même mois que les deux autres toits (mars), ce qui est 33.3% moins élevé que le toit de référence. De plus, la consommation moyenne mensuelle en énergie de chauffage par le toit vert irrigué est de 0.154 kWh/m² pour toute l'année 2007 ce qui représente une réduction de plus de 38% par rapport au toit de référence.

4.4.3 Énergie cumulative

Finalement, la figure 4.17 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 de référence a enregistré une consommation énergétique totale de 77.71 kWh/m^2 pour toute l'année étudiée. Le toit vert non irrigué a abaissé cette consommation à 48.43 kWh/m^2 et le toit vert irrigué à 41.07 kWh/m^2 . Ainsi, 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.

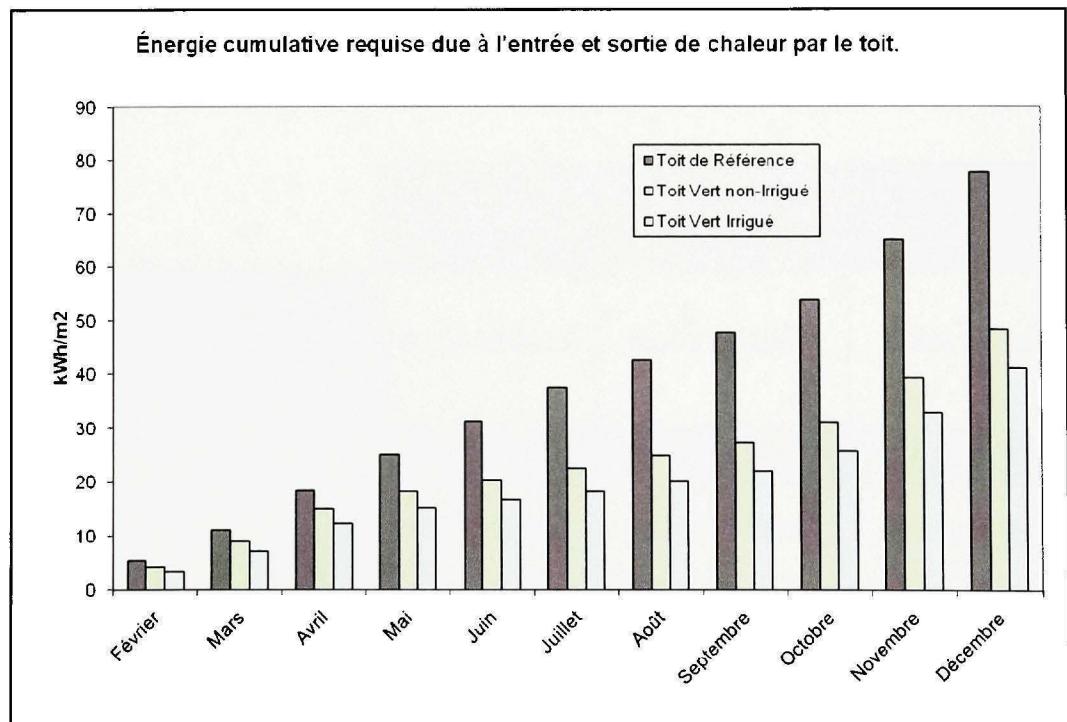


Figure 4.17 Demande totale cumulative d'énergie due à l'entrée et sortie de chaleur par le toit.

Les tableaux 4.4, 4.5 et 4.6 ci-dessous résument les résultats obtenus dans l'étude de la performance énergétique. Les résultats détaillés se retrouvent à l'Annexe V.

Tableau 4.4 Résumé des résultats pour la performance énergétique – climatisation

	Toit de Référence	Toit Vert Non irrigué	Toit Vert Irrigué
Demande maximale en énergie de climatisation (mois de juin)	0.092 kWh/m ²	0.013 kWh/m ²	0.002 kWh/m ²
Réduction / Référence	N/A	85.8%	97.8%
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%

Tableau 4.5 Résumé des résultats pour la performance énergétique – chauffage

	Toit de Référence	Toit Vert Non irrigué	Toit Vert Irrigué
Demande maximale en énergie de chauffage (mois de mars)	0.431 kWh/m ²	0.363 kWh/m ²	0.287 kWh/m ²
Réduction / Référence	N/A	15.8%	33.3%
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%

Tableau 4.6 Résumé des résultats pour la performance énergétique – énergie cumulative

	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%

CHAPITRE 5

DISCUSSION 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.

Dans le chapitre 2, 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.

Dans ce chapitre, nous comparons donc les résultats expérimentaux de la plateforme du CEU de Montréal à ceux d'Ottawa, de Toronto et de Vancouver et nous discutons des différences. Puisque, comme nous l'avons dit, les quatre villes expérimentales ont des climats qui leur

sont propres, nous regarderons surtout l'impact des toits verts par rapport aux toits de référence et comparerons les pourcentages d'augmentation ou de diminution obtenus dans chaque ville. La comparaison de ces pourcentages et l'explication des divergences permettront ainsi de valider les résultats obtenus à Montréal et de mettre en valeur les points qui semblent être communs pour les études pancanadiennes.

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.

Tableau 5.1 Éléments de design des quatre plateformes expérimentales comparées

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
CEU, Montréal, QC	Toit Vert Non irrigué	2007	42	150	non
	Toit Vert Irrigué		42	150	oui

5.1 Comparaison de la température maximale au niveau de la membrane d'étanchéité

Le tableau 5.2 présente 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 CEU de Montréal sont aussi présentés.

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

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%
CEU, Montréal, QC	Toit Vert Non irrigué	33.6	46.6	34.4	26%
	Toit Vert Irrigué	33.6	46.6	31.4	33%

On note tout d'abord que le toit du CEU de Montréal 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 CEU de Montréal 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 CEU de Montréal 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 toits verts comparés ont des systèmes d'irrigation permanents sauf la partie non irriguée du toit du CEU de Montréal. 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 CEU de Montréal, 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 CEU de Montréal 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 (autours de 70°C) les pourcentages de réduction de la température maximale de la membrane des toits verts du CEU de Montréal 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 CEU de Montréal 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.

5.2 Comparaison de la variation de la température au niveau de la membrane d'étanchéité

Le tableau 5.3 ci-dessous présente 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 CEU de Montréal 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 CEU de Montréal 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 CEU de Montréal 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 CEU de Montréal. 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) on 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 CEU de Montréal. 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.

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 CEU de Montréal semblent être en ligne avec ceux des autres ville 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 tout 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 CEU de Montréal, 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.

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

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)
CEU, 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)

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 CEU de Montréal 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 CEU de Montréal 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 CEU de Montréal 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 CEU de Montréal 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.

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

Flux de chaleur traversant la toiture – GAINS de chaleur				
Localisation	Nom	Référence	Toit Vert	
		W/m²	W/m²	% Réduction
FRF, Ottawa, ON	Toit Vert	30.0	≈ 0.0	100%
ENCC, Toronto, ON	"System S"	15.0	2.5	83%
	"System G"		2.5	83%
GRRF, Vancouver, CB	GR1	17.0	≈ 0.0	100%
	GR2		≈ 0.0	100%
CEU, Montréal, QC	Non irrigué	10.2	1.8	83%
	Irrigué		0.4	96%

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

Flux de chaleur maximal traversant la toiture – PERTES de chaleur				
Localisation	Nom	Référence	Toit Vert	
		W/m²	W/m²	% Réduction
FRF, Ottawa, ON	Toit Vert	-10.0	-7.0	30%
ENCC, Toronto, ON	"System S"	N/A	N/A	N/A
	"System G"		N/A	N/A
GRRF, Vancouver, CB	GR1	-2.0	-2.0	0%
	GR2		-2.0	0%
CEU, Montréal, QC	Non irrigué	-18.0	-15.1	16%
	Irrigué		-12.0	33%

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 chaleurs 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 CEU de Montréal 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 CEU de Montréal 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 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.

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

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%
CEU, Montréal, QC	Non irrigué	86%
	Irrigué	98%

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

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%
CEU, Montréal, QC	Non irrigué	16%
	Irrigué	33%

5.5 Comparaison avec les études théoriques

Les résultats présentés à la section précédente traitent tous de plateformes expérimentales réelles et les données obtenues proviennent de vraies conditions météorologiques. Tel que présenté au chapitre 2, la performance thermique des toits verts peut aussi être étudiée de façon théorique, en se basant soit sur des modèles mathématiques, soit sur des simulations informatiques.

Dans le modèle mathématique d'Eumorfopoulou et Aravantinos (1998), les auteurs concluent que la protection thermique d'un bâtiment, grâce à un toit vert, est due à 27% à la réflexion de la chaleur par les plantes et à 60% à l'absorption de l'énergie solaire par les plantes et le sol et l'évapotranspiration des plantes. Il en découle donc que 87% de l'énergie solaire est détournée du bâtiment grâce aux composantes de la toiture végétale. De même, le modèle mathématique de Lazzarin et al. (2005) démontre que dans le cas d'un bâtiment protégé par un toit vert, 98% de l'énergie solaire est détournée du bâtiment. L'expérience des toits verts du CEU de Montréal montrent des résultats similaires avec une diminution de 86% pour le toit vert non irrigué et une diminution de 98% pour le toit vert irrigué.

Dans la simulation informatique de Santamouris et al. (2007), des gains en énergie de climatisation allant de 12% à 76% pour le dernier étage du bâtiment (7% à 33% de l'énergie de climatisation pour tout le bâtiment) sont calculés. Il est à noter que dans ce cas précis, la simulation prenait en compte tout les éléments de l'enveloppe du bâtiment et non pas seulement la toiture. Les résultats obtenus pour le toit du CEU de Montréal, de même que les autres plateformes expérimentales canadiennes et aussi les modèles mathématiques ne considèrent que les échanges thermiques de la toiture. Ceci explique pourquoi les pourcentages de réduction de pertes et gains de chaleur de ces études unidimensionnelles sont plus élevés que ceux d'une simulation englobant tout les éléments de l'enveloppe du bâtiment.

En utilisant les résultats obtenus sur la plateforme expérimentale du CEU de Montréal, l'élaboration d'une équation permettant de quantifier les gains énergétiques apportés par le toit vert permettrait d'identifier les facteurs de design les plus importants. Pour ce faire, les modèles mathématiques présentés au début de ce mémoire pourraient être adaptés. Toutefois, certains paramètres additionnels devraient être enregistrés au niveau de la plateforme expérimentale, à savoir le taux d'humidité de la couche de substrat de culture, la radiation solaire incidente ainsi que la réflexion solaire offerte par le couvert végétal. De plus, pour une simulation globale du bâtiment, il faudrait tenir compte de l'enveloppe complète de ce dernier, incluant notamment les murs et les ouvertures.

5.6 Discussion des résultats et extrapolation

L'étude expérimentale du CEU de Montréal 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/m^2 à 48.43 kWh/m^2 (29.28 kWh/m^2 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/m^2 à 41.07 kWh/m^2 .

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 CEU de Montréal, 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 HydroQuébec) 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 CEU 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 CEU.

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 CEU de Montréal 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 CEU de Montréal 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 CEU de Montréal 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 CEU de Montréal 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.

ANNEXE I

JOURNÉES TYPIQUES

Journée estivale typique (22 Juillet 2007)

JOURNÉE CHAUTE TYPIQUE = JOUR 203 (22 Juillet)

Mois	Année	Jour	Heure	Heure	REF	REF	REF	NON-IRR	NON-IRR	NON-IRR	IRR	IRR	IRR	REF	REF	REF	NON-IRR	NON-IRR	NON-IRR	IRR	IRR	IRR	Environnement	WS	Temp	WS RH						
					TC C1 3	TC C2 3	AVG	TC S1 3	TC S2 3	AVG	TC H1 3	TC H2 3	AVG	HFT C1	HFT C2	AVG	HFT S1	HFT S2	AVG	HFT H1	HFT H2	AVG	WS	Temp	WS RH							
					-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	%	
Juillet	2007	203	0000	0000	15	19,47	22,03	20,8	22,92	23,17	23,0	23,22	23,33	23,3	-12,4	-5,41	-8,9	-2,44	-0,98	-1,7	-2,27	-1,22	-1,7	19,48	50,86							
Juillet	2007	203	0000	0000	30	19,31	21,94	20,6	22,82	23,06	22,9	23,2	23,29	23,2	-12,56	-5,61	-9,1	-2,52	-1,14	-1,8	-2,22	-1,2	-1,7	19,22	51,51							
Juillet	2007	203	0000	0000	45	19,15	21,86	20,5	22,73	22,95	22,8	23,19	23,25	23,2	-12,73	-5,74	-9,2	-2,62	-1,3	-2,0	-2,18	-1,17	-1,7	18,89	52,33							
Juillet	2007	203	0100	0100	100	19	21,78	20,4	22,63	22,84	22,7	23,17	23,2	23,2	-12,89	-5,79	-9,3	-2,71	-1,46	-2,1	-2,15	-1,14	-1,6	18,67	52,57							
Juillet	2007	203	0100	0100	115	18,85	21,71	20,3	22,53	22,74	22,6	23,16	23,16	23,2	-13,07	-5,69	-9,4	-2,79	-1,61	-2,2	-2,12	-1,12	-1,6	18,41	54,04							
Juillet	2007	203	0100	0100	130	18,71	21,67	20,2	22,44	22,63	22,5	23,14	23,11	23,1	-13,26	-5,71	-9,5	-2,89	-1,77	-2,3	-2,15	-1,14	-1,6	18,29	54,08							
Juillet	2007	203	0100	0100	145	18,57	21,66	20,1	22,34	22,52	22,4	23,12	23,06	23,1	-13,43	-5,75	-9,6	-2,99	-1,92	-2,5	-2,18	-1,16	-1,7	18,07	54,54							
Juillet	2007	203	0100	0100	200	18,45	21,62	20,0	22,25	22,42	22,3	23,11	23,01	23,1	-13,59	-5,86	-9,7	-3,08	-2,07	-2,6	-2,18	-1,19	-1,7	18	55,8							
Juillet	2007	203	0100	0100	215	18,32	21,57	19,9	21,16	22,31	22,2	23,09	22,96	23,0	-13,76	-5,92	-9,8	-3,19	-2,21	-2,7	-2,15	-1,19	-1,7	17,78	55,55							
Juillet	2007	203	0100	0100	230	18,2	21,51	19,9	21,07	22,21	22,1	23,07	22,91	23,0	-13,92	-6	-10,0	-3,29	-2,36	-2,8	-2,12	-1,19	-1,7	17,6	56,35							
Juillet	2007	203	0100	0100	245	18,08	21,45	19,8	21,2	22,21	22,1	23,04	22,85	22,9	-14,04	-6,07	-10,1	-3,4	-2,51	-3,0	-2,08	-1,17	-1,6	17,41	55,99							
Juillet	2007	203	0100	0100	300	17,96	21,39	19,7	21,92	22,2	22,0	23,02	22,79	22,9	-14,13	-6,18	-10,2	-3,51	-2,65	-3,1	-2,08	-1,19	-1,6	17,41	55,26							
Juillet	2007	203	0100	0100	315	17,86	21,31	19,6	21,84	22,19	21,9	22,99	22,74	22,9	-14,22	-6,28	-10,3	-3,62	-2,77	-3,2	-2,1	-1,2	-1,7	17,38	55,91							
Juillet	2007	203	0100	0100	330	17,75	21,25	19,5	21,77	22,18	21,8	22,97	22,67	22,8	-14,32	-6,4	-10,4	-3,7	-2,91	-3,4	-2,12	-1,24	-1,7	17,39	55,91							
Juillet	2007	203	0100	0100	345	17,66	21,16	19,8	21,68	22,09	21,7	22,94	22,68	22,8	-14,43	-6,5	-10,5	-3,8	-3,04	-3,4	-2,12	-1,27	-1,7	17,42	54,98							
Juillet	2007	203	0100	0100	400	17,51	21,13	19,3	21,59	22,01	21,6	22,91	22,56	22,7	-14,53	-6,6	-10,6	-3,91	-3,26	-3,5	-2,13	-1,33	-1,7	17,19	55,57							
Juillet	2007	203	0100	0100	415	17,48	21,05	19,3	21,51	22,01	21,5	22,89	22,57	22,7	-14,69	-6,68	-10,7	-4,03	-3,29	-3,7	-2,19	-1,35	-1,8	16,99	57,83							
Juillet	2007	203	0100	0100	430	17,39	20,98	19,2	21,42	21,89	21,4	22,86	22,43	22,6	-14,83	-6,76	-10,8	-4,13	-3,4	-3,8	-2,19	-1,37	-1,8	16,87	58,64							
Juillet	2007	203	0100	0100	445	17,3	20,91	19,1	21,34	21,79	21,3	22,83	22,37	22,6	-14,92	-6,83	-10,9	-4,22	-3,53	-3	-2,16	-1,4	-1,8	16,77	51,86							
Juillet	2007	203	0100	0100	500	17,21	20,84	19,0	21,26	21,72	21,2	22,81	22,31	22,6	-15,02	-6,92	-11,0	-4,3	-3,63	-4,0	-2,15	-1,42	-1,8	16,24	62,33							
Juillet	2007	203	0100	0100	515	17,12	20,78	19,0	21,17	21,61	21,1	22,77	22,25	22,5	-15,13	-7,01	-11,1	-4,39	-3,74	-4,1	-2,17	-1,45	-1,8	16,27	61,78							
Juillet	2007	203	0100	0100	530	17,04	20,71	18,9	21,08	21,5	21	22,74	22,19	22,5	-15,21	-7,11	-11,1	-4,49	-3,84	-4,2	-2,22	-1,48	-1,9	16,19	61,28							
Juillet	2007	203	0100	0100	545	16,99	20,65	18,8	20,9	20,9	20,8	22,7	22,13	22,4	-15,06	-7,15	-11,1	-4,58	-3,95	-4,3	-2,23	-1,51	-1,9	16,46	63,65							
Juillet	2007	203	0100	0100	600	16,95	20,6	18,8	20,91	20,81	20,9	22,67	22,06	22,4	-14,85	-7,2	-11,0	-4,66	-4,04	-4,4	-2,22	-1,55	-1,9	16,48	64,35							
Juillet	2007	203	0100	0100	615	16,93	20,54	18,7	20,82	20,72	20,8	22,64	22,23	22,4	-14,59	-7,2	-10,9	-4,74	-4,15	-4,4	-2,2	-1,58	-1,9	16,83	60,35							
Juillet	2007	203	0100	0100	645	16,95	20,45	18,7	20,65	20,54	20,6	22,56	21,87	22,2	-13,9	-7,22	-10,6	-4,93	-4,36	-4,6	-2,17	-1,63	-1,9	19,39	51,34							
Juillet	2007	203	0100	0100	700	17	20,42	18,7	20,57	20,45	20,5	22,52	21,8	22,1	-13,24	-7,17	-10,2	-5,01	-4,44	-4,7	-2,15	-1,66	-1,9	20,54	50,6							
Juillet	2007	203	0100	0100	715	17,18	20,39	18,8	20,49	20,37	20,4	22,48	21,73	22,1	-11,56	-7,12	-9,09	-5,09	-4,54	-4,8	-2,13	-1,69	-1,9	21,07	45,82							
Juillet	2007	203	0100	0100	730	17,65	20,3	19,9	21,14	21,5	21	22,97	22,21	22,7	-11,75	-7,21	-9,1	-5,16	-4,49	-4,9	-2,16	-1,71	-1,9	21,67	43,23							
Juillet	2007	203	0100	0100	745	18,37	20,41	19,4	20,2	21,31	20,3	22,39	21,59	22,0	-13,88	-6,51	-9,22	-5,22	-4,67	-5,0	-2,12	-1,87	-2,0	22,47	42,39							
Juillet	2007	203	0100	0100	800	19,32	20,59	20,0	20,24	20,4	20,1	22,35	21,52	21,9	-12,93	-5,17	-8,79	-4,28	-3,75	-4,2	-2,12	-1,87	-2,0	22,31	42,93							
Juillet	2007	203	0100	0100	815	20,48	20,88	20,7	20,17	20,08	20,1	22,31	21,44	21,9	-13,77	-5,18	-9,32	-4,37	-3,77	-5,0	-2,13	-1,94	-2,0	23,14	40,25							
Juillet	2007	203	0100	0100	830	21,31	21,25	21,5	20,21	20,11	20,23	22,06	20,96	21,5	-13,97	-5,23	-9,53	-4,48	-3,88	-3,2	-2,18	-1,94	-2,0	23,64	40,11							
Juillet	2007	203	0100	0100	845	21,31	21,67	22,5	20,94	19,70	20,0	22,23	21,31	21,8	-14,05	-5,27	-9,68	-4,51	-3,91	-3,28	-2,18	-1,94	-2,0	23,59	40,11							
Juillet	2007	203	0100	0100	900	24,67	21,35	23,5	20,82	20,26	20,6	22,06	21,01	21,5	-14,73	-5,31	-9,76	-4,62	-4,02	-3,51	-2,18	-1,94	-2,0	23,91	41,24							
Juillet	2007	203	0100	0100	915	24,52	25,72	24,4	22,22	22,44	22,8	22,41	21,79	22,1	-14,93	-5,38	-9,82	-4,77	-4,17	-3,51	-2,18	-1,94	-2,0	23,99	41,27							
Juillet	2007	203	0100	0100	945	25,52	26,24	25,3	22,22	22,44	22,8	22,41	21,79	22,1	-15,04	-5,43	-9,87	-4,82	-4,22	-3,57	-2,18	-1,94	-2,0	24,05	41,27							
Juillet	2007	203	0100	0100	1000	25,51	26,24	25,3	22,22	22,44	22,8	22,41	21,79	22,1	-15,15	-5,48	-9,92	-4,87	-4,27	-3,62	-2,18	-1,94	-2,0	24,13	41,27							
Juillet	2007	203	0100	0100	1005	25,51	26,24	25,3	22,22	22,44	22,8	22,41	21,79	22,1	-15,26	-5,53	-9,97	-4,92	-4,32	-3,67	-2,18	-1,94	-2,0	24,21	41,27							
Juillet	2007	203	0100	0100	1010	25,51	26,24	25,3	22,22	22,44	22,8	22,41	21,79	22,1	-15,3																	

Journée automnale typique (3 Octobre 2007)

JOURNÉE FRAICHE TYPIQUE = JOUR 276 (3 Octobre)

Mois	Année	Jour	Heure	Heure	REF			NON-IRR			IRR			REF			NON-IRR			IRR			Environnement							
					TC	C1	C3	TC	C2	AVG	TC	S1	TC	S2	AVG	TC	H1	TC	H2	AVG	HFT	C1	HFT	C2	AVG	HFT	H1	H2	Avg	WS
-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	W/m ²	%									
Octobre	2007	276	00h00	00h00	15	17,88	19,64	18,8	19,69	19,68	19,7	21,03	20,65	20,8	-8,59	-5,31	-7,0	-3,93	-2,91	-3,4	-2,63	-0,91	-1,8	17,02	73,1					
Octobre	2007	276	30	17,9	19,62	18,8	19,64	19,65	19,6	21	20,61	20,8	-8,41	-5,31	-6,9	-3,99	-2,96	-3,5	-2,6	-0,94	-1,8	17,04	73,2							
Octobre	2007	276	45	17,93	19,61	18,8	19,59	19,61	19,6	20,99	20,56	20,8	-8,26	-5,3	-6,8	-4,06	-3,03	-3,5	-2,6	-0,96	-1,8	17,09	73,3							
Octobre	2007	276	100	19,0	19,59	18,8	19,55	19,57	19,6	20,96	20,52	20,7	-8,12	-5,29	-6,7	-4,1	-3,00	-3,6	-2,58	-0,96	-1,8	17,17	72,9							
Octobre	2007	276	115	17,97	19,59	18,8	19,51	19,53	19,5	20,94	20,48	20,7	-7,98	-5,23	-6,6	-4,12	-3,12	-3,6	-2,55	-0,91	-1,7	17,25	72,8							
Octobre	2007	276	130	17,99	19,58	18,8	19,46	19,49	19,5	20,92	20,43	20,7	-7,85	-5,2	-6,5	-4,15	-3,17	-3,7	-2,51	-0,86	-1,7	17,25	73							
Octobre	2007	276	145	18,01	19,56	18,8	19,43	19,49	19,4	20,9	20,39	20,6	-7,77	-5,21	-6,5	-4,15	-3,21	-3,7	-2,56	-0,96	-1,8	17,25	73,4							
Octobre	2007	276	200	18,02	19,54	18,8	19,4	19,4	19,4	20,88	20,35	20,6	-7,84	-5,26	-6,6	-4,22	-3,24	-3,7	-2,63	-1,04	-1,8	17,22	73,7							
Octobre	2007	276	215	18,01	19,53	18,8	19,35	19,4	19,4	20,87	20,31	20,6	-8,05	-5,35	-6,7	-4,28	-3,29	-3,8	-2,73	-1,07	-1,9	17,27	73,5							
Octobre	2007	276	230	18	19,52	18,8	19,31	19,32	19,3	20,86	20,27	20,6	-8,1	-5,35	-6,7	-4,31	-3,32	-3,8	-2,78	-1,07	-1,9	17,3	73,6							
Octobre	2007	276	245	18	19,51	18,8	19,28	19,29	19,3	20,84	20,24	20,5	-8,01	-5,41	-6,7	-4,34	-3,37	-3,9	-2,84	-1,14	-2,0	17,44	73,4							
Octobre	2007	276	300	18,02	19,5	18,8	19,25	19,25	19,3	20,83	20,21	20,5	-7,89	-5,41	-6,7	-4,39	-3,42	-3,9	-2,89	-1,19	-2,0	17,54	73,1							
Octobre	2007	276	315	18,05	19,5	18,8	19,21	19,21	19,2	20,82	20,17	20,5	-7,73	-5,46	-6,6	-4,44	-3,45	-3,9	-2,98	-1,25	-2,1	17,59	72,9							
Octobre	2007	276	330	18,1	19,5	18,8	19,18	19,18	19,2	20,82	20,14	20,5	-7,66	-5,51	-6,6	-4,52	-3,45	-3,8	-2,92	-1,29	-2,2	17,57	72,9							
Octobre	2007	276	345	18,14	19,51	18,8	19,16	19,14	19,2	20,82	20,11	20,5	-7,63	-5,54	-6,6	-4,57	-3,56	-4,1	-3,24	-1,32	-2,3	17,58	73,3							
Octobre	2007	276	400	18,17	19,52	18,8	19,13	19,11	19,1	20,83	20,08	20,5	-7,68	-5,58	-6,6	-4,62	-3,61	-4,1	-3,49	-1,34	-2,4	17,6	73,7							
Octobre	2007	276	415	18,21	19,53	18,9	19,11	19,09	19,1	20,84	20,05	20,4	-7,66	-5,61	-6,6	-4,65	-3,68	-4,2	-3,59	-1,37	-2,5	17,59	74							
Octobre	2007	276	430	18,24	19,54	18,9	19,09	19,06	19,1	20,84	20,02	20,4	-7,57	-5,62	-6,6	-4,71	-3,71	-4,2	-3,64	-1,44	-2,5	17,6	74,5							
Octobre	2007	276	445	18,28	19,54	18,9	19,07	19,0	19,1	20,85	20	20,4	-7,55	-5,59	-6,5	-4,76	-3,73	-4,2	-3,62	-1,4	-2,5	17,6	75							
Octobre	2007	276	500	18,32	19,55	18,9	19,05	19,01	19,0	20,85	20,4	20,5	-7,43	-5,54	-6,5	-4,81	-3,79	-4,3	-3,59	-1,37	-2,5	17,56	75,6							
Octobre	2007	276	515	18,33	19,56	18,9	19,04	19,09	19,0	20,85	19,94	20,4	-7,4	-5,51	-6,5	-4,87	-3,81	-4,3	-3,6	-1,38	-2,5	17,55	76,4							
Octobre	2007	276	530	18,35	19,56	19,0	19,02	19,07	19,0	20,84	19,91	20,4	-7,36	-5,54	-6,5	-4,87	-3,82	-4,3	-3,6	-1,37	-2,5	17,57	76,9							
Octobre	2007	276	545	18,38	19,56	19,0	19	19,05	19,0	20,83	19,88	20,4	-7,31	-5,56	-6,4	-4,89	-3,84	-4	-3,62	-1,42	-2,5	17,57	77,1							
Octobre	2007	276	600	18,4	19,56	19,0	18,99	18,9	19,0	20,82	19,86	20,3	-7,33	-5,53	-6,4	-4,93	-3,87	-4,4	-3,67	-1,42	-2,6	17,66	77,6							
Octobre	2007	276	615	18,41	19,57	19,0	18,97	18,9	19,0	20,82	19,84	20,3	-7,33	-5,54	-6,4	-4,97	-3,89	-4,4	-3,69	-1,43	-2,6	17,66	78,1							
Octobre	2007	276	630	18,42	19,57	19,0	18,96	18,9	19,0	20,81	19,81	20,3	-7,33	-5,53	-6,4	-4,97	-3,89	-4,4	-3,69	-1,43	-2,6	17,66	78,1							
Octobre	2007	276	645	18,43	19,57	19,0	18,95	18,9	19,0	20,81	19,79	20,3	-7,26	-5,53	-6,4	-5,01	-3,94	-4,5	-3,8	-1,44	-2,6	17,73	78,7							
Octobre	2007	276	700	18,05	19,57	19,0	18,94	18,9	19,0	20,81	19,76	20,3	-7,15	-5,48	-6,5	-5,06	-4	-4,8	-1,45	-2,6	17,85	79,6								
Octobre	2007	276	715	18,07	19,59	19,0	18,92	18,9	19,0	20,81	19,73	20,3	-7,04	-5,41	-6,5	-5,06	-4	-4,8	-1,45	-2,6	17,91	79,6								
Octobre	2007	276	730	18,04	19,59	19,0	18,92	18,9	19,0	20,81	19,72	20,3	-6,99	-5,31	-6,5	-5,09	-4,02	-4,8	-1,52	-2,6	18,02	79,3								
Octobre	2007	276	745	18,06	19,64	19,1	18,91	18,9	19,0	20,79	19,7	20,2	-5,95	-5,08	-5,5	-5,01	-4	-4,8	-1,58	-2,7	18,09	77,4								
Octobre	2007	276	760	18,01	19,61	19,1	18,9	18,9	19,0	20,78	19,68	20,2	-5,91	-5,04	-5,5	-4,99	-4,05	-4,8	-1,61	-2,8	18,07	77,3								
Octobre	2007	276	775	18,08	19,69	19,4	18,99	18,9	19,0	20,77	19,65	20,2	-4,34	-4,65	-4,5	-5,05	-4,02	-4,8	-1,63	-2,8	18,07	77,5								
Octobre	2007	276	790	18,09	19,70	19,4	18,99	18,9	19,0	20,77	19,65	20,2	-4,34	-4,65	-4,5	-5,05	-4,02	-4,8	-1,63	-2,8	18,06	77,7								
Octobre	2007	276	805	18,06	19,69	19,6	18,99	18,9	19,0	20,76	19,62	20,2	-3,95	-4,28	-4,1	-4,93	-3,97	-4,8	-1,73	-2,8	18,05	77,5								
Octobre	2007	276	820	18,03	19,66	19,6	18,96	18,9	19,0	20,75	19,62	20,2	-3,91	-4,28	-4,1	-4,91	-3,95	-4,8	-1,72	-2,8	18,04	77,3								
Octobre	2007	276	835	18,01	19,64	19,6	18,94	18,9	19,0	20,74	19,61	20,2	-3,87	-4,26	-4,1	-4,89	-3,85	-4,8	-1,71	-2,8	18,03	77,1								
Octobre	2007	276	850	18,05	19,67	19,6	18,98	18,9	19,0	20,73	19,59	20,2	-3,83	-4,26	-4,1	-4,87	-3,83	-4,8	-1,70	-2,8	18,02	76,9								
Octobre	2007	276	865	18,02	19,64	19,6	18,95	18,9	19,0	20,72	19,56	20,2	-3,79	-4,24	-4,1	-4,85	-3,81	-4,8	-1,69	-2,8	18,01	76,7								
Octobre	2007	276	880	18,04	19,66	19,6	18,97	18,9	19,0	20,71	19,53	20,2	-3,75	-4,21	-4,1	-4,82	-3,79	-4,8	-1,68	-2,8	18,00	76,5								
Octobre	2007	276	895	18,06	19,68	19,6	18,99	18,9	19,0	20,70	19,51	20,2	-3,71	-4,19	-4,1	-4,80	-3,77	-4,8	-1,67	-2,8	18,00	76,3								
Octobre	2007	276	910	18,03	19,65	19,6	18,96	18,9	19,0	20,69	19,49	20,2	-3,67	-4,15	-4,1	-4,78	-3,75	-4,8	-1,66	-2,8	18,00	76,1								
Octobre	2007	276	925	18,05	19,67	19,6	18,98	18,9	19,0	20,68	19,46	20,2	-3,63	-4,13	-4,1	-4,76	-3,73	-4,8	-1,65	-2,8	18,00	75,9								
Octobre	2007	276	940	18,07	19,69	19,6	18,99	18,9	19,0	20,67	19,44	20,2	-3,59	-4,11	-4,1	-4,74	-3,71	-4,8	-1,64	-2,8	18,00	75,7								
Octobre	2007	276	955	18,04	19,66	19,6	18,96	18,9	19,0	20,66	19,41	20,2	-3,55	-4,09	-4,1	-4,72	-3,69	-4,8	-1,63	-2,8	18,00	75,5								
Octobre	2007	276	970	18,06	19,68	19,6	18,98	18,9	19,0	20,65	19,39	20,2	-3,51	-4,07	-4,1	-4,70	-3,67	-4,8	-1,62	-2,8	18,00	75,3	</td							

ANNEXE II

TEMPÉRATURE DE LA MEMBRANE D'ÉTANCHÉITÉ

Température maximale enregistrée au niveau de la membrane d'étanchéité

Mois	Année	Jour	Heure	RÉFÉRENCE			
				TC_C1_3 -C	TC_C2_3 -C	T.MAX(j) -C	T.MAX(m) -C
Février	2007	59	2400	2,98	8,74	8,94	7,74
Mars	2007	72	2400	8,58	10,21	10,25	8,99
Avril	2007	120	2400	9,9	14,04	17,56	17,55
Mai	2007	151	2400	18,67	20,49	21,71	30,25
Juin	2007	181	2400	17,64	20,68	33,47	36,51
Juillet	2007	212	2400	24,24	26,88	40,85	36,06
Août	2007	243	2400	19,73	22,23	34,78	34,24
Septembre	2007	273	2400	16,16	17,67	22,4	28,41
Octobre	2007	304	2400	12,27	13,75	17,12	19,07
Novembre	2007	334	2400	4,49	6,74	7,03	10,07
Décembre	2007	365	2400	4,64	7,7	7,9	7,92

Mois	Année	Jour	Heure	VERT NON-IRRIGUÉ			
				TC_S1_3 -C	TC_S2_3 -C	T.MAX(j) -C	T.MAX(m) -C
Février	2007	59	2400	5,98	6,44	6,55	5,52
Mars	2007	72	2400	9,05	9,11	9,18	6,42
Avril	2007	120	2400	13,15	13,21	14,63	13,14
Mai	2007	151	2400	20,21	20,04	20,33	22,13
Juin	2007	181	2400	21,19	21,21	23,41	27,31
Juillet	2007	212	2400	28,12	28,19	30,5	26,78
Août	2007	243	2400	22,87	22,91	25,3	26,65
Septembre	2007	273	2400	17,72	17,76	18,76	23,46
Octobre	2007	304	2400	12,9	12,62	13,42	16,52
Novembre	2007	334	2400	5,03	4,41	5,38	8,15
Décembre	2007	365	2400	5,41	5,22	5,53	5,79

Mois	Année	Jour	Heure	VERT IRRIGUÉ			
				TC_H1_3 -C	TC_H2_3 -C	T.MAX(j) -C	T.MAX(m) -C
Février	2007	59	2400	9,54	8,03	9,9	9,04
Mars	2007	72	2400	10,53	7,81	10,53	9,45
Avril	2007	120	2400	15,83	14,4	15,93	14,27
Mai	2007	151	2400	21,7	20,5	21,7	21,47
Juin	2007	181	2400	23,73	22,53	25,13	26,59
Juillet	2007	212	2400	28,56	27,68	28,72	26,03
Août	2007	243	2400	24,18	23,44	24,41	25,73
Septembre	2007	273	2400	19,13	18,93	19,89	23,41
Octobre	2007	304	2400	13,98	13,59	13,98	17,78
Novembre	2007	334	2400	8,52	7,72	8,59	10,81
Décembre	2007	365	2400	9	7,56	9,17	9,21

ANNEXE III

FLUCTUATION DE LA TEMPÉRATURE DE LA MEMBRANE

Fluctuation de la température de la membrane d'étanchéité

Mois	Année	Jour	Heure	RÉFÉRENCE							
				TC_C1_3	TC_C2_3	T.MAX(j)	T.MIN(j)	Fluctuation (i)	T.MAX_av q(m)	T.MIN_av q(m)	Fluctuation (m)
				-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C
Février	2007	59	2400	2,98	8,74	8,94	2,98	5,96	7,74	3,61	4,12
Mars	2007	72	2400	8,58	10,21	10,25	6,35	3,9	8,99	3,78	5,21
Avril	2007	120	2400	9,9	14,04	17,56	9,9	7,66	17,55	7,52	10,03
Mai	2007	151	2400	18,67	20,49	21,71	17,61	4,1	30,25	13,79	16,45
Juin	2007	181	2400	17,64	20,68	33,47	16,33	17,14	36,51	18,71	17,80
Juillet	2007	212	2400	24,24	26,88	40,85	21,85	19	36,06	19,31	16,75
Août	2007	243	2400	19,73	22,23	34,78	17,83	16,95	34,24	19,30	14,93
Septembre	2007	273	2400	16,16	17,67	22,4	12,76	9,64	28,41	16,59	11,82
Octobre	2007	304	2400	12,27	13,75	17,12	8,78	8,34	19,07	11,66	7,40
Novembre	2007	334	2400	4,49	6,74	7,03	3,45	3,58	10,07	4,97	5,10
Décembre	2007	365	2400	4,64	7,7	7,9	4,27	3,63	7,92	3,96	3,96

Mois	Année	Jour	Heure	VERT NON-IRRIGUÉ							
				TC_S1_3	TC_S2_3	T.MAX(j)	T.MIN(j)	Fluctuation (i)	T.MAX_av q(m)	T.MIN_av q(m)	Fluctuation (m)
				-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C
Février	2007	59	2400	5,98	6,44	6,55	5,88	0,67	5,52	4,96	0,56
Mars	2007	72	2400	9,05	9,11	9,18	6,25	2,93	6,42	5,51	0,91
Avril	2007	120	2400	13,15	13,21	14,63	12,54	2,09	13,14	9,58	3,56
Mai	2007	151	2400	20,21	20,04	20,33	19,1	1,23	22,13	16,11	6,02
Juin	2007	181	2400	21,19	21,21	23,41	19,21	4,2	27,31	21,46	5,85
Juillet	2007	212	2400	28,12	28,19	30,5	25,53	4,97	26,78	21,57	5,20
Août	2007	243	2400	22,87	22,91	25,3	20,09	5,21	26,65	21,53	5,11
Septembre	2007	273	2400	17,72	17,76	18,76	14,78	3,98	23,46	18,56	4,90
Octobre	2007	304	2400	12,9	12,62	13,42	9,34	4,08	16,52	13,33	3,19
Novembre	2007	334	2400	5,03	4,41	5,38	4,41	0,97	8,15	6,50	1,65
Décembre	2007	365	2400	5,41	5,22	5,53	5,04	0,49	5,79	5,20	0,59

Mois	Année	Jour	Heure	VERT IRRIGUÉ							
				TC_H1_3	TC_H2_3	T.MAX(j)	T.MIN(j)	Fluctuation (i)	T.MAX_av q(m)	T.MIN_av q(m)	Fluctuation (m)
				-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C
Février	2007	59	2400	9,54	8,03	9,9	7,9	2	9,04	7,19	1,85
Mars	2007	72	2400	10,53	7,81	10,53	7,57	2,96	9,45	7,62	1,84
Avril	2007	120	2400	15,83	14,4	15,93	13,64	2,29	14,27	11,52	2,76
Mai	2007	151	2400	21,7	20,5	21,7	19,88	1,82	21,47	17,83	3,63
Juin	2007	181	2400	23,73	22,53	25,13	21,35	3,78	26,59	22,63	3,96
Juillet	2007	212	2400	28,56	27,68	28,72	25,22	3,5	26,03	22,61	3,42
Août	2007	243	2400	24,18	23,44	24,41	21,26	3,15	25,73	22,33	3,40
Septembre	2007	273	2400	19,13	18,93	19,89	16,68	3,21	23,41	20,09	3,32
Octobre	2007	304	2400	13,98	13,59	13,98	11,25	2,73	17,78	15,30	2,48
Novembre	2007	334	2400	8,52	7,72	8,59	7,57	1,02	10,81	8,99	1,82
Décembre	2007	365	2400	9	7,56	9,17	7,45	1,72	9,21	7,25	1,96

Mois	Année	Jour	Heure	Référence				Vert non-irrigué				Vert irrigué				Environnement				Fluctuation(j)			
				TC_C1_3		TC_C2_3		T.MAX(j)		T.MIN(j)		TC_S1_3		TC_S2_3		T.MAX(j)		T.MIN(j)		WS_Temp	WS_RH	WS_T.MAX(j)	WS_T.MIN(j)
				-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	-C	%	-C	-C	-C	-C			
Février	2007	47	2400	4,22	6,63	7,39	4,17	4,72	3,28	5,36	3,27	8,64	6	9,37	5,62	-5,81	74,1	-3,46	-10,62	7,16			
Février	2007	48	2400	4,52	6,7	6,74	4,24	4,69	3,23	4,74	3,19	8,82	6	8,83	5,87	-4,1	93,6	-0,82	-7,11	6,29			
Février	2007	49	2400	4,13	7,01	7,01	4,03	4,75	3,22	4,76	3,14	8,49	5,73	8,8	5,73	-9,99	84,1	-1,5	-10,57	9,07			
Février	2007	50	2400	4,17	6,83	7,03	4,15	4,75	3,24	4,76	3,18	8,42	5,65	8,55	5,49	-11,09	82,1	-4,66	-15,28	10,62			
Février	2007	51	2400	4,16	6,58	6,86	4,05	4,56	3,14	4,75	3,14	8,09	5,3	8,42	5,3	-0,03	70	1,23	-10,06	11,29			
Février	2007	52	2400	4,53	6,59	6,83	4,15	4,57	3,06	4,63	3,04	8,31	5,81	8,41	5,28	-0,19	63,26	5,28	-5,73	11,7			
Février	2007	53	2400	3,94	7,01	7,01	3,64	4,71	3,25	4,74	3,06	8,13	5,43	8,42	5,42	-3,73	57,39	0,23	-5,54	5,97			
Février	2007	54	2400	2,95	8,8	5,19	2,95	5,47	3,07	5,47	3,25	8,77	5,76	8,89	5,76	-10,76	50	0,52	-10,76	10,26			
Février	2007	55	2400	4,64	8,27	8,27	2,95	5,56	3,75	5,56	3,66	8,22	5,76	8,07	5,76	-5,07	66,84	0,59	-11,63	12,22			
Février	2007	56	2400	3,63	8,54	8,67	3,63	5,76	3,95	5,92	3,75	9,16	6,36	9,49	6,23	-2,95	69,37	6,88	-5,55	12,43			
Février	2007	57	2400	3,26	8,71	8,71	2,91	5,9	3,99	5,95	3,95	9,47	6,1	9,51	5,95	-1,5	65,99	3,92	-7,5	11,42			
Février	2007	58	2400	3,84	8,7	8,95	3,14	5,91	3,92	6,08	3,91	9,66	6,59	9,79	6,09	-1,82	63,12	10,34	-4,7	15,04			
Février	2007	59	2400	2,99	8,74	8,94	2,98	5,98	3,95	6,07	3,91	9,54	6,65	9,9	6,29	-3,01	56,58	7,96	-4,24	12,2			
Mars	2007	60	2400	3,06	8,53	8,76	1,13	5,76	3,58	5,98	3,46	9,64	6,47	9,8	6,2	-3,48	71,5	5,27	-5,66	10,93			
Mars	2007	61	2400	4,11	8,56	8,56	2,91	5,64	3,7	5,76	5,57	9,58	6,51	9,65	6,37	1,54	92,2	2,51	-6,29	8,8			
Mars	2007	62	2400	4,63	8,51	8,64	3,88	5,66	3,71	5,69	5,68	9,58	6,73	9,58	6,46	-0,74	91,7	6,34	-0,74	7,08			
Mars	2007	63	2400	4,82	8,02	8,52	4,34	5,19	3,44	5,68	3,44	9,19	6,67	9,59	6,56	-2,01	77,2	4,78	-2,95	7,73			
Mars	2007	64	2400	3,93	8,63	8,63	3,75	5,51	3,61	5,51	3,43	8,78	6,17	9,27	6,17	-15,33	70,9	1,88	-15,33	17,21			
Mars	2007	65	2400	4,86	8,08	8,65	3,91	5,47	3,81	5,63	3,61	9,11	6,24	9,13	5,96	-4,3	74,4	-6,3	-18,37	12,07			
Mars	2007	66	2400	3,8	7,94	8,24	3,34	5,67	4,06	5,75	3,81	9,14	6,07	9,36	6,07	-4,51	77,8	-1,01	-16,01	12,58			
Mars	2007	67	2400	3,61	7,81	8,31	3,61	5,7	4,13	5,86	4,06	9,8	5,92	9,28	5,76	-6,23	70,3	-4,51	-14,04	9,53			
Mars	2007	68	2400	4,5	8,33	8,33	3,46	5,82	4,29	5,95	4,13	8,91	5,84	9,1	5,74	-3,38	62,22	-0,68	-9,35	8,07			
Mars	2007	69	2400	3,58	8,63	8,63	3,61	5,81	3,78	5,68	3,79	9,6	6,52	9,41	5,81	-3,14	87,1	-7,85	-1,01	7,85			
Mars	2007	70	2400	4,59	8,41	8,41	3,97	5,58	3,41	5,84	3,61	9,13	6,49	9,49	8,85	-5,7	75,7	11,41	-0,85	10,56			
Mars	2007	71	2400	6,32	8,83	9,4	4,02	6,82	4,91	5,92	3,43	9,6	6,2	9,18	5,67	-4,7	59,87	8,26	-0,35	8,61			
Mars	2007	72	2400	8,58	10,21	10,25	6,35	9,05	7,61	9,08	4,89	10,53	5,75	10,53	5,57	8,88	74,3	8,88	3,94	4,94			
Avril	2007	96	2400	3,76	8,11	8,92	3,64	6,11	6,26	8,3	9,41	6,88	9,72	6,7	-2,03	80,7	-1,1	-3,37	4,37				
Avril	2007	97	2400	3,78	8,42	9,51	3,75	6,44	6,72	8,84	7,38	10,04	6,95	10,04	6,43	-2,22	75,5	1,34	-1,37	4,37			
Avril	2007	98	2400	4,57	8,74	9,9	3,66	6,86	5,09	7,17	5,38	10,04	6,95	10,04	6,05	-2,22	74,2	2,85	6,3	1,3			
Avril	2007	99	2400	6,73	10,16	13,99	4,53	8,28	6,68	8,75	3,96	10,94	8,2	10,94	6,59	-2,22	64,12	6,29	-0,43	6,72			
Avril	2007	100	2400	5,84	10,54	16,21	4,63	9,38	7,86	10,51	3,12	11,88	9,35	11,88	7,3	-2,14	62,18	10,33	-0,39	10,71			
Avril	2007	101	2400	6,9	11,44	20,22	4,57	11,5	9,78	12,62	5,55	12,89	10,52	12,89	7,86	-3,03	58,41	14,15	-0,53	14,68			
Avril	2007	102	2400	4,92	9,34	11,41	4,61	7,63	6,07	11,06	6,07	11,48	8,64	12,89	8,64	-1,51	100	5,9	0,87	5,03			
Avril	2007	103	2400	7,44	9,67	9,84	4,93	6,38	4,37	7,6	4,37	10,1	7	11,45	7	-3,22	97,1	5,04	1,15	3,89			
Avril	2007	104	2400	7,76	11,62	14,27	6,58	10,13	8,62	10,55	4,71	11,61	9,4	11,61	6,74	-8,39	10,95	2,59	8,36	10,95			
Avril	2007	105	2400	4,77	10,34	11,74	4,77	8,85	7,19	10,7	7,19	11,75	9,07	12,2	9,05	-1,00	9,96	0,5	5,06	10,32			
Avril	2007	106	2400	4,31	8,89	10,29	5,03	9,51	8,39	9,51	9,52	10,29	8,3	10,29	5,55	-2,22	91,7	0,35	7,35	10,32			
Avril	2007	107	2400	6,33	9,32	9,44	4,22	5,69	5,3	9,84	5,36	9,13	4,97	9,49	7,75	-5,64	1,34	4,3	1,3				
Avril	2007	108	2400	8,62	12,26	16,06	5,9	11,68	10,27	12,47	3,81	11,64	9,92	11,64	5,38	-2,22	12,96	16,3	12,96	12,96			
Avril	2007	109	2400	11,56	14,6	22,59	6,38	14,52	13,49	15,62	7,72	14,27	12,81	14,27	8,85	-10,75	39,81	21,41	3,65	17,76			
Avril	2007	110	2400	14,2	17,36	31,09	8,81	17,32	16,56	19,2	10,45	17,03	16,12	17,03	11,24	-27,73	29,63	7,29	22,34	14,46			
Avril	2007	111	2400	14,45	17,76	30,51	12,13	17,36	16,56	19,04	13,06	18,08	17,07	18,09	13,99	-15,1	35,64	25,9	11,5	14,46			
Avril	2007	112	2400	15,96	17,98	24,19	12,7	16,7	15,74	17,72	14,33	18,26	16,69	18,28	14,8	-16,86	36,27	25,76	10,66	15,1			
Avril	2007	113	2400	16,36	19,5	28,24	14,58	18,77	15,92	19,53	15,79	19,86	15,24	19,86	15,68	-8,99	35,9	28,09	14,9	13,19			
Avril	2007	114	2400	12,4	16,76	23,39	10,86	16,15	14,75	18,71	15,32	18,89	15,01	18,89	15,35	-5,01	53,01	18,57	6,55	12,02			
Avril	2007	115	2400	11,61	16,81	23,39	10,82	16,15	14,82	18,62	15,32	18,89	15,09	18,89	15,35	-5,01	54,69	20,64	8,68	13,38			
Avril	2007	116	2400	15,51	18,36	31,37	13,81	17,57	16,25	20,48	16,25	18,65	16,76	18,73	16,76	-11,23	91,9	16,11	10,57	5,64			
Avril	2007	117	2400	8,47	12,31	21,71	8,47	11,32	9,55	17,54	9,55	15,67	12,37	19,67	12,37	-2,88	97,7	11,2	2,59	8,61			
Avril	2007	137	2400	5,49	12,68	13,41	8,3	11,7	10,08	11,96	8,29	12,43	11,77	15,62	10,84	-6,69	81,7	8,74	2,87	5,87			
Avril	2007	138	2400	11,17	14,96	21,89	8,51	14,75	13,55	15,37	9,2	15,38	13,93	15,38	10,91	-9,32	13,79	5,66	8,13	13,19			
Avril	2007	139	2400	17,38	18,61	34,9	9,35	19,38	18,59	20,73	11,53	18,71	14,86	18,71	12,57	-16,79	56,07	22,99	7,07	15,91			
Avril	2007	140	2400	11,62	16,98	29,67	11,62	18,62	18,33	21,23	18,71	22,28	17,11	22,28	17,11	-17,72	68,33	16,36	16,36	11,62			
Avril	2007	141	2400	13,79	18,65	33,77	11,33	18,51	17,45	20,15	17,72	22,28	18,77	22,28	17,16	-22,22	36,67	20,3	9,62	13,38			
Avril	2007	142	2400	15,81	18,85	36,14	10,82	19,5	18,62	21,57	18,33	21,7	20,14	21,7	21,7	-18,3	53,99	18,12	4,32	12,22			
Avril	2007	143	2400	19,99	22,08	37,61	13,11	19,72	17,65	22,65	19,91	22,89	19,57	21,03	19,99	-22,21	45,53	27	13,17	13,83			
Avril	2007	144	2400	25,85	39,59	39,59	18,91	25,67	22,47	26,63	22,25	27,84	21,71	28,61	22,79	-28,67	56,96	32,05	18,02	14,03			
Avril	2007	145	2400	25,07	41,07	41,07	22,44	27,46															

Juillet	2007	183	2400	17,03	20,1	32,66	14,65	20,58	19,55	21,48	16,11	22,09	20,97	22,2	18,19	15,39	81,4	23,19	12,16	11,03
Juillet	2007	184	2400	19,45	21,84	39,42	15,52	22,47	22	24,46	17,51	23,32	22,71	23,42	18,97	19,92	61,78	25,26	14,76	10,5
Juillet	2007	185	2400	19	21,38	32,34	18,65	21,7	21,31	23,84	20,22	23,34	22,05	23,61	20,87	17,43	92,6	25,19	17,43	7,76
Juillet	2007	186	2400	19,46	21,74	26,26	18,83	21,98	21,61	22,79	20,3	23,24	22,26	23,35	20,87	19,91	83	23,4	16,69	6,71
Juillet	2007	187	2400	19,78	22,58	34,7	18,88	23,39	22,91	24,98	20,45	24,51	23,99	24,58	21,03	18,34	61,62	27,29	18,34	9,95
Juillet	2007	188	2400	18,89	21,81	31,75	18,89	21,96	21,15	23,46	20,39	23,83	22,8	24,49	21,4	17,18	82,3	24	17,18	6,82
Juillet	2007	189	2400	19,9	22,6	32,66	18,56	22,99	22,35	23,8	19,61	24,35	23,28	24,4	21,03	19,46	73,7	24,08	16,84	7,24
Juillet	2007	190	2400	20,66	22,33	25,79	18,99	22,18	21,74	22,92	20,47	23,27	22,05	24,34	20,73	18,54	97,4	22,16	16,44	5,72
Juillet	2007	191	2400	23,46	24,63	36,81	19,66	25,33	24,95	25,99	21,08	25,2	25,03	25,2	21,38	22,28	80,4	27,39	18,19	9,2
Juillet	2007	192	2400	19,65	24,3	35,72	19,65	25,09	24,68	27,45	24,04	26,32	25,59	26,75	24,1	18,87	70,2	29,52	18,87	10,65
Juillet	2007	193	2400	19,89	22,89	36,47	17,83	23,14	22,39	25,14	21,17	25	23,95	26,28	22,31	19,14	64,63	24,92	15,92	9
Juillet	2007	194	2400	18,05	21,68	30,56	18,05	21,74	21,02	23,15	20,2	23,71	22,58	24,98	21,57	16,55	83,7	22,86	15,63	7,23
Juillet	2007	195	2400	18,87	21,89	32,32	17,05	22,02	21,57	23,06	19,08	23,34	22,27	23,68	20,34	18,42	84,2	23,49	15,36	8,13
Juillet	2007	196	2400	20	22,69	33,7	18,5	23,3	22,58	24,64	20,43	24,35	23,62	24,5	20,9	18,39	81,1	25,34	18,33	7,01
Juillet	2007	197	2400	20,56	23,37	37,5	17,94	23,62	22,78	25,43	20,01	25,19	24,47	25,29	21,34	19,74	61,52	25,82	16,39	9,43
Juillet	2007	198	2400	22,59	23,84	37,49	18,49	23,98	23,07	25	20,15	25,82	25,04	26,03	22	21,59	57,74	27,12	16,92	10,2
Juillet	2007	199	2400	24,22	25,17	39,29	21,1	25,62	24,57	26,73	21,3	26,9	26,26	26,99	23,02	20,93	81,2	27,13	19,77	7,36
Juillet	2007	200	2400	20,44	22,71	25,64	20,44	22,68	21,88	25,58	21,88	25,14	23,11	26,89	23,11	17,7	92,6	20,76	17,7	3,06
Juillet	2007	201	2400	17,55	19,82	22,68	17,55	19,29	18,43	22,65	18,43	21,67	19,39	25,11	19,39	16,37	88,4	17,69	15,92	1,77
Juillet	2007	202	2400	19,65	22,11	39,39	16,53	23,01	22,28	24,7	17,33	23,23	22,75	23,25	18,48	19,78	49,03	27,62	15,41	12,21
Juillet	2007	203	2400	20,31	22,54	42,58	16,83	24,11	23,4	26,21	19,41	24,62	24,29	24,74	20,38	19,98	57,19	28,21	16,24	11,97
Juillet	2007	204	2400	23,85	25,22	43	17,52	25,63	25,07	27,31	20,62	26,24	26,02	26,39	21,77	23,46	56,62	28,73	17,1	11,7
Juillet	2007	205	2400	23,15	24,14	41,44	20,65	26,45	27	21	23,6	26,54	27,41	27,9	24,4	21,5	67,65	25,24	21,27	8,37
Juillet	2007	206	2400	26,43	27,21	40,43	21,88	26,27	25	26,19	21,88	26,55	28	28,47	24,47	26,49	57,56	30,71	19,7	11,01
Juillet	2007	207	2400	28,19	29,04	45,45	23,69	28,99	28,1	30,8	24,4	30,2	29,52	30,44	26,05	26,07	58,55	31,88	22,99	8,89
Juillet	2007	209	2400	24,08	27,98	43,04	24,95	28,37	27,29	30,93	25,65	30,93	30,92	30,66	27,37	26,52	91,1	31,29	22,26	9,03
Juillet	2007	209	2400	24,02	26,68	40,02	24,02	27,45	26,34	29,34	23,5	29,03	27,48	29,99	26,62	21,25	78,6	28,28	21,25	7,03
Juillet	2007	210	2400	24,83	26,05	42,33	21,9	27,71	26,59	30,17	23,28	28,79	27,34	29,05	24,92	22,42	50,65	29,79	19,2	10,59
Juillet	2007	211	2400	23	25,3	45,82	21,63	28,06	25,3	30,61	23,3	27,5	24,95	28,76	22,96	24,31	57,99	31,12	19,27	11,85
Août	2007	213	2400	25,16	27,51	41,42	21,14	29,09	28,55	30,67	23,66	28,78	25,7	28,92	25,16	25,25	67,51	30,17	19,45	10,72
Août	2007	214	2400	25,23	28,34	35,47	23,41	28,5	27,22	32,81	26,09	29,27	26,71	29,62	21,98	28,31	56,74	33,62	23,58	10,04
Août	2007	215	2400	23,7	27,57	37,79	23,7	27,94	27,15	30,14	26,02	29,27	25,52	29,82	25,77	24,56	68,29	32,03	23,48	8,54
Août	2007	216	2400	21,4	25,64	39,33	21,4	25,62	24,7	28,24	24,41	27,91	26,06	29,24	25,27	18,76	58,01	27,4	18,76	8,64
Août	2007	217	2400	21,05	24,57	41,04	19,08	24,64	23,7	26,76	21,23	26,48	25,01	27,86	22,75	19,23	56,91	26,42	16,34	10,08
Août	2007	218	2400	20,9	22,44	27,32	19,84	21,81	21,12	24,53	18,96	22,96	21,34	26,45	19,8	20,57	85,8	22,7	16,23	6,47
Août	2007	219	2400	23,25	27,44	37,69	19,95	25,53	25,05	26,4	20,64	25,02	24,7	25,02	20,89	22,77	79,5	28,02	17,46	10,56
Août	2007	220	2400	20,39	23,93	33,81	20,39	24,41	23,79	26,79	23,73	25,55	24,64	25,8	23,59	17,47	67,39	29,93	17,47	12,46
Août	2007	221	2400	19,82	22,8	36,07	18,08	22,99	22,23	24,36	20,16	24,26	23,11	25,52	21,46	19,3	59,95	25,09	14,9	10,19
Août	2007	222	2400	21,68	23,89	37,01	18,62	24,26	23,73	25,41	20,03	24,98	24,11	25,01	21,03	19,44	66,94	26,89	16,72	10,17
Août	2007	223	2400	25,11	26,48	37,4	21,8	25,81	25,03	27,34	22,97	27,32	25,95	27,45	23,74	18,76	58,01	20,09	14,1	8,69
Août	2007	225	2400	22,32	24,51	38,49	21,17	24,75	23,55	27,21	23,1	26,89	25,45	27,31	24,16	18,38	52,03	27,46	18,38	9,08
Août	2007	226	2400	22,32	24,45	33,44	21,91	23,22	21,84	24,65	19,84	24,95	23,64	26,85	22,23	19,4	62,67	23	14,75	8,25
Août	2007	227	2400	19,4	22,34	33,07	18,66	22,97	21,65	24,44	20,12	24,42	23,03	24,93	21,51	19,19	51,29	26,26	16,77	9,49
Août	2007	228	2400	17,32	20,91	26,57	17,32	21,44	20,65	22,87	19,73	23,01	22,49	24,39	20,94	16,65	74,1	24,82	16,65	8,17
Août	2007	229	2400	17,6	21,09	31,59	15,71	20,99	20,51	22,31	18,22	22,99	21,93	22,72	19,35	13,79	79	24,03	13,76	10,27
Août	2007	230	2400	17,54	20,1	28,13	16,55	20,9	19,78	21,08	22,33	19,63	22,08	22,78	19,29	15,08	56,84	19,94	12,86	7,08
Août	2007	231	2400	19,9	21,23	34,74	17,83	22,08	21,3	24,71	19,78	22,08	21,22	24,67	17,83	12,22	62,79	21,27	15,57	10,39
Août	2007	232	2400	26,32	27,24	35,98	21,31	27,58	27,04	28,88	22,3	27,59	27,02	27,78	22,6	16,38	91,8	22	16	6
Août	2007	251	2400	21	24,01	36,77	21	26,22	25,27	29,95	25,27	27,62	28,42	25,84	16,4	74	25,5	14,31	11,19	11,19
Août	2007	252	2400	19,38	21	25,81	18,73	21,42	20,15	26,06	20,15	23,59	21,85	27,55	21,85	14,57	81,3	18,82	13,1	5,72
Août	2007	253	2400	20,41	21,55	31,24	17,32	22,5	21,53	24,13	17,43	23,51	22,09	23,57	19,38	18,59	59,42	24,04	11,67	12,37
Août	2007	254	2400	17,81	20,04	23,66	17,81	19,92	19,27	22,42	18,09	21,71	19,74	23,5	17,87	15,26	91,2	19,69	14,97	4,72
Août	2007	255	2400	15,19	18,37	23,81	15,19	18,57	17,36	20,23	17,19	20,99	19,19	21,75	18,7	12,44	70,3	20,42	12,44	7,98
Août	2007	256	2400	15,36	18,08	24,42	15,71	18,37	17,25	20,98	16,53	20,95	20,15	20,95	16,69	14,59	66,72	19,33	9,85	9,48
Août	2007	265	2400	19,11	20,67	28,62	15,11	21,35	19,82	23,22	18,26	23,06	21,6	24,7	20,35	16,63	56,69	23,69	13,43	10,27
Août	2007	267	2400	20,6	21,39	29,3	17,66	22,21	20,99	23,22	17,48	23,01	22,03	23,3	19,28	19,33	49,19	26,66	14,72	11,94
Août	2007	268	2400	25,45	24,97	30,56	19,64	24,85	24,12	25,08	19,18	24,93	23,79	24,93	20,26	16,51	65,11	29,69	17,34	12,35
Août	2007	269	2400	21,52	23,81	27,71	21,52	24,5	23	26,52	23,67	25,4	24,25	25,56	23,6	17,6	72			

Octobre	2007	302	2400	10.21	11.21	11.5	5.53	9.17	7.79	10.21	5.77	12.38	10	14.14	9.35	8.67	78.2	10.08	-0.16	10.24
Octobre	2007	303	2400	9.11	11.52	15.07	7.71	10.36	8.84	11.18	7.27	12.88	10.79	12.88	9.6	8.09	59.29	10.96	5.15	5.81
Octobre	2007	304	2400	12.27	13.75	17.12	8.78	12.9	11.74	13.42	8.21	13.98	12.41	13.98	9.83	13.41	51.52	17.43	6.9	10.53
Novembre	2007	305	2400	7.61	11.66	13.75	7.61	10.8	9.33	12.88	9.33	13.81	11.72	14.14	11.72	4.54	51.14	13.37	4.42	8.95
Novembre	2007	306	2400	6.41	10.51	13.03	5.8	9.52	7.59	10.9	6.58	12.66	10.15	13.78	9.33	3.4	70.7	9.72	2.16	7.56
Novembre	2007	307	2400	7.57	10.43	12.09	4.97	8.81	6.74	9.46	5.48	12.12	9.17	12.64	8.39	3.8	59.71	6.26	0.23	6.03
Novembre	2007	308	2400	10.18	11.52	14.09	6.92	10.22	8.38	10.66	5.36	12.56	10.33	12.56	8.25	7.91	54.06	12.18	3.28	8.9
Novembre	2007	309	2400	9.42	11.9	15.0	8.37	10.86	9.47	11.67	7.56	12.95	11.01	13.01	9.72	7.36	85.8	11.54	4.2	7.34
Novembre	2007	310	2400	8.01	11.38	12.57	7.6	10.21	8.51	11.47	8.4	12.63	10.66	12.94	10.26	4.84	84.7	9.87	4.41	5.46
Novembre	2007	311	2400	6.85	9.91	11.38	6.85	8.49	6.72	10.18	6.72	11.78	9.63	12.62	9.63	1.64	60.23	4.85	1.64	3.21
Novembre	2007	312	2400	4.47	8.24	9.89	4.47	6.71	4.61	8.45	4.61	10.34	7.79	11.76	7.79	0.81	70.4	2.26	-0.05	2.31
Novembre	2007	313	2400	4.38	8.32	10.25	3.89	6.98	4.58	7.8	3.48	10.34	7.41	10.47	6.59	-0.05	70.5	5.84	-1.19	7.03
Novembre	2007	314	2400	4.25	8.16	9.16	3.86	6.43	3.9	6.93	3.45	10.05	6.83	10.33	6.58	-0.8	76.3	3.15	-1.54	4.69
Novembre	2007	315	2400	5.25	8.31	9.82	3.77	6.57	3.99	6.84	3.18	9.82	6.71	10.04	6.16	1.53	68.52	5.57	-2.53	8.1
Novembre	2007	316	2400	7.5	10.09	10.35	5.24	8.46	6.62	8.76	3.84	10.51	8.03	10.51	6.34	4.07	95.5	7.56	1.27	6.29
Novembre	2007	317	2400	7.92	10.78	12.56	7.53	9.92	8.13	10.47	6.67	11.74	9.84	11.81	8.07	5.72	76.2	10.15	4.06	6.09
Novembre	2007	318	2400	11.19	12.23	12.84	6.63	11.05	9.93	11.05	7.04	12.05	10.62	12.05	8.77	11.31	55.96	13.31	4.47	8.44
Novembre	2007	319	2400	8.48	11.06	12.22	8.48	10.08	8.66	11.12	8.66	12.42	10.66	12.59	10.65	4.89	92.3	11.29	4.89	6.4
Novembre	2007	320	2400	4.81	8.16	11.05	4.43	7.13	5.33	10.05	5.33	10.96	8.81	12.4	8.81	-0.67	72.9	4.83	-0.87	5.7
Novembre	2007	321	2400	4.15	7.45	8.14	3.73	5.68	3.37	7.07	3.37	9.58	7.15	10.93	7.15	-0.44	63.95	3.09	-2.29	5.38
Novembre	2007	322	2400	3.65	7.34	7.87	3.62	5.62	3.04	6.62	2.87	9.26	6.35	9.61	6.28	-0.05	61.39	3.63	-2.2	5.83
Novembre	2007	323	2400	7.2	7.83	2.49	5.33	5.28	2.82	5.24	2.79	8.67	5.37	9.05	5.68	2.01	72.4	4.84	-4.58	9.42
Novembre	2007	324	2400	5.45	7.33	7.46	3.72	5	2.77	5.48	2.63	8.35	5.77	9.76	5.71	2.58	88.8	4.07	0.76	3.31
Novembre	2007	325	2400	4.28	7.31	7.74	4.28	5.32	3.34	5.4	2.78	8.66	6.04	8.74	5.77	0.81	98.7	2.6	0.81	1.79
Novembre	2007	326	2400	5.36	7.76	7.76	3.96	6.07	3.83	6.08	3.26	8.05	6.26	9.06	6.03	3.45	90.2	0.76	-3.48	4.24
Novembre	2007	327	2400	5.39	8.26	8.28	5.37	6.58	4.37	6.58	3.84	9.21	6.54	9.29	6.23	-6.37	65.19	-3.44	-6.37	2.93
Novembre	2007	328	2400	5.36	8.36	8.46	4.94	6.8	4.6	6.8	4.34	9.41	6.48	9.58	6.45	-1.73	82.3	-1.71	-7.29	5.58
Novembre	2007	329	2400	4.78	7.86	8.4	4.77	6.09	4.03	6.89	4.03	9.23	6.71	9.65	6.43	1.83	78.7	4.59	-1.87	6.46
Novembre	2007	330	2400	4.26	8.11	8.82	4.26	6.07	3.99	6.5	3.99	9.06	6	9.63	5.61	0.89	99.2	4.17	0.76	3.41
Novembre	2007	331	2400	4.22	7.86	8.45	4.2	6.16	3.84	6.21	3.84	9.37	6.57	9.42	6.02	-1.48	72.4	2.82	-1.48	4.3
Novembre	2007	332	2400	2.85	7.23	7.84	1.35	5.81	3.2	6.22	3.2	8.92	6.08	9.45	6.08	-5.47	73.2	-1.58	-8.54	6.96
Novembre	2007	333	2400	4.18	7.05	7.85	2.72	5.05	2.85	5.85	2.85	8.5	5.95	8.99	5.82	-1.39	68.64	4.86	-5.62	10.48
Novembre	2007	334	2400	4.49	6.74	7.03	3.45	5.03	2.87	5.38	2.76	8.52	5.83	8.59	5.83	-5.03	82.3	0.02	-5.03	5.05
Décembre	2007	335	2400	3.22	7.2	7.44	3.22	6.06	3.51	6.06	2.88	9.08	6.08	9.2	5.83	-13.18	63.35	-5.23	-13.22	7.99
Décembre	2007	336	2400	1.57	6.47	7.2	1.56	5.56	3.28	6.09	3.28	8.53	5.46	9.14	5.46	-9.24	80.1	-9.24	-13.26	4.02
Décembre	2007	337	2400	4.14	6.67	6.67	1.56	5.16	3.32	5.55	3.2	8.32	5.43	8.53	5.28	-7.92	89.4	0.07	-9.11	9.18
Décembre	2007	338	2400	4.26	6.75	6.94	4.03	4.99	3.31	5.23	3.3	8.33	5.8	8.52	5.44	-4.97	91.6	-3.11	-7.92	4.81
Décembre	2007	339	2400	4.9	7.22	7.22	4.25	5.39	3.4	5.45	3.3	8.66	5.8	8.67	5.79	-9.53	73	-4.95	-9.53	4.58
Décembre	2007	340	2400	4.74	8	8	4.74	5.98	3.85	5.98	3.4	8.93	6.05	8.95	5.78	-3.58	85.6	-3.58	-12.41	8.83
Décembre	2007	341	2400	4.55	8.18	8.22	4.31	6.04	3.93	6.14	3.85	8.96	6.09	9.12	6.03	-1.81	76.5	-1.54	-4.68	3.14
Décembre	2007	342	2400	5.09	8.67	8.67	4.32	6.28	3.85	6.28	3.84	9.49	6.51	9.49	6.06	-9.08	63.92	2.04	-9.08	11.12
Décembre	2007	343	2400	4.59	8.76	8.82	4.57	6.39	4.16	6.45	3.85	9.21	6.47	9.5	6.39	-9.23	67.77	-7.72	-11.72	4
Décembre	2007	344	2400	4.71	8.63	8.82	4.6	6.3	4.23	6.54	4.16	9.45	6.71	9.58	6.43	-4.33	86.7	-3.76	-9.32	5.56
Décembre	2007	345	2400	3.95	8.55	8.86	3.93	6.56	3.5	6.3	4.04	6.38	3.85	6.75	6.68	0.24	99.9	0.29	-4.64	5.13
Décembre	2007	346	2400	3.5	8.75	8.75	3.5	6.27	4.07	6.27	4.02	8.27	6.41	8.77	6.71	-6.71	67	2.19	-9.81	12
Décembre	2007	347	2400	2.36	8.79	8.94	2.05	6.57	4.45	6.65	4.02	8.27	6.41	8.53	6.41	-11.57	88	-9.95	-12.63	2.68
Décembre	2007	348	2400	4.63	8.78	8.87	2.02	6.36	4.2	6.63	4.14	8.45	6.59	8.64	6.33	-12.52	66.65	-0.45	-12.52	12.07
Décembre	2007	349	2400	5.05	8.78	9	4.64	6.65	4.41	6.68	4.2	8.72	6.57	8.81	6.52	-14.41	68.12	-11.05	-16.8	5.75
Décembre	2007	350	2400	4.78	7.9	8.77	4.11	5.9	3.93	6.54	3.93	9.58	6.13	9.72	6.08	-10.29	94.5	-10.22	-15.09	4.87
Décembre	2007	351	2400	4.58	7.4	8	4.51	5.21	3.33	5.92	3.33	9.36	6.65	9.76	6.14	-12.73	76.1	-7.58	-12.73	5.15
Décembre	2007	352	2400	4.6	7.22	7.67	4.58	5.26	3.41	5.45	3.33	9.11	6.3	9.56	6.29	-10.24	86.3	-9.72	-13.78	4.06
Décembre	2007	353	2400	4.76	7.19	7.44	4.53	5.32	3.4	5.42	3.36	8.89	6.09	9.22	6.09	-7.63	93.3	-7.36	-12.09	4.73
Décembre	2007	354	2400	4.82	7.34	7.54	4.79	5.32	3.43	5.45	3.39	8.94	6.23	9.17	6.09	-5.85	87.8	-5.59	-7.8	2.21
Décembre	2007	355	2400	4.84	7.44	7.66	4.83	5.37	3.47	5.45	3.42	8.99	6.31	9.2	6.22	-4.13	88.9	-3.59	-5.98	2.39
Décembre	2007	356	2400	4.13	7.27	7.43	4.12	5.21	3.41	5.37	3.39	8.96	6.04	8.98	5.96	2.31	81.2	2.34	-3.96	6.3
Décembre	2007	357	2400	5.11	6.36	7.34	4.14	4.01	2.42	5.25	2.36	6.62	4.07	9.1	3.62	2.39	69.38	8.49	2.29	6.2
Décembre	2007	358	2400	4.42	6.86	6.86	3.06	4.58	2.89	4.58	2.4	8.08	5.8	8.08	4.09	0.61	83.9	2.2	-3.74	5.94
Décembre	2007	359	2400	5.51	7.35	7.35	4.24	4.84	3.12	4.84	2.89	8.62	6.44	8.62	5.8	0.6	91.6	3.36	0.28	3.08
Décembre	2007	360	2400	5.44	7.42	7.58	5.44	5.06	3.34	5.07	3.14	8.66	6.3	8.85	6.3	-0.01	89.1	1.11	-0.01	1.12
Décembre	2007	361	2400	4.38	7.75	7.84	4.22	5.31	3.68	5.36	3.31	9.17	6.52	9.17	6.28	0.41	96.3	1.53	-1.1	2.63
Décembre	2007	362	2400	4.39	7.82	7.99	4.39	5.38	3.87	5.39	3.38	9.25	6.79	9.45	6.54	-0.86	84.3	1.3	-1.13	2.43
Décembre	2007	363	2400	5.09	7.26	7.88	4.24	4.89	3.28	5.41	3.28									

ANNEXE IV

FLUX DE CHALEUR TRAVERSANT LA TOITURE

Flux de chaleur traversant la toiture

Mois	Année	Jour	Heure	RÉFÉRENCE						
				HFT_C1	HFT_C2	HFT_avg+(j)	HFT_avg-(j)	HFT_avg+(m)	HFT_avg-(m)	
				W/m^2	W/m^2	W/m^2	W/m^2	W/m^2	W/m^2	W/m^2
Février	2007	59	2400	-23,26	-17,47	0	-20,016666667	0,00	-17,29	
Mars	2007	72	2400	-13,15	-13,93	0	-14,43651042	0,00	-17,97	
Avril	2007	120	2400	-18,56	-10,16	2,486666667	-9,589010989	3,47	-12,76	
Mai	2007	151	2400	-10,27	-5,54	0,3	-6,489005236	9,29	-8,21	
Juin	2007	181	2400	-15,57	-8,01	9,382931034	-9,827910448	10,22	-7,13	
Juillet	2007	212	2400	-11,6	-4,08	10,14527027	-6,488474576	9,84	-7,09	
Août	2007	243	2400	-12,63	-5,79	10,41828571	-7,285769231	7,62	-7,04	
Septembre	2007	273	2400	-10,39	-6,17	2,498235294	-8,359428571	4,63	-7,26	
Octobre	2007	304	2400	-9,11	-7,02	1,523	-8,78510989	1,28	-8,79	
Novembre	2007	334	2400	-19,89	-15,31	0	-18,84380208	0,00	-15,44	
Décembre	2007	365	2400	-19,8	-12,42	0	-17,26020833	0,00	-16,97	

Mois	Année	Jour	Heure	VERT NON-IRRIGUÉ					
				HFT_S1	HFT_S2	HFT_avg+(j)	HFT_avg-(j)	HFT_avg+(m)	
				W/m^2	W/m^2	W/m^2	W/m^2	W/m^2	
Février	2007	59	2400	-17,37	-14,84	0	-16,3055729	0,00	-13,41
Mars	2007	72	2400	-12,49	-10,43	0	-13,7571354	0,00	-15,13
Avril	2007	120	2400	-8,85	-7,36	0	-6,86223958	0,05	-10,00
Mai	2007	151	2400	-3,96	-3,22	0	-4,06916667	1,29	-4,80
Juin	2007	181	2400	-4,71	-3,89	0,276	-4,52763736	1,68	-3,06
Juillet	2007	212	2400	-1,71	-1,53	1,896056338	-2,05991667	1,81	-3,26
Août	2007	243	2400	-2,99	-2,52	1,68375	-4,0210119	1,60	-3,60
Septembre	2007	273	2400	-4,3	-2,91	0	-4,89552083	1,09	-3,61
Octobre	2007	304	2400	-6,26	-5,5	0	-7,65614583	0,09	-5,34
Novembre	2007	334	2400	-12,28	-11,03	0	-12,6915104	0,00	-11,49
Décembre	2007	365	2400	-12,47	-9,62	0	-11,4480729	0,00	-12,18

Mois	Année	Jour	Heure	VERT IRRIGUÉ					
				HFT_H1	HFT_H2	HFT_avg+(j)	HFT_avg-(j)	HFT_avg+(m)	
				W/m^2	W/m^2	W/m^2	W/m^2	W/m^2	
Février	2007	59	2400	-13,94	-9	0	-12,4529688	0,00	-10,89
Mars	2007	72	2400	-14,55	-12,59	0	-13,1661979	0,00	-11,98
Avril	2007	120	2400	-6,71	-3,48	0	-5,4159375	0,00	-8,57
Mai	2007	151	2400	-3,99	-2,26	0	-3,46682292	0,12	-3,89
Juin	2007	181	2400	-0,61	-1,11	0,025714286	-1,58934783	0,39	-2,35
Juillet	2007	212	2400	0,23	-1,03	0,108571429	-2,2808427	0,18	-2,11
Août	2007	243	2400	-1,01	-1,25	0	-2,7825	0,07	-2,87
Septembre	2007	273	2400	-3,82	-1,68	0	-3,80515625	0,08	-2,67
Octobre	2007	304	2400	-8,04	-4,12	0	-7,77010417	0,00	-4,86
Novembre	2007	334	2400	-14,77	-9,7	0	-12,02125	0,00	-10,04
Décembre	2007	365	2400	-12,83	-7,18	0	-11,0542188	0,00	-10,97

Statistiques détaillées du flux de chaleur

	REFERENCE		VERT N-IRR				VERT IRR			
	+	-	+	%réduction	-	%réduction	+	%réduction	-	%réduction
Février	0,00	-17,29	0,00	N/A	-13,41	22,4%	0,00	N/A	-10,89	37,0%
Mars	0,00	-17,97	0,00	N/A	-15,13	15,8%	0,00	N/A	-11,98	33,3%
Avril	3,47	-12,76	0,05	98,6%	-10,00	21,6%	0,00	100,0%	-8,57	32,8%
Mai	9,29	-8,21	1,29	86,1%	-4,80	41,6%	0,12	98,7%	-3,89	52,6%
Juin	10,22	-7,13	1,68	83,5%	-3,06	57,0%	0,39	96,2%	-2,35	67,0%
Juillet	9,84	-7,09	1,81	81,6%	-3,26	54,0%	0,18	98,2%	-2,11	70,2%
Août	7,62	-7,04	1,60	79,0%	-3,60	48,8%	0,07	99,1%	-2,87	59,2%
Septembre	4,63	-7,26	1,09	76,4%	-3,61	50,3%	0,08	98,2%	-2,67	63,3%
Octobre	1,28	-8,79	0,09	92,6%	-5,34	39,2%	0,00	100,0%	-4,86	44,7%
Novembre	0,00	-15,44	0,00	N/A	-11,49	25,6%	0,00	N/A	-10,04	35,0%
Décembre	0,00	-16,97	0,00	N/A	-12,18	28,3%	0,00	N/A	-10,97	35,4%
MAX	10,22	-7,04	1,81	82,3%	-3,06	56,5%	0,39	96,2%	-2,11	70,0%
MIN	0,00	-17,97	0,00	N/A	-15,13	15,8%	0,00	N/A	-11,98	33,3%
AVG	4,21	-11,45	0,69	83,6%	-7,81	31,8%	0,08	98,2%	-6,47	43,5%

ANNEXE V

PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE

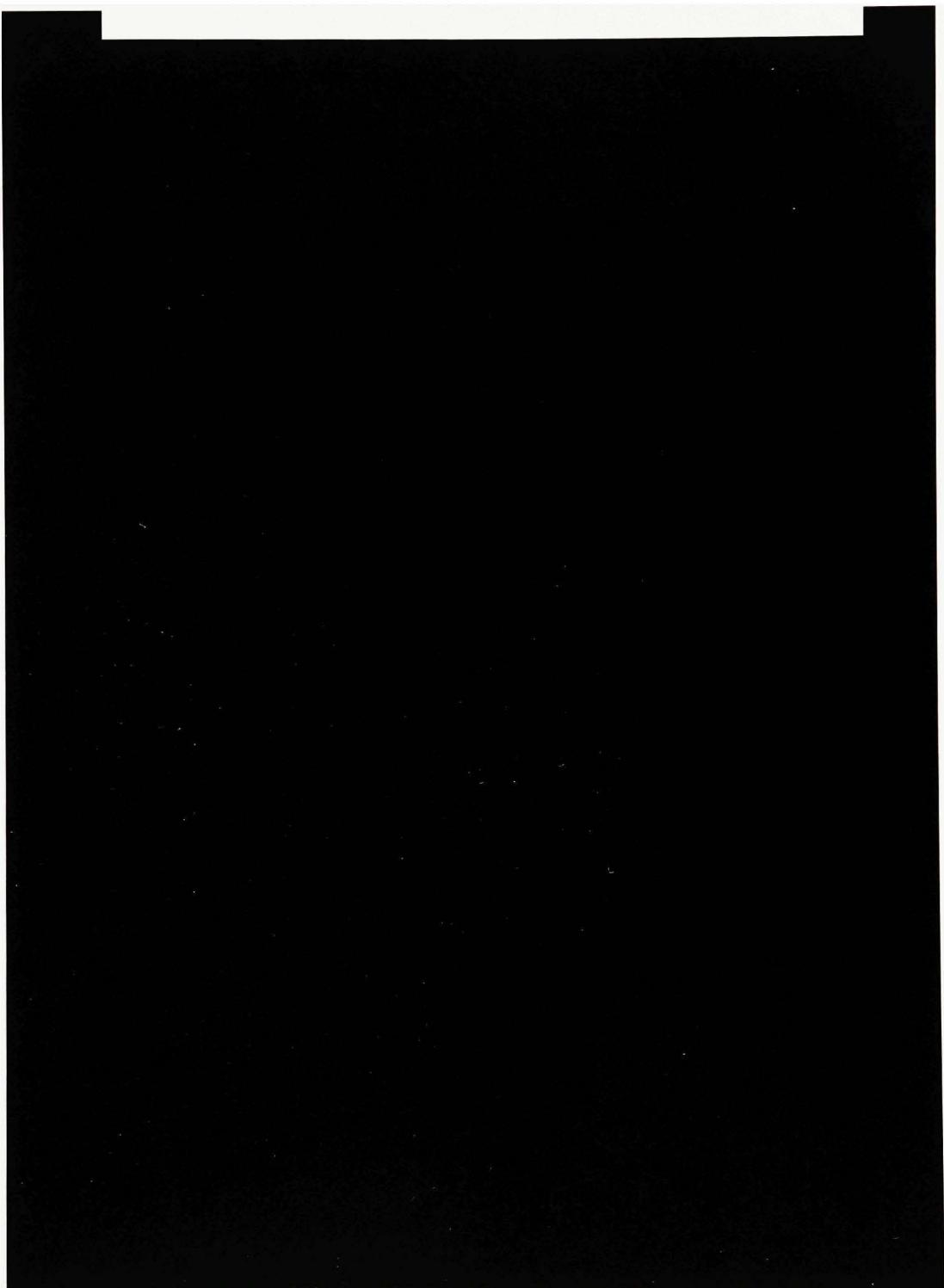
Performance énergétique

Mois	Année	Jour	Heure	RÉFÉRENCE										
				HFT_C1		HFT_C2		Énergie		Énergie entrant (j)	Énergie sortant (j)	Énergie clim. (moyenne - m)	Energie chauff. (moyenne - m)	Énergie dépensée (cumul - j)
				W/m^2	W/m^2	kWh/m^2	kWh/m^2	kWh/m^2	kWh/m^2	kWh/m^2	kWh/m^2	kWh/m^2	kWh/m^2	
Février	2007	59	2400	-23,26	-17,47	-0,005096875	0,000	-0,481	0,000	0,415	5,393			
Mars	2007	72	2400	-13,15	-13,93	-0,00407625	0,000	-0,347	0,000	0,431	10,999			
Avril	2007	120	2400	-18,56	-10,16	-0,003603125	0,000	-0,216	0,010	0,285	18,386			
Mai	2007	151	2400	-10,27	-5,54	-0,001986875	0,000	-0,155	0,067	0,147	25,043			
Juin	2007	181	2400	-15,57	-8,01	-0,002964375	0,064	-0,161	0,092	0,112	31,186			
Juillet	2007	212	2400	-11,6	-4,08	-0,001991875	0,093	-0,095	0,087	0,113	37,373			
Août	2007	243	2400	-12,63	-5,79	-0,00232625	0,041	-0,137	0,053	0,119	42,731			
Septembre	2007	273	2400	-10,39	-6,17	-0,00206625	0,001	-0,178	0,025	0,138	47,631			
Octobre	2007	304	2400	-9,11	-7,02	-0,002018125	0,000	-0,197	0,003	0,201	53,962			
Novembre	2007	334	2400	-19,89	-15,31	-0,0044125	0,000	-0,452	0,000	0,371	65,082			
Décembre	2007	365	2400	-19,8	-12,42	-0,0040275	0,000	-0,414	0,000	0,407	77,709			

Mois	Année	Jour	Heure	VERT NON-IRRIGUÉ									
				HFT_S1		HFT_S2		Énergie		Énergie sortant (j)	Énergie clim. (moyenne - m)	Energie chauff. (moyenne - m)	Énergie dépensée (cumul)
				W/m^2	W/m^2	kWh/m^2	kWh/m^2	kWh/m^2	kWh/m^2	kWh/m^2	kWh/m^2	kWh/m^2	
Février	2007	59	2400	-17,37	-14,84	-0,004030625	0,000	-0,391	0,000	0,322	4,185		
Mars	2007	72	2400	-12,49	-10,43	-0,00321875	0,000	-0,330	0,000	0,363	8,904		
Avril	2007	120	2400	-8,85	-7,36	-0,002034375	0,000	-0,165	0,000	0,239	14,885		
Mai	2007	151	2400	-3,96	-3,22	-0,000901875	0,000	-0,098	0,007	0,100	18,184		
Juin	2007	181	2400	-4,71	-3,89	-0,00109	0,000	-0,103	0,013	0,057	20,285		
Juillet	2007	212	2400	-1,71	-1,53	-0,00041875	0,016	-0,030	0,007	0,063	22,447		
Août	2007	243	2400	-2,99	-2,52	-0,00070375	0,001	-0,080	0,003	0,072	24,792		
Septembre	2007	273	2400	-4,3	-2,91	-0,000914375	0,000	-0,117	0,002	0,077	27,154		
Octobre	2007	304	2400	-6,26	-5,5	-0,001474375	0,000	-0,183	0,000	0,127	31,094		
Novembre	2007	334	2400	-12,28	-11,03	-0,002943125	0,000	-0,305	0,000	0,276	39,369		
Décembre	2007	365	2400	-12,47	-9,62	-0,00276125	0,000	-0,275	0,000	0,292	48,428		

Mois	Année	Jour	Heure	VERT IRRIGUÉ										
				HFT_H1		HFT_H2		Énergie		Énergie entrant (j)	Énergie sortant (j)	Énergie clim. (moyenne - m)	Energie chauff. (moyenne - m)	Énergie dépensée (cumul)
				W/m^2	W/m^2	kWh/m^2	kWh/m^2	kWh/m^2	kWh/m^2	kWh/m^2	kWh/m^2	kWh/m^2	kWh/m^2	
Février	2007	59	2400	-13,94	-9	-0,002871875	0,000	-0,299	0,000	0,261	3,397			
Mars	2007	72	2400	-14,55	-12,59	-0,003085	0,000	-0,316	0,000	0,287	7,134			
Avril	2007	120	2400	-6,71	-3,48	-0,00127	0,000	-0,130	0,000	0,206	12,276			
Mai	2007	151	2400	-3,99	-2,26	-0,000776875	0,000	-0,083	0,001	0,092	15,139			
Juin	2007	181	2400	-0,61	-1,11	-0,00021375	0,000	-0,037	0,002	0,047	16,616			
Juillet	2007	212	2400	0,23	-1,03	-0,00009375	0,000	-0,050	0,001	0,046	18,073			
Août	2007	243	2400	-1,01	-1,25	-0,000279375	0,000	-0,067	0,000	0,067	20,147			
Septembre	2007	273	2400	-3,82	-1,68	-0,000685625	0,000	-0,091	0,000	0,063	22,060			
Octobre	2007	304	2400	-8,04	-4,12	-0,00151875	0,000	-0,186	0,000	0,117	25,677			
Novembre	2007	334	2400	-14,77	-9,7	-0,00305	0,000	-0,289	0,000	0,241	32,906			
Décembre	2007	365	2400	-12,83	-7,18	-0,00250125	0,000	-0,265	0,000	0,263	41,068			

Statistiques de la performance énergétique



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 contral 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, 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, refelctive, 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, 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 cycle 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. Hatzibios et P Patargas. 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.