



HAL
open science

Impacts des enveloppes végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain

Rabah Djedjig

► **To cite this version:**

Rabah Djedjig. Impacts des enveloppes végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain. Génie civil. Université de La Rochelle, 2013. Français. NNT : 2013LAROS421 . tel-01141046

HAL Id: tel-01141046

<https://theses.hal.science/tel-01141046>

Submitted on 10 Apr 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE

UFR Sciences Fondamentales et Sciences pour l'Ingénieur

École Doctorale Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique, Énergétique et
Aéronautique (SI-MMEA)

Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE)

THÈSE

présentée par

Rabah DJEDJIG

pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université de La Rochelle

Discipline : Génie Civil

Impacts des enveloppes végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain

Thèse dirigée par Rafik BELARBI et Emmanuel BOZONNET

Soutenance prévue le 11/12/2013

Jury :

M. Youssef DIAB	Professeur, Université Paris-Est Marne-la-Vallée, Rapporteur
M. François GARDE	Professeur, Université de La Réunion, Rapporteur
M. Darren ROBINSON	Professeur, Université de Nottingham, Examineur
M. Didier DEFER	Professeur, Université d'Artois, Examineur
M. Christian INARD	Professeur, Université de La Rochelle, Examineur
M. Rafik BELARBI	Professeur, Université de La Rochelle, Directeur de thèse
M. Emmanuel BOZONNET	MCF, Université de La Rochelle, Co-directeur de thèse
Mme Samira KHERROUF	Ingénieur, ADEME, Examinatrice

À mon père que dieu l'accueille dans son paradis,

À ma mère que dieu la garde,

À ma chère épouse,

À mes frères et mes sœurs;

Remerciements

J'adresse mes sincères remerciements à M. A. AÏT-MOKHTAR, directeur du LaSIE pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire. Je remercie l'Agence Nationale de la Recherche pour avoir financé ce travail de thèse.

J'exprime toute ma gratitude à M. Rafik BELARBI et M. Emmanuel BOZONNET pour m'avoir encadré et pour la confiance qu'ils m'ont accordée. C'est grâce à leurs qualités scientifiques et humaines que ce travail, riche et passionnant, a pu être accompli.

Je remercie M. Youssef DIAB, Professeur à l'Université Paris-Est Marne-la-Vallée et M. François GARDE, Professeur à l'Université de La Réunion pour avoir accepté de rapporter et de juger mon travail. Je remercie M. Darren ROBINSON, Professeur à l'Université de Nottingham, M. Didier DEFER, Professeur à l'Université d'Artois, M. Christian INARD professeur à l'Université de La Rochelle et Mme Samira KHERROUF ingénieur à l'Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie pour avoir accepté d'examiner et de juger mon travail.

Merci à M. Brice RODRIGUEZ gérant de 'Atelier du végétal' pour avoir mis en place gracieusement le mur végétal. Merci à S-E OULDBOUKHITINE pour sa collaboration.

Enfin, je souhaite remercier toutes les personnes qui m'ont soutenu et grâce à qui, directement ou indirectement, ce travail de thèse a été mené à bien. Je pense au personnel du LaSIE et du département de Génie Civil avec qui j'ai partagé des moments conviviaux durant ces trois années de thèse. Une pensée particulière à mes collègues A. TRABELSI, M. TAHLAITI, A. YOUNSI, K. ABAHRI, M. BENAMOUR, N. ISSAADI, Y. FERROUKHI, A. KANAI, A. HAMAMI, H. ASSOUM, I. ABDUL-RAHMAN et P.T. NGUYEN.

Résumé

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet ANR-Villes Durables VegDUD : Rôle du végétal dans le développement urbain durable ; une approche par les enjeux liés à la climatologie, l'hydrologie, la maîtrise de l'énergie et les ambiances (2010-2013). Elle traite de la modélisation et de l'expérimentation de toitures et de façades végétales en vue de l'évaluation de leurs impacts hygrothermiques sur les bâtiments et sur les microclimats urbains.

Un modèle physique a été développé pour décrire les mécanismes de transferts couplés de chaleur et de masse (hydrique) au sein de la paroi végétale. L'implémentation de ce modèle dans un code de simulation thermique dynamique permet de prédire l'impact de la végétalisation sur la performance énergétique des bâtiments. L'extension de cette démarche à l'échelle d'une rue canyon permet d'inclure l'interaction microclimatique dans la simulation thermohydrique des bâtiments.

Sur le plan expérimental, une maquette reconstituant une scène urbaine est mise en place pour étudier l'impact de différentes typologies de parois végétales dans plusieurs configurations microclimatiques. La confrontation des résultats expérimentaux et ceux issus de la modélisation numérique a été entreprise à l'échelle du système constitué du bâtiment et du microclimat urbain environnant. Pour cela, l'étude du comportement d'un bâtiment et d'une rue végétalisés par rapport au comportement du même bâtiment et d'une rue témoin a permis d'évaluer l'incidence des transferts thermiques, hygrométriques et radiatifs de la végétalisation. Ceci a permis d'entreprendre la validation des outils de prédiction numérique développés.

Les résultats de l'étude montrent que les transferts thermiques et hydriques sont fortement couplés et que le comportement thermique des parois végétales est tributaire de l'état hydrique du substrat de culture. Pour l'été comme pour l'hiver, les simulations numériques et les données expérimentales montrent que la végétalisation permet d'améliorer la performance énergétique des bâtiments et de réduire les îlots de chaleur urbains.

Abstract

This study was conducted in the framework of the National Programme ANR-VegDUD Project: Role of vegetation in sustainable urban development, an approach related to climatology, hydrology, energy management and environments (2010 -2013). It deals with the experimental and numerical modeling of green roofs and green facades to evaluate their thermohydric effects on buildings and urban microclimates.

A physical model describing the thermal and water transfer mechanisms within the vegetated building envelopes has been developed. The model's program has been implemented in a building simulation program. Using this tool, we are able to predict the impact of green roofs and green facades on building energy performance. This approach is extended to the street canyon in order to assess the microclimatic interaction in building simulation.

An experimental mockup modeling an urban scene at reduced scale is designed to study the impact of different types of green roofs and walls. The comparison of the measurements carried out on vegetated buildings and streets with the reference highlights the hygrothermal and radiative impacts of vegetated buildings envelopes. In addition, these experimental data are used to verify and validate the reliability of developed tools.

The results show that thermal and water transfers are strongly coupled. Hence, the thermal behavior of green roofs and green walls depend on the water availability within the growing medium. In summer and winter, measurements and numerical simulations show that green envelopes improve the energy efficiency of buildings and reduce the urban heat island.

Table des matières

Remerciements.....	5
Résumé.....	7
Abstract.....	9
Table des matières.....	11
Table des illustrations.....	15
Liste des Tableaux.....	19
Nomenclature.....	21
Caractères latins.....	21
Caractères grecs.....	23
Indices.....	23
Introduction générale.....	25
Chapitre 1 Étude Bibliographique.....	29
1- Introduction.....	29
2- Végétalisation des enveloppes de bâtiments.....	29
2.1- Typologies de parois végétales.....	30
2.1.1- Toitures végétalisées.....	30
2.1.2- Façades végétalisées.....	32
2.2- Impacts environnementaux de la végétalisation.....	34
Aspects sociologiques et psychologiques.....	34
Gestion des eaux pluviales.....	35
Isolation acoustique.....	36
Dépollution atmosphérique.....	36
Apport de biodiversité en ville.....	37
3- Climatologie urbaine et demande énergétique des bâtiments.....	37
3.1- Ilots de chaleur urbains.....	37
3.1.1- Définitions et phénomènes associés.....	37
3.1.2- Causes des ilots de chaleur urbains.....	41
3.1.3- Mesures de lutte contre les ilots de chaleur.....	44
3.2- Interaction énergétique entre bâtiments et microclimat urbain.....	46
3.2.1- Échelles microclimatiques dans les zones urbaines.....	46
3.2.2- Modélisation de l'interaction bâtiments – microclimat urbain.....	50
3.2.3- Demande de climatisation et recherche de solutions alternatives.....	52
4- État de l'art de l'impact thermique des parois végétalisées.....	54
4.1- Cas d'études expérimentales.....	54

4.1.1-	Toitures végétalisées	54
4.1.2-	Façades végétalisées	57
4.2-	Bibliographie des modèles de parois végétalisées	58
5-	Conclusions	61
Chapitre 2	Modélisation des transferts thermohydrriques dans les parois végétales	63
1-	Introduction	63
2-	Phénomènes de transfert dans les canopées végétales	64
2.1-	Transfert hydrique dans les sols non saturés	64
2.2-	Transferts thermiques et radiatifs dans les couverts végétaux	67
2.2.1-	Transferts radiatifs dans les couverts végétaux	67
2.2.2-	Transferts convectifs sensible et latent dans les couverts végétaux	69
Analogie électrique des échanges convectifs	69	
Résistance aérodynamique	71	
Résistance stomatique	72	
2.3-	Bilan énergétique d'une canopée végétale.....	74
2.3.1-	Bilan énergétique	74
2.3.2-	Évapotranspiration : formule de Penman-Monteith.....	75
3-	Développement d'un modèle d'enveloppe végétale.....	78
3.1-	Constitution de l'enveloppe végétale	79
3.2-	Modèle du couvert végétal	79
3.3-	Modèle du substrat de culture.....	83
3.4-	Bilan hydrique	85
3.5-	Résolution numérique.....	86
3.6-	Validation expérimentale en conditions estivales.....	88
3.7-	Études paramétriques.....	95
3.7.1-	Importance de la couverture végétale.....	96
3.7.2-	État hydrique du substrat de culture.....	97
3.7.3-	Inertie des modules de végétalisation	98
4-	Conclusions	99
Chapitre 3	Étude expérimentale d'enveloppes végétales	101
1-	Introduction	101
2-	Conception de la maquette de scène urbaine ClimaBat	102
2.1-	Analogie des échanges thermiques et radiatifs	104
2.2-	Études antérieures et objectifs actuels.....	105
3-	Protocole expérimental.....	107
3.1-	Végétalisation des enveloppes de ClimaBat.....	107
3.2-	Objectifs des configurations d'étude microclimatiques sur ClimaBat.....	109
3.3-	Suivi expérimental des enveloppes végétales.....	110
3.3.1-	Liste des capteurs installés sur la maquette	110
3.3.2-	Aspects techniques de la mise en œuvre.....	114
4-	Analyse des données expérimentales.....	117
4.1-	Mesures hygrothermiques et hydriques dans le mur végétal	118

4.2-	Impacts thermiques sur le bâtiment végétalisé	121
4.2.1-	Effets thermiques en période estivale	121
4.2.2-	Effets thermiques en période hivernale.....	123
4.2.3-	Bilan énergétique de la paroi végétalisée.....	124
4.3-	Impacts microclimatiques à l'échelle d'une rue canyon.....	125
4.3.1-	Impacts radiatifs	125
4.3.2-	Impacts thermiques.....	128
4.3.3-	Impacts hygrométriques	131
5-	Conclusions	132
Chapitre 4 Modélisation de l'interaction bâtiment enveloppe végétale microclimat 133		
1-	Introduction.....	133
2-	Simulation thermique dynamique de bâtiments végétalisés	134
2.1-	Modélisation des bâtiments sous TRNSYS.....	135
2.2-	Implémentation du modèle de paroi végétale dans TRNSYS.....	136
2.3-	Comparaison aux données expérimentales.....	139
2.4-	Cas d'études numériques.....	143
2.4.1-	Impacts des façades végétales sur la thermique des bâtiments	143
	Description du cas d'étude.....	143
	Impacts énergétiques des murs végétaux.....	144
	Influence de l'orientation des façades végétales.....	147
2.4.2-	Analyse des impacts de la résistance thermique, de l'ombrage et de l'évapotranspiration	148
3-	Modélisation de l'interaction microclimatique à l'échelle d'une rue canyon	151
3.1-	Modèle aéraulique d'un canyon urbain.....	151
3.2-	Implémentation sous TRNSYS.....	155
3.3-	Calibration des paramètres du modèle aéraulique	156
3.4-	Simulation couplée de l'interaction bâtiment – enveloppe végétale – microclimat	158
4-	Conclusions	160
Conclusions générales et perspectives..... 161		
	Références.....	165

Table des illustrations

Figure 1-1 : (a) Toiture végétalisée de l'Historial de la Vendée, France ; (b) Toiture végétalisée de l'hôtel de ville de Chicago, Illinois	30
Figure 1-2 : Composition typique d'un toit végétalisé (Source : www.ecovegetal.fr).....	31
Figure 1-3 : Quatre types différents de façades végétalisées : (a) végétalisation directe ; (b) végétalisation indirecte ; (c) système de mur vivant avec modules de plantation ; (d) système de mur vivant avec une couche feutre hydroponique (source : (Ottelé et al., 2011)).....	33
Figure 1-4 : Exemples de façades végétalisées : (a) Mur végétal du musée du quai de Branly ; (b) Façades végétales grimpantes du CHU de Leipzig dans la Saxe en Allemagne (source : www.fassadengruen.de).....	33
Figure 1-5 : (a) Exemple typique des ruissellements cumulatifs observés sur un toit végétalisé et sur un toit conventionnel à Leuven en Belgique pour une période de 24h et 14.6 mm de précipitations (Mentens et al., 2006) ; (b) Évolution typique du taux de ruissèlement (en pointillé) suite à une séquence de précipitation (en continu) (Czemiel Berndtsson, 2010).....	35
Figure 1-6 : Augmentation de la poussière de polluants divers piégée sur le lierre de Boston dans une rue à grande circulation automobile durant la saison de croissance.....	37
Figure 1-7 : Image thermique du centre-ville de Bâton Rouge en Louisiane prise le 11/05/1998 à 13h00 heure locale par un avion équipé par NASA. La température estimée varie entre 25°C pour la végétation et 65 °C pour les toitures (Gorsevski et al., 1998)	39
Figure 1-8 : (a) Différence de température entre les zones urbaines de Phoenix et des zones rurales dans l'Arizona ; (b) Corrélation de Karl et al. de l'intensité de l'îlot de chaleur pour des données annuelles de 305 villes américaines ; d'après (Stoll and Brazel, 1992).....	40
Figure 1-9 : Profils de température aux alentours du coucher et du lever de soleil à Saint-Louis dans le Missouri, le 26 et 27 Juillet 1975 ; (a) zone rurale, (b) zone urbaine (inversion thermique) ; d'après (Godowitch et al., 1985).....	41
Figure 1-10 : variation de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (ICU) en fonction de (a) le facteur de forme entre le ciel et les rues ($F_{ciel,rue}$) noté (ψ_s) et (b) la différence dans les propriétés thermiques entre la zone urbaine et les zones représentée par la différence des admittances notée ($\Delta\mu_{u-r}$) ; (Oke et al., 1991).....	42
Figure 1-11 : Gammes des pics de températures (en °C) atteints sur différents matériaux (d'après (Gartland, 2008))	45
Figure 1-12 : Représentation schématique des échelles climatiques et des couches limites planétaire et urbaine (d'après (Oke, 2006)).....	47
Figure 1-13 : Moyenne spatiale et temporelle de la vitesse du vent en milieu urbain dense avec localisation des sous-couches de la couche de surface ; (z_H) la hauteur de rugosité, (z_r) la sous-couche de rugosité, (z_0) et (z_d) la longueur de rugosité et la hauteur de déplacement du plan neutre du profil logarithmique (Oke, 2006).....	48
Figure 1-14 : Estimation du facteur de forme du ciel à partir de la géométrie d'un canyon urbain de longueur infinie (d'après Oke (1988)).....	49
Figure 1-15 : Types d'écoulements dans une rue canyon : rugosité isolée, interférence de sillage et écoulement rasant, Bozonnet (2005) d'après (Oke, 1987).....	50
Figure 1-16 : Systèmes de climatisation et amplification de l'îlot de chaleur urbain (Bozonnet, 2005).....	52
Figure 1-17 : Schéma comparatif du comportement thermique et radiatif des parois végétalisées et des parois revêtues d'une peinture ou d'un matériau à haute réflectivité solaire.....	53

Figure 1-18 : Mesures de thermographie infrarouge réalisées en hiver et en été (Niachou et al., 2001; Santamouris et al., 2007).....	55
Figure 1-19 : Comparaison des variations du flux thermique et des températures dans une toiture de référence et dans les différentes couches constituantes d'une toiture végétalisée (Liu, 2003).....	56
Figure 2-1 : Représentation schématique des trois phases des milieux de culture.....	64
Figure 2-2 : Bilan hydrique de la zone racinaire (d'après Miyazaki (2006)).....	66
Figure 2-3 : (a) Variations typiques de l'absorptivité, de la transmissivité et de la réflectivité spectrale des feuilles illustrées pour une feuille de vigne ; (b) Gamme de variation de la réflectivité spectrale pour les dicotylédones (laitue, pomme de terre, tulipier et vigne) et les aiguilles de conifères (pin tordu, pin d'orégon et épinette de Sitka) (Source : Jones and Vaughan (2010))	68
Figure 2-4 : Stomates et transpiration stomatique (source : soutien67.free.fr et John A. Dutton e-Education Institute)	73
Figure 2-5 : Facteurs de l'équation (2-17) avec lesquels la résistance stomatique minimale est multipliée en fonction de l'éclairement solaire, de la température de la feuille, de la teneur en eau de la zone racinaire et du déficit de pression de vapeur	74
Figure 2-6 Termes du bilan énergétique d'une canopée végétale et diagramme de l'air humide	76
Figure 2-7 : Structure et propriétés radiatives modélisées d'un module de végétalisation.....	79
Figure 2-8 : Modes de transfert thermique modélisés sur un module de végétalisation et différentes résistances aux transferts de chaleur et de vapeur considérées.....	80
Figure 2-9 : Organigramme de l'algorithme de résolution numérique	87
Figure 2-10 : Maquette expérimentale de toitures végétalisées et son instrumentation.....	89
Figure 2-11 : Principales variables météorologiques mesurées durant la saison d'été 2011 et utilisées comme données d'entrée pour la validation du modèle développé.....	90
Figure 2-12 : Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux en termes de l'évolution de la température à 2 cm au-dessous de la surface extérieure du substrat	92
Figure 2-13 : Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux en termes de l'évolution de la teneur en eau dans le substrat	93
Figure 2-14 : Termes des bilans énergétiques du feuillage, du substrat et bilan global : flux radiatifs, sensibles, latents et flux thermique conduit	94
Figure 2-15 : Comparaison de la température de la surface extérieure du substrat (T_g) et de la température du feuillage (T_f) simulées à la température de l'air ambiant (T_a).....	95
Figure 2-16 : Comparaison numérique de la température de surface extérieure du substrat (T_g) obtenue pour différents indice de surface foliaire (F) avec les conditions météorologiques réelles utilisés pour la validation expérimentale	96
Figure 2-17 : Comparaison numérique de la température de surface extérieure du substrat (T_g) obtenue pour différents taux de couverture végétale (σ_f) avec les conditions météorologiques réelles utilisés pour la validation expérimentale.....	97
Figure 2-18 : Comparaison numérique de la température de surface extérieure du substrat (T_g) obtenue pour différents rapport de teneurs en eau ($\omega_g / \omega_g^{max}$) avec les conditions météorologiques réelles utilisés pour la validation expérimentale.....	98
Figure 2-19 : Comparaison numérique des flux thermiques conduits vers le bâti obtenus avec ou sans prise en compte de l'inertie thermique	99
Figure 3-1 : Plateforme expérimentale de la maquette de scène urbaine à échelle réduite ClimaBat.....	102
Figure 3-2 : Schéma de capteurs installés dans la maquette ClimaBat pour l'étude des peintures sélectives (Doya, 2010) dont 62 thermocouples de surface majoritairement fonctionnels à ce jour	106
Figure 3-3 : Schéma des capteurs installés dans la maquette ClimaBat pour l'étude des modules de toitures végétales et de leurs impacts thermiques sur les bâtiments (Ouldboukhitine, 2012).....	107
Figure 3-4 : Dispositifs de végétalisation expérimentés sur la maquette de scène urbaine à échelle réduite.....	108
Figure 3-5 - Mise en place d'un système de façade végétalisée composée de caissons de sphaigne attachés à une grille métallique	109
Figure 3-6 : Schéma représentatif de l'emplacement spécifique de chacun des capteurs installés dans le cadre du projet ANR-VegDUD	111

Figure 3-7 : Les trois rues étudiées avec les capteurs correspondants	113
Figure 3-8 : Acheminement ^(a) souterrain des câbles de capteurs vers la centrale d'acquisition ^(c) placée dans un boîtier étanche ^(b) à l'intérieur d'un bloc du bâtiment central.....	114
Figure 3-9 : Positionnement (a) des thermocouples, des capteurs de flux thermique et (b) de l'hygromètre dans le système du mur végétal.....	114
Figure 3-10 : (a) Pyranomètres et pyrgeomètres fixés sur des plaques métalliques maintenues à l'aide de fils tendus entre les bâtiments ; (b) Abris des hygromètres fabriqués en PVC.....	116
Figure 3-11 – Mise en place des capteurs de flux thermique.....	116
Figure 3-12 : Étalonnage des sondes de teneur en eau.....	117
Figure 3-13 : Exemple de données météorologiques enregistrées au cours de l'été 2012 : Température de l'air ambiant T_b , Humidité relative HR , éclairement solaire I_s et rose des vents.....	118
Figure 3-14 : Évolution de la teneur en eau volumétrique du substrat du mur végétal la paroi végétalisée à différentes distances de l'arrosage.....	119
Figure 3-15 : (a) Températures d'air mesurées à trois hauteurs de la lame d'air, comparées à la température de l'air extérieur ; (b) Humidité relative mesurée au milieu de la lame d'air, comparée à l'humidité relative de l'air extérieur.....	119
Figure 3-16 : Comparaison de la température de surface pour la façade de référence et pour la surface extérieure du substrat et températures d'air mesurées à 10, 25 et 50 cm de la façade végétale.....	120
Figure 3-17 : Comparaison des températures mesurées sur les facettes en bas, au milieu et en haut de la façade végétalisée (GwallF) aux températures mesurées sur la façade de référence (RefF) durant une période estivale.....	121
Figure 3-18 : Comparaison des flux thermiques mesurés en bas en haut de la façade végétalisée (GwallF) aux flux thermiques mesurés sur la façade de référence (RefF) durant une période estivale.....	122
Figure 3-19 : (a) Variations de la température et de l'éclairement solaire pendant une période hivernale (déc. 2012) ; (b) Comparaison des températures mesurées sur les facettes en bas, au milieu et en haut de la façade végétalisée (GwallF) aux températures mesurées sur la façade de référence (RefF) ; (c) Comparaison des flux thermiques mesurés en bas en haut de la façade végétalisée (GwallF) aux flux thermiques mesurés sur la façade de référence (RefF).....	124
Figure 3-20 : Comparaison du bilan énergétique moyen journalier de la façade végétalisée (GwallF) au bilan énergétique de la façade de référence (RefF) pour les périodes estivales et hivernales.....	125
Figure 3-21 : Comparaison du rayonnement solaire réfléchi par la rue avec le mur végétal au rayonnement réfléchi par la rue de référence et à l'éclairement solaire.....	126
Figure 3-22 : (a) Flux radiatif de grandes longueurs d'ondes émis vers le ciel par les rues RefC et GwallC ; (b) Échange radiatif GLO net entre le ciel et les rues RefC et GwallC.....	127
Figure 3-23 : Température radiante moyenne équivalente pour les canyons RefC et GwallC.....	128
Figure 3-24 : (a) Variations des températures mesurées aux centres du canyon de référence (RefC) et des canyons végétalisés (GwallC et GRoofC) ; (b) Différences de températures dans les rues végétalisées par rapport à la rue de référence ; (c) Surchauffe de l'air dans la rue de référence par rapport à la météo.....	129
Figure 3-25 : Tracé de la différence de température entre les rues végétalisée et la rue de référence en fonction de la différence de température entre la rue de référence et la météo.....	130
Figure 3-26 : (a) Variations des humidités relatives mesurées aux centres du canyon de référence (RefC) et des canyons végétalisés (GwallC et GRoofC) ; (b) Différences de de l'humidité relative dans les rues végétalisées par rapport à la rue de référence ; (c) Différences de pression de vapeur calculées dans les rues végétalisées par rapport à la rue de référence.....	131
Figure 4-1 : Interface graphique TRNSYS Simulation Studio.....	134
Figure 4-2 : Fonctionnement du couplage entre le modèle de bâtiment multizone de TRNSYS et le modèle d'enveloppe végétale (opérations itératives au pas de temps k sont en pointillé).....	137
Figure 4-3 : Bâtiment de la maquette ClimaBat utilisé lors de la validation numérique des modèles couplés sous TRNSYS.....	139
Figure 4-4 : Calcul de la hauteur angulaire des masques solaires pour son introduction dans le Type 68 de TRNSYS.....	141
Figure 4-5 : Échanges thermiques modélisés dans lame d'air.....	142

Figure 4-6 : (a) Données météorologiques mesurées en août 2012 et utilisées dans les simulations TRNSYS en vue de la validation expérimentale ; (b) Comparaison des résultats numériques et expérimentaux en termes des variations de la température de surface extérieure pour la paroi végétalisée et pour la paroi de référence	143
Figure 4-7 : Cas d'étude pour l'impact des murs végétaux sur la performance énergétique des bâtiments	144
Figure 4-8 : Comparaison des charges mensuelles de chauffage en hiver et de rafraîchissement en été pour les deux bâtiments situés à La Rochelle et à Athènes	145
Figure 4-9 : Comparaison de la charge annuelle de chauffage et de climatisation pour les bâtiments situés à La Rochelle et à Athènes	146
Figure 4-10 : Comparaison des variations de la température opérative dans le bâtiment végétalisé et dans le bâtiment de référence	146
Figure 4-11 : Comparaison du flux thermique transmis au bâtiment situé à La Rochelle pour différentes orientations de la façade végétalisée	147
Figure 4-12 : Quatre cas d'étude pour l'évaluation des effets superposés de la couche de substrat, de l'ombrage foliaire et de l'évapotranspiration	149
Figure 4-13 : (a) Comparaison de l'évolution de la température de la membrane d'étanchéité pour les quatre cas d'étude ; (b) Comparaison de flux thermique transmis par la toiture vers le bâtiment pour les quatre cas d'étude	150
Figure 4-14 : Schématisation de la zone de recirculation et de la zone ventilée dans une rue canyons et leurs dimensions respectifs (d'après (Harman et al., 2004))	152
Figure 4-15 : Le réseau de résistances pour (a) un canyon large avec une zone de recirculation et une zone ventilée distincts et (b) un canyon étroit avec une zone de recirculation uniquement (Harman et al., 2004)	153
Figure 4-16 : Représentation schématique des vitesses de vent utilisées dans le calcul des résistances (r_i) (Harman et al., 2004)	154
Figure 4-17 : Principe du couplage bâtiment–enveloppe végétale–microclimat de la rue	156
Figure 4-18 : Mesures de température utilisées dans la calibration du modèle aéraulique et les mesures de température dans les canyons utilisées dans la comparaison aux données expérimentales	157
Figure 4-19 : Comparaison entre la température simulée par le modèle aéraulique implémentée sous TRNSYS et la température mesurée au centres des rues RefC et GwallC pour des paramètres $\alpha_1=0,9$, $\alpha_2=0,225$, $z_{om}(\text{béton})=0,005$ et $z_{om}(\text{végétal})=0,01$	157
Figure 4-20 : Cas d'études numériques pour la simulation de l'impact énergétique des murs végétaux en interaction avec le bâtiment et le microclimat de la rue	158
Figure 4-21 : Simulation thermique dynamique de l'impact des murs végétaux en façade est et ouest des bâtiments et couplage au modèle aéraulique de canyons urbains	159
Figure 4-22 : Comparaison de la charge de climatisation dans le bâtiment végétalisé et dans le bâtiment de référence avec la charge obtenue pour les bâtiments isolés pour le mois de juillet et le climat d'Athènes	160

Liste des Tableaux

Tableau 1-1 : Comparaison des toitures intensives et extensives (Peck et al., 1999)	32
Tableau 1-2 : Valeurs moyennes de la chaleur anthropique (Q_A) et du rayonnement net (Rn) pour différentes villes (estimations faites avant 1980) d'après Taha (1997)	43
Tableau 1-3- Principaux modèles d'enveloppes végétalisées.....	59
Tableau 2-1 : Liste des paramètres utilisés pour la validation expérimentale	92
Tableau 3-1 : Principales caractéristiques physiques et morphologiques de la maquette expérimentale	103
Tableau 3-2 : Liste des capteurs installés dans le cadre du projet ANR-VegDUD dans la maquette expérimentale et leurs principales caractéristiques	112
Tableau 4-1 : Liste des paramètres, entrées et sorties du module d'enveloppe végétale.....	138
Tableau 4-2 : Influence de l'orientation de la façade végétalisée sur température opérative dans les bâtiments situés à La Rochelle et à Athènes durant les mois de juillet et d'août	148

Nomenclature

Caractères latins

Désignation	Description	Unité
A	Flux massique d'arrosage	$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
C	Flux massique de remontée capillaire	$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
c_p	Capacité thermique massique	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
D	Flux massique de drainage	$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
D_T	Diffusivité thermique de l'air	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
D_v	Coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
d_0	Hauteur de déplacement	m
d	Largeur de la rue canyon	m
E	Flux massique de l'évapotranspiration	$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
EV	Flux massique de l'évaporation directe	$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
F	Indice de surface foliaire	–
G	Flux thermique absorbé par la surface végétale	W.m^{-2}
g	Conductance au transfert de chaleur ou de vapeur	$\text{m}.\text{s}^{-1}$
H	Flux thermique sensible	W.m^{-2}
h_f	Hauteur de la canopée foliaire	m
h_g	Épaisseur de la couche de substrat	m
$\overline{h_m}$	Coefficient thermique d'évaporation	$\text{W.m}^{-2}.\text{Pa}^{-2}$
I_s	Éclairement solaire	W.m^{-2}
I_{IR}	Éclairement de grandes longueurs d'onde du ciel	W.m^{-2}
$J_{w,i}$	Flux massique d'eau entrant à la zone racinaire	$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
$J_{w,o}$	Flux massique d'eau sortant de la zone racinaire	$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
K	Conductivité hydraulique	$\text{m}.\text{s}^{-1}$
k	Conductivité thermique	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
L	Flux de chaleur latente	W.m^{-2}
Le	Nombre de Lewis	–
M	Puissance thermique mise en jeu par le métabolisme	W.m^{-2}
M_a, M_v	Masses molaire de l'air et de la vapeur d'eau	g.mol^{-1}

m	masse	kg
P	Flux massique de précipitation	$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
p_a	Pression atmosphérique	Pa
Pr	Nombre de Prandtl	–
p_v	Pression de vapeur d'eau	Pa
$p_{vs,sat}$	Pression de vapeur saturante à la température de la surface s	Pa
Q_A	Flux de chaleur anthropique	W.m^{-2}
q	Flux thermique de conduction	W.m^{-2}
R	Constante des gaz parfaits	$\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Rn	Flux radiatif net	W.m^{-2}
RU	Flux massique de ruissellement d'eau	$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
r	Résistance	s.m^{-1}
r_a	Résistance aérodynamique	s.m^{-1}
r_c	Résistance de la canopée végétale à l'évaporation directe	s.m^{-1}
r_s	Résistance stomatique	s.m^{-1}
$r_{s,min}$	Résistance stomatique minimale	s.m^{-1}
r_{sub}	Résistance du substrat à l'évaporation directe	s.m^{-1}
S	Surface, Aire	m^2
Sc	Nombre de Schmidt	–
S_r	Degré de saturation	–
T	Température	K
T_0	Température potentielle	K
TR	Flux massique de transpiration végétale	$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
t	Temps	s
u	Vitesse du vent	m.s^{-1}
u_*	Vitesse de friction	m.s^{-1}
V	Volume	m^3
w	Teneur en eau massique	$\text{kg}_{\text{eau}}.\text{kg}^{-1}_{\text{sec}}$
z	Altitude ou profondeur	m
z_{om}	Longueur de rugosité pour la quantité de mouvement	m
z_{oH}	Longueur de rugosité pour la chaleur	m

Caractères grecs

Désignation	Description	Unité
β	Angle zénithal solaire	–
γ	Constante psychrométrique	Pa.K ⁻¹
Δ	Pente moyenne de la courbe de saturation de l'air humide	Pa.K ⁻¹
ε	Émissivité	–
ϵ	Porosité	–
ζ	Paramètre de stabilité atmosphérique	–
θ	Teneur en eau volumique	m ³ _{eau} .m ³ _{substrat}
κ	Constante de Von Karman	–
λ	Chaleur latente de vaporisation de l'eau	J.kg ⁻¹
μ	Coefficient d'extinction solaire	–
ρ	Masse volumique	kg.m ³
$\rho_{f,s}$	Réflectivité solaire du feuillage	–
$\rho_{g,s}$	réflectivité solaire du substrat	–
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	W.m ⁻² .K ⁻⁴
σ_f	Taux de couverture végétale	–
τ_s	Transmissivité solaire	–
ψ_m	Potentiel hydrique matriciel	m
ψ_e	Potentiel hydrique au point d'entrée d'air	m
Ψ_M	Correction de stabilité atmosphérique pour la quantité de mouvement	–
Ψ_H	Correction de stabilité atmosphérique pour la chaleur	–
ω, ω_g	Teneur en eau du substrat	kg _{eau} .m ³ _{substrat}

Indices

a	Air	g	Substrat (surface)
b	Surface intérieure du substrat	s	Solaire
c	Canopée végétale	w	Eau
f	Feuillage		

Introduction générale

L'amélioration de la performance énergétique et de la qualité environnementale des bâtiments constitue une thématique incontournable dans la conjoncture actuelle du développement urbain durable. Gros consommateur d'énergie et producteur de gaz à effet de serre, le secteur du bâtiment offre des possibilités suffisamment fortes pour anticiper le changement climatique et faire face aux défis énergétiques contemporains. La maîtrise des ambiances habitables doit assurer la qualité des espaces intérieurs en réduisant la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre. Cela passe par le perfectionnement de la qualité de l'enveloppe du bâtiment, puis par l'amélioration des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation et enfin par l'utilisation des énergies renouvelables. Ces exigences sont plus importantes dans les zones urbaines denses. Car, bien qu'elle présente certains avantages, la densification urbaine nuit à la qualité de vie et à la santé des habitants de la ville. Le comportement thermique, les effets aérodynamiques et l'interaction énergétique des bâtiments dans les zones urbaines densifiées suscitent des phénomènes microclimatiques qui amoindrissent la performance des bâtiments et altèrent le confort hygrothermique des citoyens. Le phénomène de l'îlot de chaleur urbain est la manifestation, à l'échelle de la ville, de ces phénomènes microclimatiques.

On estime que le pourcentage de la population mondiale vivant en ville passera de 50 à 60 % d'ici 2030. Par conséquent, la recherche et l'utilisation de techniques de construction innovantes permettant de répondre à la double problématique de la réduction de la consommation énergétique des bâtiments et de l'atténuation des îlots de chaleur urbains est impératives. Dans un contexte de développement urbain durable, les toitures et les façades végétales, de typologies variées, ont un potentiel considérable pour répondre à cette problématique. D'après plusieurs études sur des parois végétales aboutissent aux divers bénéfices de ces parois végétales sur les plans de l'économie d'énergie, du microclimat urbain, de la gestion des eaux pluviales, de l'isolation acoustique, de la dépollution atmosphérique et sur le plan social.

Ce manuscrit traite de la modélisation du comportement thermique et hydrique des parois végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain. L'objectif est le développement d'outils numériques et expérimentaux permettant l'évaluation des impacts thermiques et microclimatiques liés à la végétalisation des enveloppes. Ce

travail s'inscrit dans le cadre du projet ANR Villes Durables VegDUD : Rôle du végétal dans le développement urbain durable ; une approche par les enjeux liés à la climatologie, l'hydrologie, la maîtrise de l'énergie et les ambiances (2010-2013). Le projet est articulé autour de six volets scientifiques : Expérimentations, Modélisation, Typologie, Physiographie et Évaluations des dispositifs pour les espaces privés et pour les espaces collectifs. Chaque volet se compose d'un groupe de tâches. Le travail présent s'insère dans les volets de modélisation et d'expérimentations.

L'objectif de ce travail est de produire des outils permettant d'évaluer l'incidence des parois végétales sur la performance énergétique des bâtiments, sur le confort thermique des occupants et sur l'environnement microclimatique à l'échelle d'un canyon urbain. La démarche suivie consiste au développement d'une modélisation numérique et d'une modélisation expérimentale afin de caractériser, prédire et suivre le comportement et les impacts de différentes typologies de parois végétales. La modélisation numérique consiste à établir un modèle physique permettant la simulation des transferts couplés de chaleur et de masse au niveau de la paroi végétale. Ce modèle numérique est destiné à être implémenté dans un code de simulation thermique dynamique de bâtiments. La modélisation expérimentale consiste à mettre en place une maquette d'une scène urbaine comportant différentes typologies de parois végétales. Cette maquette permet l'acquisition de données utiles pour la validation de la modélisation numérique proposée. Par ailleurs, la comparaison des mesures expérimentales simultanées effectuées sur différentes configurations d'études permet de conclure sur les impacts thermiques et microclimatiques de la végétalisation.

Ce manuscrit est articulé autour de quatre chapitres :

Le chapitre 1 décrit, d'abord, les principales typologies de parois végétales (toitures et façades) et quelques aspects techniques de leurs mise en œuvre pouvant influencer leur comportement thermique et hydrique. Ensuite, le chapitre apporte des éléments bibliographiques concernant la problématique de la performance énergétique des bâtiments en lien avec les îlots de chaleur urbains. La végétalisation des enveloppes est présentée comme une solution technique et architecturale permettant à la fois de réduire la facture énergétique des bâtiments et d'atténuer le microclimat des villes denses. Enfin, un état de l'art des travaux numériques et expérimentaux portant sur les impacts thermiques de la végétalisation est établi. Cela permet de situer le travail actuel par rapport aux travaux antérieurs et de mettre l'accent sur la contribution apportée dans ce document.

Le chapitre 2 décrit la modélisation développée pour la simulation des transferts thermiques et hydriques couplés au sein d'un élément de paroi végétale. Les phénomènes de transfert dans les canopées végétales sont d'abord présentés en guise

d'introduction pour le modèle de paroi végétale. Les résultats des simulations numériques sont confrontés aux mesures effectuées sur la maquette expérimentale présentée au chapitre 3 en termes des évolutions de la température et de la teneur en eau du substrat.

Le chapitre 3 présente la maquette de scène urbaine conçue pour le suivi expérimental de différentes parois végétales (une façade et deux toitures végétalisées) installées sur les bâtiments à échelle 1:10. Les aspects techniques de la mise en place des capteurs et de l'acquisition des données sont présentés conjointement avec les objectifs de l'expérimentation. La comparaison des mesures simultanées effectuées sur des bâtiments et des rues végétalisés et sur un bâtiment et une rue témoins permet de remonter à l'impact des parois végétales à l'interface bâtiment – rues canyons. Compte tenu du nombre important de mesures réalisées à plusieurs emplacements dans la maquette expérimentale, celle-ci pourrait servir à alimenter une base de données utile quant à l'étude du comportement thermohydrrique des parois végétalisées.

Le chapitre 4 est dédié au développement d'outils de prédiction numérique des effets thermohydrriques liés à la végétalisation non seulement à l'échelle du bâtiment mais aussi au niveau d'une rue canyon. La démarche a consisté, tout d'abord, à implémenter le modèle de paroi végétalisée développé préalablement dans le chapitre 2 dans un code de simulation thermique dynamique de bâtiments (TRNSYS). Une fois ce modèle implémenté, son couplage au modèle du bâtiment permet d'entreprendre des simulations annuelles permettant d'évaluer la performance énergétique des bâtiments avec enveloppes végétalisées. Ensuite, l'extension de cette démarche à l'échelle de la rue a été réalisée moyennant le couplage d'un modèle de rue canyon développé pour s'intégrer à l'environnement de modélisation dynamique des bâtiments. Ceci a permis, enfin, d'entreprendre des simulations permettant de quantifier les effets de l'interaction bâtiment – paroi végétale et microclimat à l'échelle d'un canyon urbain.

Chapitre 1

Étude Bibliographique

1- Introduction

Le présent chapitre constitue une synthèse des travaux bibliographiques relatifs aux effets des enveloppes végétales (façades et toitures) sur les performances énergétiques et environnementales des bâtiments, sur le confort des occupants et sur le microclimat urbain. Il s'organise autour de trois parties :

- La première est consacrée à un état de l'art sur les typologies de parois végétales
- La deuxième est dédiée à l'interaction bâtiment microclimat urbain
- La troisième partie constitue une synthèse des modèles de parois végétalisées et recueil de travaux expérimentaux publiés dans littérature

2- Végétalisation des enveloppes de bâtiments

Dans l'architecture du 20^{ème} siècle, la végétalisation des toitures ou des façades de bâtiments est progressivement devenue une solution permettant de relier la ville à la nature. Avec l'arrivée des membranes d'étanchéité légères et résistantes à la pénétration racinaire, et de mélanges terreux allégés, la végétalisation extensive des toitures a connu un essor important au cours des années 1980. La prise en compte rapide par les pouvoirs publics et l'intégration de «l'esprit environnemental» dans la société ont permis la réussite remarquable de cette technique Allemagne. Ainsi, 14 % des toitures-terrasses en Allemagne étaient végétalisées essentiellement avec cette solution, ce qui représente une surface de 13,5 km² (Castleton et al., 2010). Les façades végétalisées constituent une solution complémentaire aux toitures végétales. Bien que leur utilisation soit souvent pour des fins esthétiques et architecturales, elles sont susceptibles d'améliorer la performance énergétique des bâtiments et d'adoucir

l'environnement microclimatique urbain. Les toitures et les façades végétalisées procurent à l'enveloppe du bâtiment les propriétés thermiques et radiatives des surfaces végétales naturelles. Par conséquent, elles peuvent répondre simultanément à la double problématique de l'îlot de chaleur urbain et de la consommation énergétique des bâtiments.

2.1- Typologies de parois végétales

2.1.1- Toitures végétalisées

Le terme « toiture végétalisée » est un terme générique utilisé pour désigner une plantation de végétaux sur un toit (ex. Figure 1-1). L'éco-toit, le toit vivant, le toit 'marron' (Brown roof), le toit vert ou encore la terrasse-jardin sont des termes plus distinctifs mais souvent utilisés indifféremment. Les termes « éco-toit » et « toit vivant » sont propres à des systèmes de végétalisation qui accomplissent un cycle de vie saisonnier tel que la dormance due à la chaleur ou au froid. Le terme « toit marron » est utilisé au Royaume-Uni où la terre récupérée des aménagements de sites urbains a été utilisée comme substrat de culture. Le terme « toit vert » prend deux significations : la première a un sens large qui comprend toute les formes de toitures végétalisées, le second est spécifique aux toitures extensives (Coffman, 2007). Le terme « toit-terrasse » désigne un jardin aménagé sur le toit d'un bâtiment.

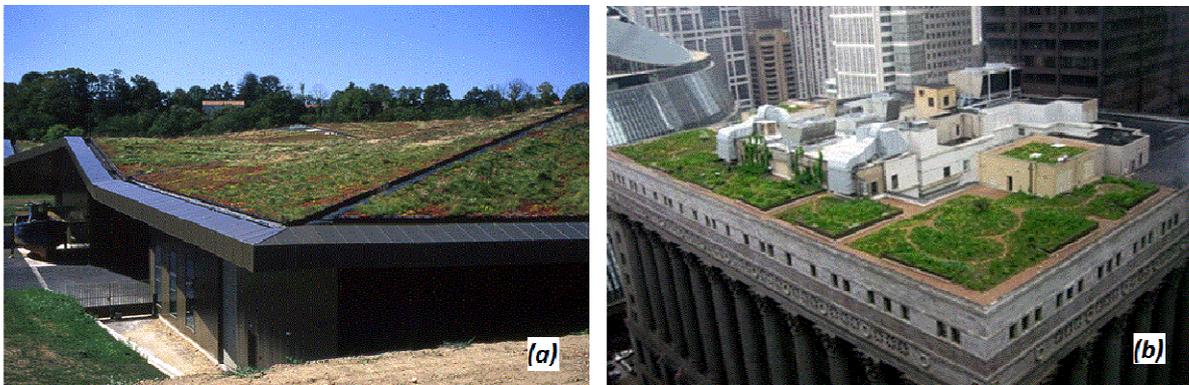


Figure 1-1 : (a) Toiture végétalisée de l'Historial de la Vendée, France ; (b) Toiture végétalisée de l'hôtel de ville de Chicago, Illinois

Une toiture végétalisée est composée en général des éléments suivants (cf. Figure 1-2) :

- La structure portante : elle correspond à la structure du toit d'origine pour les bâtiments réhabilités. Cette partie peut être fabriquée en béton, en acier ou en bois et doit supporter le poids de l'installation prévue. Cette dernière peut doubler voire tripler lorsque le substrat est saturé. Le surpoids d'une toiture extensive varie entre 72,6-169,4 kg.m⁻² selon l'épaisseur du substrat (Peck et al., 1999).

- Une membrane d'étanchéité : de nombreux fabricants recommandent des matériaux d'étanchéité tels que le PVC, le bitume modifié, l'asphalte caoutchouté pour les toitures extensives.
- Une barrière anti-racines: elle protège la membrane d'étanchéité de la pénétration et la dégradation par le système racinaire. Les couches d'étanchéité faites de PVC ou d'EPDM sont impénétrables par les racines et ne nécessitent pas de barrière anti-racines.
- Une couche de drainage : les eaux pluviales doivent être évacuées afin de maintenir des conditions de développement optimal à l'égard des plantes. La couche de drainage peut être composée d'agrégat minéraux, d'une nappe drainante grillagée ou de plaques de polystyrène alvéolé. La couche de drainage, qui doit être légère et durable, est multifonctionnelle car elle assure une rétention supplémentaire d'eau et permet l'aération.
- Un filtre géotextile : ce filtre est rajouté pour éviter le colmatage de la couche de drainage.
- Le substrat de culture : le substrat constitue un support physique des éléments nutritifs pour les plantes. Il doit permettre l'infiltration, la rétention d'une partie des eaux pluviales et l'évacuation du surplus.
- La végétation : le choix des plantes dépend du climat, de la hauteur finale de végétation souhaitée, de la période de floraison et du type de substrat utilisé. Un état de l'art sur la sélection des plantes est présenté dans Spala et al. (2008).

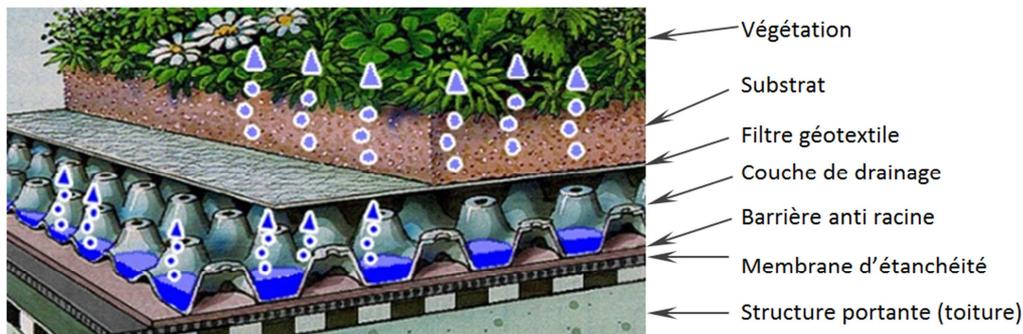


Figure 1-2 : Composition typique d'un toit végétalisé (Source : www.ecovegetal.fr)

Les toitures végétalisées sont classifiées en deux types selon l'épaisseur de la couche de substrat : toitures végétalisées extensives et toitures végétalisées intensives. Le choix du type de végétation, le poids et les coûts sont différents pour ces deux types. Le Tableau 1-1 récapitule les avantages de chaque type de toiture sachant que les avantages de l'un sont les inconvénients de l'autre.

Tableau 1-1 : Comparaison des toitures intensives et extensives (Peck et al., 1999)

Toiture extensive	Toiture intensive
Couche de substrat mince (5 à 15 cm)	Couche de substrat épaisse (20 à 100 cm)
Conditions sévères pour les plantes	Conditions favorables pour les plantes
Diversité restreinte d'espèces végétales	Grande diversité de plantes adaptées
Avantages :	Avantages :
<ul style="list-style-type: none"> - Légèreté de la structure - Adaptées pour les grandes surfaces - Inclinaison jusqu'à 30° - Peu de maintenance et longue durée de vie - Peu d'expertise technique requise - Adaptées pour les projets de réaménagement - Souvent pas de besoin de systèmes d'irrigation ou de drainage spéciaux - Croissance spontanée de la végétation - Moins chère 	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne isolation - Comparable à un jardin au sol - Peut être très attractif visuellement - Souvent accessible : plusieurs utilisation de la toiture, espace de récréation et de jardinage. - Meilleure efficacité énergétique et plus grande rétention d'eau - Plus longue durée de vie de la membrane

2.1.2- Façades végétalisées

Le « mur vert » ou « mur végétalisé » ou encore le « jardin vertical » sont des termes utilisés pour décrire toute forme de végétalisation verticale. Il existe différentes techniques de végétalisation verticale (cf. Figure 1-3). Les différences structurales entre ces techniques de végétalisation engendrent des comportements thermohydriques et aérauliques différents selon le type de façade utilisée. Pour mieux appréhender l'interaction des différentes façades avec les bâtiments et l'environnement extérieur, la description des différentes techniques est nécessaire. Il existe deux typologies de façades végétalisées : les façades végétales et les murs vivants (ou murs végétaux).

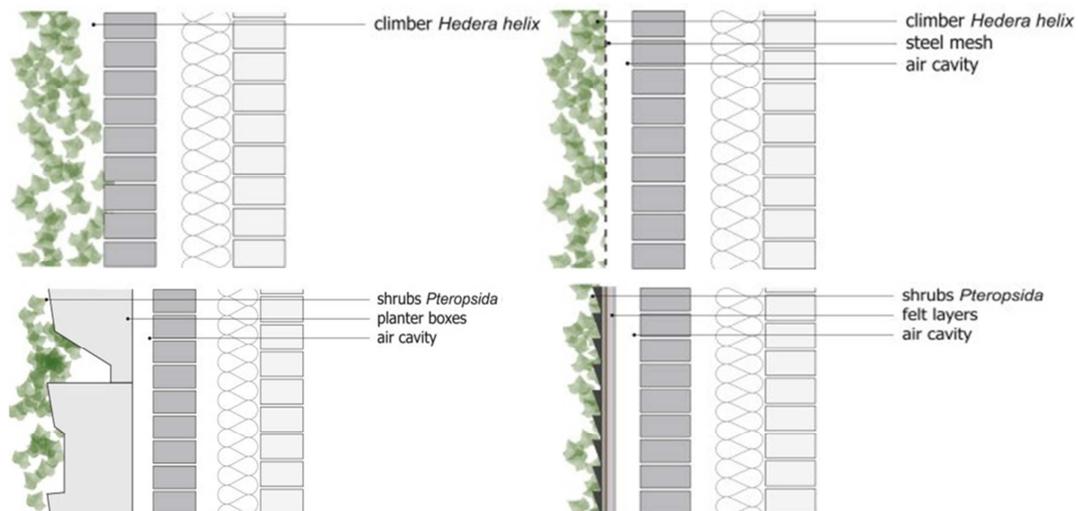


Figure 1-3 : Quatre types différents de façades végétalisées : (a) végétalisation directe ; (b) végétalisation indirecte ; (c) système de mur vivant avec modules de plantation ; (d) système de mur vivant avec une couche feutre hydroponique (source : (Ottelé et al., 2011))

Les façades végétales utilisent des plantes grimpantes (cf. Figure 1-3). En général, les plantes sont enracinées au sol mais parfois elles sont cultivées dans des bacs placés en bas ou en haut du mur. Dans ce dernier cas, on parle de végétation tombante. Ces plantes peuvent s'ancrer directement sur le mur (végétalisation directe) ou grimper sur des supports prédisposés (végétalisation indirecte). La végétalisation directe permet de couvrir la façade sans prévoir de structure support. Cependant, les plantes envahissantes peuvent endommager le mur si l'on souhaite les enlever. La végétalisation indirecte permet de séparer la végétation du mur par l'utilisation de treillis ou de filets comme support de plantes.



Figure 1-4 : Exemples de façades végétalisées : (a) Mur végétal du musée du quai de Branly ; (b) Façades végétales grimpantes du CHU de Leipzig dans la Saxe en Allemagne (source : www.fassadengruen.de)

Les murs vivants comportent un substrat de culture. Le substrat est soit mis dans des panneaux ou des modules prévégétalisés que l'on fixe sur le mur soit fabriqué

d'un tissu en feutre hydroponique (cf. Figure 1-3(a)). Les modules peuvent être fabriqués en plastique, en polystyrène expansé, en tissu synthétique, en argile, en métal ou en béton. Le substrat peut être organique ou hydroponique. Les murs végétaux permettent la plantation d'espèces végétales variées. En raison de cette grande diversité végétale, les murs vivants nécessitent un entretien plus fréquent que celui des façades à végétation grimpante. De plus, un arrosage régulier par une solution nutritive est nécessaire pour couvrir les besoins des plantes en eau et en sels minéraux. L'arrosage s'opère à différents niveaux le long du mur, et utilise la gravité pour apporter l'eau à toute la surface.

La technique de végétalisation utilisée détermine la nature des transferts hygrothermiques mises en jeux et par conséquent l'ampleur des impacts énergétiques et environnementaux occasionnés par la paroi végétale. En effet l'existence ou l'inexistence d'une couche de substrat détermine si les échanges thermiques s'établissent directement entre la végétation et la façade du bâtiment ou non. Le substrat interagit avec les feuilles et l'environnement, dissipe par évaporation directe une partie supplémentaire de l'énergie reçue par la façade et augmente la résistance et l'inertie thermiques de la paroi. De même, la lame d'air formée par les supports de fixation modifie, lorsqu'elle existe, la nature du transfert thermique entre les modules et la façade du bâtiment. L'espacement entre ces éléments donne lieu à des échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde et à des flux thermiques sensibles et latents.

2.2- Impacts environnementaux de la végétalisation

La végétalisation des bâtiments impacte la micro-météorologie, l'hydrologie, l'écologie et la société urbaines. Ses bénéfices sont ressentis sur les domaines public et privé. Ceci permet de réaliser des économies de fonds aussi bien sur les coûts initiaux d'investissement que sur les coûts de fonctionnement et les dépenses annuelles (Banting et al., 2005). Cette partie présente les avantages de la végétalisation autres que les impacts thermiques. Ces derniers feront, ultérieurement, l'objet d'un état de l'art détaillé (§4, page 54).

Aspects sociologiques et psychologiques

L'introduction du végétal dans l'environnement urbain présente des avantages esthétiques et psychologiques. L'accessibilité visuelle des toitures et des façades végétalisées apaise les citadins et procure détente et récréation (Hartig et al., 1991). Ceci peut même avoir des conséquences positives sur la santé publique, sur la concentration des travailleurs ou sur la réussite scolaire (Raffan, 2002). En effet, les sociétés urbanisées préfèrent conserver un contact avec la nature car elle réduit le stress et restaure l'intégrité psychologique (Van Den Berg et al., 2007). White et Gatersleben (2011) ont réalisé une étude statistique sur la perception de la végétalisation des bâtiments par les habitants de Londres dans le but de déterminer

si l'esthétique des parois végétales peut promouvoir les projets de réhabilitation. Les conclusions de l'étude affirment que la perception la beauté d'un bâtiment par les individus est supérieure lorsque ce dernier est végétalisé.

Gestion des eaux pluviales

La végétalisation des toitures augmente la perméabilité des surfaces urbaines et réduit les risques d'inondation. Grâce à leur capacité de stockage d'eau, les toitures végétalisées permettent de réduire significativement les pics de ruissellement des eaux pluviales. D'après Mentens et al. (2006), la réduction du ruissèlement atteint 54 %. Cela permet d'éviter l'engorgement des réseaux d'assainissement et de réduire ainsi les risques d'inondations. La figure 1-7(a) compare la quantité d'eau ruisselée par une toiture végétalisée à Leuven (Belgique) au ruissèlement d'une toiture conventionnelle durant une journée pluvieuse (Mentens et al., 2006). En même temps, Le graphique (b) de cette figure schématise la façon avec laquelle l'eau est drainée par une toiture végétale (Czemiel Berndtsson, 2010). Cette figure montre que le comportement hydrique des toitures végétales est caractérisé par les propriétés suivantes :

- i. Retardement du début du ruissellement grâce à l'absorption de l'eau par le substrat et les systèmes de drainage par rétention,
- ii. Réduction de la quantité d'eau totale ruisselée, une partie de l'eau retenue est évaporée,
- iii. Étalement du ruissellement sur de longues périodes par le drainage progressif de l'eau stockée temporairement par le substrat.

Par ailleurs, les toitures végétales changent les concentrations des polluants contenus dans l'eau de pluie. D'après Berndtsson et al. (2009), les substrats utilisés dans les toitures intensives et extensives éliminent certains polluants, notamment les nitrates et les métaux lourds, et relâchent d'autres polluants tels que le phosphore contenu dans les engrais utilisés.

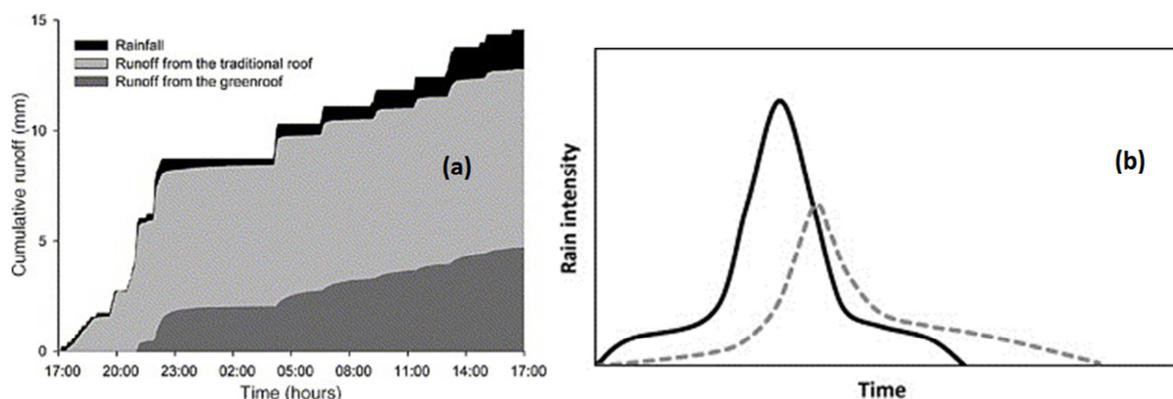


Figure 1-5 : (a) Exemple typique des ruissellements cumulatifs observés sur un toit végétalisé et sur un toit conventionnel à Leuven en Belgique pour une période de 24h et 14.6 mm de précipitations (Mentens et al., 2006) ; (b) Évolution typique du taux de ruissèlement (en pointillé) suite à une séquence de précipitation (en continu) (Czemiel Berndtsson, 2010)

Isolation acoustique

La végétalisation des enveloppes des bâtiments permet d'améliorer l'isolation acoustique (Van Renterghem and Botteldooren, 2009). Les couches de l'enveloppe végétale formées par le substrat, le feuillage et l'air permettent d'amortir le bruit désagréable extérieur provenant des machines, la circulation routière et du transport aérien. Le substrat bloque le bruit de basses fréquences tandis que le feuillage bloque les hautes fréquences (Peck et al., 1999). Une couche de 12 cm de substrat peut réduire le bruit de 40 dB et une couche de 20 cm peut le réduire jusqu'à 50 dB (Hooker and Hendriks, 1994). Van Renterghem et al. (2013) ont réalisé des simulations numériques de la propagation du son à partir d'une rue canyon vers une cours intérieure. Ils trouvent que l'utilisation des toitures végétales présente un grand potentiel pour améliorer la tranquillité dans la cours intérieure. Sur certaines configurations favorables la réduction du bruit offerte par les toitures végétales atteint jusqu'à 7,5 dB. Toujours d'après Van Renterghem et al. (2013), l'impact des façades végétales dépend fortement des propriétés phoniques de celles-ci. Elles peuvent avoir un impact significatif surtout en partie haute du mur. Les murs végétaux acoustiquement mous sont plus efficaces pour réduire le bruit provenant de la rue.

Dépollution atmosphérique

La dépollution et l'amélioration de la qualité de l'air urbain est l'un des avantages de la végétalisation. La végétation permet la fixation de plusieurs polluants. Yang et al. (2008) estiment que les toitures végétalisées sont capables de fixer $85 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ de polluants divers. Pour cela, ils utilisent un modèle de dépôt sec avec les données de pollution atmosphériques réelles mesurées entre Août 2006 and Juillet 2007. Thoennesen (2002) a réalisé une étude qui a permis de mettre en évidence le rôle de la végétalisation des façades dans le piégeage des polluants issus de la circulation routière (d'après Köhler (2008)). L'étude a lieu sur une façade de lierre d'un bâtiment à plusieurs étages dans une rue à grande circulation au centre-ville de Düsseldorf en Allemagne. L'analyse de la poussière des polluants accumulée sur la façade a montré que la végétation constitue un piège à poussières efficace. La plus forte concentration de polluants a été relevée à une hauteur de deux mètres au-dessus de la rue. La concentration des polluants augmente tout au long de la période de croissance. Les résultats globaux de cette étude sont présentés sur la figure 1-6 où les barres pointillées correspondent aux feuilles nettoyyées.

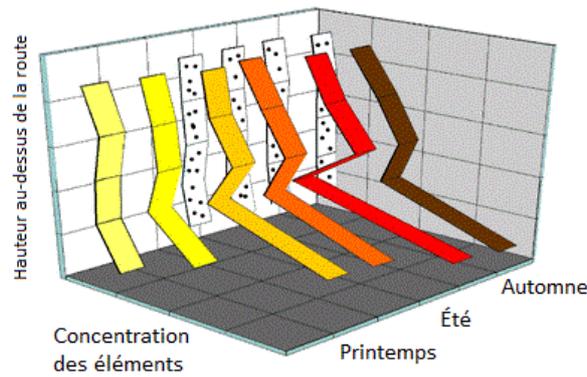


Figure 1-6 : Augmentation de la poussière de polluants divers piégée sur le lierre de Boston dans une rue à grande circulation automobile durant la saison de croissance

Apport de biodiversité en ville

La biodiversité englobe les variétés d'espèces vivantes (diversité d'espèces), la variété génétique (diversité génétique) et la variété écosystémique (diversité de l'écosystème) (Miller, 2007). Parfois, l'objectif principal de la végétalisation est de créer des écosystèmes permettant la conservation de la diversité des espèces vivantes (Coffman, 2007). Plusieurs travaux de recherche ont porté sur le lien entre la diversité floristique et la diversité faunique (Brenneisen, 2006; Kadas, 2006). Il a été montré que la diversité des espèces d'invertébrés est associée aux propriétés des toitures végétales telles que la profondeur du substrat et la diversité des plantes. De même, la variabilité topographique et la diversité floristique des toitures végétales est positivement corrélée avec la diversité des oiseaux, des insectes et des araignées recensés (Grant, 2006).

3- Climatologie urbaine et demande énergétique des bâtiments

3.1- Ilots de chaleur urbains

3.1.1- Définitions et phénomènes associés

Il a été observé depuis près de deux siècles que les zones urbaines et suburbaines sont caractérisées par un îlot de chaleur, une sorte d'« oasis inverse » où les températures de l'air est plus élevées que dans les zones rurales environnantes. L'étude sur le climat de Londres (1818) publiée par Luke Howard fût la première découverte de ce phénomène (Howard, 1833). Il a rapporté qu'« un excès artificiel de chaleur » par rapport au reste du pays a été constaté dans cette ville. Emilien Renou a mis en évidence ce phénomène pour la ville de Paris au milieu du 19^{ème} siècle (Renou, 1862) et Whilhelm Shmidt est arrivé aux mêmes conclusions pour la ville de Vienne au début du 20^{ème} siècle (Schmidt, 1917). Gordon Manley fût le premier à nommer ce

phénomène « ilot de chaleur urbain » (Manley, 1958). Ce terme a été repris et utilisé par tous les climatologues spécialisés dans la climatologie urbaine. Il a fallu attendre 1987 pour que T.K. Oke définisse l'intensité de ce phénomène comme étant la différence de température maximale entre le centre de la ville et les zones rurales environnantes (Oke, 1987).

Le phénomène des ilots de chaleurs urbains est observé dans les villes denses. Ces villes constituent par rapport aux zones rurales des ilots urbains caractérisés par des surfaces minérales (béton, asphalte, etc.) qui, à la différence des sols naturels perméables et végétalisés, absorbent l'énergie solaire sans pouvoir la dissiper par évaporation comme est le cas des sols naturels. Il en résulte que la température de surface croît et que la chaleur absorbée au cours de la journée soit restituée à l'air par convection. Par conséquent, le phénomène se manifeste par l'élévation de la température de l'air dont la circulation est ralentie par la rugosité urbaine. Dans ce qui suit, une revue des phénomènes associés aux ilots de chaleur urbains est présentée.

La température des surfaces urbaines minérales ; telles que les toitures et les pavés, dépasse couramment la température de l'air de 25 à 50 °C. La cartographie des températures de surfaces terrestres urbaines a été rendu possible au 20^{ème} siècle grâce à l'utilisation de satellites et de systèmes de télédétection embarqués. Le programme « Explorer Mission 1 » lancé par la NASA en 1978 était l'une des premières utilisations de satellites dans la cartographie thermique d'une zone urbaine. Des images de meilleure résolution ont pu être obtenues grâce à l'utilisation d'avions équipés de caméras adaptées. La figure 1-7 montre une image thermique de la ville de Bâton Rouge en Louisiane. La résolution de 10 [m] par pixel permet d'identifier les bâtiments. Tandis que les parcs et les zones rurales ont une température proche de la température de l'air, les toits des bâtiments apparaissent en rouge et atteignent jusqu'à 65 °C. La température de l'air en contact avec les surfaces urbaines chaudes augmente. Par conséquent, la différence de température entre les zones urbaines et les zones périurbaines devient significative. Cette différence est généralement minimale le matin puis augmente au cours de la journée. L'intensité de l'ICU est plus importante au cours de la nuit où les surfaces urbaines continuent à restituer la chaleur emmagasinée durant la journée et réduisent le rafraîchissement nocturne (Morris and Simmonds, 2000). La différence de température maximale peut dépasser 12 °C et l'heure à laquelle cette différence est mesurée dépend des propriétés thermiques des matériaux de construction (Gartland, 2008).



Figure 1-7 : Image thermique du centre-ville de Bâton Rouge en Louisiane prise le 11/05/1998 à 13h00 heure locale par un avion équipé par NASA. La température estimée varie entre 25°C pour la végétation et 65 °C pour les toitures (Gorsevski et al., 1998)

Plusieurs études, par exemple (Kawashima et al., 2000; Stoll and Brazel, 1992), ont été réalisées dans le but de déterminer le lien entre les températures des surfaces observées et la température de l'air mesurée. Ces études ont abouti à des corrélations qui dépendent des conditions météorologiques. En présence de nuages et de vents forts, la différence de température est réduite et par conséquent l'îlot de chaleur urbain est moins intense. Le phénomène de l'îlot de chaleur urbain se manifeste le plus fortement durant les périodes du beau temps caractérisés par un ciel clair et des vents faibles. Les corrélations entre la température de surface et la température de l'air ne sont généralement valables que pour la zone urbaine pour laquelle la corrélation a été établie. En effet, une corrélation établie pour la ville de Tokyo ou de Londres par exemple ne peut être appliquée à une autre ville d'un emplacement géographique, de climat et d'un niveau de développement différents.

L'intensité de l'îlot de chaleur augmente avec la croissance de la population urbaine et l'expansion des villes au cours du temps. Stoll and Brazel (1992) ont analysé l'historique des données météorologiques mesurées dans les villes de Phoenix et de Baltimore et dans des zones rurales environnantes. Le tracé des différences moyennes mensuelles entre les températures de ces deux villes et les températures des zones rurales montre que l'amplification de l'îlot de chaleur est liée à l'accroissement de la population (cf. Figure 1-8). En 90 ans, entre 1910 et 2000, l'intensité de l'îlot de chaleur urbain de la ville de Phoenix a triplé, passant de 2 °C à 6 °C. Durant la même période, la population de Baltimore a peu évolué et l'îlot de chaleur n'a augmenté que d'environ 1 °C.

Les résultats de cette étude sont en accord avec la corrélation de Karl et al. (1988) qui exprime, suivant une loi en puissance (équation (1-1)), l'évolution de l'îlot de chaleur en fonction de la population :

$$\bar{T}_{u-r} = a (\text{POPULATION})^{0.45} \quad (1-1)$$

Avec \bar{T}_{u-r} [°C] la moyenne de la différence de température entre la zone urbaine et les zones rurales donnée en fonction de la population urbaine et d'un paramètre de corrélation (a).

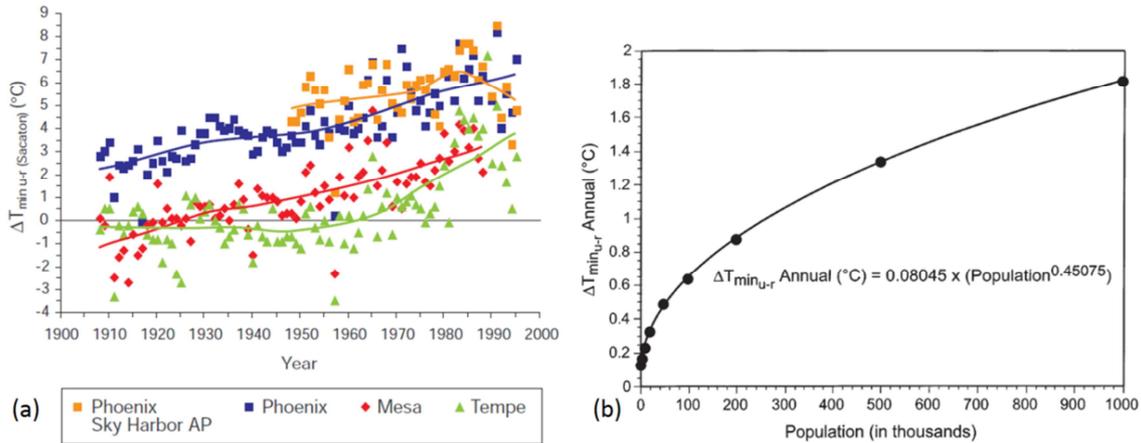


Figure 1-8 : (a) Différence de température entre les zones urbaines de Phoenix et des zones rurales dans l'Arizona ; (b) Corrélation de Karl et al. de l'intensité de l'îlot de chaleur pour des données annuelles de 305 villes américaines ; d'après (Stoll and Brazel, 1992)

L'îlot de chaleur urbain n'affecte pas seulement la température de l'air à faible altitude. Les effets de l'îlot de chaleur urbain peuvent être ressentis jusqu'à 2 km au-dessus de la zone urbaine (Gartland, 2008). En effet, si la zone urbaine est suffisamment chaude, la remontée de l'air réchauffé au contact du sol pourrait conduire à une inversion thermique. L'inversion thermique se produit lorsqu'une masse d'air chaude se trouve, dans la couche limite atmosphérique, entre deux atmosphères plus fraîches. Ce phénomène est d'autant plus probable que le phénomène de l'îlot de chaleur est marqué. À la différence des zones rurales, où les conditions de stabilité atmosphérique ont lieu durant la nuit, la restitution de la chaleur emmagasinée durant la journée inverse le profil de température au-dessus de la zone urbaine (cf. Figure 1-9). À noter que l'inversion thermique contribue au piégeage de la pollution par-dessus des zones urbaines notamment en périodes nocturnes.

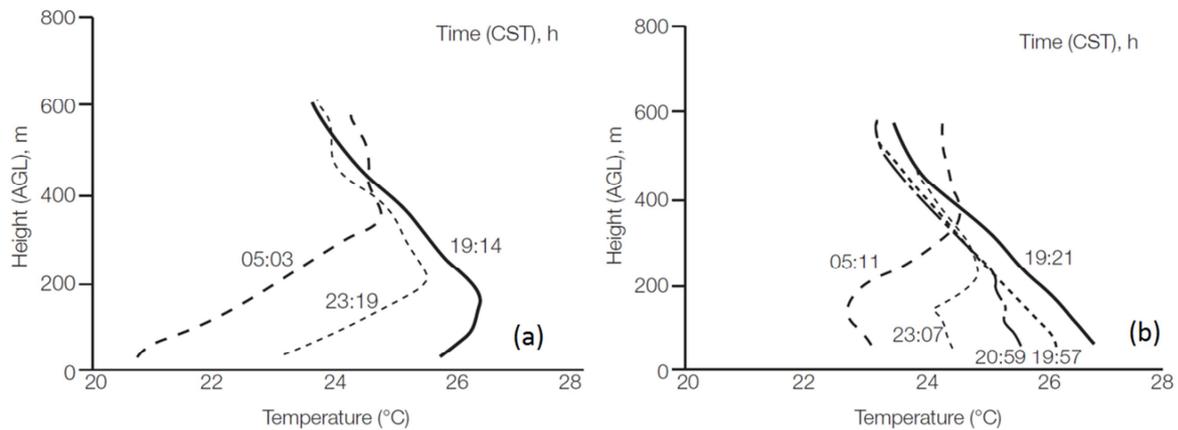


Figure 1-9 : Profils de température aux alentours du coucher et du lever de soleil à Saint-Louis dans le Missouri, le 26 et 27 Juillet 1975 ; (a) zone rurale, (b) zone urbaine (inversion thermique) ; d'après (Godowitch et al., 1985)

3.1.2- Causes des îlots de chaleur urbains

Le bilan énergétique par unité de surface urbaine peut s'écrire sous la forme générale suivante (Taha, 1997) :

$$Rn + Q_A = H + L + \Delta G \quad (1-2)$$

Avec :

- (Rn) : Le flux radiatif net ou bilan radiatif. Il correspond au flux radiatif absorbé, toutes longueurs d'ondes confondues
- (Q_A) : Le flux anthropique. Il correspond au dégagement de chaleur produit par l'ensemble des activités humaines
- (H) : Le flux de chaleur sensible. Il correspond au transfert de chaleur par convection (verticale) ou par advection (horizontale)
- (L) : Le flux de chaleur latente. Il correspond l'évaporation produite par les eaux de surface, par la végétation et par les surfaces perméables
- (ΔG) : Ce terme peut être négatif (puits) ou positif (source). Il exprime l'énergie (majoritairement radiative) stockée (généralement au cours de la journée) ou restituée (généralement au cours de la nuit) par les matériaux de construction

En se basant sur ce bilan énergétique, les causes de la formation des îlots de chaleur urbains peuvent être répertoriées selon leur mode d'action (Gartland, 2008) :

- i. Évaporation réduite
- ii. Stockage thermique accru
- iii. Rayonnement net accru
- iv. Convection réduite
- v. Chaleur anthropique

Le manque des eaux de surface, les surfaces imperméables des constructions, le manque de végétation et la perte du couvert forestier réduisent l'évaporation. L'intensification de l'urbanisation provoque la modification des types de recouvrement des sols. Les sols naturels sont remplacés par des matériaux imperméables qui n'assurent pas les fonctions de filtration et d'absorption de l'eau. En minimisant la disponibilité de l'eau en milieu urbain, les processus naturels de rafraîchissement assurés par l'évaporation de l'eau depuis les sols et par la transpiration végétale deviennent plus restreints.

L'utilisation de matériaux de construction de diffusivité thermique élevée favorise le stockage thermique durant la journée. Cette énergie est restituée en partie à l'air ambiant pendant la nuit. D'après Oke et al. (1991) Les propriétés thermiques des matériaux de construction telles que la conductivité et la capacité thermiques jouent un rôle déterminant dans le comportement thermique dynamique des zones urbaines (cf. Figure 1-10b). Certains matériaux ont la capacité de diffuser rapidement la chaleur et de la stocker suffisamment pour la restituer progressivement à l'environnement urbain. C'est pour cette raison que la différence maximale de température entre les zones urbaines et rurales est souvent relevée après le coucher de soleil et non pas à l'heure la plus chaude de la journée.

Le rayonnement net est d'autant plus important que l'albédo des surfaces urbaines est faible, que les rues de la ville sont étroites et que le niveau de pollution est élevé. Le faible albédo des matériaux de la ville tels que l'asphalte, les pavés ou le béton est synonyme d'une haute absorptivité solaire. Les matériaux à faible albédo absorbent plus d'énergie solaire et par conséquent se portent à de plus hautes températures (Rosenfeld et al., 1995; Taha et al., 1988). La morphologie urbaine favorise souvent le piégeage radiatif qui conduit à l'absorption d'une plus grande fraction du rayonnement solaire. Ce phénomène est le résultat des multi-réflexions du rayonnement solaire occasionnées par les surfaces urbaines en vis-à-vis et empiré par faibles ouvertures des rues étroites sur le ciel (cf. Figure 1-10a). Le bilan radiatif augmente aussi avec le niveau de pollution par les gaz à effet de serre.

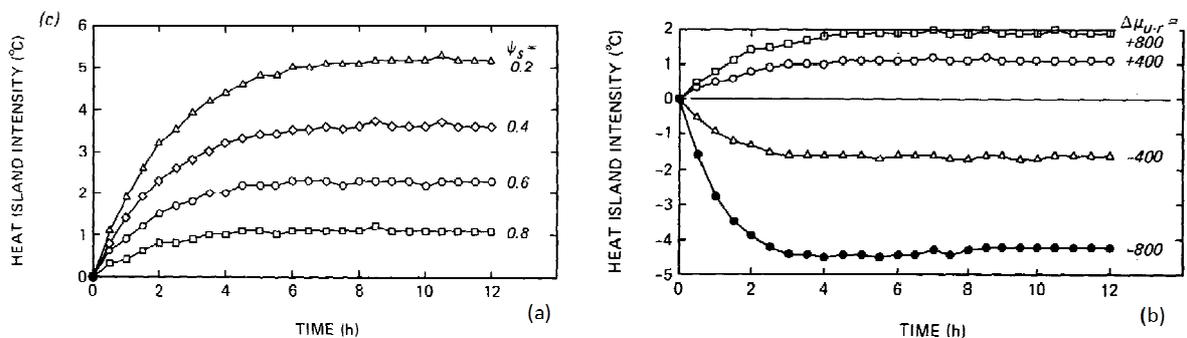


Figure 1-10 : variation de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (ICU) en fonction de (a) le facteur de forme entre le ciel et les rues ($F_{ciel,rue}$) noté (ψ_s) et (b) la différence dans les propriétés thermiques entre la zone urbaine et les zones représentée par la différence des admittances notée ($\Delta\mu_{u-r}$) ; (Oke et al., 1991)

La morphologie de la ville influence la vitesse du vent en plus du bilan radiatif. De par sa rugosité élevée, la ville a tendance à ralentir la vitesse du vent dans les couches basses de l'atmosphère. Or, l'intensité de la convection est directement liée à la vitesse du vent à faible altitude. La réduction de la vitesse du vent réduit la convection ce qui accentue le stockage thermique et accroît la température des surfaces. Par ailleurs, la formation des zones de recirculation à l'aval des bâtiments dans les rues canyons et dans les espaces confinés conduit à des températures d'air locales élevées, plus importantes que l'intensité globale de l'îlots de chaleur à l'échelle de la ville. En effet, l'îlot de chaleur observé à l'échelle d'une ville n'est que la résultante des plus petits îlots de chaleur formés dans les fragments urbains où les conditions environnementales sont favorables.

En ville, une source de chaleur autre que l'énergie solaire vient s'ajouter au bilan thermique et intensifie l'îlot de chaleur formé par l'îlot urbain. Il s'agit de la chaleur anthropique générée par l'ensemble des activités humaines. Cette source de chaleur est produite par les véhicules, par les bâtiments et par les activités industrielles et commerciales. Le dégagement de chaleur anthropique est plus important en hiver qu'en été. Taha (1997) a récapitulé des estimations du taux de dégagement de la chaleur anthropique dans certaines métropoles mondiales (cf. Tableau 1-2). Il évoque que (Q_A) varie entre 20 et 40 $W.m^{-2}$ en été et entre 70 et 210 $W.m^{-2}$ en hiver. Bien que ces estimations aient été faites avant 1980 et que les chiffres actuels devraient être nettement supérieurs, on note que les moyennes annuelles de la chaleur anthropique estimée pour les villes de Manhattan et Montréal (resp. 117-159 et 99 $W.m^{-2}$) étaient supérieures au rayonnement net mesuré dans ces villes (resp. 93 et 52 $W.m^{-2}$).

Tableau 1-2 : Valeurs moyennes de la chaleur anthropique (Q_A) et du rayonnement net (R_n) pour différentes villes (estimations faites avant 1980) d'après Taha (1997)

Ville	(Q_A) [$W.m^{-2}$]	(R_n) [$W.m^{-2}$]
Los Angeles	21	108
Manhattan, NY City	117-159	93
Moscow	127	-
Montréal	99	52
Budapest	43	46
West Berlin	21	57

La chaleur anthropique est tributaire de la consommation énergétique. Par conséquent, sa puissance croît avec les besoins énergétiques et l'expansion des villes. Pour une ville extrêmement dense comme Tokyo, une simulation numérique des différents termes du bilan énergétique de l'équation (1-2) donne des niveaux de production de chaleur anthropique qui atteignent 400 $W.m^{-2}$ en été et jusqu'à

1590 W.m⁻² en hiver (Ichinose et al., 1999). En été, l'utilisation des systèmes de climatisation a un effet de rétroaction positive sur le phénomène de l'îlot de chaleur urbain. En plus de la chaleur dégagée par les moteurs et les compresseurs, ces systèmes rejettent à l'extérieur la chaleur extraite de l'intérieur des bâtiments. L'utilisation à grande échelle de ces systèmes dans un milieu urbain densifié, réduit leur efficacité dès lors que cela augmente la température de la source chaude représentée par la température de l'air extérieur.

3.1.3- Mesures de lutte contre les îlots de chaleur

Les mesures de lutte contre les îlots de chaleur urbains concernent les secteurs de l'urbanisme, de l'architecture, de la gestion des ressources naturelles et des transports. Ces mesures permettent, en plus de favoriser la fraîcheur (l'été) dans les milieux urbains, de réduire la facture énergétique, d'améliorer la qualité de l'air et de promouvoir la santé et le confort des habitants de la ville. Certaines mesures sont liées aux infrastructures urbaines, à l'architecture et à l'aménagement urbain et doivent être pris en considération dans la planification urbaine. La morphologie urbaine, la hauteur et l'espacement des bâtiments, les réseaux routiers et les transports en communs en font partie. D'autres mesures de réhabilitation peuvent être appliquées pour rafraîchir les espaces urbains et réduire la chaleur anthropique. Les zones urbaines et périurbaines sont caractérisées d'un grand pourcentage de toitures et de voiries. Au moment où peu d'arbres et de végétation trouvent place dans les centres villes, les matériaux traditionnels utilisés dans les toitures et les voiries sont souvent sombre et imperméables. Ces matériaux absorbent beaucoup de chaleur et limitent l'évaporation des sols naturels. L'utilisation de matériaux de construction à haute réflectivité solaire et la multiplication des arbres et des espaces verts constitue un bon remède contre les îlots de chaleur urbains. Ces solutions permettent de réduire significativement les hautes températures de surface responsables du réchauffement de l'air ambiant.

Les toitures représentent près de 20 % de la surface au sol des zones urbaines et périurbaines (Akbari et al., 2003) et sont souvent les surfaces les plus chaudes en ville (cf. Figure 1-7, page 39). La plupart des toitures traditionnelles sont caractérisées par de faibles albédos (0,05 à 0,25) et par conséquent leurs températures atteignent souvent 65 à 90 °C en été. Ces dernières années, des toitures blanches dites « cool roof » ont fait leur apparition sur le marché. Leur utilisation, de plus en plus répandue, permet de limiter les pics de température qui ne dépasse pas 50 °C pour ce type de toitures. Deux propriétés radiatives leurs permettent d'afficher cette performance : une haute réflectivité solaire et une haute émissivité aux grandes longueurs d'onde (Bozonnet et al., 2011). La première permet d'absorber moins de rayonnement solaire tandis que la deuxième maximise les déperditions radiatives infrarouges. Pour les façades des bâtiments, l'utilisation des peintures blanches ou des

peintures sélectives (cool paints) permet de limiter le piégeage radiatif et d'atténuer la température dans les rues confinées.

Les matériaux traditionnels utilisés dans les voiries sont souvent composés d'asphalte et de pavés en béton. La réflectivité de ces matériaux est relativement faible. Elle se situe généralement dans la gamme 0,1 – 0,2 pour l'asphalte et dans la gamme 0,25 – 0,35 pour les pavés. Par conséquent les pics de température des voiries atteignent jusqu'à 65 °C. De même que pour les toitures des pavés « cool » ont émergé dans le marché des travaux publics (Santamouris et al., 2011). Les technologies utilisées pour rendre les pavages plus frais sont issues de la recherche de nouveaux procédés permettant l'atténuation des îlots de chaleur urbains. Ces pavés sont fabriqués à partir des matériaux traditionnels mais leurs propriétés sont différentes. Ils sont rendus cool soit par un revêtement d'une couleur plus clair ou par leur perméabilité à l'eau accrue. Cette dernière propriété permet à l'eau de pluie de s'infiltrer à travers le matériau suffisamment poreux et d'être évaporée par temps chaud.

Une autre mesure de lutte contre les îlots de chaleur urbains consiste à introduire d'avantage le végétal dans le milieu urbain. La végétation permet de rafraîchir le milieu environnant de deux façons : i) par l'évapotranspiration végétale qui vaporise l'eau plutôt que de chauffer les feuilles et ii) par l'ombrage des surfaces et la réduction de leurs temps d'exposition au rayonnement solaire. L'évapotranspiration permet aux feuilles, de faible inertie thermique, de rester à des températures voisines de celles de l'air ambiant. Par conséquent, les surfaces végétales sont parmi les surfaces urbaines les moins chaudes (cf. Figure 1-11).

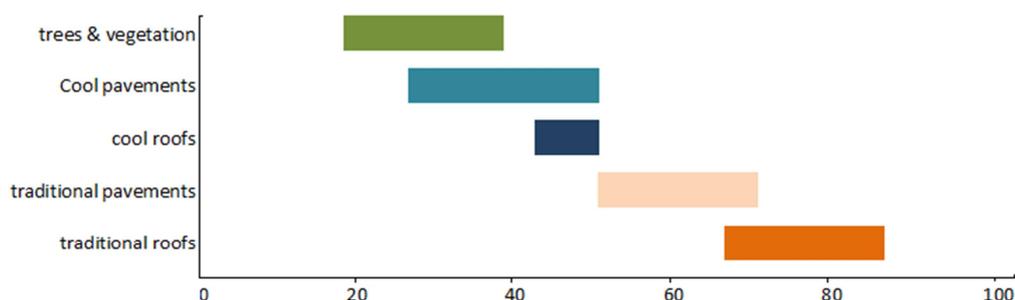


Figure 1-11 : Gammes des pics de températures (en °C) atteints sur différents matériaux (d'après (Gartland, 2008))

Pour tirer profit de ses caractéristiques, la végétation peut être disposée dans de nombreux espaces urbains tels que le long des axes de transport et sur les terrains publics et privés. Ceci passe par la plantation d'arbres et la multiplication des espaces verts. La végétalisation des parkings, du pourtour des bâtiments et l'utilisation des murs végétaux et des toits verts constituent une bonne solution. Ces dispositifs permettent de rafraîchir l'environnement proche et de réduire les variations de la température des surfaces ombragées. En plus de l'effet du rafraîchissement, la

végétation rend le paysage urbain plus attractif et moins stressant. Cependant, le choix optimum du dispositif de végétalisation dépend de l'espace urbain considéré. Par exemple, la plantation d'arbres dans des rues canyons confinées risque de réduire le transport des polluants générés par la circulation routière (Vos et al., 2012)

3.2- Interaction énergétique entre bâtiments et microclimat urbain

3.2.1- Échelles microclimatiques dans les zones urbaines

La portée de l'influence de la surface terrestre dans l'atmosphère définit la couche limite planétaire. Cette couche peut mesurer quelques centaines de mètres d'épaisseur la nuit ou quelques milliers de mètres le jour selon la surface sous-jacente. Dans cette couche atmosphérique, les flux de masse et de chaleur sont assimilés à des constantes. Les phénomènes microclimatiques, y compris l'îlot de chaleur urbain, s'observent au sein de cette couche atmosphérique. À la différence des zones rurales quasiment planes, les flux verticaux de quantité de mouvement, de chaleur et d'humidité dans les zones urbaines ont lieu sur des surfaces rugueuses. La rugosité de la surface correspond à la hauteur moyenne des obstacles formés par les bâtiments et les arbres. La portée de l'influence thermique et aéraulique spécifique à chaque obstacle est relativement courte. Elle est observée à l'échelle de la sous-couche de rugosité. Les effets individuels des surfaces urbaines s'atténuent à faible distance de leurs sources respectives. Cependant, le mélange turbulent avec d'autres effets venant d'autres sources densifiées forme des zones microclimatiques à de plus grandes échelles. La figure 1-12 montre une représentation schématique de la couche limite urbaine (Oke, 2006). Cette couche est formée par l'ensemble de la canopée urbaine. À l'échelle de la couche de surface, il y a la sous-couche inertielle où les mesures de flux verticaux, théoriquement constants, sont effectuées. Les mesures effectuées dans cette sous-couche sont influencées par le vent et leur analyse nécessite le calcul des zones du sol d'où elles proviennent (footprint).

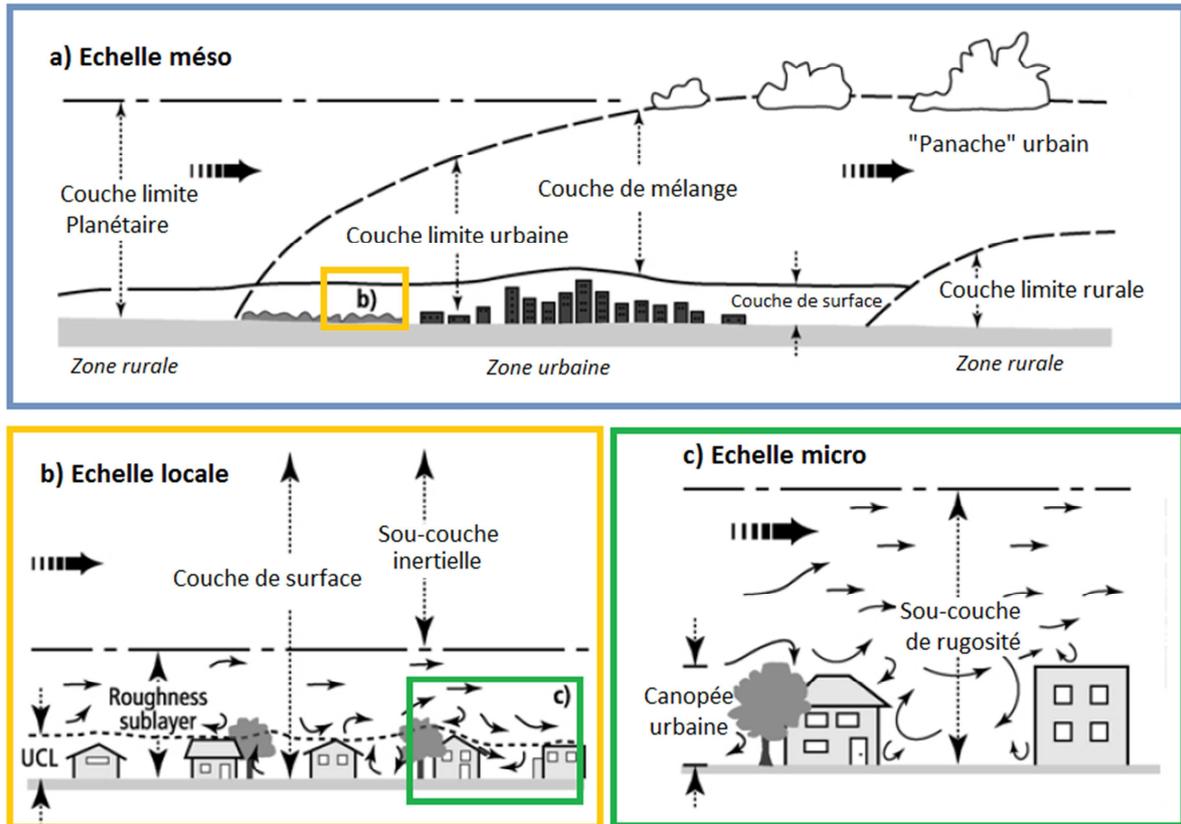


Figure 1-12 : Représentation schématique des échelles climatiques et des couches limites planétaire et urbaine (d'après (Oke, 2006))

La figure 1-13 (Oke, 2006) représente le profil moyen du vent au-dessus de la canopée urbaine dans le cas où celle-ci se trouve sur un site suffisamment plat. La moyenne est à la fois spatiale et temporelle, il est quasiment impossible de trouver ce profil exact nulle part dans la ville, car le vent interagit avec les bâtiments, les rues, les cours et les arbres. La vitesse et la direction du vent sont donc très variables. Dans la sous-couche inertielle, la théorie de la similarité développée par Monin et Obukhov est applicable. Le profil moyen du vent est souvent modélisé par une loi logarithmique semi-empirique de la forme suivante :

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z - d_0 + \Psi_M(\zeta)}{z_{0m}} \right) \quad (1-3)$$

Avec (u_*) la vitesse de friction, (κ) la constante de Van Karman, (z_{0m}) la longueur de rugosité, (d_0) la hauteur de déplacement et (Ψ_M) une fonction adimensionnelle qui tient compte du changement du profil en fonction du paramètre de stabilité (ζ). Ce dernier est défini comme le rapport entre la hauteur de mesure et la longueur de Monin-Obukhov (Campbell and Norman, 1998a):

$$\zeta = - \frac{\kappa g z H}{\rho c_p T_0 u_*^3} \quad (1-4)$$

Avec (g) l'accélération de la pesanteur, (H) le flux de chaleur sensible, (ρ) la masse volumique de l'air, (c_p) la chaleur massique à pression constante et (T_0) la température potentielle virtuelle¹. Les paramètres de l'équation (1-3) peuvent être déterminés par plusieurs méthodes à l'aide de mesures expérimentales (Britter and Hanna, 2003).

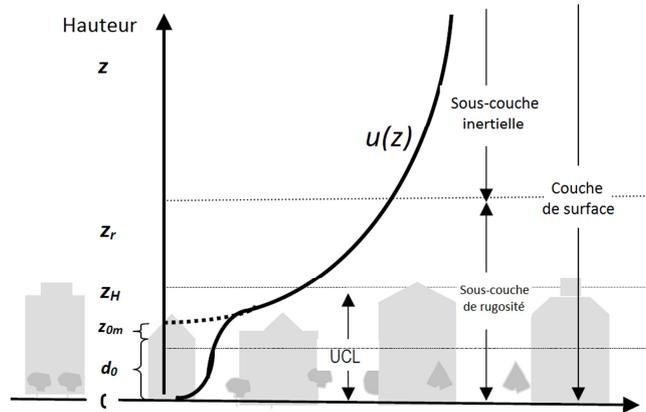


Figure 1-13 : Moyenne spatiale et temporelle de la vitesse du vent en milieu urbain dense avec localisation des sous-couches de la couche de surface ; (z_H) la hauteur de rugosité, (z_r) la sous-couche de rugosité, (z_0) et (z_d) la longueur de rugosité et la hauteur de déplacement du plan neutre du profil logarithmique (Oke, 2006)

Les observations expérimentales in-situ ou dans des souffleries ont établi le fait que l'écoulement du vent autour d'un obstacle isolé, par exemple un bâtiment seul, est fortement perturbé au-dessus et tout autour de l'obstacle. Les lignes de courant sont modifiées, des zones de recirculations sont créées par-dessus et derrière l'obstacle (bulles de sillage) et l'écoulement reste perturbé sur une distance jusqu'à dix fois la hauteur de l'obstacle. C'est pour cette raison que les mesures du vent dans les zones rurales se font normalement à 10 [m] d'altitude. Dans les zones urbaines, il est difficile, voire impossible, de trouver un terrain non perturbé par les bâtiments. Pour que les mesures du vent dans une zone urbaine soient utiles, il faut s'assurer qu'elles sont effectuées dans la sous-couche inertielle et non pas à l'intérieur de la canopée urbaine.

Les rues représentent l'échelle microclimatique la plus petite dans une canopée urbaine. Leur comportement individuel dans une situation climatique donnée détermine l'intensité des phénomènes microclimatiques observés à l'échelle de la ville. L'étude de cette unité élémentaire est indispensable pour l'appréhension des phénomènes à grande échelle. T. R. Oke était l'un des premiers chercheurs à s'intéresser au microclimat à l'intérieur de canyons urbains dans le but de caractériser les propriétés climatiques urbaines. À cette échelle, les températures et les flux

¹ Température de l'air ramenée par une compression/détente adiabatique à la pression atmosphérique standard : $T_0 = T \times (p_0/p)^{R/c_p}$

observés dans le canyon sont liés aux propriétés géométriques des rues considérées. Idéalement, une rue canyon est une rue symétrique entre deux bâtiments de longueur infinie. La largeur de la rue est notée (W) et sa hauteur est notée (H). Le rapport d'aspect (H/W) est un indicateur morphologique à qui le piégeage radiatif et le confinement aéraulique sont intimement liés. Les multiples interrélflexions du rayonnement solaire sur les parois de la rue canyon sont responsables du piégeage radiatif. L'augmentation de la surface développée et les interrélflexions solaires se traduisent par de plus faibles albédos.

L'absorption de l'énergie solaire est plus grande dans les canyons urbains avec des rapports d'aspects (hauteur/largeur) élevés. D'après les mesures réalisées par Aida (1982) sur différentes géométries de canyons, l'absorption solaire est réduite de 27 % à 13 % lorsque le rapport d'aspect passe de 0,5 à 2. Un paramètre autre que le rapport d'aspect est souvent utilisé pour décrire la morphologie urbaine. Il s'agit du facteur de forme ($F_{ciel-rue}$) qui reflète la visibilité du ciel depuis la rue. S'il est égal à un, le ciel est complètement visible. S'il est égal à zéro, la vue du ciel est obstruée par les obstacles. Plus ce facteur de forme est important, plus les échanges radiatifs GLO sont intenses et plus le canyon se refroidit rapidement. Plus il est faible, plus l'énergie solaire est emmagasinée et plus le dégagement de chaleur est important au cours de la nuit. Le rapport d'aspect et le facteur de forme sont deux propriétés liées entre elles par la géométrie du canyon urbain (Steyn and Lyons, 1985) (cf. Figure 1-14).

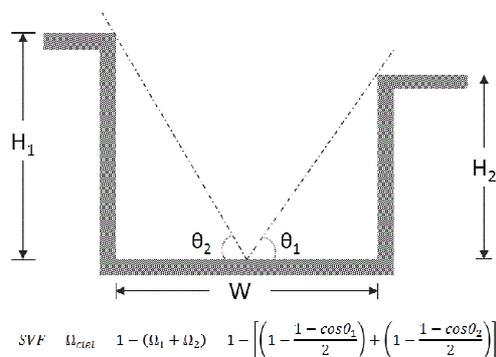


Figure 1-14 : Estimation du facteur de forme du ciel à partir de la géométrie d'un canyon urbain de longueur infinie (d'après Oke (1988))

Le microclimat à l'échelle d'une rue canyon est directement lié à la morphologie locale. La nature de l'écoulement dans la rue dépend de la vitesse et de la direction du vent de référence au-dessus de la canopée urbaine. Selon le vent, l'écoulement dans la rue peut être longitudinal ou transversal, selon si la direction du vent de référence fait moins de 30° avec l'axe des rues ou pas (d'après Vardoulakis et al. (2003)). L'accent est mis souvent sur l'aspect bidimensionnel de l'écoulement transversal. Oke (1987) définit trois types d'écoulements en fonction du rapport d'aspect (H/W) : (a) écoulement à rugosité isolée ; (b) écoulement à interférence de sillage ; (c) écoulement rasant (cf. Figure 1-15). Pour les rues larges ($H/W < 0,3$), les

bâtiments sont suffisamment espacés pour qu'ils agissent séparément. Si le rapport d'aspect est de l'ordre de 0,5, l'écoulement d'air perturbé en aval du premier bâtiment atteint le deuxième bâtiment avant de se rétablir et les sillages s'interfèrent. Quand le rapport d'aspect est de l'ordre de l'unité, l'écoulement du vent au-dessus des bâtiments devient rasant et génère un vortex dans le canyon.

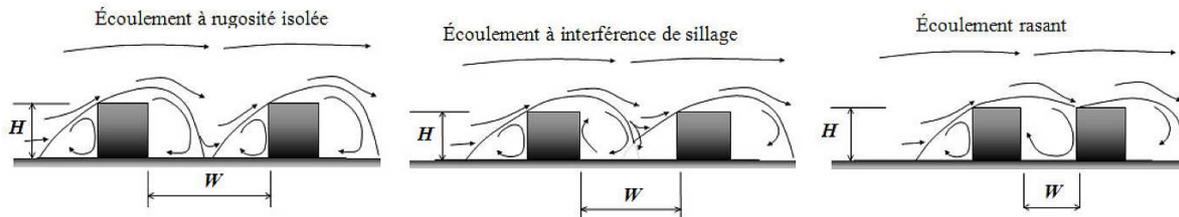


Figure 1-15 : Types d'écoulements dans une rue canyon : rugosité isolée, interférence de sillage et écoulement rasant, Bozonnet (2005) d'après (Oke, 1987)

3.2.2- Modélisation de l'interaction bâtiments – microclimat urbain

Les besoins énergétiques des bâtiments de la ville sont influencés par l'environnement urbain. Les conditions microclimatiques sont souvent différentes des moyennes enregistrées à l'échelle régionale. Les sollicitations thermiques varient d'un bâtiment à un autre selon les masques solaires, les orientations, le confinement aéraulique et les propriétés des surfaces environnantes. Des bâtiments identiques dans une même ville peuvent avoir des besoins énergétiques différents. Le bâtiment dans la ville est donc influencé par les autres bâtiments et par les phénomènes microclimatiques à l'échelle de la canopée urbaine. La prise en compte de l'interaction bâtiments-microclimat permet d'améliorer la prédiction des besoins énergétiques à l'échelle des îlots urbains. La modélisation de cette interaction énergétique nécessite le couplage de plusieurs modèles à différentes échelles.

La complexité des phénomènes thermiques et aérauliques engendrés par le tissu urbain rend quasiment impossible de relier par une modélisation robuste et précise toutes les échelles climatiques, de la consommation énergétique individuelle des bâtiments aux phénomènes météorologiques à l'échelle régionale. Les modèles de canopée urbaine permettent de décrire l'interaction entre l'échelle méso et la canopée urbaine. Cette dernière est définie, généralement, par une morphologie urbaine simplifiée constituée d'une cellule élémentaire de rues ou de blocs urbains répétés. La modélisation des bâtiments par ce type d'approche est donc schématique. Ces modèles permettent tout de même de prédire avec précision acceptable l'intensité des phénomènes microclimatiques tels que les îlots de chaleur urbains. Parmi ces modèles de canopée urbaine, on peut citer : le modèle OHM (Objective Hysteresis model, Grimmond et al. (1991)), le modèle TEB (Town Energy Balance, Masson (2000)), le modèle SM2U (Dupont, 2001) et le modèle CAT (Canyon Air Temperature, Erell and Williamson (2006)).

La modélisation de l'interaction entre les échelles climatiques et les bâtiments peut être basée sur le couplage d'un modèle méso et à l'échelle de la canopée et d'un modèle thermique basique de blocs urbains (Kikegawa et al., 2006). Une modélisation plus fine de l'interaction énergétique entre les bâtiments et le microclimat urbain nécessite la prise en compte des orientations des bâtiments, de leurs dispositions relatives et de leurs réponses thermiques dynamiques. Des modèles thermoaéraulique ont été élaborées pour simuler l'interaction bâtiments-microclimat à l'échelle d'un fragment urbain ou d'un quartier. Bouyer (2009) a couplé SOLENE¹ à Fluent² après lui avoir incorporé un modèle nodal de bâtiments. Il nota un écart important de consommation énergétique entre un bâtiment isolé et un bâtiment en site urbain (Bouyer, 2009). Plus tard, Malys (2012) a intégré le modèle de végétation de Del Barrio (1998) dans le modèle de bâtiment pour simuler l'impact des façades végétalisées sur la consommation énergétiques des bâtiments et sur le microclimat urbain à l'échelle d'un quartier. L'application s'est portée sur le quartier du Pin Sec à Nantes pour lequel la modélisation aéraulique a été réalisée à l'aide de Code_Saturne (code CFD développé par EDF).

Dans le but de décrire les bâtiments de la scène urbaine avec le même détail que dans les codes de thermique dynamique du bâtiment tout en considérant les phénomènes aéraulique particuliers des zones urbaines, Gros (2013) s'est basé sur la méthode des facteurs de pondération pour la réduction du modèles thermique de bâtiment. Le modèle obtenu a été couplé à SOLENE et a un modèle zonal tridimensionnel de la canopée urbaine (QUIC) (Gros, 2013). Un autre outil de simulation thermique à l'échelle urbaine est le logiciel « CitySim » (Robinson et al., 2009). Cet outil est muni d'une interface graphique et ne cesse pas d'évoluer. Anciennement SUNtool, ce logiciel a été muni d'un modèle thermique de bâtiment basé sur l'analogie électrique des transferts thermiques (Kämpf and Robinson, 2007) et permet une étude stochastique du comportement des occupants.

Ces outils de modélisation constituent un outil d'aide à la décision permettant d'appuyer les démarches de planification urbaine durable. Cependant, les outils numériques développés par Bouyer (2009) et Malys (2012) décrivent finement les champs de température à l'échelle d'un quartier au détriment de la modélisation détaillée des bâtiments constituant la scène urbaine. De plus, de par l'utilisation des codes de CFD, ces modèles sont limités à de courtes périodes de simulation. De même, l'outil développé par Gros (2012) permet de décrire avec plus de détail la physique des bâtiments. En revanche, son utilisation dans l'évaluation de l'incidence de la végétalisation sur la performance énergétique des bâtiments est peu intéressante. En effet, Gros (2012) présente une étude des impacts thermiques de la

¹ Code de simulation thermo-radiative développé au CERMA et basé sur la méthode des radiosités

² Code commercial de CFD

végétalisation en imposant aux surfaces végétalisées une température égale à celle de l'air ambiant.

3.2.3- Demande de climatisation et recherche de solutions alternatives

La multiplication des activités humaines implique l'augmentation des besoins énergétiques. Les exigences de confort thermique d'été augmentent avec l'expansion des villes. Les îlots de chaleur urbains amplifient les besoins de rafraîchissement notamment pour des villes situées dans des zones climatiques chaudes ou tempérées. Le rafraîchissement nécessaire est traditionnellement assuré par les systèmes de climatisation. Ces systèmes pompent la chaleur de l'intérieur des espaces climatisés et la rejette à l'extérieur. Ces rejets thermiques sont une forme de chaleur anthropique qui amplifie l'îlot de chaleur et augmente la température du milieu urbain. En effet, étant donné le caractère densifié de la ville, l'air contenu dans des environnements confinés ne peut plus être assimilé à un puits de chaleur infini. Inversement, l'élévation de la température extérieure augmente la charge thermique et détériore le rendement des systèmes de climatisation. Cet effet d'amplification rétroactive est illustré par la figure 1-16 (d'après Bozonnet (2005)). En résumé, le bâtiment interagit avec son environnement et le moyen de rafraîchissement idéal doit permettre d'atténuer la charge de climatisation sans conduire au réchauffement de l'environnement extérieur voire le rafraîchir.

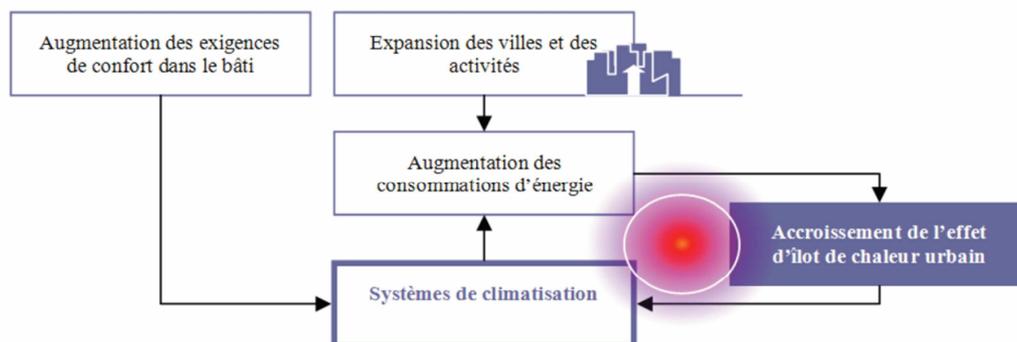


Figure 1-16 : Systèmes de climatisation et amplification de l'îlot de chaleur urbain (Bozonnet, 2005)

Face à cette problématique, la recherche de solutions alternatives de rafraîchissement passif s'impose. Une première solution consiste au rafraîchissement nocturne par ventilation naturelle. Le principe est simple, profiter de la fraîcheur de l'air au cours de la nuit pour refroidir l'intérieur et la structure du bâtiment en ouvrant les fenêtres, les volets et les ouvrants de toitures. Cette technique se sert de l'inertie thermique du bâtiment pour retarder le réchauffement de journée suivante. Ainsi, le confort thermique est amélioré et les besoins de climatisation sont abaissés. Toutefois son intérêt est limité en milieu urbain dense, notamment, dans le secteur résidentiel à cause de la pollution et du bruit.

Une autre solution est de traiter l'enveloppe du bâtiment de façon à transmettre et à emmagasiner moins d'énergie reçue sous forme de rayonnement solaire au cours de la journée. En effet, il a été montré que la végétation et les surfaces de haute réflectivité solaire présentent des températures de surfaces plus faibles comparées aux surfaces urbaines traditionnelles. Ainsi, leur application sur l'enveloppe des bâtiments permet de réduire la température de surface et par conséquent la charge thermique de climatisation. En effet, Il est établi que les toits blancs (cool roofs) et les toits végétaux réduisent les besoins énergétiques de climatisation et améliorent le confort thermique d'été en plus de leur impact sur le microclimat urbain (Zinzi and Agnoli, 2012). Par ailleurs, les plantes à feuilles semi-persistantes ou caduques peuvent être utilisées comme brise soleil évolutif recouvrant une partie des vitrages. Ces plantes assurent une fonction d'ombrage pendant la saison chaude et laissent passer l'éclairage solaire en hiver (Ip et al., 2010). Cependant, l'ampleur de leur influence sur le bâtiment dépend fortement du niveau d'isolation de la toiture (Bozonnet et al., 2011; Jaffal et al., 2012).

Bien que les surfaces à haute réflectivité solaire et les surfaces végétalisées puissent avoir des impacts similaires sur la performance énergétique des bâtiments dans certaines conditions, leurs comportements thermiques et leurs effets sur l'environnement extérieur sont différents. En effet, toutes les deux minimisent la chaleur absorbée et réduisent la température de surface. Cependant, la surface « cool » réfléchit plus et absorbe moins de rayonnement tandis que la surface végétalisée absorbe autant de rayonnement qu'une surface traditionnelle mais en dissipe une bonne partie sous forme de chaleur latente. En d'autres termes, le niveau élevé de l'albédo permet de renvoyer à l'environnement l'énergie solaire reçue par la paroi et la végétalisation l'absorbe puis la dissipe par évaporation. La figure 1-17 compare le comportement de ces deux techniques de revêtement extérieur et leur influence sur l'environnement urbain.

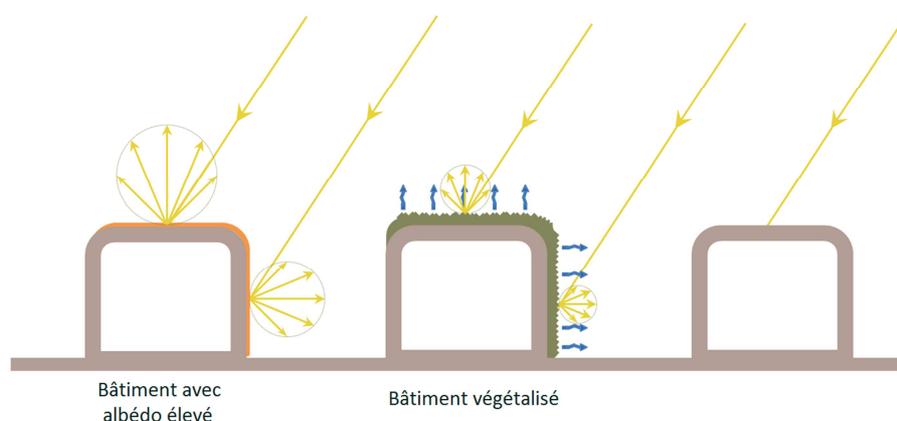


Figure 1-17 : Schéma comparatif du comportement thermique et radiatif des parois végétalisées et des parois revêtues d'une peinture ou d'un matériau à haute réflectivité solaire

Cette figure schématise deux bâtiments : i) à gauche, un bâtiment avec un revêtement de haute réflectivité solaire et ii) au milieu, un bâtiment végétalisé. Les surfaces végétalisées, en toiture ou en façade, absorbent plus d'énergie solaire, toutefois l'évapotranspiration modère le bilan thermique de surface. En revanche, la valeur élevée de l'albédo modère le bilan thermique de surfaces en réfléchissant une grande partie de l'éclairement solaire. Le rayonnement réfléchi peut être intercepté par la rue ou par d'autres bâtiments se trouvant à proximité ce qui intensifierait l'éclairement de la scène urbaine considérée. De point de vue global et purement thermique, la végétalisation est peu compromettante et présente des avantages certains.

L'utilisation des peintures sélectives a fait l'objet d'une étude réalisée à l'Université de la Rochelle (Doya, 2010) sur la plateforme expérimentale présentée au chapitre 3. Par ailleurs des investigations théoriques et expérimentales de l'incidence des toitures végétalisées sur la performance énergétique des bâtiments ont été abordées par Ouldboukhitine et al. (2012), dans le cadre du projet ANR-AGROBAT : « Incidence des toitures végétalisées sur la performance énergétique des bâtiments selon une approche pluridisciplinaire » et du projet FEDER : « Développement d'une plateforme de caractérisation thermo-hydrrique de composants de toitures végétales ». L'étude a été réalisée moyennant : (i) une caractérisation des principales propriétés du complexe végétal (thermohydrrique, hydrrique, hydrodynamique et microstructurale) ; (ii) une modélisation à l'échelle du complexe végétal et (iii) validation sur maquette à échelle 1:10 et sur des bâtiments réels.

Dans la continuité des études antérieures sur ces solutions alternatives de rafraichissement passif, le travail actuel permet, d'une part, l'évaluation expérimentale de l'impact des enveloppes végétalisées sur l'environnement microclimatique à l'échelle de la rue. D'autre part, le développement d'outils permettant la prédiction de la réponse thermique des bâtiments végétalisés aux sollicitations météorologiques dans un milieu urbain.

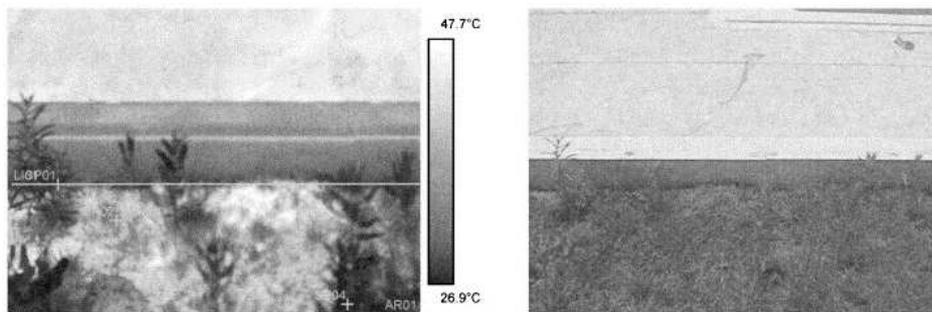
4- État de l'art de l'impact thermique des parois végétalisées

4.1- Cas d'études expérimentales

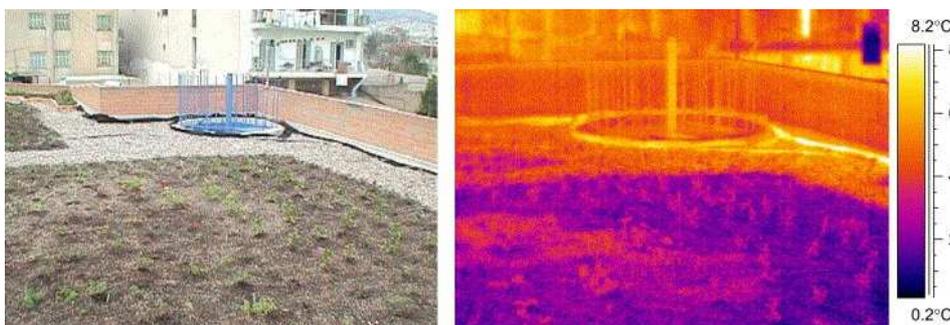
4.1.1- Toitures végétalisées

Le revêtement de l'enveloppe du bâtiment par des complexes végétaux modifie ses propriétés thermiques et radiatives et engendre différents modes de transfert thermique et massiques sur sa face externe. On observe alors pour la végétalisation d'une toiture que les transferts thermiques à la surface extérieure en été sont réduits.

Par conséquent, les pics de température en surface sont réduits, et l'amplitude du flux thermique traversant est diminuée. Les résultats et conclusions de plusieurs études expérimentales ont été publiés par de nombreux chercheurs depuis le début des années 2000 (Fioretti et al., 2010; Lin and Lin, 2011; Niachou et al., 2001; Onmura et al., 2001; Santamouris et al., 2007; N. H. Wong et al., 2003; Nyuk Hien Wong et al., 2003). Des mesures de thermographie infrarouge (Niachou et al., 2001) ont montrées que la température de surface dépend fortement du type et de la couleur de la végétation utilisée en plus du niveau d'isolation de la structure portante. Le grand avantage des toitures végétales, tel qu'il est souligné par Santamouris (Santamouris et al., 2007), est qu'elles réduisent les besoins de climatisation en été sans augmenter les besoins de chauffage en hiver. On rapporte dans cette étude que la charge de climatisation a baissée de 6-49% dans une école maternelle à Athènes et notamment dans le dernier étage. La figure 1-18 illustre deux exemples de photographies prise par thermographie infrarouge sur des bâtiments localisés à Athènes. On y identifie les surfaces végétalisées par leur basse température par rapport à l'environnement proche. Les différences de température entre les variétés d'espèces végétales, le substrat et la toiture gravillonnée y sont mis en évidence.



Date : Juin, 2000 (Niachou et al., 2001)



Date : Décembre, 2002 (Santamouris et al., 2007)

Figure 1-18 : Mesures de thermographie infrarouge réalisées en hiver et en été (Niachou et al., 2001; Santamouris et al., 2007)

D'autre part, la réduction de température de surface du toit peut être réduite d'au moins 30 °C au niveau de la membrane d'étanchéité par l'application de modules de

toitures végétalisées. C'est, du moins, le constat d'une campagne expérimentale qui a eu lieu au Japon en 1991 et dont les résultats ont été publiés dans (Onmura et al., 2001). Ce résultat a été par la suite consolidé par une étude expérimentale réalisée en Estonie entre juin 2004 et avril 2005 et dont les résultats ont été publiés en 2009 par Teemusk et Mander (2009). La figure 1-19 montre que la réduction de la température au cours de la journée est suivie par une température légèrement plus haute durant la nuit (Liu, 2003). Ceci peut être expliqué par le fait que les feuilles limitent les déperditions infrarouges nocturnes de par leur opacité au rayonnement de grandes longueurs d'onde. Le flux traversant la toiture est aussi bien réduit au cours de la journée (gains thermiques) qu'au cours de la nuit (déperditions thermiques). La baisse des gains est cependant plus marquée que la réduction des déperditions. Ceci est dû à l'évapotranspiration et aux effets d'ombrage qui opèrent plus le jour que la nuit. Les couches supplémentaires des modules de végétalisation permettent donc d'atténuer l'amplitude des variations diurnes de la température et du flux dans la partie végétalisée de l'enveloppe du bâtiment. Ceci a pour conséquence la baisse des besoins énergétiques de climatisation en été en plus de l'allongement de la durée de vie des membranes d'étanchéité et la protection de la structure portante du toit.

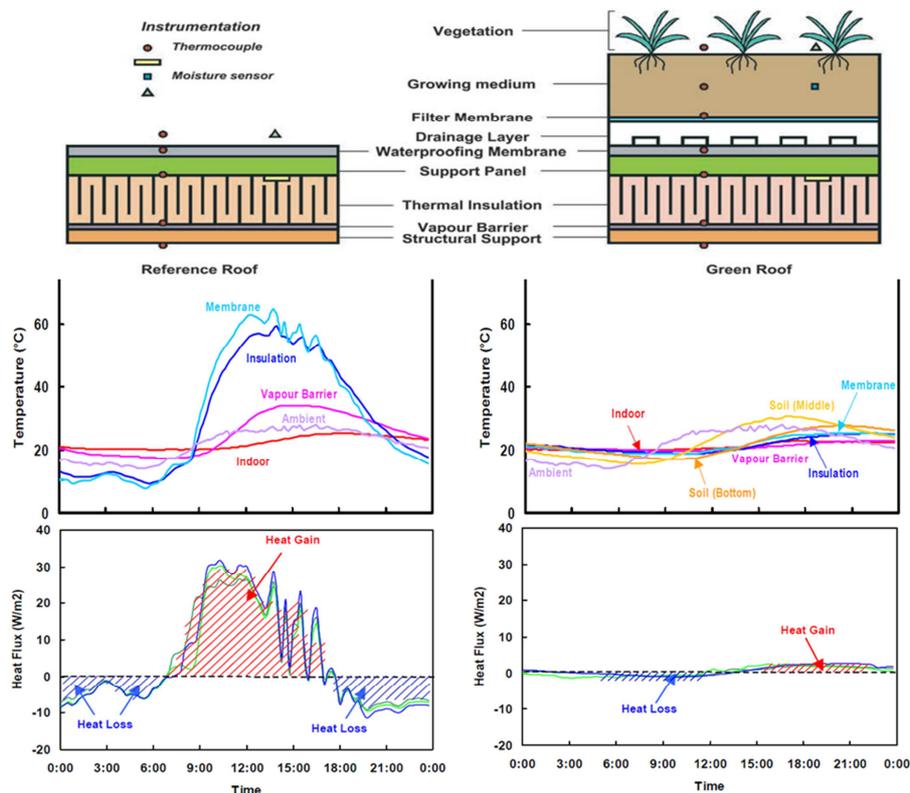


Figure 1-19 : Comparaison des variations du flux thermique et des températures dans une toiture de référence et dans les différentes couches constituantes d'une toiture végétalisée (Liu, 2003)

L'impact de la végétalisation du toit sur les besoins énergétiques et le confort des occupants est moins important lorsque le rapport Toit/Enveloppe est faible. Les simulations numériques présentées dans (Martens et al., 2008) montre que l'effet du

toit vert sur l'ensemble du bâtiment est plutôt faible dans des immeubles multi-étages et qu'il n'est cependant ressenti qu'au dernier étage. Pour de tels bâtiments, la végétalisation des façades conduirait à de plus forts impacts thermiques. D'autant plus que, selon la position géographique et l'orientation, le flux thermique mesuré sur une façade d'un bâtiment peut dépasser le flux thermique mesuré sur son propre toit (Cheng et al., 2010).

4.1.2- Façades végétalisées

Les mécanismes de transfert de masse et de chaleur dans les façades végétalisées sont relativement complexes, ils sont influencés par l'orientation des façades et par à l'environnement urbain. Comparées aux études sur les toitures végétalisées, les investigations expérimentales traitant des façades végétales sont peu nombreuses. Les effets thermiques des plantes grimpantes ont fait l'objet de suivis expérimentaux in-situ sur des bâtiments réels en Grèce. Des mesures de température ont été réalisées sur une paroi orientée vers l'ouest et partiellement recouverte de plantes grimpantes (Tsoumarakis et al., 2008). Elles montrent que la couverture végétale réduit les pics de température. L'expérimentation présentée dans (Eumorfopoulou and Kontoleon, 2009), concerne l'étude d'un bâtiment de cinq étages dont la façade orientée vers l'est des trois premiers niveaux est partiellement recouverte de végétation. La baisse des pics de température enregistrée sur la face extérieure de la façade végétalisée est d'environ 5 °C, tandis qu'une différence d'environ 1 °C est relevée sur la face intérieure. La baisse de l'amplitude des fluctuations est accompagnée par une réduction du flux thermique traversant la paroi végétalisée. En effet, la couche de végétation ombre la façade au cours de la journée et réduit l'éclairement solaire reçu par la paroi considérée. Les déperditions thermiques sont atténuées aussi par cette couche foliaire. Ce dernier effet est mieux perceptible au cours de la nuit où l'échange thermique par rayonnement GLO, qui s'établit entre la paroi et son environnement y compris le ciel, est réduit par les feuilles dont la température avoisine celle de l'air ambiant.

Les murs vivants (avec substrat) présentent des problématiques expérimentales supplémentaires en relation avec le comportement hydrique et thermique du substrat. Une étude expérimentale (Cheng et al., 2010) réalisée à Hong Kong sur un panneau végétalisé composé d'un milieu hydroponique en laine de roche avec plantation de graminées montre que la gravité joue un rôle important sur la distribution verticale de teneur en eau dans le substrat. Ce dernier se retrouve deux fois plus humide en bas qu'en haut des panneaux avec une certaine variabilité sur les valeurs mesurées. L'étude établit, par ailleurs, des corrélations linéaires reliant la différence de température entre le substrat et l'air ambiant aux taux de couverture végétale et la teneur en eau du substrat. Huit systèmes différents de murs végétaux ont fait l'objet d'une investigation expérimentale à Singapore (Wong et al., 2010). En dépit des

mesures comparatives de température de surface présentées pour chaque système, l'étude met l'accent sur l'impact de murs végétaux sur l'environnement proche. En effet, les mesures de température réalisées à différentes distances des murs végétaux montrent le pouvoir rafraichissant mesurable jusqu'à 60 cm de ces systèmes.

Compte tenu du nombre limité d'études expérimentales des impacts thermiques et hygrométriques des parois végétales sur le microclimat environnant, le chapitre 3 présentera l'investigation expérimentale entreprise dans le cadre du projet de recherche VegDUD (Djedjig et al., 2013a, 2013b).

4.2- Bibliographie des modèles de parois végétalisées

La modélisation thermique des parois végétalisées permet le développement d'outils de prévision et d'aide à la décision utiles lors de l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments végétalisés. Les phénomènes de transfert modélisés dépendent des conditions météorologiques et des propriétés thermophysiques des matériaux. Selon le type de paroi végétale utilisée, il s'agit, notamment, des propriétés thermiques et radiatives de la végétation, du substrat de culture et/ou du support de fixation. Certaines propriétés varient en fonction de l'état hydrique qui est tributaire des précipitations et des cycles d'arrosage. Tous ces paramètres sont soumis aux conditions météorologiques propres à l'emplacement géographique considéré. En effet, de par son incorporation d'espèces vivantes, la paroi végétalisée réagit différemment selon les sollicitations météorologiques variables.

Plusieurs travaux traitent de la modélisation d'enveloppes végétales. Il s'agit notamment d'établir un bilan énergétique pour chaque composant de la paroi végétalisée. Celle-ci est souvent décomposée en deux parties : le substrat et la végétation. Les modèles existants diffèrent cependant les uns des autres par l'approche de modélisation et l'importance des hypothèses. Certains considèrent l'air dans la canopée végétale comme une zone thermique à part entière et d'autres l'approchent comme un mélange d'air à proportions constantes aux températures du feuillage, du substrat et de l'air ambiant. Certaines modélisations se focalisent sur la transmittivité solaire du couvert végétal et d'autres la considère complètement opaque. Le tableau 1-3 synthétise les modèles d'enveloppes végétales disponibles dans la littérature, principalement pour des toitures végétalisées.

Tableau 1-3- Principaux modèles d'enveloppes végétalisées

Modèle	Description
(Del Barrio, 1998)	Le modèle décrit le couvert végétal par trois variables : température du feuillage, température et humidité de l'air interfoliaire. La végétation, d'inertie thermique non négligeable, est considérée comme une couche semi-transparente au rayonnement solaire. L'étude paramétrique présentée dans l'article fixe la température et la teneur en eau du substrat
(Stec et al., 2005)	Un modèle nodal pour la simulation de la performance d'un mur trombe contenant de la végétation. Les simulations sont réalisées à l'aide de Simulink TM et les résultats numériques sont comparés à des mesures au laboratoire.
(Alexandri and Jones, 2007)	Le modèle considère que les flux verticaux de chaleur et d'humidité sont proportionnels aux différences verticales de température et d'humidité dans la canopée végétale. Ainsi le couvert végétal dont l'homogénéité spatiale n'est qu'horizontale, est discrétisé selon la verticale. La précipitation et l'irrigation ne sont pas tenues en compte. Le modèle est validé par des mesures expérimentales.
(Frankenstein and Koenig, 2004; D.J. Sailor, 2008)	Le modèle considère le couvert végétal comme une couche complètement opaque au rayonnement et dont l'inertie thermique est négligeable. Les échanges hygrothermiques au niveau du feuillage et du substrat sont exprimés en fonction des leurs différences de température et d'humidité par rapport à l'air dans la canopée végétale. Ce dernier est considéré comme un mélange d'air à proportions constantes aux températures des surfaces d'échange. Le modèle de conduction dans le substrat n'est pas détaillé et son inertie thermique est a priori négligée. Le modèle a été intégré par D.J. Sailor dans EnergyPlus et des résultats numériques ont été comparés à des données expérimentales.
(Feng et al., 2010)	Le modèle établit un bilan énergétique global pour toute la toiture végétale. Le calcul est alimenté par la température du feuillage mesurée à l'aide d'un thermocouple. La photosynthèse n'est pas négligée et compte pour près de 10% de l'énergie solaire absorbée d'après les résultats présentés dans l'article en question.
(He and Jim, 2010)	Développement d'un modèle d'efficacité d'ombrage pour le couvert végétal et son utilisation dans la balance énergétique d'une toiture végétalisée, pour l'analyse des flux, conjointement avec la méthode du rapport de Bowen basée sur des mesures expérimentales réalisées in-situ.
(Ouldboukhitine et al., 2011)	Basé sur (D.J. Sailor, 2008) avec prise en considération des effets de transferts hydrique sur la conductivité thermique du substrat. Le

	modèle néglige l'inertie thermique et corrige, via des données de pesées d'échantillons particuliers, l'équation de Penman Monteith utilisée pour modéliser l'évapotranspiration.
(Tabares-Velasco and Srebric, 2012)	Un modèle stationnaire établi sur la base des observations expérimentales en laboratoire obtenues sur un module de toiture végétalisée. L'article propose certaines nouvelles relations qui pourraient être utilisées dans la modélisation des enveloppes végétalisées
(Djedjig et al., 2012)	Le modèle a été développé dans le cadre du projet ANR-VegDUD. Il considère le couvert végétal comme une couche semi-transparente au rayonnement solaire. L'inertie thermique de l'ensemble de la paroi végétalisée est prise en compte et les transferts de masse et de chaleur sont fortement couplés. L'article présente une validation expérimentale des résultats numérique en termes des évolutions journalières de la température et de la teneur en eau dans le substrat. Le modèle est détaillé dans le chapitre 2.

Afin de mettre en place un outil d'évaluation et d'aide à la décision concernant l'impact de la végétalisation sur la performance énergétique des bâtiments, certains modèles ont été intégrés dans des codes de simulation thermique et dynamique des bâtiments. D.J. Sailor a intégré son modèle dans l'outil de simulation EnergyPlus. Une version de ce modèle a été développée plus tard pour s'intégrer dans TRNSYS (Jaffal et al., 2012). Afin de prendre en compte l'inertie thermique et de mieux décrire les phénomènes de transferts thermohydrauliques couplés des parois végétales, le modèle, développé et validé expérimentalement à l'Université de La Rochelle (Djedjig et al., 2012), et qui sera présenté dans le chapitre 2 a été implémenté dans TRNSYS (Djedjig et al., 2013c) (cf. Chapitre 4). Ces outils permettent d'évaluer l'incidence de la végétalisation sur les besoins énergétiques de chauffage et de climatisation indépendamment des conditions microclimatiques de l'environnement urbain. Pourtant, dans certaines villes denses, le confinement aéraulique des rues et le piégeage radiatif, en plus des sources thermiques anthropiques, rendent l'utilisation de données météorologiques standards pour simuler les sollicitations externes du bâtiment, peu précise. En effet, le revêtement des surfaces extérieures des bâtiments influence le microclimat de l'environnement proche, notamment, les espaces confinés tels que les rues canyons. Inversement, le changement microclimatique impacte les besoins énergétiques des bâtiments. Par conséquent, le couplage des modèles thermiques du bâtiment à des modèles d'environnements microclimatiques est nécessaire. Alexandri et Jones (2008) utilisent le modèle décrit dans le tableau ci-dessus, pour simuler l'impact thermique de la végétalisation des trois facettes d'une rue canyon. Le modèle a été mis en œuvre conjointement avec ECOTECH pour les calculs radiatifs et un code CFD (WinAir4) pour la simulation du transport

aéroulque. Une étude paramétrique faisant varier l'emplacement géographique, le rapport d'aspect et l'orientation de la rue ainsi que la direction du vent a été effectuée. Il a été conclu que les climats chauds et secs favorisent un plus grand rafraîchissement estival de l'environnement confiné. Une ville comme Riyad est susceptible d'avoir une réduction moyenne de température de $9,1^{\circ}\text{C}$ d'après les résultats présentés (Alexandri and Jones, 2008). Dans le cadre du travail actuel, le modèle de Harman et al. (2004) a été utilisé pour simuler le transport aéroulque à l'échelle d'une rue canyon. Son couplage, dans TRNSYS, aux modèles de bâtiment et de parois végétales fera l'objet de la deuxième partie du chapitre 4.

5- Conclusions

Les études expérimentales et les modèles de parois végétalisées disponible dans la littérature attestent des effets thermiques positifs sur les bâtiments notamment en périodes estivales. Les modèles disponibles sont plus ou moins raffinés et reposent tous sur des hypothèses plus ou moins fortes. Les modèles qui décrivent le mieux les phénomènes de transfert thermiques dans le feuillage et dans le substrat négligent le couplage entre les transferts thermiques et hydriques au sein de la paroi végétale. L'évapotranspiration qui impact fortement la température de surface dépend directement de l'état hydriques du substrat de culture. Les propriétés thermophysiques du substrat dépendent aussi de l'état hydrique. Par ailleurs, La prise en compte de l'inertie thermique du substrat dans les simulations où les modèles de parois végétales sont couplés aux bâtiments est nécessaire.

Le chapitre suivant, présente le développement d'un nouveau modèle thermohydrique permettant de s'affranchir de certaines hypothèses introduites dans les modèles revus dans cette bibliographie. En outre, très peu d'études s'intéressent à l'incidence thermique de la végétalisation sur les bâtiments en interaction avec le microclimat urbain environnant. Les chapitres 3 et 4 sont dédiés à la modélisation expérimentale et théorique de l'incidence des toitures et des façades végétales en interaction microclimatique.

Chapitre 2

Modélisation des transferts thermohydriques dans les parois végétales

1- Introduction

La modélisation des transferts hygrothermiques et hydriques dans les toitures et les façades végétalisées nécessite la prise en considération de tous les paramètres structuraux, physiques, biologiques et ambiants qui influent de près ou de loin sur le comportement thermique de l'enveloppe végétalisée. Dans un premier temps, ce chapitre aborde les phénomènes de transferts d'énergie et de masse dans les canopées végétales. Ceci afin d'exposer les fondements théoriques des formulations mathématiques utilisées dans la modélisation et de bien assimiler les hypothèses qui en découlent. Dans un second temps, le développement d'un modèle de transferts couplés de masse et de chaleur au sein des éléments d'enveloppes végétalisées est présenté. La résolution numérique des équations de bilan établies, permet la validation du modèle développé à travers des comparaisons aux mesures collectées sur la maquette expérimentale présentée au chapitre 3. Enfin, une étude paramétrique est conduite dans le but d'analyser la sensibilité du modèle aux variations de certains paramètres physiques.

2- Phénomènes de transfert dans les canopées végétales

Cette partie traite certains aspects liés au transfert de masse et de chaleur dans les canopées végétales. Tout d'abord, les propriétés des sols insaturés sont définies pour introduire la modélisation du transfert hydrique dans la zone racinaire. En effet, la disponibilité en eau dans cette zone superficielle impacte directement l'évaporation de l'eau et la transpiration végétale. Ensuite, les propriétés radiatives des feuilles sont présentées pour établir subséquemment le bilan radiatif d'un couvert végétal. Ensuite, les flux thermiques sensibles et latent sont décrits par une analogie électrique modélisant le transport aéraulique. Les résistances thermiques obtenues sont modélisées en fonction des variables météorologiques et de l'état hydrique du sol pour décrire le transfert de chaleur et de vapeur depuis les feuilles vers l'atmosphère. Enfin, l'établissement du bilan énergétique d'une canopée végétale permet de remonter à l'évapotranspiration potentielle donnée par l'équation de Penman-Monteith.

2.1- Transfert hydrique dans les sols non saturés

Le substrat de culture est un milieu poreux composé de trois phases : solide, liquide et gazeuse. La phase composée de matières minérales et organiques, forme la matrice solide. Son complément géométrique est l'espace poreux. Ce dernier est occupé par l'eau qui représente la phase liquide et par l'air qui représente la phase gazeuse. Une représentation schématique des trois phases est illustrée par la figure 2-1.

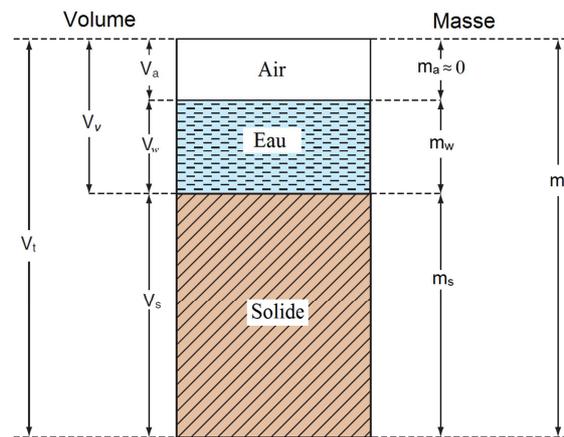


Figure 2-1 : Représentation schématique des trois phases des milieux de culture

À droite de cette figure sont représentées les masses des trois phases : la masse du solide (m_s), la masse de l'eau (m_w) et la masse de l'air (m_a) qui est négligeable devant la masse des deux autres phases. À gauche de la figure sont représentés les volumes : le volume de la matrice solide (V_s), le volume occupé par l'eau (V_w) et le volume de

l'air (V_a). Les masses et les volumes de chacun de ces constituants sont comparés à la masse totale (m_t) et au volume total (V_t).

La figure 2-1 permet de définir les paramètres de base qui caractérisent le milieu poreux et son état hydrique. Ainsi, on distingue la masse volumique de la matrice solide ($\rho_s = m_s/V_s$), la masse volumique apparente à sec ($\rho_0 = m_s/V_t$) et la masse volumique apparente ($\rho = m_t/V_t$). De même, la porosité du milieu est définie par le rapport du volume occupé par les fluides au volume total ($\epsilon = V_v/V_t$). L'état hydrique, donné par la teneur en eau du substrat, est une caractéristique physique déterminante dans le comportement thermique des enveloppes végétales. La teneur en eau peut être exprimée de différentes manières : par le rapport de la masse d'eau à la masse du solide (la teneur en eau massique $w = m_w/m_s$), par le rapport du volume d'eau liquide au volume total (la teneur en eau volumique $\theta = V_w/V_t$). Par ailleurs, le degré de saturation est défini par le rapport du volume d'eau au volume des pores ($S_r = V_w/V_v$).

Dans la suite du document, la teneur en eau est exprimée en termes du rapport de la masse d'eau au volume total et est notée (ω) [$\text{kg}_{\text{eau}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{substrat}}$]:

$$\omega = \frac{m_w}{V_t} = \rho_w \theta \quad (2-1)$$

Avec $\rho_w = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ la masse volumique de l'eau supposée constante.

On définit et note (ω^{max}) la teneur en eau correspondant à la capacité de rétention. Il s'agit de la teneur en eau maximale que le substrat peut contenir avant écoulement sous l'action de la gravité en partant d'une teneur en eau à saturation ($\omega^{sat} > \omega^{max}$). On parle de « capacité de rétention au champ » qui dépend essentiellement de la granulométrie du sol.

Les forces capillaires qui retiennent l'eau sont d'autant plus importantes que l'humidité du sol est faible. La teneur en eau au « point de flétrissement permanent » est notée (ω^{min}). Elle correspond à la teneur en eau minimale du sol à partir de laquelle la plante ne peut plus prélever d'eau. Si ce taux d'humidité perdure, la plante flétrit puis meurt. La quantité d'eau que le sol peut absorber et restituer à la plante, i.e. la différence entre la teneur en eau à la capacité au champ et la teneur en eau au point de flétrissement permanent, est appelée « réserve utile en eau ».

L'écoulement d'eau dans les sols non saturés est décrit par l'équation de Richards (1931) qui est la combinaison de l'équation de continuité et de la loi de Darcy. Pour un écoulement unidimensionnel selon (z), l'équation s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K \left(\frac{\partial \psi_m}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (2-2)$$

Avec (K) [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] la conductivité hydraulique et (ψ_m) [m] le potentiel hydrique matriciel du sol considéré. Ces deux propriétés dépendent fortement de la teneur en eau volumique (θ). Le plus simple modèle pour décrire cette dépendance est celui de Brooks et Corey (Brooks and Corey, 1964) donné par les relations suivantes :

$$K(\theta) = K_{sat} \left(\frac{\theta}{\theta_{sat}} \right)^\eta \quad \text{et} \quad \psi_m(\theta) = \psi_e \left(\frac{\theta}{\theta_{sat}} \right)^{-b} \quad (2-3)$$

Où (K_{sat}) [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] et (θ_{sat}) sont la conductivité hydraulique et la teneur en eau volumique à saturation, (ψ_e) est le potentiel au point d'entrée d'air, (b) et (η) sont des exposants qui dépendent du type de sol.

La forte dépendance de la conductivité hydraulique et du potentiel hydrique en fonction de la teneur en eau volumique rend cette équation fortement non linéaire. L'équation de Richards est souvent utilisée dans la modélisation du transfert de l'eau dans de la zone vadose située au-dessus d'une nappe phréatique. Lorsque l'on s'intéresse à une couche relativement fine d'un substrat, par exemple celle d'une toiture végétale extensive, un bilan hydrique global modélisant les variations de la teneur en eau moyenne du substrat peut suffire à condition que les flux massiques soient directement corrélés avec la teneur en eau moyenne.

Le bilan hydrique de la zone racinaire d'un sol végétalisé donne la variation au cours du temps de la teneur en eau moyenne dans cette zone :

$$\rho_w h_g \frac{d\theta_g}{dt} = h_g \frac{d\omega_g}{dt} = J_{w,i} - J_{w,o} - E \quad (2-4)$$

Avec (h_g) [m] la profondeur de la zone racinaire ; (θ_g) la teneur en eau volumique moyenne dans la zone racinaire ; ($J_{w,i}$), ($J_{w,o}$) et (E) (tous en [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]) sont respectivement le flux massique d'infiltration à la surface, le flux massique quittant la zone racinaire et le flux massique de l'évapotranspiration. Le flux massique d'infiltration est déterminé par les flux de précipitations (P) et du ruissellement (RU) : $J_{w,i} = P - RU$. Le flux ($J_{w,o}$) est la résultante des phénomènes de percolation (D) et de remontée capillaire (C) : $J_{w,o} = D - C$ (cf. Figure 2-2).

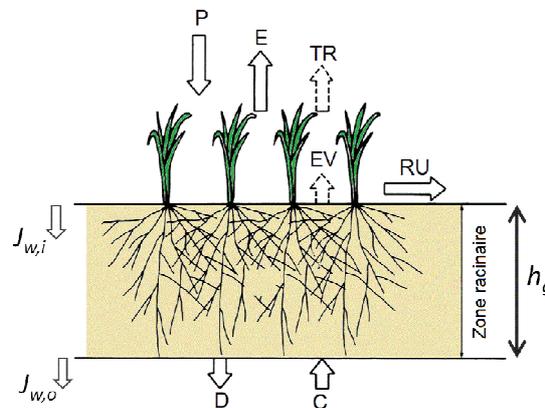


Figure 2-2 : Bilan hydrique de la zone racinaire (d'après Miyazaki (2006))

L'infiltration ($J_{w,i}$) et le ruissellement (RU) sont influencés par la végétation. La chute des gouttes de pluie directement sur un sol nu change la structure du sol à la surface en réduisant la taille des agrégats. Ceci augmente le ruissellement et réduit l'infiltration. Au contraire, un sol végétalisé est protégé car la végétation réduit l'énergie des gouttes de pluie ce qui maintient la porosité du sol et favorise l'infiltration. L'évapotranspiration (E) est composée de la transpiration des plantes (TR) et de l'évaporation directe (EV). Le taux d'évapotranspiration théorique potentiel est calculé en fonction des conditions météorologiques à l'aide la formule de Penman-Monteith présentée en page 75. La remontée capillaire d'eau (C) des zones profondes augmente avec la diminution de l'eau contenue dans la zone racinaire. Le rôle de ce flux est crucial pour la survie des plantes en périodes de sécheresse sévère. Dans ces conditions, la zone profonde constitue un réservoir qui continue d'assurer l'alimentation des plantes en eau. Contrairement aux sols naturels, le substrat des modules de végétalisation utilisés dans le bâtiment sont de faibles épaisseurs et leur réserve utile en eau est rapidement épuisée durant les périodes de l'année où les précipitations sont rares et le climat est chaud. La percolation (D) se produit lorsque l'infiltration dépasse la capacité de rétention au champ de la zone racinaire. La percolation se produit rapidement après de fortes précipitations et la perte d'eau dans la zone racinaire par évapotranspiration devient alors prépondérante.

2.2- Transferts thermiques et radiatifs dans les couverts végétaux

2.2.1- Transferts radiatifs dans les couverts végétaux

Le rayonnement solaire apporte l'énergie nécessaire pour le développement de la vie sur la terre. L'activité bioénergétique liée à la structure et à la composition chimique des feuilles confère aux canopées végétales des propriétés radiatives à caractère spectral. Les plantes absorbent une partie de l'éclairement solaire appelée rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) pour l'utiliser dans la synthèse de la matière organique. Le rayonnement photosynthétiquement actif se situe dans la gamme du rayonnement visible et s'étend de 400 à 700 nm.

La figure 2-3 montre l'évolution typique des propriétés radiatives des feuilles dans la gamme des courtes longueurs d'ondes.

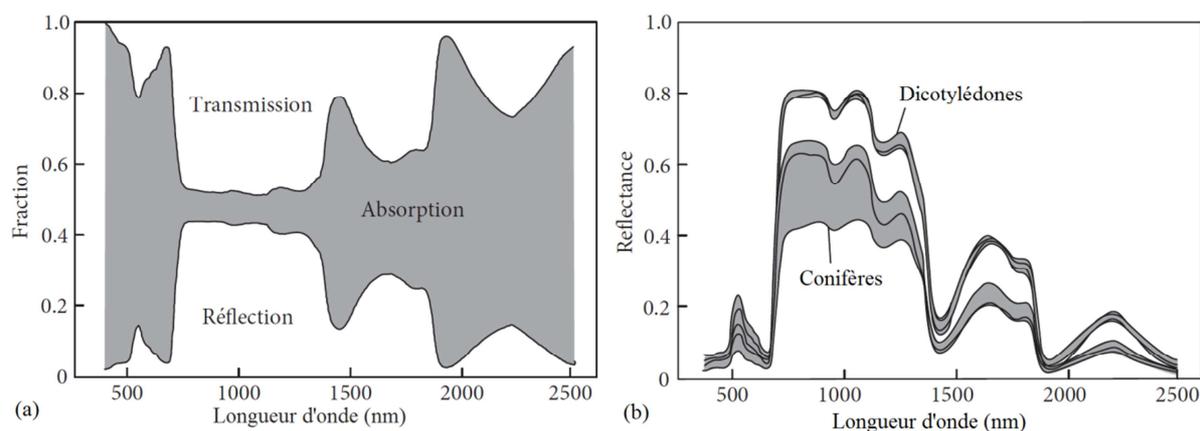


Figure 2-3 : (a) Variations typiques de l'absorptivité, de la transmissivité et de la réflectivité spectrale des feuilles illustrées pour une feuille de vigne ; (b) Gamme de variation de la réflectivité spectrale pour les dicotylédones (laitue, pomme de terre, tulipier et vigne) et les aiguilles de conifères (pin tordu, pin d'orégon et épinette de Sitka) (Source : Jones and Vaughan (2010))

La composition chimique des feuilles est le facteur déterminant dans la gamme du rayonnement visible. Les pigments photosynthétiques sont les composés chimiques responsables de la transformation de l'énergie lumineuse en énergie chimique. La prépondérance des chlorophylles dans les feuilles vertes explique la faible absorption du spectre vert. Dans l'intervalle 700-1100 nm, l'absorption est faible. Elle n'est engendrée que par la structure cellulaire et les autres composés chimiques de la feuille. Dans cette gamme de longueurs d'ondes la transmission et la réflexion sont plus importantes. Au-delà de 1100 nm, la contribution de l'eau dans l'absorption du rayonnement devient significative et le coefficient d'absorption redevient plus important.

En plus des propriétés foliaires, les propriétés radiatives des canopées végétales dépendent de la structure des plantes définie par la disposition spatiale des feuilles et par la densité du couvert végétal. Les coefficients d'absorption et de transmission solaires des canopées végétales dépendent de l'indice de surface foliaire (F). Il s'agit d'une grandeur sans dimension, qui représente la surface foliaire d'un peuplement végétal. L'indice de surface foliaire se définit comme étant la moitié de la surface totale des feuilles (les deux côtés de la feuille), par unité de surface au sol. Une approche simple pour modéliser l'absorption de la canopée végétal consiste à supposer un milieu homogène où le rayonnement est absorbé et non pas diffusé. Ainsi, la loi de Beer-Lambert peut décrire l'atténuation exponentielle du rayonnement traversant la canopée végétale (Monteith and Unsworth, 2008). Dans ce cas, le coefficient d'extinction dépend des propriétés radiatives des feuilles et de leur inclinaison moyenne. L'inclinaison moyenne des feuilles intervient car elle détermine la profondeur jusqu'où le rayonnement solaire direct (d'angle zénithal β) pénètre dans la canopée sans être interceptés.

$$\tau = \exp[-\mu(\beta).F] \quad (2-5)$$

Avec (τ) la transmissivité de la canopée végétale, (μ) le coefficient d'extinction correspondant à l'angle zénithal solaire (β) et (F) l'indice de surface foliaire.

2.2.2- Transferts convectifs sensible et latent dans les couverts végétaux

Analogie électrique des échanges convectifs

Considérons un écoulement d'air au-dessus d'une surface humide horizontale. La loi de Fourier permet d'exprimer le flux thermique sensible à la surface car la vitesse de l'air s'y annule. Le flux sensible (H) $[W.m^{-2}]$ est proportionnel au gradient vertical de la température d'air (T_a) au niveau de la surface :

$$H = -k_a \left. \frac{\partial T_a}{\partial z} \right|_s = -\rho_a c_{p,a} D_T \left. \frac{\partial T_a}{\partial z} \right|_s \quad (2-6)$$

Avec (k_a) $[W.m^{-1}.K^{-1}]$, (ρ_a) $[kg.m^{-3}]$ et $(c_{p,a})$ $[J.kg^{-1}.K^{-1}]$ sont respectivement la conductivité thermique, la masse volumique et la capacité thermique spécifique à pression constante de l'air humide. Cette équation est réécrite sous une forme faisant apparaître la diffusivité thermique de l'air (D_T) $[m^2.s^{-1}]$.

De même, le flux massique d'évaporation est donné par la loi de Fick :

$$E = -D_v \left. \frac{\partial \rho_v}{\partial z} \right|_s \quad (2-7)$$

Avec (E) $[kg_{vap}.m^{-2}.s^{-1}]$ le flux massique d'évaporation, (ρ_v) $[kg_{vap}.m^{-3}]$ la masse volumique de vapeur et (D_v) $[m^2.s^{-1}]$ le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air. L'avantage d'exprimer les deux flux dans la même forme est de faciliter les manipulations mathématiques en utilisant deux coefficients de diffusion de même unité $[m^2.s^{-1}]$. En effet, il existe une similitude entre les deux phénomènes de transport.

En sciences environnementales et biophysiques, il est possible de spécifier les températures et les concentrations dans les organismes et dans l'environnement proche. Cependant il est trop complexe de mesurer les gradients locaux à petite échelle. Dans un écoulement aérodynamique au-dessus d'une surface plane horizontale, des couches limites aérodynamique et thermique se forment. Ces couches limites ont des épaisseurs finies auxquelles sont associés les gradients de température et d'humidité dans l'air. Ces couches limites peuvent donc être représentées par des résistances au transport de la chaleur et de la vapeur depuis la surface d'échange vers l'écoulement loin de la surface. Il convient donc d'utiliser une analogie électrique pour modéliser les phénomènes de transfert.

La loi d'Ohm stipule que le courant électrique est proportionnel à la différence de tension et inversement proportionnel à la résistance du conducteur. Cette loi

s'applique à tout le système et non pas à travers un incrément infinitésimal comme pour les équations (2-6) et (2-7). La résistance ou la conductance d'un système dépend du phénomène considéré et des propriétés des matériaux. Par analogie avec la loi d'Ohm, le flux thermique (H) et le flux massique (E) sont exprimés par les équations (2-8) et (2-9). Les températures et les concentrations de vapeur sont spécifiées à la surface et dans l'air ambiant. Les résistances au transfert de chaleur et de masse (r_a) et (r_v), ou les conductances (g_a) et (g_v), sont formées par la couche limite aéraulique. Leur unité est analogue à l'inverse d'une vitesse [s.m⁻¹].

$$H = \rho_a c_{p,a} g_a (T_s - T_a) = \frac{\rho_a c_{p,a}}{r_a} (T_s - T_a) \quad (2-8)$$

$$E = g_v (\rho_{v_s} - \rho_{v_a}) = \frac{1}{r_v} (\rho_{v_s} - \rho_{v_a}) \quad (2-9)$$

L'hypothèse d'un mélange idéal de gaz parfaits, permet d'écrire pour la vapeur d'eau et pour l'air les relations suivantes :

$$p_v = \rho_v \frac{R}{M_v} T \quad \text{et} \quad p_a = \rho_a \frac{R}{M_a} T \quad (2-10)$$

Avec (p_v) [Pa] la pression de vapeur partielle, (p_a) [Pa] la pression atmosphérique, (T) la température, (M_v) la masse molaire de la vapeur d'eau, (M_a) masse molaire de l'air et (R) la constante des gaz parfaits. En exprimant ces relations pour l'air ambiant et pour la surface d'échange puis en introduisant la chaleur latente de vaporisation et la capacité thermique spécifique, l'équation (2-9) se met sous la forme :

$$\lambda E = \rho_a c_{p,a} \times \left(\frac{c_{p,a} p_a}{\lambda \left(\frac{M_v}{M_a} \right)} \right)^{-1} \times g_v (p_{v_s} - p_{v_a}) \quad (2-11)$$

Le rapport $\frac{c_{p,a} p_a}{\lambda \left(\frac{M_v}{M_a} \right)}$ est appelé constante psychrométrique et est noté (γ) [Pa.K⁻¹].

Le flux latent (L) se réduit à l'expression suivante :

$$L = \lambda E = \frac{\rho_a c_{p,a}}{\gamma r_v} (p_{v_s} - p_{v_a}) \quad (2-12)$$

Dans le cas d'un écoulement d'air induit par le vent au-dessus d'une canopée végétale, le transport turbulent de chaleur et de vapeur est purement convectif. Dans ce cas de figure, les profils de température et de concentrations coïncident et le nombre de Lewis défini par l'équation (2-13) est égal à 1 (Del Barrio, 1998; Kloppers and Kröger, 2005).

$$Le = \frac{Sc}{Pr} = \frac{D_T}{D_v} = \frac{g_T}{g_a} = \frac{r_v}{r_a} = 1 \quad (2-13)$$

Avec (Sc) le nombre de Schmidt, le rapport entre la diffusivité cinématique et la diffusivité massique, et (Pr) le nombre de Prandtl, le rapport entre la diffusivité cinématique et la diffusivité thermique.

On pourra donc supposer que les résistances convectives au transfert sensible et latent sont égales ($r_v = r_a$).

Résistance aérodynamique

La formulation des flux thermiques sensibles et latents par l'analogie électrique nécessite la détermination de la résistance aérodynamique (r_a) et de la résistance au transfert de la vapeur contenue dans les feuilles.

La résistance aérodynamique (r_a) est déduite à partir des profils des couches limites aérodynamique et thermiques formées par l'écoulement aéraulique sur le couvert végétal en présence d'un gradient thermique. Les climatologues utilisent souvent un modèle logarithmique semi-empirique pour décrire la variation de la vitesse du vent au-dessus d'une surface plane rugueuse (Gosse, 1971). Ce modèle est utilisé aussi bien pour les canopées urbaines que pour les canopées forestières et végétales (de moindre rugosité). Il s'agit du modèle évoqué dans le chapitre 1 (page 47) dans lequel la vitesse (u) [$m.s^{-1}$], à la distance (z) [m] de la surface, est exprimée en fonction de la vitesse de friction (u_*) [$m.s^{-1}$], de la constante de Van Karman (κ), de la longueur de rugosité (z_{0m}) [m], de la hauteur de déplacement (d_0) [m] et d'une fonction adimensionnelle (Ψ_M) tenant compte du changement du profil en fonction du paramètre de stabilité (ζ) (Cermak, 1995; Yasuda, 1988):

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z - d_0}{z_{0m}} + \Psi_M(\zeta) \right) \quad (1-3)$$

Pour les canopées végétales uniformes, la hauteur de déplacement (d_0) et la longueur de rugosité (z_{0m}) peuvent être approximés connaissant uniquement la hauteur de la canopée à l'aide de corrélations empiriques (Kustas et al., 1989; Stearns, 1970).

Le profil de température dans la couche limite thermique peut être décrit par un modèle similaire faisant intervenir le flux de chaleur sensible (H) (Campbell and Norman, 1998b) :

$$T(z) = T(d + z_{0H}) - \frac{H}{\kappa \rho c_p u_*} \ln \left(\frac{z - d_0}{z_{0H}} + \Psi_H \right) \quad (2-14)$$

Avec (z_{0H}) [m] et (Ψ_H) la longueur de rugosité et le facteur de correction de stabilité pour la chaleur.

En rapportant dans l'équation (2-14) la vitesse de friction (u_*) exprimée à partir de l'équation (1-3) et la différence de température exprimée à partir de l'équation (2-8),

la résistance aérodynamique au transfert de chaleur sensible peut être exprimée par l'équation suivante :

$$r_a = \frac{\left[\ln\left(\frac{z-d_0}{z_{0m}}\right) + \Psi_m \right] \left[\ln\left(\frac{z-d_0}{z_{0H}}\right) + \Psi_H \right]}{\kappa^2 u(z)} \quad (2-15)$$

L'équation (1-3) est valable uniquement au-dessus de la canopée pour $z \geq d_0 + z_{0m}$. Sous la canopée, la vitesse du vent subit une décroissance exponentielle. Afin de modéliser cette décroissance de vitesse, la canopée végétale est divisée en deux parties. Le profil du vent moyen dans la partie supérieure qui constitue 90 % de la canopée est donné par l'équation suivante (Campbell and Norman, 1998c) :

$$u(z) = u(h_c) \exp\left[a \left(\frac{z}{h_c} - 1 \right) \right] \quad (2-16)$$

Avec (h_c) [m] la hauteur de la canopée végétale et (a) un coefficient d'atténuation propre à la canopée végétale considérée. La vitesse $u(h_c)$ en haut de la canopée végétale est égale à la vitesse calculée par l'équation (1-3) pour la hauteur (h_c). Dans cette partie de la canopée, la résistance thermique prend une autre forme que celle présentée pour le profil logarithmique de température. Cette forme sera présentée et utilisée dans la seconde partie de ce chapitre.

Résistance stomatique

Le transfert de la vapeur d'eau depuis le tissu foliaire s'établit à travers deux résistances en série : la résistance aérodynamique, à travers la couche limite aéraulique et la résistance stomatique qui s'oppose à la transpiration végétale.

Les régulations physiologiques qui permettent aux plantes de s'adapter à une alimentation en eau déficitaire s'opèrent dès qu'un déficit hydrique apparaît. La plante ajuste rapidement et de façon réversible les flux d'eau qui la traversent par la fermeture des stomates. Les stomates sont des orifices de petite taille que l'épiderme des organes aériens des végétaux comporte. Ils se trouvent le plus souvent sur la face inférieure des feuilles (cf. Figure 2-4). Dans les situations de sécheresse longue et sévère, la fermeture des stomates peut devenir complète.

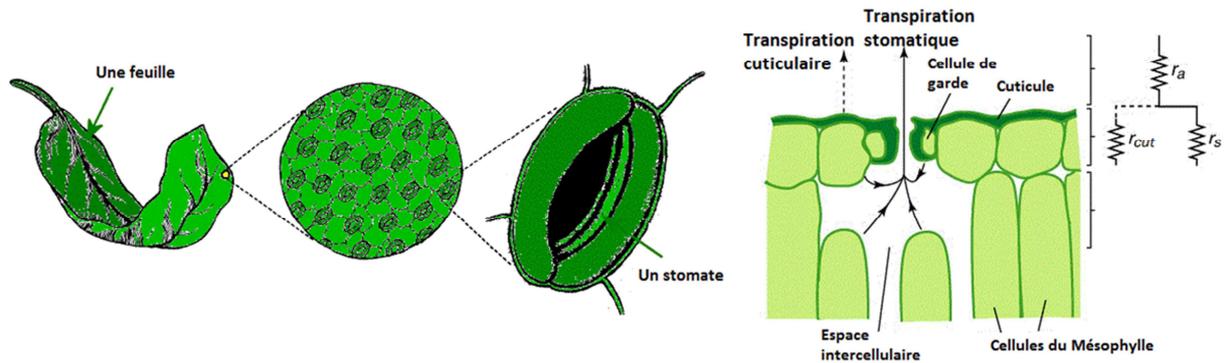


Figure 2-4 : Stomates et transpiration stomatique
(source : soutien67.free.fr et John A. Dutton e-Education Institute)

La transpiration des plantes est gouvernée par la taille de l'ouverture des stomates. Leur ouverture ou fermeture modifie la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau. La diffusion de la vapeur d'eau est induite par le déficit de pression de vapeur entre l'atmosphère et les espaces intercellulaires saturés en eau. La résistance stomatique d'une feuille est égale à la résistance stomatique équivalente des milliers de stomates qu'elle contient. Plus généralement, le calcul de la résistance stomatique d'une canopée végétale tient compte de l'indice de surface foliaire (F). Pour la plupart des feuilles de plantes (sauf pour les plantes CAM à métabolisme acide crassulacéen), la résistance stomatique est fonction de plusieurs variables, équation (2-17):

- L'éclairement solaire (I_s) de la surface végétale en [W.m^{-2}]
- L'état hydrique donné par la teneur en eau du sol (ω_g)
- Le déficit de pression de vapeur de l'air par rapport aux cellules des feuilles ($p_{v_{f,sat}} - p_{v_a}$) [Pa]
- La température des feuilles (T_f) en [K]
- La concentration ambiante en dioxyde de carbone (CO_2)

Les formules disponibles dans la littérature pour le calcul de la résistance stomatique sont presque aussi nombreuses que les chercheurs qui les proposent. Jarvis (1976) fût parmi les premiers auteurs à proposer la forme de l'équation (2-17) pour la modélisation des variations diurnes de la résistance stomatique. Les fonctions ($f_i, i=1,5$) sont comprises entre 1 et l'infini et constituent des facteurs multiplicateurs de la résistance stomatique minimale ($r_{s,min}$). Cette résistance minimale est la résistance stomatique que présente la feuille pour la capacité maximale en eau dans le substrat, pour l'éclairement maximale et quand l'effet du déficit de pression de vapeur est négligeable.

$$r_s = \frac{r_{s,min}}{F} f_1(I_s) f_2(T_f) f_3(\omega) f_4(p_{v_{f,sat}} - p_{v_a}) f_5(\text{CO}_2) \quad (2-17)$$

Les valeurs de la résistance stomatique minimale ($r_{s,min}$) varient considérablement selon le type de végétation. Par exemple, elle est de l'ordre de 25-50 s.m^{-1} pour les

cultures de maïs et de soja et de l'ordre de 200-300 s.m⁻¹ pour des arbres divers (Körner, 1994).

Les facteurs les plus déterminants sont l'éclairement solaire (I_s) ou plus précisément le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) et l'état hydrique des feuilles et de la zone racinaire du substrat. La résistance stomatique varie aussi en fonction de la température et de l'humidité. Cependant, dans des conditions météorologiques ordinaires l'effet de ces deux facteurs est moins important. À noter que seuls des conditions climatiques permettant la survie des plantes sont considérées. La concentration du CO₂ dans l'air varie de moins de 10% et son effet peut à priori être négligé dans l'étude des phénomènes thermiques auxquels le présent chapitre porte intérêt. La figure 2-5 illustre la variation typique des principaux facteurs de l'équation (2-17) corrélés en fonction des variables environnementales correspondantes (Stanghellini and de Jong, 1995).

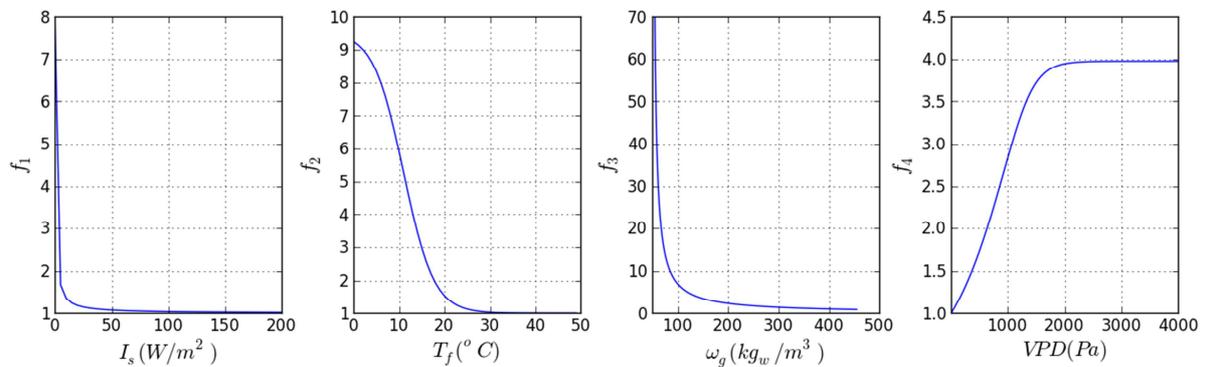


Figure 2-5 : Facteurs de l'équation (2-17) avec lesquels la résistance stomatique minimale est multipliée en fonction de l'éclairement solaire, de la température de la feuille, de la teneur en eau de la zone racinaire et du déficit de pression de vapeur

2.3- Bilan énergétique d'une canopée végétale

2.3.1- Bilan énergétique

L'analyse des systèmes biophysiques et de leurs interactions avec l'environnement repose sur le principe de conservation de la masse et de l'énergie. L'établissement d'un bilan énergétique nécessite la comptabilisation des énergies reçues, cédées et stockées par le système considéré. L'équation suivante établit le bilan des flux thermiques d'une surface végétale exprimés en [W.m⁻²] :

$$Rn + M - H - \lambda E = G \quad (2-18)$$

Dans cette équation, les échanges radiatifs de courtes de grandes longueurs d'ondes sont pris en compte dans le terme (Rn) qui représente le rayonnement net absorbé par la surface végétale. L'apport énergétique du métabolisme et l'absorption de l'énergie pour la photosynthèse sont pris en compte dans le terme (M). (H) représente la dissipation thermique par flux sensible due à une différence de température. Le

terme (λE) représente la dissipation thermique par flux latent (E [$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$] est le taux massique d'évapotranspiration et λ [J.kg^{-1}] et la chaleur latente de vaporisation). Enfin, le terme (G) représente le stockage thermique par la végétation et par le sol. Les processus liés aux effets thermiques des microorganismes du sol et au métabolisme des plantes (M) sont moins importants et peuvent être négligés¹. En effet, l'énergie liée à la photosynthèse et au métabolisme ne représente qu'environ 1 % de l'éclairement solaire sur les feuilles (Nobel, 2005a). De même, l'utilisation de la méthode du gradient nul montre que la constante de temps des feuilles n'est que de quelques secondes (Nobel, 2005b). Or, l'échelle temporelle des variations des conditions météorologiques est plutôt de l'ordre de l'heure. Le stockage thermique des feuilles est donc très faible et l'inertie thermique foliaire peut être négligée. Toutefois, l'inertie thermique du sol et des parties massives de la végétation telles que les troncs d'arbre doivent être prises en compte.

L'équation (2-18) exprime le principe de conservation de l'énergie. Son utilisation permet de remonter aux flux thermiques et massiques. Typiquement, elle permet le calcul du taux d'évaporation E par la mesure des flux Rn , H et G ou la détermination de la température de surface pour des conditions météorologiques données.

2.3.2- Évapotranspiration : formule de Penman-Monteith

L'évapotranspiration est le phénomène de l'évaporation d'eau contenue dans un sol recouvert de végétation. L'eau évaporée dans l'air provient soit directement du sol, soit des stomates de la végétation. Dans le premier cas, on parle d'évaporation directe. Dans le second, on parle de transpiration des plantes. L'évaporation directe se produit essentiellement dans une zone de faible épaisseur située immédiatement sous la surface du sol, où l'apport énergétique nécessaire à la vaporisation de l'eau est suffisant. Tandis que la transpiration végétale a lieu au niveau des stomates et met en jeu l'eau absorbée par le système racinaire.

Il est possible d'estimer le taux de l'évapotranspiration dans des conditions météorologiques données. Le calcul utilise l'équation de Penman-Monteith établie ci-après. L'intérêt de cette équation découle d'une approximation qui permet d'estimer le flux latent sans avoir besoin de connaître la température de surface (T_s) des équations (2-8) et (2-12).

La validité de la formule de Penman-Monteith repose sur quelques hypothèses (Vinet, 2000) :

- La surface est saturée en eau (donc $p_v = p_{v,sat}$)
- L'énergie est absorbée au niveau de la surface

¹ D'après Feng et al. (2010), l'énergie liée à la photosynthèse peut représenter jusqu'à 10 %. Cependant, la mesure intrusive de la température des feuilles remet en cause ces estimations.

- La surface est plane, homogène et continue
- La surface est de grande étendue pour que les apports latéraux d'énergie soient négligeables
- Le régime est permanent

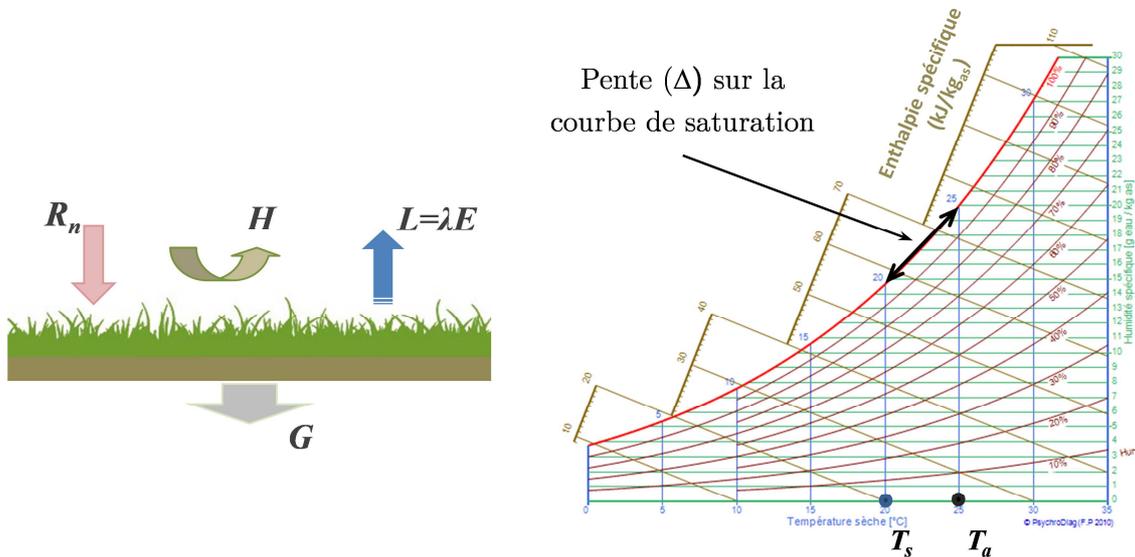


Figure 2-6 Termes du bilan énergétique d'une canopée végétale et diagramme de l'air humide

Pour établir la formule de Penman-Monteith, considérons une surface enherbée saturée en eau (cf. Figure 2-6). Le flux latent est donné par l'équation (2-12) où la pression de vapeur à la surface considérée est égale la pression de vapeur saturante à la température de surface :

$$\lambda E = \frac{\rho_a c_{p,a}}{\gamma r_v} (p_{v_{s,sat}} - p_{v_a}) \quad (2-19)$$

La pression de vapeur saturante ($p_{v_{s,sat}}$) ne peut pas être calculée directement car la température de surface (T_s) n'est pas connue. Néanmoins, elle peut être approchée en approximant la pente moyenne (Δ) de la courbe de saturation entre (T_a) et (T_s) par la pente locale à la température de l'air (T_a) (cf. Figure 2-6). Cette approximation permet d'écrire la relation suivante à la pression atmosphérique (Snyder and Paw, 2002) :

$$\Delta = \frac{p_{v_{a,sat}} - p_{v_{s,sat}}}{T_a - T_s} \approx \left. \frac{dp_{v_{sat}}}{dT} \right|_{T_a} \quad (2-20)$$

Dans cette équation la différence de température ($T_a - T_s$) est liée au changement d'enthalpie entre les deux états. Dans le cas d'un processus adiabatique, l'expression du flux sensible donnée par l'équation (2-8) permet d'écrire la relation suivante :

$$T_a - T_s = -\frac{H r_a}{\rho_a c_{p,a}} = \frac{p_{v_{a,sat}} - p_{v_{s,sat}}}{\Delta} \quad (2-21)$$

Soit :

$$p_{v_{s,sat}} = p_{v_{a,sat}} + \Delta \left(\frac{H r_a}{\rho_a c_{p,a}} \right) \quad (2-22)$$

L'équation (2-19) devient :

$$\lambda E = \frac{\rho_a c_{p,a}}{\gamma r_v} \left[p_{v_{a,sat}} + \Delta \left(\frac{H r_a}{\rho_a c_{p,a}} \right) - p_{v_a} \right] \quad (2-23)$$

Sachant que le processus d'évaporation mis en jeu n'est pas adiabatique, le bilan énergétique de la surface végétale donné par l'équation (2-18) (où le terme (M) lié au métabolisme est négligé) permet d'exprimer le flux sensible sous la forme suivante :

$$H = R_n - G - \lambda E \quad (2-24)$$

Avec (R_n) le flux radiatif absorbé et (G) le flux transféré par conduction dans le sol. L'équation (2-23) devient :

$$\lambda E = \frac{\rho_a c_{p,a}}{\gamma r_v} (p_{v_{a,sat}} - p_{v_a}) + \frac{\Delta r_a}{\gamma r_v} [R_n - G - \lambda E] \quad (2-25)$$

Enfin, l'équation (2-25) peut s'écrire selon l'expression (2-26) en supposant que la résistance au transfert de la vapeur (r_v) est la somme de la résistance aérodynamique (r_a) et de la résistance stomatique (r_s) c.à.d. ($r_v = r_a + r_s$), on obtient l'équation de Penman-Monteith qui s'écrit sous la forme suivante :

$$\lambda E = \frac{\Delta (R_n - G) + \frac{\rho_a c_{p,a}}{r_a} (p_{v_{a,sat}} - p_{v_a})}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \quad (2-26)$$

Avec (Δ) la pente de la courbe de saturation à la température de l'air, (γ) la constante psychrométrique, (r_a) et (r_s) les résistances aérodynamiques et stomatique.

La formule de Penman-Monteith dans sa forme issue des recommandations du FAO est donnée par l'équation (2-27) (Allen et al., 1998). Cette équation a été utilisé récemment dans la modélisation des toitures végétalisés (Ouldboukhitine, 2012) et dans la modélisation des façades végétales (Malys, 2012). Elle exprime le taux d'évapotranspiration (E_0) en [mm.jour⁻¹] pour un terrain de gazon saturé en fonction de données météorologiques : éclairement solaire, température, humidité relative et vitesse du vent mesurée à 10 m d'altitude :

$$\lambda E_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u (p_{v_{a,sat}} - p_{v_a})}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u)} \quad (2-27)$$

Le but initial de l'utilisation de la formule de de Penman-Monteith est d'estimer le flux massique de vapeur pour établir un bilan hydrique sans connaître pour autant la température de surface. Or dans la modélisation thermique du bâtiment, la connaissance de la température de surface est indispensable, d'autant plus que la teneur eau varie énormément étant donné la faible épaisseur du substrat. On préférera donc le calcul direct des flux latents de l'évaporation et de la transpiration végétale sachant que ces flux prendront en considération l'état hydrique du substrat et le taux de couverture végétale.

3- Développement d'un modèle d'enveloppe végétale

La modélisation du comportement thermohydrrique des enveloppes végétales, en vue de l'évaluation de leurs impacts énergétiques sur le bâtiment, nécessite la prise en compte des phénomènes de transfert thermiques et hydriques dominants. Ces phénomènes se produisent dans les différentes couches du module de végétalisation utilisé et font intervenir la structure du bâtiment et son environnement urbain dans les transferts couplés de masse et de chaleur. L'intensité de ces phénomènes dépend, en plus des conditions météorologiques, des propriétés physiques du module de végétalisation telles que ses propriétés thermiques et radiatives, son état hydrique et des types de substrat et de végétation utilisés. Notons que les différentes propriétés physiques de ces éléments telles que la conductivité thermique, la masse volumique, la capacité thermique et les propriétés radiatives varient au cours du temps en fonction de la teneur en eau du substrat. En revanche, l'état hydrique du substrat varie au cours le temps selon l'intensité de l'évapotranspiration qui dépend à son tour du type de végétation utilisée et de sa densité foliaire. Les variations hydriques au cours du temps dans le substrat sont donc l'un des phénomènes de transfert dominants auxquels le modélisateur doit porter toute son attention.

Le modèle développé dans ce chapitre a pour objectif de simuler le comportement thermique et hydrique de toitures et des façades. Son utilisation dans la simulation des murs végétaux est limitée au cas où on suppose l'homogénéité spatiale de la teneur en eau dans le substrat de culture. Cela revient à prendre des valeurs moyennes par éléments de façade végétale. Dans ce cas de figure, il faut introduire dans les simulations, les sollicitations météorologiques propres aux parois verticales. Le modèle s'affranchit de quelques hypothèses simplificatrices établies par d'autres modèles de la littérature. Ces modèles, bien qu'ils reposent sur différentes approches, considèrent tous des régimes de transfert quasi-stationnaires et négligent dans

l'ensemble l'effet des transferts hydriques sur la prédiction du comportement thermique.

3.1- Constitution de l'enveloppe végétale

Le modèle développé considère le module de végétalisation comme un système composé de deux couches séparées (Figure 2-7) : un couvert végétal (le feuillage) et un milieu de culture (le substrat). Le feuillage constitue l'ensemble des feuilles, d'indice de surface foliaire (F), recouvrant une partie de la surface du module de végétalisation d'un rapport égal au taux de couverture (σ_f). Il constitue, vis-à-vis du rayonnement solaire, un écran dont le coefficient de transmissivité solaire ($\tau_{f,s}$) dépend de l'indice de surface foliaire. Le substrat est une couche d'un milieu poreux défini par son épaisseur, par sa capacité de rétention d'eau maximale et par ses propriétés thermophysiques qui dépendent de sa teneur en eau. En plus des différents paramètres physiques de l'enveloppe végétale, le modèle nécessite la définition des conditions aux limites de part et d'autre du module de végétalisation. D'une part, il s'agit des sollicitations météorologiques en l'occurrence la température de l'air ambiant (T_a), l'humidité relative de l'air ambiant (HR), la vitesse du vent (u), l'éclairement solaire global sur la paroi végétalisée (I_s), l'éclairement atmosphérique de grandes longueurs d'onde ou la température fictive du ciel (T_{sky}). D'autre part, le modèle nécessite la connaissance de la température à la base du substrat (T_b) ou du flux thermique (q_b) qui y est conduit vers la structure portante.

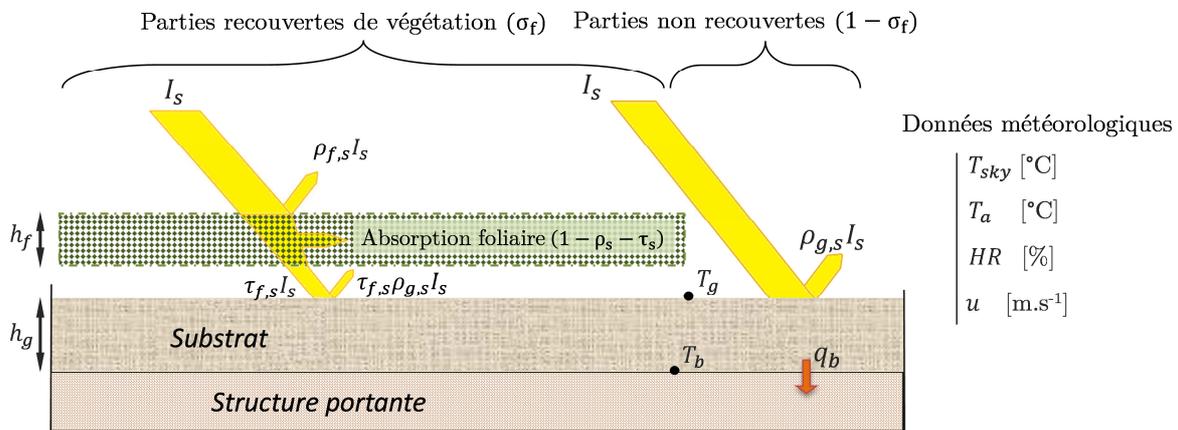


Figure 2-7 : Structure et propriétés radiatives modélisées d'un module de végétalisation

3.2- Modèle du couvert végétal

Le bilan énergétique de l'équation (2-18) peut être établi séparément sur la végétation et sur le sol. En supposant que la température du feuillage est homogène, le bilan thermique du couvert végétal se réduit à l'équation suivante :

$$(\rho c_p)_f d_f F \frac{dT_f}{dt} = Rn_f - H_f - L_f \quad (2-28)$$

Où $(\rho c_p)_f$, d_f et T_f sont respectivement la capacité thermique spécifique, l'épaisseur moyenne et la température des feuilles. Rn_f , H_f et L_f (W/m^2) représentent le flux radiatif absorbé, le flux thermique sensible et le flux thermique latent à la surface du feuillage. Le flux radiatif Rn_f est la somme de l'éclairement CLO absorbé et du rayonnement GLO échangé avec la surface du substrat, le ciel et les multiples parois et surfaces environnantes. Le flux thermique sensible et le flux thermique latent sont échangés par convection avec l'air dont l'écoulement est induit par le vent. L'intensité des flux convectifs est proportionnelle aux différences des grandeurs intensives aux nœuds que représentent l'air ambiant et la surface du feuillage. Ces différences, que ce soit en température ou en pression de vapeur partielle, véhiculent la chaleur et la vapeur à travers les résistances au transfert représentées sur Figure 2-8.

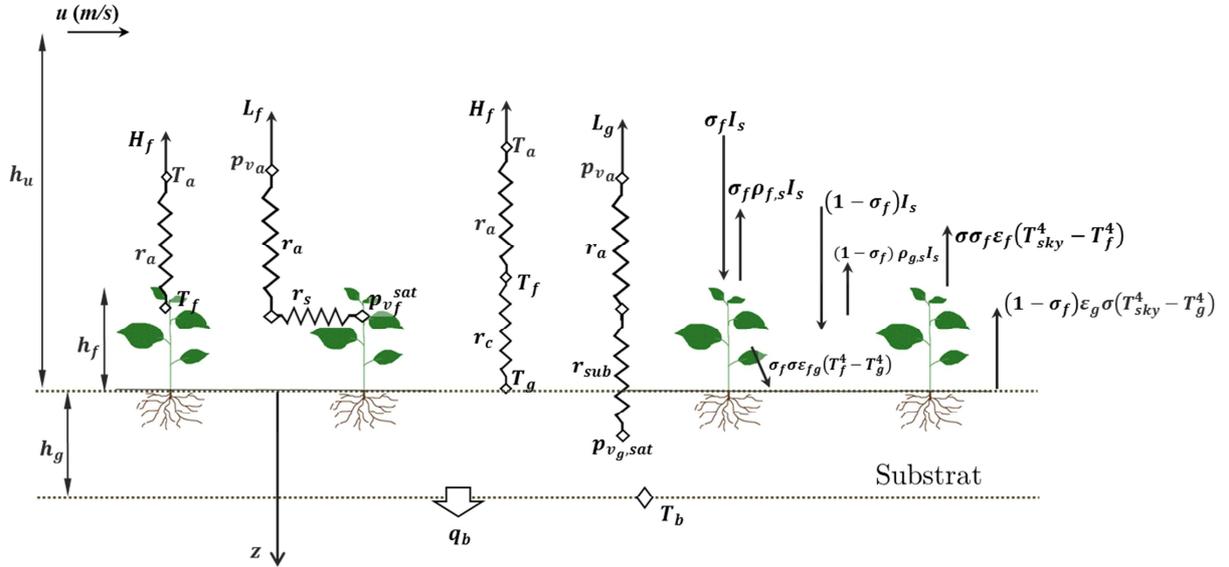


Figure 2-8 : Modes de transfert thermique modélisés sur un module de végétalisation et différentes résistances aux transferts de chaleur et de vapeur considérées

Les propriétés radiatives spectrales des feuilles vertes sont caractérisées d'une grande absorptivité qui dépasse 98% dans le gamme du rayonnement visible (VIS) et dans la gamme du rayonnement infrarouge lointain (FIR) (Nobel, 2005b). Par contre la réflectivité et la transmissivité sont plus importantes le rouge et le proche infrarouge (NIR) notamment dans l'intervalle de $0,74 \mu\text{m}$ à $1,2 \mu\text{m}$ qui représente 27% du rayonnement solaire total. Les feuilles sont donc semi-transparentes au rayonnement de courtes longueurs d'onde. Dans le cas d'un couvert végétal à faible densité foliaire, la transmissivité vis-à-vis du rayonnement solaire peut s'avérer donc non négligeable. Sur une surface unitaire de paroi végétalisée, la fraction (σ_f) recouverte de végétation absorbe une fraction égal à $(1 - \tau_{f,s} - \rho_{f,s})$ de l'éclairement solaire (I_s) reçu sur la face

supérieure. Sur la face inférieure, la feuille absorbe la même fraction du rayonnement réfléchi par la surface du substrat ($\tau_{f,s} \rho_{g,s} I_s$) si l'on se limite à une seule réflexion (Figure 2-7). Par conséquent Le rayonnement solaire absorbé par le feuillage ($Rn_{f,s}$ [W.m^{-2}]) s'exprime ainsi :

$$Rn_{f,s} = \sigma_f \left[(1 - \tau_{f,s} - \rho_{f,s}) (1 + \tau_{f,s} \rho_{g,s}) \right] \times I_s \quad (2-29)$$

Où ($\tau_{f,s}$) et ($\rho_{f,s}$) sont la transmissivité et la réflectivité solaire du couvert végétal, et ($\rho_{g,s}$) est la réflectivité solaire du substrat. Le coefficient de transmission du couvert végétal se calcule à l'aide de la loi de Beer-Lambert (cf. équation (2-5)) avec un coefficient d'extinction ($\mu_{f,s}$) supposé constant :

$$\tau_{f,s} = \exp(-\mu_{f,s} F) \quad (2-30)$$

L'échange radiatif de grandes longueurs d'ondes s'établit uniquement entre le feuillage et l'atmosphère terrestre d'une part, et entre le feuillage et la surface du substrat d'autre part. Ces trois corps rayonnants peuvent être assimilés à trois surfaces planes infinies et parallèles. Le flux radiatif de grandes longueurs d'onde absorbé par le feuillage ($Rn_{f,IR}$ [W.m^{-2}]) se réduit dans le cas d'une toiture végétalisée à l'équation (2-31).

$$Rn_{f,IR} = \sigma_f \left[\varepsilon_f \sigma (T_{sky}^4 - T_f^4) + \frac{1}{1/\varepsilon_f + 1/\varepsilon_g - 1} \sigma (T_g^4 - T_f^4) \right] \quad (2-31)$$

Dans le cas d'une façade végétalisée, la température du ciel dans l'équation (2-31) est remplacée par une température équivalente qui approche l'effet conjoint des différentes surfaces urbaines se trouvant à proximité et qui sont associées à des températures et des facteurs de forme différents. Le bilan radiatif global du feuillage est la somme des équations (2-29) et (2-31) :

$$Rn_f = Rn_{f,s} + Rn_{f,IR} \quad (2-32)$$

Les flux thermiques sensible (H_f [W.m^{-2}]) et latent (L_f [W.m^{-2}]) sont exprimés en fonction de la différence de température entre les feuilles et l'air ambiant et en fonction du déficit de pression de vapeur dans l'air ambiant par rapport à la pression de vapeur saturante dans le tissu foliaire. Les intensités de ces flux sont proportionnels à la surface d'échange que représente l'indice de surface foliaire (F) pour une surface unitaire de d'enveloppe végétale et inversement proportionnels aux résistances convectives (cf. Figure 2-8) :

$$H_f = F \frac{(\rho c_p)_a}{r_a} (T_f - T_a) \quad (2-33)$$

$$L_f = F \frac{(\rho c_p)_a}{\gamma(r_a + r_s)} (p_{v_{f,sat}} - p_{v_a}) \quad (2-34)$$

Où $(\rho c_p)_a$ [$\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$] est la capacité thermique spécifique de l'air. La résistance aérodynamique (r_a) [s.m^{-1}] est formée par la couche limite turbulente créée par l'écoulement d'air au-dessus de la canopée végétale. La résistance (r_s) [s.m^{-1}] représente la résistance stomatique au transfert de la vapeur.

Étant donnée la très faible longueur caractéristique des feuilles par rapport aux vitesses de vent en plus des faibles écarts de température entre l'air ambiant et le feuillage, les effets de la flottabilité, représentés par (Ψ_M) et (Ψ_H) dans l'équation (2-15), peuvent être négligés. Par conséquent, le calcul de la résistance aérodynamique (r_a) est réduit à la relation :

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{z_u - d_0}{z_{om}}\right] \ln\left[\frac{z_u - d_0}{z_{oH}}\right]}{\kappa^2 u} \quad (2-35)$$

Avec (κ) est la constante de Von Karman's, (u [m.s^{-1}]) est la vitesse du vent mesurée à la distance (z_u) de la paroi végétale. Les Longueurs de rugosité (z_{om} , z_{oH}) et la hauteur de déplacement (d_0) sont calculées en fonction de la hauteur de la canopée végétale (h_f) d'après (Balick et al., 1981) :

$$d_0 = 0.701 h_f^{0.975} \quad (2-36)$$

$$z_{om} = 0.131 h_f^{0.997} \quad (2-37)$$

$$z_{oH} = 0.1 z_{om} \quad (2-38)$$

Par ailleurs, le calcul la résistance stomatique doit prendre en considération le rôle des paramètres météorologiques et physiologiques qui influent sur la transpiration végétale. La résistance stomatique (r_s) [s.m^{-1}] est calculée selon l'équation (2-17).

Dans l'équation (2-17), les fonctions multiplicatrices f_1 , f_2 , f_3 et f_4 introduisent le rôle que joue l'éclairement solaire, la température, la teneur en eau volumique et le déficit de vapeur dans l'ouverture ou la fermeture des stomates. Comme expliqué en page 74, l'influence de la concentration en CO_2 sur la transpiration peut être négligée soit $f_5 = 1$. Les modèles de toitures végétalisées existants utilisent des fonctions établies dans différentes conditions environnementales et pour différentes plantes telles que des arbres tropicaux ou des arbustes désertiques. Ces modèles sont souvent développés pour modéliser les transferts dans systèmes sol-végétation-atmosphère (modèles SVAT). Les expressions utilisées dans le modèle développé dans ce chapitre sont issues des références (Avisar and Pielke, 1991; D.J. Sailor, 2008; Stanghellini and de Jong, 1995) :

$$f_1(I_s) = 1 + e^{-0.034(I_s - 3.5)} \quad (2-39)$$

$$f_2(T_f) = \frac{e^{0.3(T_f - 273.15)} + 258}{e^{0.3(T_f - 273.15)} + 27} \quad (2-40)$$

$$f_3(\omega_g) = \begin{cases} 0 & \text{si } \omega_g^{\min} > \omega_g \\ \frac{\omega_g^{\max} - \omega_g^{\min}}{\omega_g - \omega_g^{\min}} & \text{si } \omega_g^{\min} < \omega_g < \omega_g^{\max} \end{cases} \quad (2-41)$$

$$f_4(p_{v_f, sat} - p_{v_a}) = 4 \times 10^{-3} + e^{-0,73 \frac{0,622 \times 10^3}{p_{atm}} (p_{v_f, sat} - p_{v_a})} \quad (2-42)$$

3.3- Modèle du substrat de culture

Le modèle du substrat est basé sur l'équation de diffusion de la chaleur. Dans cette équation la teneur en eau volumique (ω_g) moyenne du substrat varie au cours du temps en fonction de l'intensité de l'évapotranspiration et des apports en eau par irrigation ou suite à des précipitations. Par conséquent, l'équation de diffusion de la chaleur dans le substrat peut être écrite sous la forme :

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[(\rho c_p)_{g, \omega_g} T \right] = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{\omega_g} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2-43)$$

La variation de la conductivité thermique (k_{ω_g}) [$\text{W.K}^{-1}.\text{s}^{-1}$] du substrat en fonction la teneur en eau du substrat peut être approchée d'une fonction affine dont l'ordonnée à l'origine correspond à la conductivité thermique du substrat à l'état sec (k_0). Des corrélations reliant la conductivité thermique à la teneur en eau ont été établies au laboratoire (Ouldboukhitine et al., 2012). Par ailleurs, d'après (Del Barrio, 1998) une corrélation proposée par l'auteur de (Vershinin et al., 1966) peut être utilisée pour calculer la capacité thermique spécifique (ρc_p)_g [$\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$] en fonction de la teneur en eau. Les deux relations utilisées dans le modèle présenté dans ce chapitre sont les suivantes :

$$k_{\omega_g} = k_0 + \omega_g k_w \quad (2-44)$$

$$(\rho c_p)_{g, \omega_g} = c_{p_w} (0,2 + \omega_g) \rho_{0,g} \quad (2-45)$$

Avec ($c_{p,w}$) [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$] la capacité thermique de l'eau et ($\rho_{0,g}$) la masse volumique apparente à sec du substrat.

Pour qu'elle puisse être résolue, l'équation (2-43) nécessite deux conditions aux limites en plus d'une condition initiale. La température (T_b) à la base du substrat, dont le contact est assuré avec les autres couches de l'enveloppe végétale, peut être fournie comme condition à la limite inférieure :

$$T(z = -h_g, t) = T_b \quad (2-46)$$

À la limite supérieure, le flux thermique conduit dans le substrat résulte du bilan thermique des flux radiatifs, sensible et latent de cette surface. La condition de Neumann est donnée par la relation suivante :

$$-k_{\omega_g} \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = Rn_g - H_g - L_g \quad (2-47)$$

Avec Rn_g , H_g et L_g [W.m^{-2}] le flux radiatif absorbé, le flux thermique sensible le flux thermique latent à la surface du substrat. Tous ces flux de chaleur sont représentés sur la figure 2-8.

De même que pour l'établissement du bilan radiatif sur le feuillage, le flux (Rn_g) est la somme de l'éclairement de courtes longueurs d'ondes (CLO) absorbé et du rayonnement de grandes longueurs d'onde (GLO) échangé avec le feuillage et le ciel. Le substrat absorbe une fraction égale à $(1-\rho_{g,s})$ du rayonnement CLO transmis par le feuillage et de l'éclairement incident sur les parties découvertes du substrat (cf. Figure 2-7) :

$$\begin{aligned} Rn_{g,s} &= \sigma_f \left[(1-\rho_{g,s}) \tau_{f,s} I_s \right] + (1-\sigma_f) \left[(1-\rho_{g,s}) I_s \right] \\ &= (1-\rho_{g,s}) (1-\sigma_f (1-\tau_{f,s})) I_s \end{aligned} \quad (2-48)$$

Le calcul des échanges radiatifs GLO est réalisé de la même manière que pour l'établissement du bilan radiatif foliaire. Il en résulte que le rayonnement net absorbé par le substrat soit donné par la relation suivante :

$$Rn_g = (1-\rho_{g,s}) (1-\sigma_f (1-\tau_{f,s})) I_s + \sigma_f \varepsilon_{fg} \sigma (T_f^4 - T_g^4) + (1-\sigma_f) \varepsilon_g \sigma (T_{sky}^4 - T_g^4) \quad (2-49)$$

Avec :

$$\varepsilon_{fg} = \frac{1}{1/\varepsilon_f + 1/\varepsilon_g - 1} \quad (2-50)$$

D'autre part, les flux sensible et latent sont calculés en fonction des différences de température et de pression de vapeur partielle entre le substrat et l'air ambiant. Par analogie avec l'établissement du bilan foliaire, l'intensité de ces flux est modulée par des résistances thermiques au transfert de chaleur et de vapeur, voir Figure 2-8 :

$$H_g = \frac{(\rho c_p)_a}{(r_c + r_a)} (T_g - T_a) \quad (2-51)$$

$$L_g = \frac{(\rho c_p)_a}{\gamma (r_{sub} + r_a)} (p_{v_{g,sat}} - p_{v_a}) \quad (2-52)$$

Avec (γ) [Pa.K^{-1}] la constante psychrométrique, (r_c) [s.m^{-1}] la résistance au transfert thermique sensible au sein de la canopée végétale et (r_{sub}) [s.m^{-1}] la résistance du substrat au transfert latent.

D'après (Goudriaan, 1977; Norman et al., 1995), la résistance (r_c) est calculée, en considérant la vitesse de l'écoulement d'air (u_c) dans le couvert végétal donnée par l'équation (2-16) :

$$r_c = \frac{1}{a' + b' u_c} \quad / \quad a' \approx 0,004 \text{ m/s} \quad \text{and} \quad b' \approx 0,012 \quad (2-53)$$

$$u_c = u_{h_f} e^{-a \left(1 - \frac{0,05}{h_f}\right)} \quad (2-54)$$

$$u_{h_c} = u \left[\ln \left(\frac{h_f - d_0}{z_{om}} \right) / \left(\ln \left(\frac{z_u - d_0}{z_{om}} \right) \right) \right] \quad (2-55)$$

$$a = \sqrt{0,2 F h_f / d_f} \quad (2-56)$$

Avec (h_f) [m] la hauteur de la canopée végétale et (z_u) [m] est l'altitude correspondante à la vitesse (u) et (d_f) [m] la distance moyenne entre les feuilles.

La résistance du substrat à l'évaporation (r_{sub}) est corrélée avec la teneur en eau volumique (Aluwihare and Watanabe, 2003; van de Griend and Owe, 1994) :

$$r_{sub} = c_0 + c_1 \times \left(\frac{\omega_g}{\omega_g^{sat}} \right)^{-c_2} \quad (2-57)$$

Les valeurs numériques des constantes c_0 , c_1 et c_2 intervenant dans l'équation (2-57) varient selon la référence entre 0 et 33 pour c_0 , entre 3,5 et 270 pour c_1 et entre 1,6 et 3,3 pour c_2 . Des valeurs établies sur un banc expérimental d'une toiture végétalisée en laboratoire (Tabares-Velasco and Srebric, 2012) sont utilisées. Ce sont respectivement 0, 34,5 et 3,3 pour les trois constantes c_0 , c_1 et c_2 .

3.4- Bilan hydrique

La teneur en eau du substrat joue un rôle déterminant dans l'intensité de l'évapotranspiration. D'une part, la fonction $f_3(\omega_g)$ de l'équation (2-41) permet de moduler la transpiration des plantes dont l'eau est puisée dans le substrat. D'autre part, la teneur en eau volumique (ω_g) intervient dans l'équation (2-57) pour contrôler l'évaporation directe à la surface du substrat. Par ailleurs, la conductivité thermique du substrat (k_g) et sa capacité thermique spécifique (ρc_p)_g dépendent toutes les deux de la teneur en eau. La simulation de l'évolution temporelle de l'état hydrique des modules de végétalisation est donc primordiale dans la prédiction du comportement hygrothermique des enveloppes végétales.

Le bilan hydrique global permet de modéliser l'évolution au cours du temps de la teneur en eau moyenne. L'hypothèse de l'homogénéité spatiale de la teneur en eau est particulièrement justifiée pour des couches de substrat suffisamment minces de type

toiture extensive. L'équation du bilan hydrique peut donc être écrite sous la forme suivante :

$$h_g \frac{\partial \omega_g}{\partial t} = A + P - D - E \quad (2-58)$$

Avec (h_g) l'épaisseur de la couche de substrat, (A) , (P) et (D) [$\text{kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$] sont les flux massiques d'arrosage de précipitation et de drainage. L'équation (2-58) est couplée aux modèles thermiques du couvert végétal et du substrat à travers le terme de l'évapotranspiration (E) [$\text{kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$] évalué comme ceci :

$$E = (L_f + L_g) / \lambda \quad (2-59)$$

Avec (λ) [J.kg^{-1}] la chaleur latent de vaporisation ; (L_f) et (L_g) [W.m^{-2}] sont les flux de transpiration et d'évaporation donnés par les équations (2-34) et (2-52).

3.5- Résolution numérique

Le modèle de paroi végétale est donné par les équations (2-28) à (2-59). Les équations principales sont données par bilans thermiques et hydrique établis sur le feuillage et sur le substrat :

$$(\rho c_p)_f d_f F \frac{dT_f}{dt} = Rn_f - H_f - L_f \quad (2-28)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} [(\rho c_p)_{g,\omega_g} T] = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{\omega_g} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2-43)$$

$$-k_{\omega_g} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = Rn_g - H_g - L_g \quad (2-47)$$

$$h_g \frac{\partial \omega_g}{\partial t} = A + P - D - E \quad (2-58)$$

Une méthode de différences finies implicite est utilisée pour résoudre l'équation (2-43). Cette méthode numérique permet d'assurer la convergence et la stabilité du système numérique. Par ailleurs, les flux radiatifs GLO et les flux latents font intervenir dans les équations (2-31), (2-34), (2-42), (2-49) et (2-52) des termes non linéaires en fonction de la température du feuillage et de la température du substrat. Un développement de Taylor permet de linéariser ces différents termes entre les itérations (m) et $(m-1)$ de la résolution numérique :

$$[T^4]_m = [T^4]_{m-1} + 4 [T^3]_{m-1} \{ [T]_m - [T]_{m-1} \} \quad (2-60)$$

$$[p_{v,sat}]_m = [p_{v,sat}]_{m-1} + \frac{\partial p_{v,sat}}{\partial T} \Big|_{m-1} \{ [p_{v,sat}]_m - [p_{v,sat}]_{m-1} \} \quad (2-61)$$

Avec ces opérations, les équations (2-28), (2-43) et (2-58) forment un système linéarisé de $(n+3)$ équations à $(n+3)$ inconnus qui sont $(T_f, T_g, \omega_g$ et $T_{i, i=1,n})$. Où n est le nombre de points de discrétisation spatiale au sein de la couche de substrat. Ce système linéaire est résolu pour chaque pas de temps par itérations successives jusqu'à la vérification du critère de convergence donné par l'équation (2-62).

$$\sqrt{\sum_{j=1}^{n+3} (T_i^m - T_i^{m-1})^2} \leq \tilde{\epsilon}_T \text{ et } |\omega_g^m - \omega_g^{m-1}| \leq \tilde{\epsilon}_\omega \quad (2-62)$$

Le critère de convergence utilisé stipule la minimisation des écarts entre les solutions aux itérations (m) et $(m-1)$ en termes des températures et de la teneur en eau volumique. À la convergence, ces écarts doivent être d'un ordre de grandeur inférieur à une erreur numérique jugée acceptable $(\tilde{\epsilon})$.

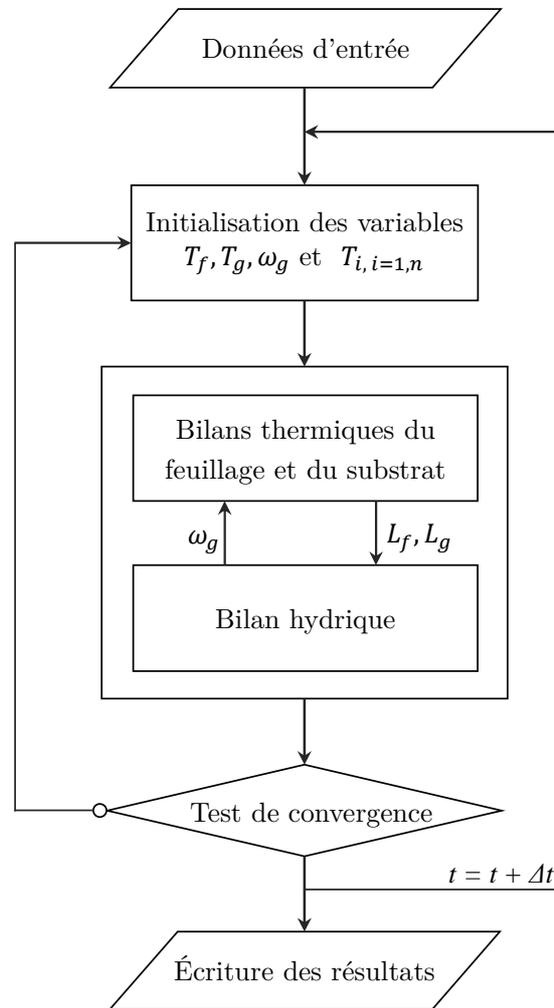


Figure 2-9 : Organigramme de l'algorithme de résolution numérique

Figure 2-9 montre l'organigramme de l'algorithme numérique utilisé pour les simulations numériques. La température de l'air ambiant, son humidité relative, la vitesse du vent à certaine altitude, l'éclairement solaire global sur le module de

végétalisation, la température du ciel et les précipitations sont introduits comme données d'entrée. En plus des sollicitations météorologiques extérieures, la température de la surface inférieure de la couche de substrat ou le flux thermique à cet endroit doivent être aussi fournis. Pour chaque pas de temps, les $(n+3)$ variables sont initialisés à leurs valeurs au pas de temps précédent. Une première résolution numérique du modèle linéarisé est à ce moment réalisée. La solution qui en résulte servira à la réinitialisation pour la deuxième itération. Cette opération est répétée jusqu'à vérification du critère de convergence pour le pas de temps actuel avant de recommencer les mêmes étapes pour le pas de temps suivant.

3.6- Validation expérimentale en conditions estivales

Afin d'évaluer la pertinence de la modélisation développée dans ce chapitre, une comparaison des résultats des simulations numériques à des données expérimentales obtenues sur des modules de toitures végétalisées a été effectuée. Les données expérimentales sont issues de deux toitures végétales installées sur la maquette expérimentale qui fera l'objet d'une description détaillée dans le chapitre 3. Cette maquette expérimentale a été construite à l'Université de La Rochelle dans le but d'étudier les propriétés de différentes techniques de revêtement extérieur et leurs impacts thermiques sur la performance des bâtiments et sur le microclimat urbain. La maquette expérimentale, est constituée de cinq rangées de bâtiments à échelle réduite (1:10). Deux d'entre elles sont équipées de deux complexes différents de toitures végétales. Le premier fait 8 cm d'épaisseur et comporte une plantation de sedum. Le deuxième fait 12 cm d'épaisseur et comporte une plantation de graminées. Les données expérimentales dans les comparaisons présentées ci-après concernent ce dernier. La figure 2-10 présente une photographie des deux toitures végétales et un schéma de leur instrumentation. Le suivi expérimental des deux toitures végétales a été assuré par S-E Ouldboukhité dans le cadre du projet ANR Habitat Intelligent et Solaire Photovoltaïque (HABISOL-AGROBAT) (Ouldboukhité, 2012). Il s'agit d'une mesure de la température dans le substrat de culture à différentes profondeurs à l'aide d'un ensemble de thermocouples de type K, d'une mesure de la teneur en eau du substrat à l'aide d'humidimètres TDR et d'une mesure des flux radiatifs CLO et GLO réfléchis et émis par les toitures végétales. Par ailleurs, une station météorologique installée près du site expérimental permet l'acquisition de toutes les données météorologiques nécessaires.

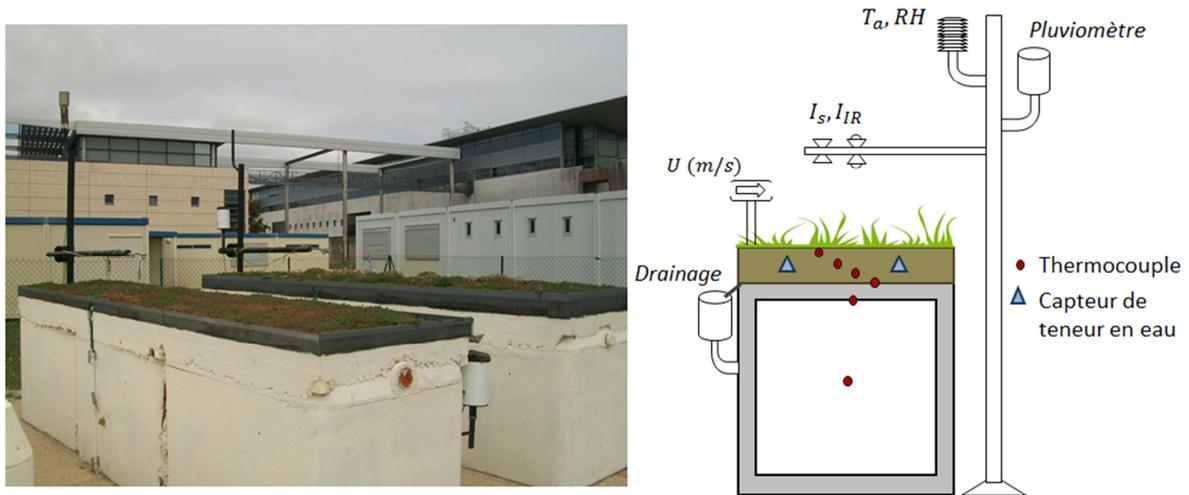


Figure 2-10 : Maquette expérimentale de toitures végétalisées et son instrumentation

Les données expérimentales utilisées remontent à la saison d'été de l'année 2011. Durant cette saison, La Rochelle a connue des conditions météorologiques variables avec des précipitations occasionnelles. La figure 2-11 illustre la variation durant 19 jours des principales variables météorologiques à savoir la température et l'humidité relative de l'air, l'éclairement solaire horizontal, La température fictive du ciel et le taux de précipitation.

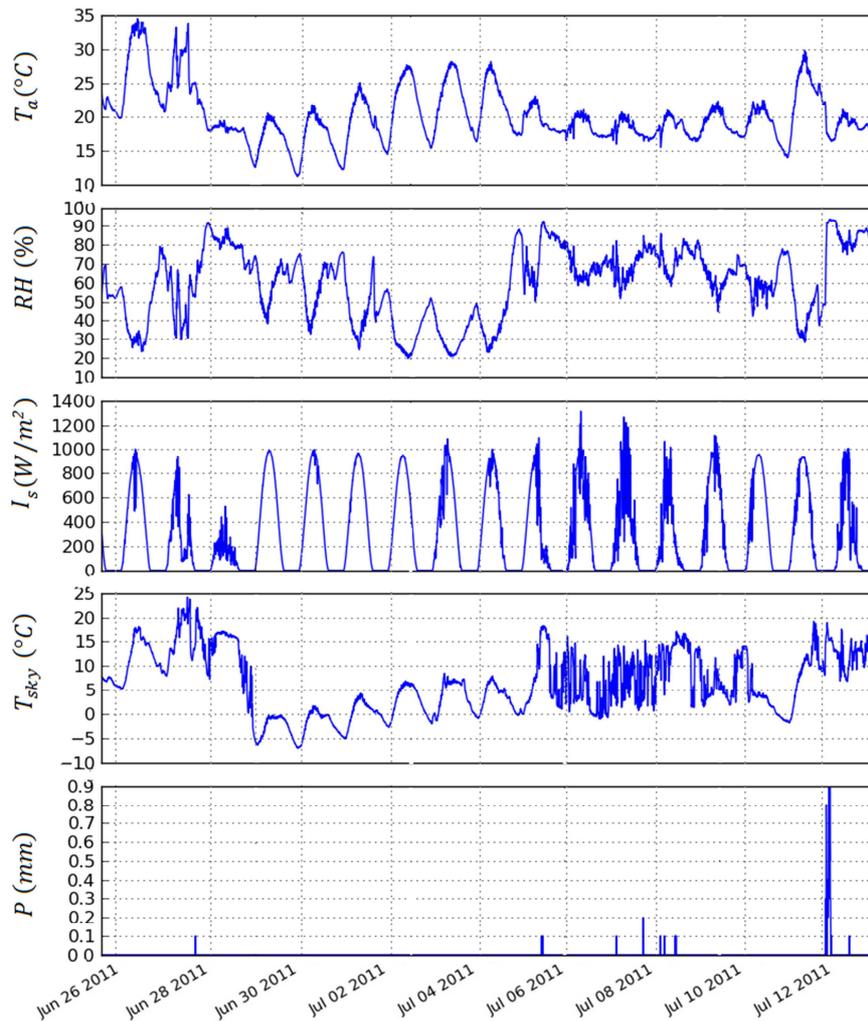


Figure 2-11 : Principales variables météorologiques mesurées durant la saison d'été 2011 et utilisées comme données d'entrée pour la validation du modèle développé

Toutes ces données météorologiques ont été enregistrées et rapportées sur cette figure avec un pas de temps de 5 min. La température de l'air atteignait des valeurs journalières maximales variant entre 20 et 35 °C et des valeurs minimales entre 10 et 20 °C avec une amplitude de variations diurnes entre 5 et 15 °C. Le ciel était parfois clair et parfois couvert et de fortes précipitations ont lieu dans la nuit du 12 au 13 Juillet au contraire des jours précédents. Ce sont ces sollicitations météorologiques variables qui ont servi de données d'entrée pour la simulation numérique présentée ci-après.

Les données mesurées de température, d'humidité relative et d'éclairement solaire sont directement utilisables par le programme numérique. Le calcul de température fictive du ciel passe par la mesure du flux atmosphérique de grandes longueurs d'onde (I_{IR}) reçu par une surface horizontale. Ce flux thermique est mesuré par un pyrgéomètre orienté vers le ciel et la mesure qu'il délivre est transformée en une

température de ciel équivalente avec une émissivité égale à 1 selon l'équation suivante :

$$T_{sky} = \left(\frac{I_{IR}}{\sigma} \right)^{1/4} \quad (2-63)$$

Quant aux précipitations et au drainage intervenant dans l'équation du bilan hydrique (2-58), la centrale d'acquisition utilisée cumule la quantité d'eau de pluie mesurée en continu durant le pas de temps entre deux mesures consécutives. Par conséquent, le pluviomètre installé sur le mât, dont la fonction est de permettre la détermination du flux massique (P) [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$] de l'eau de pluie par unité de surface végétalisée, fourni une mesure cumulée en [mm] sur le pas de temps choisi pour l'acquisition. La conversion en flux massique est donc simple sachant que 1 [mm] de pluie correspond au flux massique de 1 [kg] d'eau de pluie par 1 [m^2] de surface végétalisée durant le pas de temps choisi pour l'acquisition. Le cas est différent pour le pluviomètre destiné à mesurer l'eau drainée par la toiture végétale. En effet, ce pluviomètre est placé au bout d'une gouttière ouverte destinée à récupérer l'eau de drainage de toute la toiture végétale. Or, la mesure intègre l'eau de pluie directement récupérée par le pluviomètre et l'eau de pluie récupérée directement par la gouttière en plus de toute l'eau drainée par la toiture végétale. Le flux massique de drainage (D) par unité de surface végétalisée et par pas de temps d'acquisition peut être calculé par la relation suivante :

$$D = \frac{D^{mesuré} \times S_{pluviomètre} - P \times (S_{gouttière} + S_{pluviomètre})}{S_{toiture}} \quad (2-64)$$

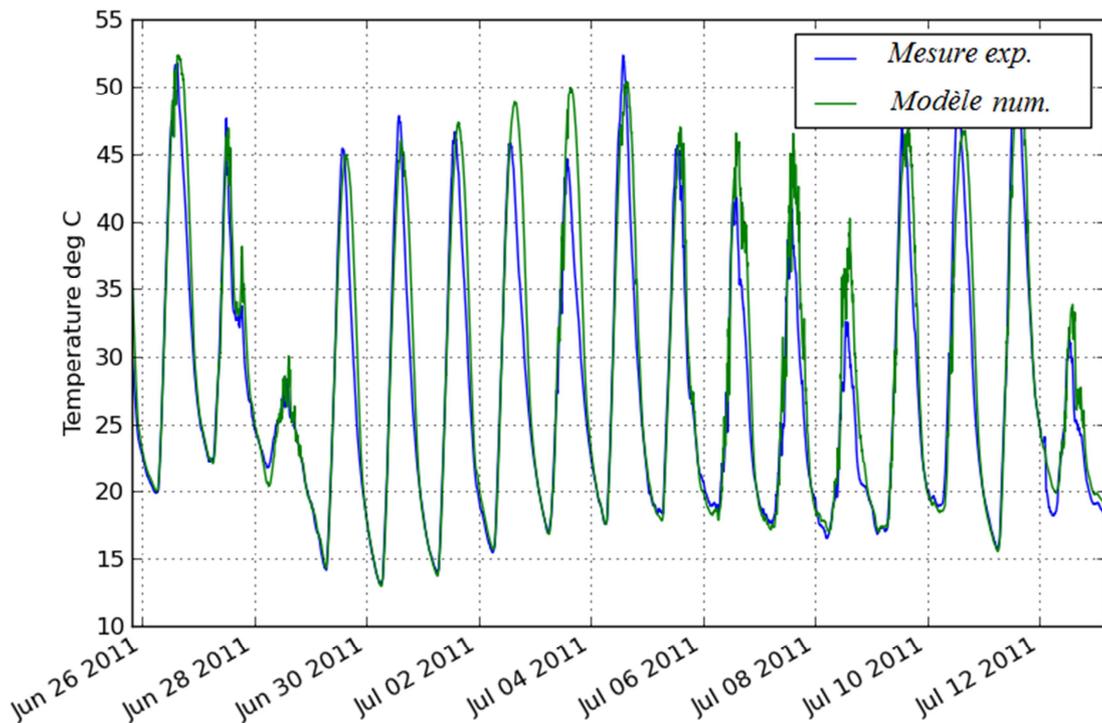
Avec (S) [m^2] la surface de l'élément indiqué par l'indice correspondant et ($D^{mesuré}$) [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$] la mesure brute délivrée par le pluviomètre.

La pertinence de la prédiction numérique du modèle développé est a été évaluée par la comparaison des résultats des simulations aux données expérimentales collectées. Les données d'entrée du modèle sont les variables météorologiques présentées ci-dessus. Les paramètres du modèle ont été choisis pour correspondre au mieux aux propriétés de la toiture expérimentée. Certains paramètres tels que les teneurs en eau maximales et minimales et la conductivité thermique du substrat ont été mesurées (Ouldboukhitine et al., 2012). Certains d'autres, tel que ($\mu_{f,s}$) et ($r_{s,min}$), sont tirés de références bibliographiques (Del Barrio, 1998; D. J Sailor, 2008).

Le tableau 2-1 récapitule l'ensemble des paramètres utilisés dans les simulations numériques en vue de la validation expérimentale. La comparaison du modèle avec les observations expérimentales en termes de température de surface et de teneur en eau est illustrée dans Figure 2-12 et Figure 2-13. Ces figures montrent une bonne concordance entre la prédiction numérique et le comportement thermo-hydrigue observé durant cette période estivale.

Tableau 2-1 : Liste des paramètres utilisés pour la validation expérimentale

Paramètre	Description	Valeur
σ_f	Taux de couverture (-)	0.8
$\mu_{f,s}$	Coefficient d'extinction CLO (-)	0.75
$\rho_{f,s}$	Réflectivité solaire du feuillage (-)	0.3
ε_f	Émissivité du feuillage (-)	0.95
h_f	Hauteur du couvert végétal (m)	0.07
F	Indice de surface foliaire (-)	3
d_f	Épaisseur moyenne du feuillage (m)	0.002
ρ_f	Masse volumique du feuillage (kg.m ⁻³)	900
$c_{p,f}$	Capacité thermique du feuillage (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	4180
$r_{s,min}$	Résistance stomatale minimale (s.m ⁻¹)	200
$\rho_{g,s}$	Réflectivité solaire du substrat (-)	0.2
ε_g	Émissivité du substrat (-)	0.95
$\rho_{0,g}$	Masse volumique apparente du substrat (kg.m ⁻³)	800
ω_g^{max}	Teneur en eau minimale du substrat (kg _{eau} .m ⁻³ _{substrat})	260
ω_g^{min}	Teneur en eau maximale du substrat (kg _{eau} .m ⁻³ _{substrat})	5
$k(\omega_g^{max})$	Conductivité thermique maximale du substrat (W.m ⁻¹ K ⁻¹)	0.5
$k(\omega_g^{min})$	Conductivité thermique minimale du substrat (W.m ⁻¹ K ⁻¹)	0.1
h_g	Épaisseur du substrat (m)	0.12
ω_g	Teneur en eau initiale (kg _{eau} .m ⁻³ _{substrat})	75


Figure 2-12 : Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux en termes de l'évolution de la température à 2 cm au-dessous de la surface extérieure du substrat

La figure 2-12 montre que les variations diurnes de la température à 2 cm au-dessous de la surface extérieure du substrat sont correctement prédites sur une période moyennement longue (19 jours) avec des conditions météorologiques variables. Malgré les irrégularités enregistrées dans l'amplitude des variations de la température, la prédiction numérique est significativement proche de l'observation expérimentale avec un écart moyen de 0,8 °C et une précision relative moyenne de $\pm 10\%$ pour 80 % des valeurs mesurées.

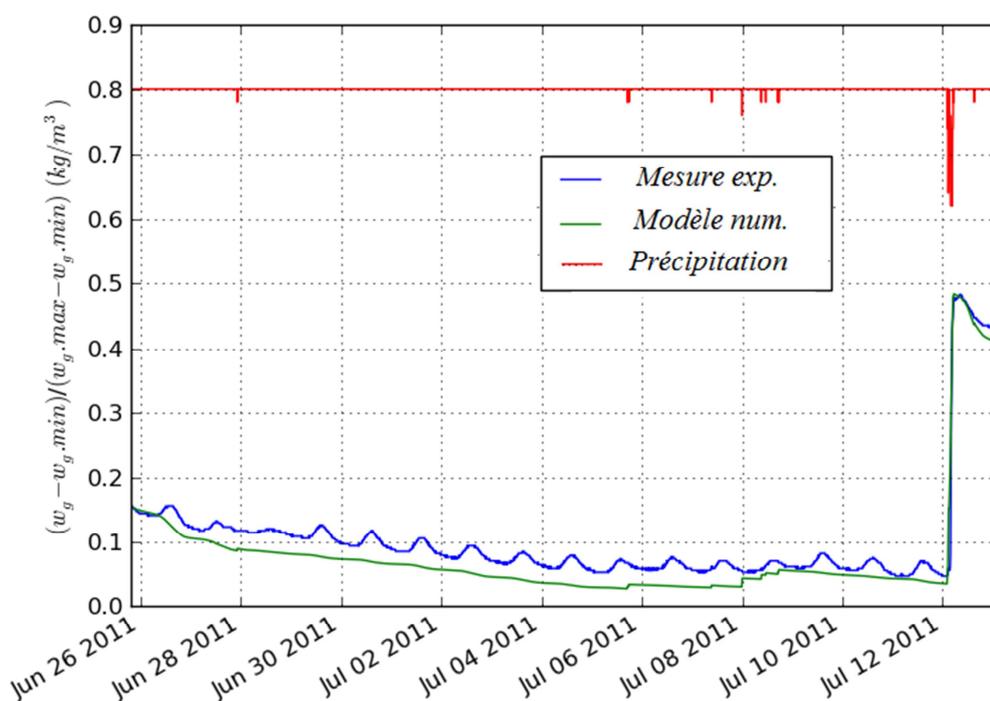


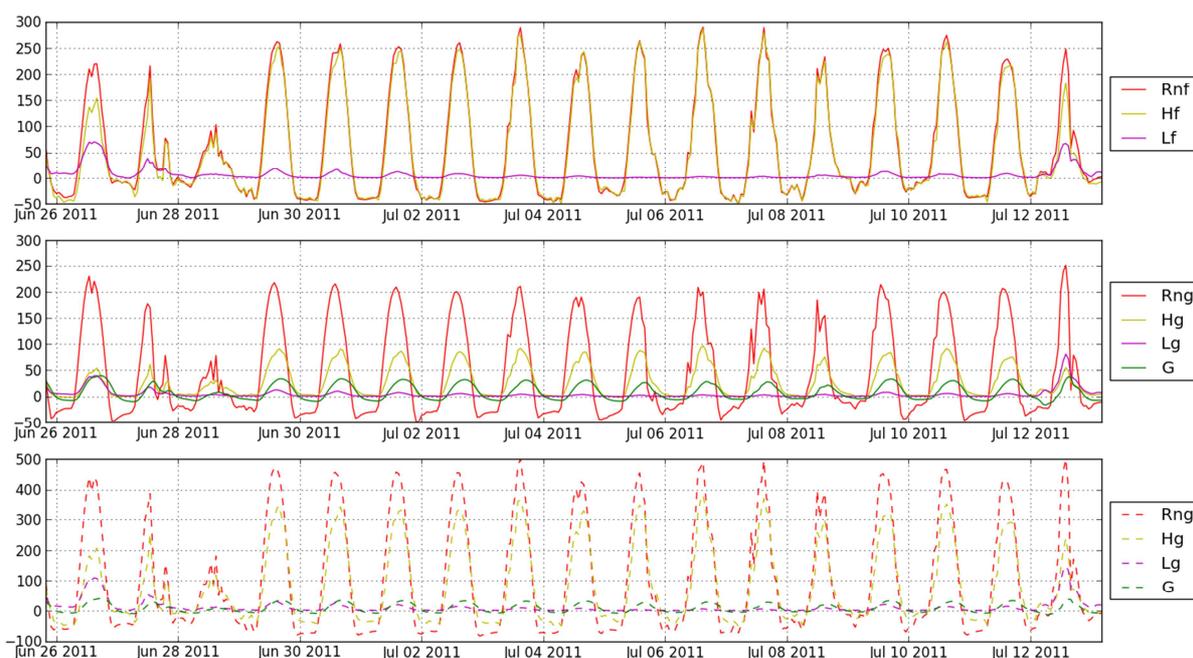
Figure 2-13 : Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux en termes de l'évolution de la teneur en eau dans le substrat.

Conjointement, la variation au cours du temps de la teneur en eau dans le substrat est aussi bien prédite par le modèle que l'évolution de température (cf. Figure 2-13). En effet, la baisse moyenne de la teneur en eau due à l'évapotranspiration au cours des périodes sans précipitations est assez bien reproduite par la simulation numérique. Cependant, l'évolution à caractère cyclique que l'on observe sur la courbe expérimentale n'est pas reproduite par le modèle. Cette évolution cyclique est vraisemblablement due à l'évaporation de l'eau piégée dans la couche de drainage et de son absorption par le substrat durant les périodes journalières les plus chaudes. Les phénomènes de sorption-désorption et de condensation ne sont, évidemment, pas pris en compte dans le modèle.

L'aptitude du modèle à prédire de tels comportements thermohydrigues complexes lui est conférée par le couplage thermohydrigue qui permet de moduler l'intensité des transferts latents en fonction de la teneur en eau dans le substrat et vice-versa. Ce constat est corroboré par la bonne prédiction de la baisse de température de surface

le 13 juillet. Cette baisse est due à l'augmentation, correctement prédite, de la teneur en eau du substrat suite à de fortes précipitations ; contrairement au 28 juin où la baisse de température de surface était le résultat d'un plus faible éclairement solaire (cf. figure 2-11).

L'analyse des différents termes des bilans énergétiques (équations (2-28) et (2-47)) permet de mettre en lumière les mécanismes de transfert mis en jeu dans la toiture végétale. L'amplitude des variations de la température de surface produite par la simulation est gouvernée par l'intensité des flux radiatifs, sensibles et latents simulés. La figure 2-14 montre que l'accroissement des flux latents de transpiration (L_f) et d'évaporation (L_g) après l'augmentation de la teneur en eau du substrat est à l'origine de la baisse de température de surface durant le dernier jour. Pendant les 18 premiers jours, la teneur en eau du substrat était à moins de 10 % de sa valeur maximale ce qui réduisait l'évapotranspiration au minimum. La prédiction numérique du comportement thermique lié au bilan hydrique représente un avantage pour le modèle développé. En effet, l'équation de Penman-Monteith ne permet pas aux modèles qui l'utilisent la prise en compte du stress hydrique.



À partir des simulations numériques effectuées pour cette période, les faits suivants peuvent être relevés :

- Le jour, avec une faible teneur en eau, la quasi-totalité du flux radiatif absorbé par les feuilles est dissipé sous forme de chaleur sensible et la température des feuilles dépasse dans ce cas la température de l'air ($T_f > T_a$) (cf. Figure 2-14 et

Figure 2-15). Dans le substrat, un quart du flux radiatif absorbé est transmise par conduction à la structure portante du toit.

- La nuit, les déperditions de grandes longueurs d'onde entraînent la diminution de la température des feuilles au-dessous de la température de l'air. Les déperditions nocturnes sont équilibrées par un flux thermique sensible qui s'établit dans le sens inverse par rapport au jour ($T_f < T_a$).
- Lorsque teneur en eau du substrat augmente, l'évapotranspiration devient de plus en plus prédominante et les gains solaires sont de plus en plus dissipés sous forme latente. Il en résulte que la température du substrat diminue et que la température des feuilles avoisine la température de l'air ambiant.

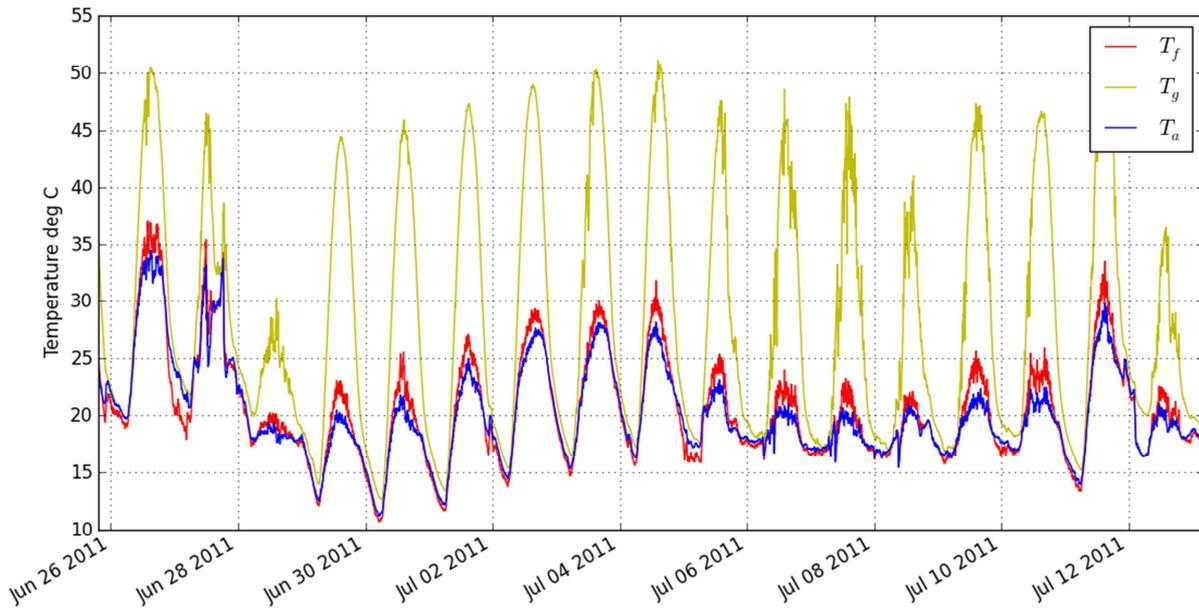


Figure 2-15 : Comparaison de la température de la surface extérieure du substrat (T_g) et de la température du feuillage (T_f) simulées à la température de l'air ambiant (T_a)

Il est à rappeler que l'un des bénéfices thermiques majeurs de la végétalisation est la réduction de la température des surfaces végétalisées. Cependant, la sécheresse qu'a encourue la toiture expérimentale durant cette période, a conduit à des températures maximales souvent au-dessus de 45 °C et qui dépassent parfois 50 °C au cours de la journée, Figure 2-12. On conclut que si l'on veut tirer avantage du rafraîchissement passif réputé des toitures végétales en été, il faudra les arroser régulièrement durant les périodes où les précipitations se font rares.

3.7- Études paramétriques

À présent, l'influence de certains paramètres sur le comportement thermique des toitures végétales est présentée à travers des simulations numériques. Dans ces simulations, la teneur en eau initiale du substrat a été fixée dans les mêmes conditions qu'auparavant et les conditions météorologiques réelles présentées dans

Figure 2-11 ont servi de données d'entrées pour le modèle. Le comportement thermique qu'aurait manifesté la toiture végétale dans d'autres conditions expérimentales peut être donc examiné et comparé au cas réel présenté ci-dessus. Seulement, l'évolution expérimentale de la température de la surface intérieure du substrat (T_b) a été, elle aussi, imposée comme condition limite. Ceci pourrait altérer les conclusions quantitatives que l'on peut déduire de ces études paramétriques pour des éléments d'enveloppes à structure légère.

3.7.1- Importance de la couverture végétale

Dans le but d'identifier le rôle que joue l'importance de la couverture végétale dans l'évolution de la température de substrat (T_g) et les valeurs maximales susceptible d'atteindre, des simulations numériques faisant varier l'indice de surface foliaire (F) et le taux de couverture (σ_f) ont été réalisées.

La figure 2-16 permet de comparer les évolutions de la température de surface (T_g) obtenues pour des indices de surfaces foliaires allant de 1 à 4.

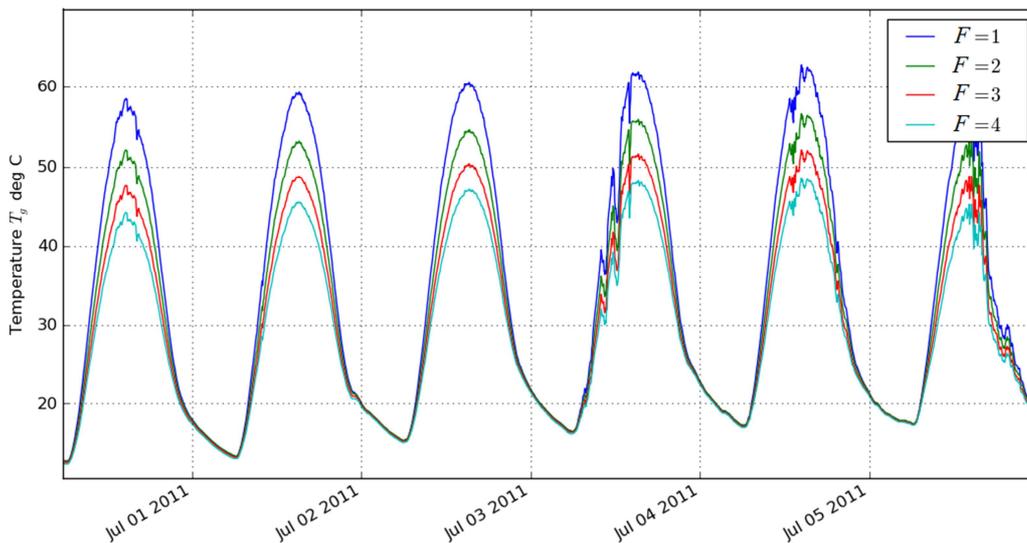


Figure 2-16 : Comparaison numérique de la température de surface extérieure du substrat (T_g) obtenue pour différents indice de surface foliaire (F) avec les conditions météorologiques réelles utilisés pour la validation expérimentale

On constate que les plus faibles indices de surface foliaire conduisent aux températures de surface les plus élevées. Il s'agit de l'effet d'ombrage où l'éclairement solaire reçu par la paroi végétalisée est réduit par la végétation. Cependant, plus l'indice (F) augmente, moins la diminution des températures maximales est importante. Ceci s'explique par l'extinction exponentielle inverse du rayonnement solaire traversant le couvert végétal en fonction de l'indice de surface foliaire donnée par l'équation (2-30). Durant la nuit, les températures de surfaces obtenues pour les différents indices foliaires sont égales en l'absence de rayonnement solaire.

La figure 2-17 permet de comparer les évolutions de la température (T_g) pour des taux de couverture végétale allant de moitié ($\sigma_f = 0,5$) à l'unité ($\sigma_f = 1$).

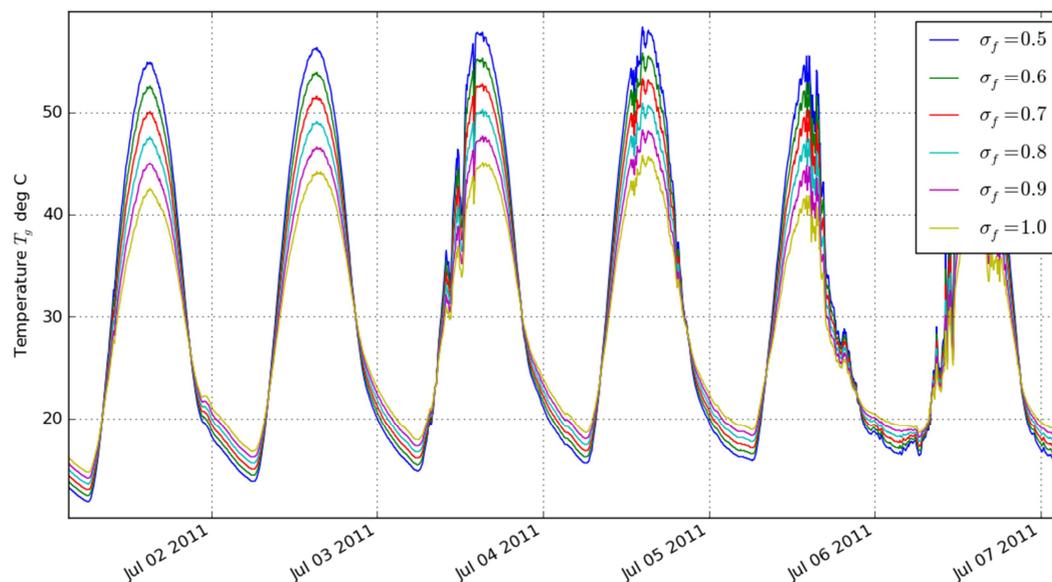


Figure 2-17 : Comparaison numérique de la température de surface extérieure du substrat (T_g) obtenue pour différents taux de couverture végétale (σ_f) avec les conditions météorologiques réelles utilisés pour la validation expérimentale

De même que pour l'indice de surface foliaire, la baisse des températures maximales atteintes au cours de la journée est notable pour les grands taux de couverture végétale. Cependant, la différence dans les températures maximales entre les cas simulés est proportionnelle à la différence des taux de couverture (σ_f). Ainsi, la différence des températures maximales entre la couverture à moitié et la couverture totale de végétation atteint 13 °C dans ces conditions. À la différence du constat fait pour l'indice foliaire, la toiture à moitié recouverte de végétation se rafraîchit jusqu'à 4 °C de plus que la toiture totalement recouverte durant la nuit. On constate que les déperditions nocturnes sont d'autant plus importantes que le taux de couverture (σ_f) est petit. Cela s'explique par le fait que le couvert végétal constitue un écran totalement opaque aux rayonnements de grandes longueurs d'onde.

Bien que les simulations réalisées permettent de mettre en évidence les effets radiatifs de la couche foliaire, l'ampleur de son influence réelle dépend de la teneur en eau dans le substrat. En effet, l'indice de surface foliaire et le taux de couverture influent sur l'intensité de l'évapotranspiration qui est faible dans les conditions météorologiques des simulations.

3.7.2- État hydrique du substrat de culture

L'importance des variations de la teneur en eau sur la température de surface observée dans le paragraphe consacré à la validation expérimentale incite à réaliser cette étude paramétrique. Dans cette étude, il s'agit de comparer les évolutions de la

température (T_g) obtenues pour différentes valeurs du rapport de la teneur en eau à la teneur en eau maximale ($\omega_g / \omega_g^{max}$). Pour ne pas influencer les résultats par les variations de la teneur en eau au cours du temps, le bilan hydrique n'a pas été pris en considération et la teneur en eau était fixée à une valeur constante pour chaque simulation.

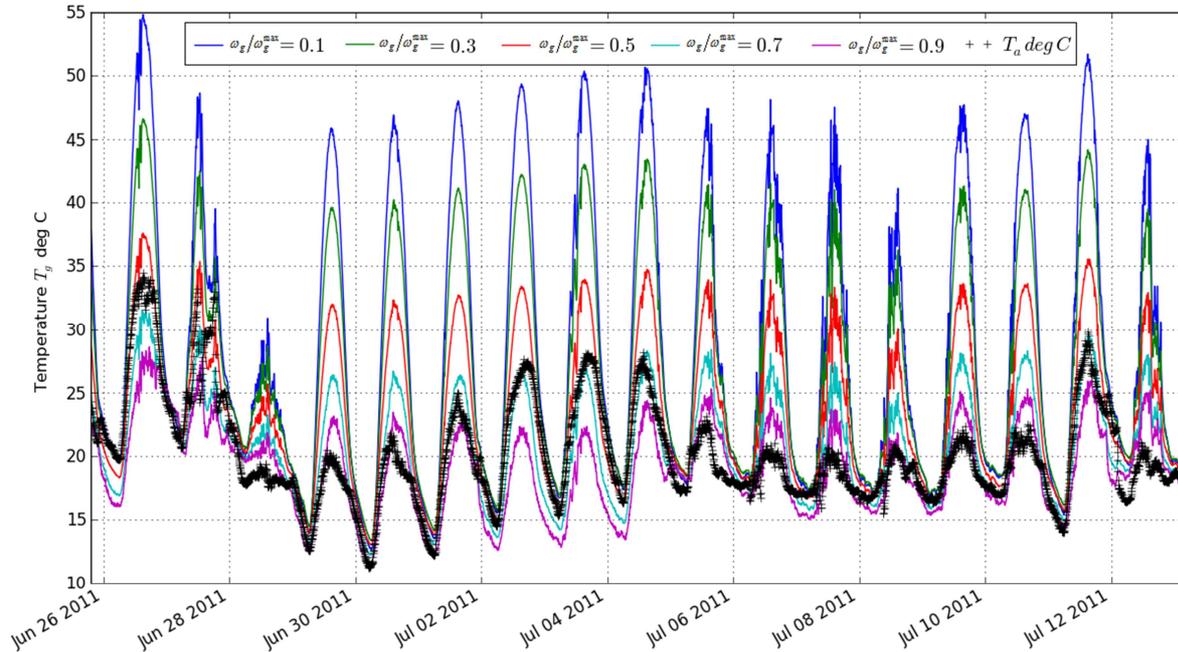


Figure 2-18 : Comparaison numérique de la température de surface extérieure du substrat (T_g) obtenue pour différents rapport de teneurs en eau ($\omega_g / \omega_g^{max}$) avec les conditions météorologiques réelles utilisés pour la validation expérimentale

Les résultats numériques montrent que les pics de température sont fortement réduits dans le cas où le substrat est quasiment saturé. Cette réduction est plus importante que celle obtenue avec de plus grandes densités foliaires. La figure 2-18 montre que les pics de température mesurés sur la toiture expérimentale qui ont atteint 50 °C avec 10 % de la teneur en eau maximale n'auraient pas dépassé 35°C si teneur en eau était à 50 % de sa valeur maximale. En outre, la température (T_g) pourrait même rester au-dessous de la température de l'air ambiant. En effet, l'évaporation à la surface du substrat devient suffisamment intense pour que, sous l'ombre des feuilles, la température de surface ait tendance à approcher la température humide de l'air ambiant.

3.7.3- Inertie des modules de végétalisation

Dans le premier chapitre, il a été rapporté que plusieurs modèles de la littérature négligent l'effet de l'inertie thermique additionnelle engendrée par les modules de végétalisation. L'ultime analyse paramétrique présentée dans ce chapitre concerne l'inertie thermique de l'enveloppe végétale. Il ne s'agit pas d'étudier l'inertie

thermique elle-même car toute modélisation dynamique doit nécessairement prendre en compte l'inertie dans la simulation thermique des bâtiments. Il s'agit plutôt de prendre en compte ou pas l'inertie thermique du substrat et de comparer les résultats des simulations numériques dans les deux cas. Les mêmes conditions météorologiques et le même niveau de sécheresse qu'auparavant sont utilisés dans les calculs.

La figure 2-19 montre que le flux thermique maximal obtenu avec en considérant l'inertie thermique du substrat est plus faible de $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ par rapport au flux thermique obtenu sans prise en compte de cette inertie. Le déphasage des pics de flux dans les deux cas est d'environ 3 heures pour une épaisseur de substrat de 8 cm. Par ailleurs, la négligence de l'inertie thermique conduit à la surestimation des pics de flux conduit vers le bâti.

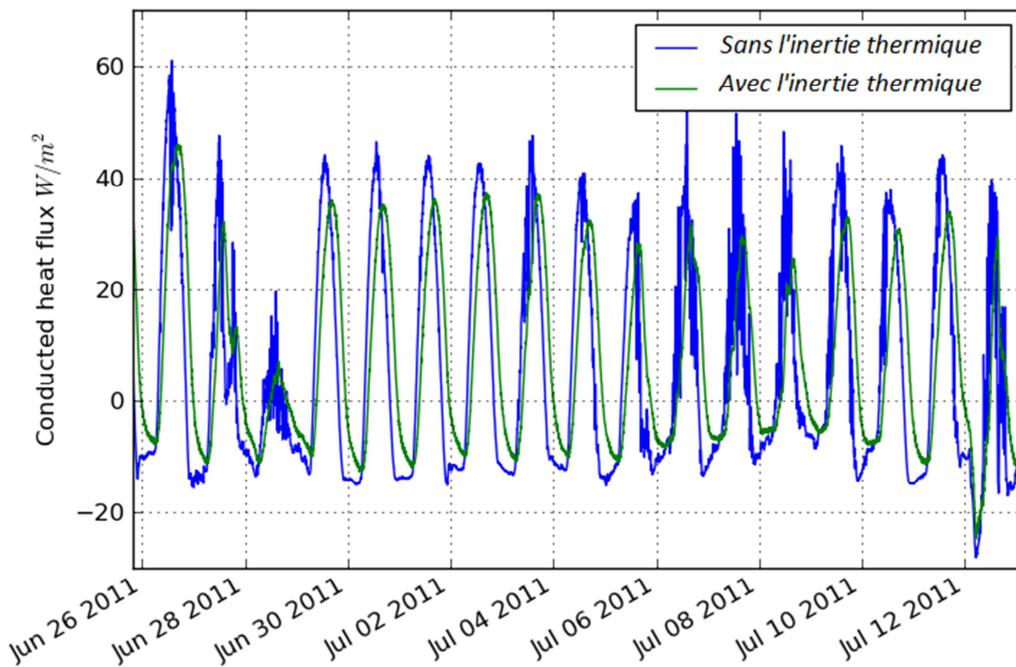


Figure 2-19 : Comparaison numérique des flux thermiques conduits vers le bâti obtenus avec ou sans prise en compte de l'inertie thermique

4- Conclusions

Dans le but d'introduire la modélisation des enveloppes végétales, une description non exhaustive des principaux phénomènes de transfert dans les canopées végétales a été présentée dans un premier temps. Ensuite, une modélisation des transferts couplés de masse et de chaleur a été développée. Le modèle présenté s'affranchit de quelques hypothèses simplificatrices des modèles disponibles dans la littérature. La comparaison des résultats numériques aux données expérimentales a permis de mettre au jour la pertinence de la modélisation proposée et les avantages qu'elle procure. Ainsi, les variations diurnes de la température de surface et de l'état hydrique du

substrat de culture sont analysées à travers le flux de masse et de chaleur mis en jeu au sein des modules de végétalisation. Enfin, l'étude présentée souligne le rôle que joue l'état hydrique des toitures végétales dans leur comportement thermique.

Le modèle de paroi végétale présenté dans ce chapitre sera couplé à un modèle de bâtiments afin de mettre en place un outil de prédiction. Cet outil, présenté dans le chapitre 4, permettra d'évaluer l'impact des enveloppes végétales sur la performance énergétique des bâtiments. Avant cela, une description détaillée de la maquette expérimentale et l'analyse des principales mesures effectuées sont présentées dans le chapitre 3.

Chapitre 3

Étude expérimentale d'enveloppes végétales

1- Introduction

L'investigation expérimentale des effets thermiques de la végétalisation sur les bâtiments et leur environnement microclimatique urbain s'impose à défaut d'une modélisation précise et fiable de leur comportement thermique. En effet, la complexité des phénomènes thermiques et aérauliques ayant lieu au sein des modules de végétalisation dans un environnement urbain dense ou dans conditions climatiques extrêmes n'est pas à ce jour maîtrisée. La modélisation proposée dans le chapitre 2 ne fait qu'améliorer la prédiction numérique des effets thermiques de la végétalisation dans des conditions météorologiques estivales où la plupart des modèles biophysiques utilisés sont validés. Ainsi, les phénomènes liés à la flottabilité et au confinement aérauliques, les phénomènes de condensation, de sorption-désorption et de gel ne sont pas pris en considération. De plus, le changement des propriétés foliaires qui accompagne les cycles de vie de la végétation est méconnu et non modélisé.

Le suivi expérimental in-situ des toitures et des façades végétalisées installées sur des bâtiments réels a fait l'objet de plusieurs investigations expérimentales qui sont rapportés dans le chapitre 1. Cependant, la mesure de l'impact des enveloppes végétales sur la performance énergétique des bâtiments dépend du type de bâtiment et du comportement des usagers. En plus, l'interaction des enveloppes végétales avec l'environnement microclimatique extérieur n'a guère été prise en considération. Par conséquent, il est souvent difficile de généraliser les conclusions tirées de ces études expérimentales à d'autres bâtiments végétalisés dans différentes conditions environnementales.

Dans le but de relier le comportement thermohydrigue des enveloppes végétales aux conditions environnementales dans un contexte urbain dense sans perturbations anthropiques, une maquette expérimentale à échelle réduite bâtie à l'Université de La Rochelle a été mise en service. La maquette expérimentale, baptisée « ClimaBat », constitue une scène d'un îlot urbain à échelle réduite (Doya et al., 2012). Ce chapitre présente la maquette expérimentale, la mise en place d'enveloppes végétales et leur instrumentation. Les données expérimentales collectées permettent de remonter aux effets hygrothermiques et radiatifs de différents scénarii de végétalisation d'enveloppes, et ce, à travers des comparaisons directes et simultanées à des cas de références.

2- Conception de la maquette de scène urbaine ClimaBat

La maquette expérimentale ClimaBat (cf. Figure 3-1) est construite sur une plateforme dallée en plein air d'une surface de $10 \times 20 \text{ m}^2$. Elle simule une scène urbaine à l'échelle 1:10 constituée de cinq bâtiments rectangulaires parallèles et identiques avec des façades orientées vers l'est et l'ouest. Chaque bâtiment est formé par la juxtaposition de 3 cuves de récupération d'eau pluviale. Les cuves, fabriquées en béton, ont une hauteur de 1,26 m, une largeur de 1,13 m et une longueur de 1,68 m. L'espacement régulier des bâtiments forme quatre rues canyons de rapport d'aspect Largeur/Hauteur égal à 0,8. La chaussée est équivalente à une aire piétonne légère. Elle est constituée de dalles en béton gravillonné de 4 cm d'épaisseur posées sur un lit de sable et de graviers de 80 cm. Les parois des cuves représentant les bâtiments à échelle réduite ne comportent ni vitrage ni isolation. L'absence de vitrages réduit les apports solaires qui représentent, pour les bâtiments réels, une source principale de chaleur. Néanmoins la faible épaisseur des parois non isolées compense en partie cette différence avec les bâtiments réels. Par ailleurs, l'inertie thermique des parois est faible. Avec une enveloppe de 4,5 cm d'épaisseur, le modèle réduit correspond à un bâtiment réel à structure légère.

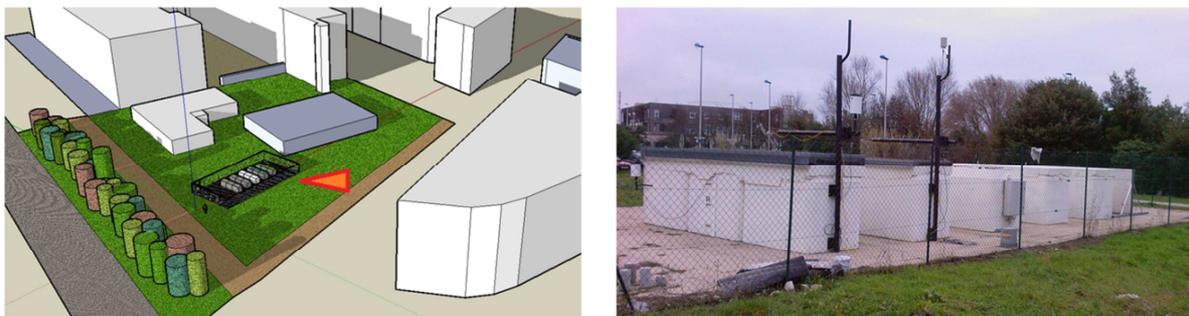


Figure 3-1 : Plateforme expérimentale de la maquette de scène urbaine à échelle réduite ClimaBat

Les bâtiments de la maquette ont été tous repeints avec une peinture blanche avant la mise en place des modules de végétalisation. Des mesures spectrométriques de réflectivité solaire, réalisées par le département d'optique théorique et appliquée du centre français de recherche aérospatiale (partenaire du projet ANR-VegDUD), ont permis de déterminer la réflectivité solaire des différentes surfaces de la maquette expérimentale (Doya and Briottet, 2011). La réflectivité solaire de parois repeintes en blanc est de 0,64 et la réflectivité des dalles en béton gravillonné est de 0,36. L'encrassement progressif et la dégradation de l'état des surfaces auraient baissé de peu ces valeurs au fil du temps. Les principales caractéristiques thermophysiques et morphologiques de la maquette expérimentale sont récapitulées dans le tableau 3-1.

Tableau 3-1 : Principales caractéristiques physiques et morphologiques de la maquette expérimentale

Bâtiments à échelle réduite	
Nombre	5 (3 cuves par bâtiment)
Hauteur	1260 mm
Largeur	1130 mm
Longueur	5060 mm (3×1680 mm)
Matériau	Béton
Conductivité thermique	2,36 (W.m-1.K-1)
Masse volumique	2150 (kg.m-3)
Capacité thermique	915 (J.kg-1K-1)
Réflectivité solaire de la peinture blanche	0,64
Rues Canyon	
Nombre	4+1 rues
Hauteur	1,30 m
Largeur	1,12 m
Longueur	1,12 m
Réflectivité solaire de la chaussée	0,364
Rapport d'aspect	Hauteur/Largeur 1,2

La plateforme expérimentale, bâtie à l'Université de La Rochelle, est située à 300 m de la côte atlantique. Dans cette région les vents dominants sont des vents d'ouest. Afin de conserver les rues à l'abri du vent, celles-ci ont été orientées dans l'axe Sud-Nord. De plus une haie d'arbre et d'arbuste situé à quelques mètres à l'ouest de la plateforme forme une barrière qui atténue les vents violents. M. Doya rapporte dans sa thèse (Doya, 2010) les résultats de simulations numériques du confinement aérodynamique réalisées à l'aide du logiciel ENVI-met (Bruse and Fleer, 1998) destiné au

couplage climat–environnement. Il mentionne que la vitesse moyenne de l'écoulement à l'intérieur des rues et à 0,4 m du sol est inférieure à $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ pour une vitesse de vent de référence de 4 m.s^{-1} à 10 m d'altitude. La comparaison des mesures effectuées par deux anémomètres situés sur un bâtiment de proximité et sur la maquette expérimentale confirme la réduction de la vitesse du vent au niveau de la plateforme ClimaBat.

L'éclairement solaire reçu par les façades de la maquette est identique pour tous les bâtiments et toutes les rues. En effet, à part les façades orientées vers l'extérieur des bâtiments situés aux extrémités de la maquette (bâtiments 1 et 5 de la figure 3-4), les autres façades possèdent les mêmes facteurs de forme avec le ciel et les mêmes masques solaires formés exclusivement par les bâtiments de la maquette. Les bâtiments environnants sont suffisamment loin et n'influencent pas les échanges radiatifs sur la maquette. La mise en place d'un écran façade du côté ouest de la plateforme permet de créer une configuration semblable pour le bâtiment d'ouest (cf. Figure 3-4, page 108).

2.1- Analogie des échanges thermiques et radiatifs

Le transfert de chaleur sur la maquette expérimentale s'établit sous cinq formes : des éclairagements de courtes et de grandes longueurs d'ondes, des flux convectifs sensible et latent et des flux conduits dans les parois des bâtiments et dans le sol. Pour que les mesures réalisées sur ClimaBat puissent être généralisées à un environnement urbain réel, des similitudes physiques entre ces deux échelles doivent être vérifiées.

L'utilisation de matériaux de construction courants et de revêtements extérieurs standards dans la conception de la maquette ClimaBat, ainsi que son exposition au cycle diurne réel d'ensoleillement sur un site extérieur permettent d'assurer, au mieux, le même bilan radiatif solaire que pour une scène urbaine réelle géométriquement similaire. En effet, le flux solaire absorbé ne dépend que de l'orientation des façades, des masques solaires liés au rapport d'aspect des rues et de la réflectivité des revêtements extérieurs utilisés. Or, toutes ces grandeurs sont conservées dans le modèle réduit. De même, les échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde sont les mêmes que pour une scène urbaines de mêmes proportions géométriques à condition que les variations de température de surface dans la maquette soient de l'ordre de leurs variations à échelle réelle.

La similitude de l'évolution thermique dynamique des bâtiments de la maquette ClimaBat avec des bâtiments à échelle réelle a été étudiée à l'aide de simulations numériques réalisés sur le code de simulation TRNSYS (Doya, 2010; Doya et al., 2012). Les résultats numériques démontrent l'équivalence entre le modèle réduit de bâtiments et un bâtiment réaliste à structure légère. Il s'agit d'un bâtiment constitué de trois étages avec un taux de vitrage est/ouest égal à $1/6^{\text{ème}}$ de la surface habitable.

L'enveloppe de ce bâtiment équivalent est constituée de façades en parpaings creux de 20 cm et d'une dalle et de planchers en béton armé de 12 cm. Dans cette étude, les évolutions de température les mieux concordants entre les deux échelles ont été retrouvés sur les surfaces extérieures de l'enveloppe. En effet, le pic de température atteint sur la surface extérieure de l'enveloppe dépend principalement de l'énergie solaire absorbée.

En outre, la température de l'air dans les rues canyons dépend de l'intensité des flux thermiques sensibles et latents liés principalement au transport convectif tourbillonnaire. Pour un écoulement transversal, ce transfert thermique s'établit entre la canopée urbaine et une rue canyon selon trois régimes qui ne dépendent que du rapport d'aspect de la rue : rasant, à interférence de sillage et à rugosité isolée (Oke, 1988). La maquette ClimaBat reproduit à petite échelle les propriétés des écoulements rasants qui caractérisent les rues canyons réelles de même rapport d'aspect. De plus, le transfert de chaleur sensible peut être corrélé, d'une part, avec le débit volumique de renouvellement d'air dans le canyon et la différence de température ($T_C - T_A$) entre le canyon et la canopée. D'autre part, ce flux est proportionnel à la différence de température entre l'air de la rue canyon et les surfaces (S_i) qui la composent. Par conséquent, si l'on considère une réduction d'échelle de (n) fois, les flux sensible entre les facettes du canyon et l'air du canyon et entre l'air du canyon et l'air urbain sont tous les deux réduits d'un facteur de (n^2) au même titre que la réduction des surfaces d'échange. Par ailleurs, la vitesse de l'air à échelle réduite est plus faible. Ceci réduit en même temps les coefficients d'échange convectifs et le renouvellement d'air dans le canyon sans pour autant impacter, significativement, la température de l'air dans le canyon.

La maquette de scène urbaine ClimaBat permet donc de conserver, à petite échelle, l'analogie des phénomènes de transfert majeurs et l'analogie des paramètres liés aux bâtiments et à leur contexte urbain et météorologique. Cependant, la similitude de Reynolds n'est pas vérifiée. Cette dernière ne peut être obtenue que dans une soufflerie où l'on perd toute autre analogie avec les échanges thermiques réels. De plus, le montage expérimental réalisé permet de comparer différentes configurations de bâtiments et de rues identiques végétalisés ou pas. Il permet aussi la constitution d'une base de données utile pour la calibration, la vérification et la validation des modèles développés. Ces modèles serviront par la suite à évaluer l'impact de la végétalisation de l'enveloppe de bâtiments réels sur la performance énergétique et l'environnement microclimatique.

2.2- Études antérieures et objectifs actuels

La plateforme ClimaBat a déjà servi au sein du laboratoire à d'autres investigations expérimentales. Avant de l'exploiter dans le cadre du projet VegDUD pour l'étude de

l'impact thermique des enveloppes végétales sur le bâtiment et son environnement microclimatique, elle a été utilisée dans deux autres projets de recherches : le premier concerne l'étude de l'impact de l'utilisation des peintures sélectives sur des façades de canyons urbains (Doya, 2010); la seconde concerne l'étude de toitures végétales et de leurs impacts thermiques sur les bâtiments (Ouldboukhitine, 2012).

La première étude a fait partie de la thèse de Maxime Doya (2010) au cours de laquelle un grand nombre de thermocouples (cf. Figure 3-2) ont été placés dans l'air ou insérés dans les façades intérieures et extérieures des bâtiments. La majorité de ces thermocouples sont encore fonctionnels et les mesures qu'ils délivrent sont utiles pour le travail actuel. La figure 3-2 montre l'emplacement des thermocouples de surface insérés dans les façades extérieures et intérieures, dans les chaussées des rues et dans les toitures.

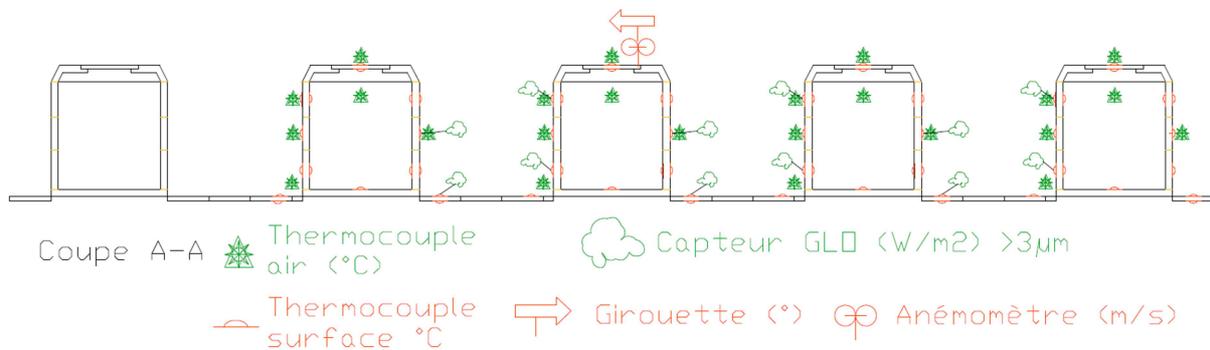


Figure 3-2 : Schéma de capteurs installés dans la maquette ClimaBat pour l'étude des peintures sélectives dont 62 thermocouples de surface majoritairement fonctionnels à ce jour (Doya, 2010)

La seconde étude a fait partie de la thèse de Salah-Eddine Ouldboukhitine (2012) au cours de laquelle deux toitures végétales installées sur les deux bâtiments situés à l'est ont été instrumentées dans le but de suivre leurs comportements thermiques et hydrologiques. La figure 3-3 schématise le montage expérimental dans lequel des thermocouples mesurent la température à différentes profondeurs des substrats, des sondes de teneur en eau mesurent les variations hydriques et des capteurs de flux thermiques et radiatifs mesurent les flux transmis vers le bâti et le rayonnement réfléchi par les toitures. Des données issues de ces instruments ont été utilisées dans le Chapitre 2 pour la validation du modèle d'enveloppe végétale développé.

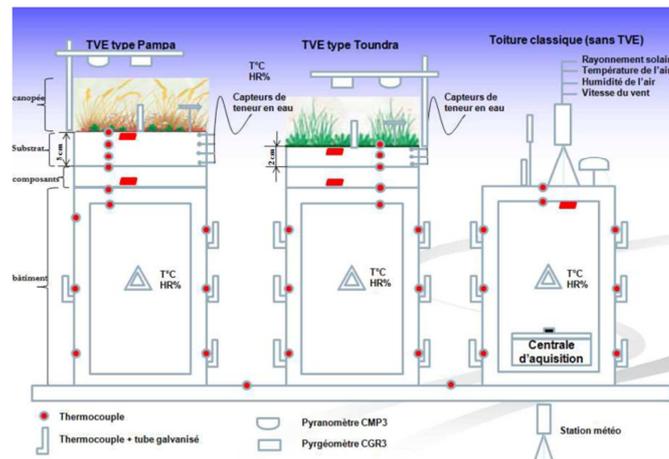


Figure 3-3 : Schéma des capteurs installés dans la maquette ClimaBat pour l'étude des modules de toitures végétales et de leurs impacts thermiques sur les bâtiments (Ouldboukhitine, 2012)

Dans la suite de ce chapitre une description détaillée du montage expérimental actuel réalisé dans le but de quantifier l'impact hygrothermique des enveloppes végétales sur les bâtiments et leur environnement microclimatique. L'expérimentation réalisée a permis en outre la constitution d'une base de données expérimentales utile pour la calibration, la vérification et la validation des modèles de bâtiments végétalisés couplés au microclimat à l'échelle d'une rue canyon.

3- Protocole expérimental

3.1- Végétalisation des enveloppes de ClimaBat

La maquette expérimentale ClimaBat permet de réaliser une étude comparative à échelle réduite de l'impact hygrothermique et radiatif de la végétalisation sur le bâtiment et sur l'environnement microclimatique à l'échelle d'une rue canyon. Il s'agit de comparer les mesures réalisées sur des bâtiments identiques dans un environnement microclimatique semblable où certaines toitures et façades sont végétalisées. La comparaison avec un bâtiment et une rue témoins permet d'évaluer l'incidence des dispositifs de végétalisation utilisés sur les évolutions de température, d'humidité et de flux. La maquette expérimentale compte 5 bâtiments et 4 rues. Deux toitures végétales de compositions différentes sont installées sur les deux bâtiments situés à l'est. Un mur végétal est installé sur la façade ouest du bâtiment situé entre le bâtiment central et le bâtiment de l'ouest. Le bâtiment central est un bâtiment témoin. Il constitue une référence à laquelle les mesures réalisées sur les bâtiments végétalisées sont comparées. Par ailleurs, la rue située immédiatement à l'ouest du bâtiment central de référence est la moins influencée par les dispositifs expérimentaux de végétalisation. Cette rue est utilisée comme rue canyon de référence à laquelle les mesures réalisées dans les autres rues sont comparées.

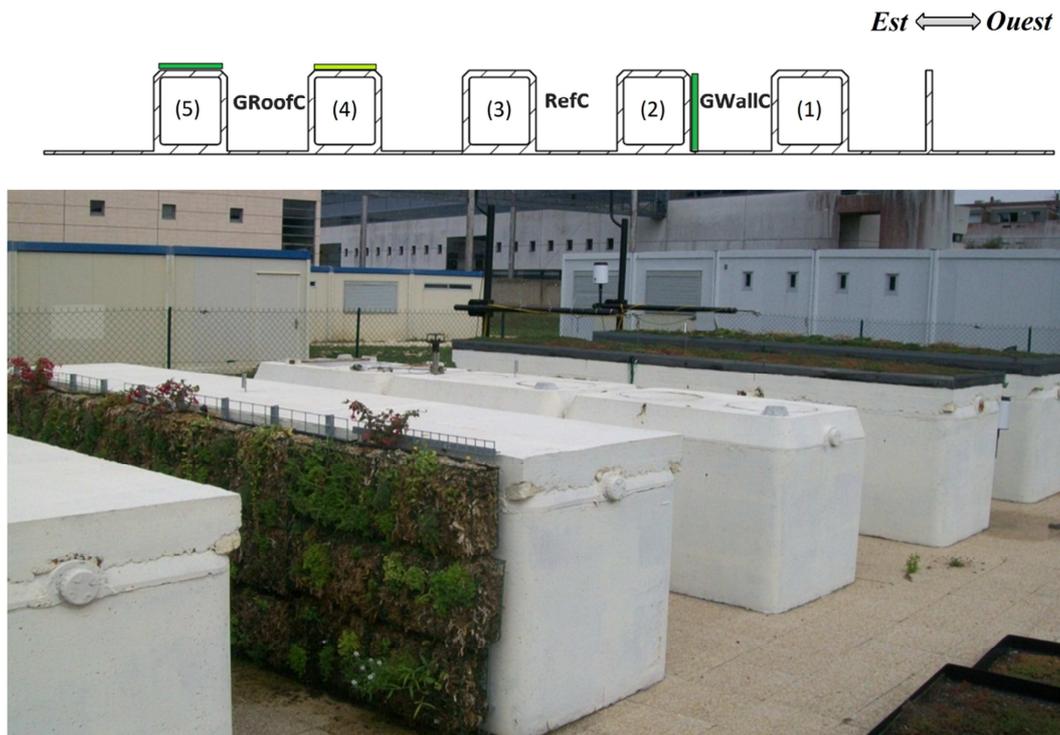


Figure 3-4 : Dispositifs de végétalisation expérimentés sur la maquette de scène urbaine à échelle réduite

La mise en place des toitures végétales a été réalisée dans le cadre du projet ANR Habisol-AGROBAT dans le but d'étudier l'incidence des toitures terrasses végétalisées sur la performance énergétique des bâtiments. Dans ce projet, deux typologies de toitures ont été expérimentées, la première comporte une plantation de sedum et est appelée « Toundra », la seconde comporte une plantation de graminées et est appelée « Pampa ». Les deux types de végétations sont adaptés à différents climats avec une plus grande nécessité d'arrosage pour les graminées. Les deux plantations utilisent un complexe formé par un tapis de substrat et une couche de drainage constituée de pouzzolane. L'épaisseur des complexes utilisés est de 8 et 12 cm respectivement (Ouldboukhite, 2012).

Le mur végétal installé sur la façade ouest de l'un des bâtiments a été mis en place par l'entreprise « Atelier du Végétal » (cf. Figure 3-5) au mois de juin 2011. Les modules sont constitués de caissons métalliques contenant de la sphaigne végétale originaire du Chili. Ces modules font 15 cm d'épaisseur et sont montés sur une grille métallique préalablement fixée au mur. De par sa forme, la grille métallique forme derrière les modules de végétalisation une lame d'air faiblement ventilée de 5 cm. Six différentes typologies de végétation ont été plantées sur le mur végétal :

- Sedum (Acre 'Yellow Queen' et acre 'Orpin doré')
- Menthe ('Requilenii' de Corse)
- Thym (Sperpyllum, praecox minor, pseudolanuginosus, et anderson doré)
- Vinca (minor blanche)

- Campanule (muralis bleue)
- Delosperma jaune



Figure 3-5 - Mise en place d'un système de façade végétalisée composée de caissons de sphaigne attachés à une grille métallique

Contrairement aux toitures végétales, la rétention de l'eau de pluie par le mur végétal est faible et les forces de gravités favorisent le drainage de l'eau en surplus. Par conséquent, une irrigation régulière assurant le développement des plantes est nécessaire. Un arrosage goutte à goutte est installé sur la partie supérieure du mur. Il permet d'apporter au mieux la juste quantité d'eau nécessaire pour les plantes. L'irrigation est automatisée à l'aide d'un programmeur permettant de prérégler les fréquences et durées d'arrosage. Une gouttière (cf. Figure 3-5) mise en place sous le mur végétal permet de drainer l'eau en surplus. Cela permet entre autre d'éviter que l'eau ne stagne dans la rue et modifie les propriétés thermiques et radiatives de la chaussée.

3.2- Objectifs des configurations d'étude microclimatiques sur ClimaBat

Le suivi expérimental des dispositifs de végétalisation installés sur la maquette ClimaBat est conçu pour répondre à plusieurs objectifs :

- Étude des modules de végétalisation et de leur comportement thermohydrigue en relation avec les conditions météorologiques
- Détermination de leurs impacts thermiques sur les bâtiments à échelle réduite
- Évaluation de leurs impacts thermiques et hygrométriques sur l'environnement extérieur à l'échelle des rues canyons
- Constitution d'une base de données expérimentale utile dans la calibration, la vérification et la validation des modèles développés

Le premier objectif est accessible par l'analyse directe des mesures réalisées au sein des composants de végétalisation. Le deuxième objectif est accessible qualitativement via des comparaisons directes aux mesures réalisées sur le bâtiment témoin. La prise en compte de la structure du bâti est cependant nécessaire pour transposer les résultats à des bâtiments réels. Le troisième objectif n'est accessible que par la comparaison des mesures simultanées réalisées dans les rues étudiées.

La partie supérieure de la figure 3-4 schématise la disposition générale des dispositifs de végétalisation sur la plateforme expérimentale. L'étude expérimentale de l'impact microclimatique des enveloppes végétales présentée dans ce chapitre est basée sur la comparaison des mesures réalisées dans trois rues canyons distinctes. La première rue ne comporte ni mur végétal ni toiture végétale, c'est la rue de référence que l'on dénote RefC. La deuxième rue est celle où le mur végétal a été installé. Dans cette rue le seul dispositif de végétalisation situé à proximité immédiate est le mur végétal installé sur la façade orientée vers l'ouest. Cette rue est dénotée GwallC. La troisième configuration d'étude microclimatique est donnée par la rue située entre les deux toitures végétales. Cette troisième et dernière rue expérimentée est dénotée GRoofC. La figure 3-7 illustre les trois configurations avec une photographie de chacune des rues canyon étudiées.

3.3- Suivi expérimental des enveloppes végétales

3.3.1- Liste des capteurs installés sur la maquette

L'instrumentation de la maquette ClimaBat permet de collecter des mesures de grande utilité pour l'appréhension des conséquences de l'usage de ces dispositifs végétaux. Le choix des instruments de mesures et de leurs emplacements dans la maquette est dicté par les objectifs de la campagne expérimentale. Pour rappel, il s'agit de suivre le comportement thermique et hydriques des modules de végétalisation en fonction des sollicitations météorologiques, de déterminer l'incidence thermique de la végétalisation sur les bâtiments et ses conséquences énergétiques et enfin, d'évaluer l'impact microclimatique à l'échelle d'une rue canyon à proximité immédiate.

Afin de répondre à ces objectifs, quatre-vingt capteurs ont été installés dans différents emplacements sur la plateforme expérimentale. La liste de ces capteurs et de leurs principales caractéristiques est dressée dans le tableau 3-2. Ces capteurs permettent de réaliser les mesures suivantes :

Dans le système du mur végétal :

- Mesure de la température à 3 hauteurs et 5 profondeurs au sein du substrat du mur végétal
- Mesure de la teneur en eau au sein du mur végétal à 4 distances par rapport à l'arrosage
- Mesure de la température à 3 hauteurs au sein de la lame d'air formée par la grille métallique
- Mesure de l'humidité relative au centre de la lame d'air

Dans les trois rues canyons :

- Mesure de la température la température de l'air à 3 hauteurs et à différentes distances des façades expérimentées y compris au centre de chacune des rues
- Mesure de l'humidité relative au centre des 3 rues
- Mesure du rayonnement solaire réfléchi et du rayonnement GLO émis par les rues RefC et GwallC

Dans les bâtiments expérimentaux :

- Mesure du flux thermique traversant les façades des rues RefC et GwallC
- Pour rappel, les thermocouples insérés lors d'une étude antérieure (Doya, 2010) dans les façades intérieures et extérieures et dans l'air intérieur des bâtiments sont, à ce jour, fonctionnels et permettent presque tous l'acquisition des mesures correspondantes.

Un schéma qui montre l'emplacement de ces différents capteurs dans la plateforme ClimaBat est donné par la figure 3-6. Les pyranomètres (capteurs de flux radiatif solaire) et les pyrgeomètres (capteurs des flux radiatifs GLO) sont placés au milieu des rues à hauteurs des toitures. Ils sont orientés vers le bas d'une façon à mesurer les radiosités CLO et GLO des rues par rapport à leurs emplacements respectifs. L'anémomètre sonique est placé à 28 cm au-dessus de la toiture du bloc bâtiment central. Il mesure la vitesse et la direction instantanées du vent à cet emplacement. Les hygromètres permettent de mesurer simultanément l'humidité relative et la température de l'air avec les précisions mentionnées sur le tableau 3-2.

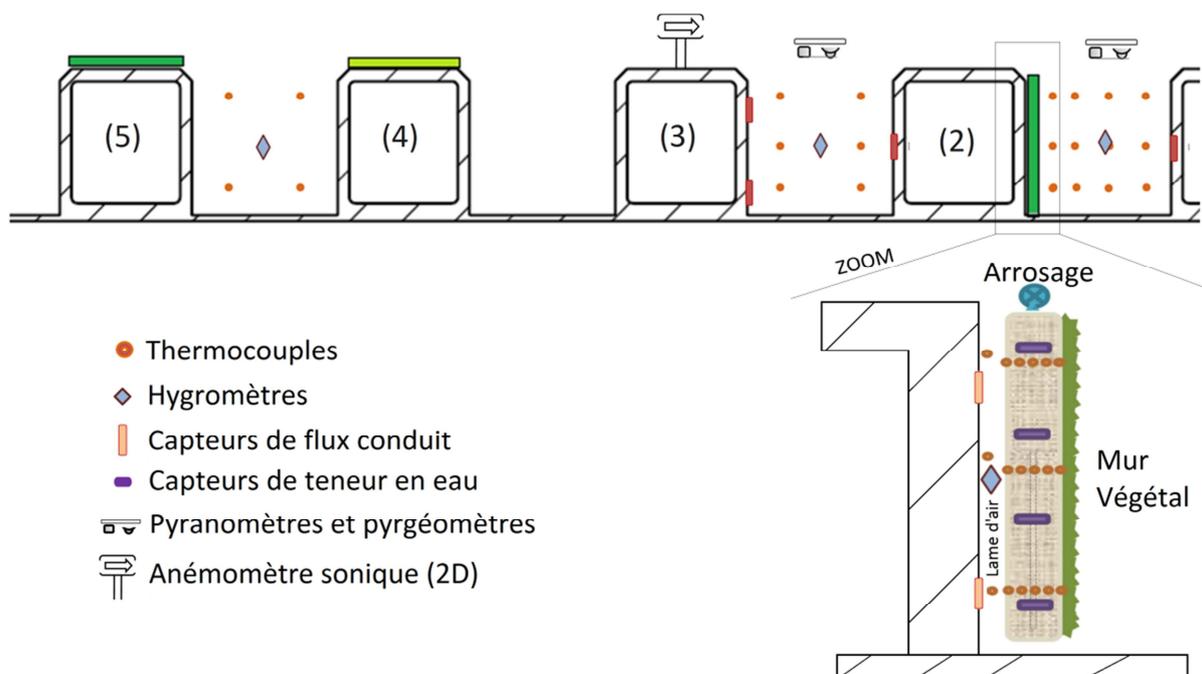


Figure 3-6 : Schéma représentatif de l'emplacement spécifique de chacun des capteurs installés dans le cadre du projet ANR-VegDUD

Tableau 3-2 : Liste des capteurs installés dans le cadre du projet ANR-VegDUD dans la maquette expérimentale et leurs principales caractéristiques

Nombre	Type de capteur	Caractéristiques
40	Thermocouple de type K	Précision : $\pm 0,3$ K
6	Capteurs teneur en eau	Gamme de mesure : 0-100 % (0-50% linéaire) ; Précision : ± 3 %
2	CMP3 Pyranomètre	Gamme spectrale : 0,3-2,8 μm ; Champ de vue : 180°
2	CGR3 Pyrgéomètre	Gamme spectrale : 5-42 μm ; Champ de vue : 150°
6	Capteur de flux thermique	Dimension : 10x10 cm^2
4	Hygromètre CS215	Gamme de mesure pour HR : 10-90% ; Précision : $\pm 2\%$ $\pm 0,4^\circ\text{C}$ entre $+5^\circ\text{C}$ et $+40^\circ\text{C}$

Les données météorologiques sont mesurées à l'aide de capteurs installés dans la plateforme expérimentale et d'une station météorologique mise en place sur le toit d'un bâtiment universitaire de proximité. La station météorologique mesure l'éclairement solaire et l'éclairement GLO du ciel à l'aide d'un radiomètre¹ composé d'un pyranomètre et d'un pyrgéomètre. Elle mesure aussi la température, l'humidité relative et le vent sur la toiture du bâtiment. Des mesures complémentaires locales sont réalisées sur la plateforme expérimentale. Elles concernent la température et l'humidité relative à 3 m au-dessus de la maquette expérimentale en plus de la pluviométrie.

L'intervalle choisi pour l'enregistrement des données expérimentales est de 5 min. Les données de température, d'humidité et de flux thermique et radiatif sont échantillonnées sur ce pas de temps. En outre, le système d'acquisition utilisé permet de réaliser des opérations statistiques sur les données mesurées sur un pas temps plus court. Ainsi, la pluviométrie est cumulée et la vitesse et direction du vent sont moyennées entre deux enregistrements.

¹ Radiomètre CNR1 de Kipp & Zonen©

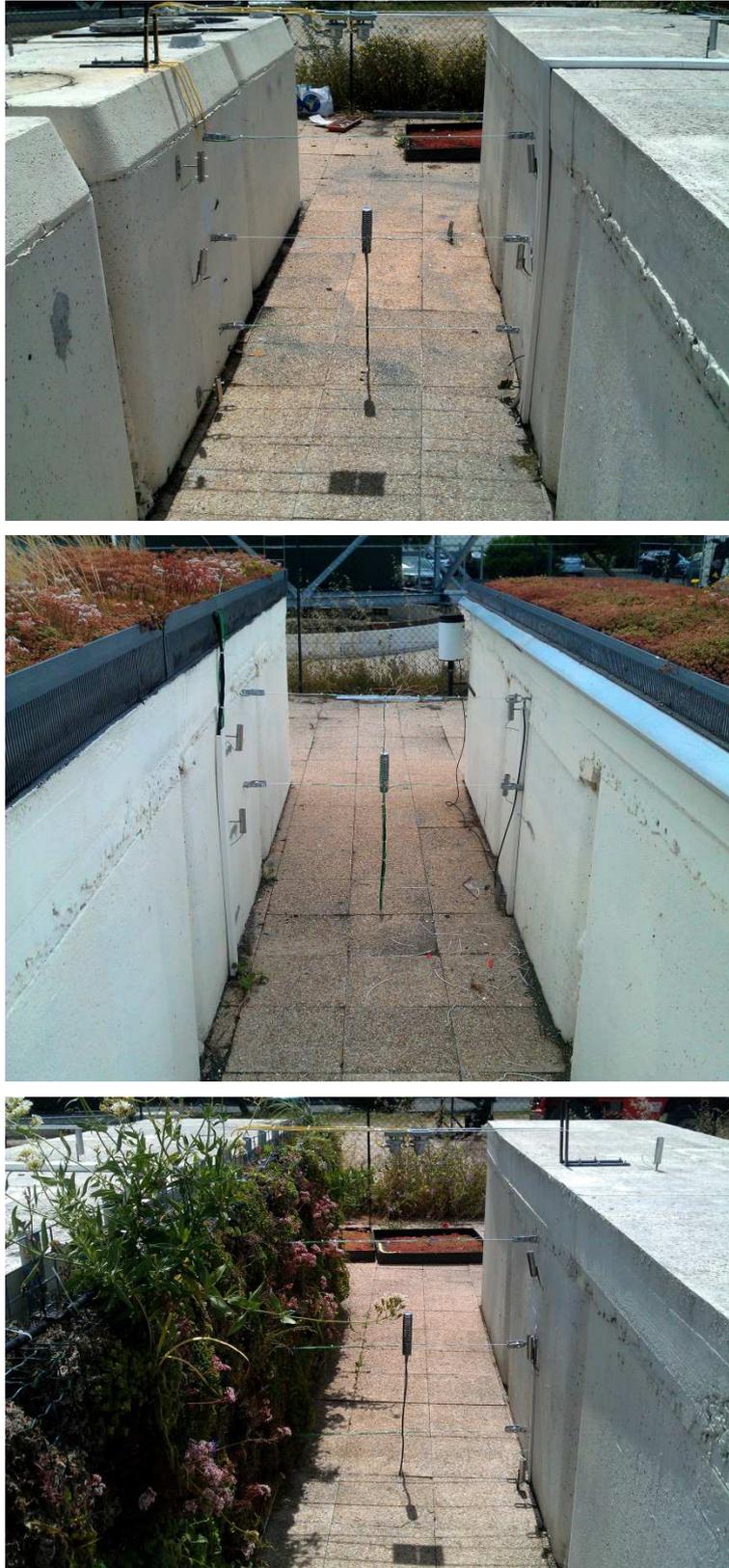


Figure 3-7 : Les trois rues étudiées avec les capteurs correspondants

3.3.2- Aspects techniques de la mise en œuvre

Les quatre-vingt capteurs ont été reliés à un système d'acquisition¹ dérivé sur 3 multiplexeurs. La centrale d'acquisition est placée dans un boîtier étanche à l'intérieur du bloc sud du bâtiment central. Les câbles des capteurs sont acheminés vers elle dans des gaines protectrices sous-terraines (cf. Figure 3-8). Les thermocouples utilisés ont été étalonnés, préalablement, dans un bain thermostaté. Par la suite, les câbles de capteurs ont été numérotés pour faciliter leur repérage. Une fois passés dans les gaines, ils ont été positionnés dans leurs emplacements puis attachés à la grille métallique du mur végétal ou à des supports préalablement installés dans les rues. Toutes les mesures sont effectuées dans le plan médian de la maquette expérimentale. À titre préventif, une couche de vernis a été appliquée sur les soudures chaudes des thermocouples dégainés et sur les capteurs de flux thermique pour éviter leur oxydation.



Figure 3-8 : Acheminement^(a) souterrain des câbles de capteurs vers la centrale d'acquisition^(c) placée dans un boîtier étanche^(b) à l'intérieur d'un bloc du bâtiment central



Figure 3-9 : Positionnement (a) des thermocouples, des capteurs de flux thermique et (b) de l'hygromètre dans le système du mur végétal

¹ Modèle CR1000 de marque Campbell Scientific©

Au niveau du mur végétal, une colonne de modules végétalisés a été enlevée, puis remise à sa place, pour permettre le passage des câbles et le positionnement des différents capteurs (cf. Figure 3-9). Cinq thermocouples régulièrement espacés sont enfoncés dans le substrat à 3 hauteurs différentes et un thermocouple est placé dans la lame d'air à chaque hauteur. De même, 4 sondes permettant la mesure de la teneur en eau sont enfoncées au milieu du substrat à différentes distances de l'arrosage. Deux autres sont placées à hauteur du premier capteur et dans des emplacements différents par rapport aux goutteurs terminaux du système d'arrosage. Par ailleurs, deux capteurs de flux thermique sont collés à la façade extérieure en béton et un hygromètre est positionné au centre la lame d'air. Lors de la mise en place des capteurs, il était question de réfléchir sur le choix des différentes solutions techniques afin de réduire les erreurs inhérentes aux mesures physiques. Quelques aspects importants de la mise en œuvre de l'instrumentation sont présentés ci-dessous.

L'une des considérations importantes concerne la taille des supports utilisés pour la fixation des différents capteurs. En effet, étant donné l'orientation des bâtiments et le rapprochement des capteurs contenus dans le plan médian, tout support volumineux aurait une portée d'ombre importante à l'emplacement des différents capteurs. Ceci conduirait sans doute à des mesures erronées et non représentatives des grandeurs que l'on souhaite mesurer. De ce fait, le choix des supports de fixation des capteurs positionnés dans les rues est porté sur des systèmes de fils tendus. Ainsi, les pyranomètres et les pyrgeomètres sont fixés sur des plaques métalliques de petite taille maintenues au milieu des rues à 10 cm au-dessus des toitures (cf. Figure 3-10(a)). De même, 24 thermocouples (cf. Figure 3-6) sont attachés à des fils tendus à trois hauteurs entre les deux façades de chacune des rues expérimentées. Par ailleurs, les abris commercialisés pour ce type de capteurs sont trop volumineux pour être placés dans les rues canyons à échelle réduite car ils perturberaient l'écoulement d'air et produiraient une ombre importante. Pour remédier à cette problématique, des abris de petite taille ont été fabriqués à partir de coudes flexibles en PVC (cf. Figure 3-10(b)). Ils ont été repeints en chrome pour maximiser leur réflectivité solaire et minimiser leur émissivité infrarouge. Ces abris permettent de protéger les capteurs d'humidité et de température de la pluie et du rayonnement solaire dans la limite des angles d'exposition dans la rue.



Figure 3-10 : (a) Pyranomètres et pyrogéomètres fixés sur des plaques métalliques maintenues à l'aide de fils tendus entre les bâtiments ; (b) Abris des hygromètres fabriqués en PVC

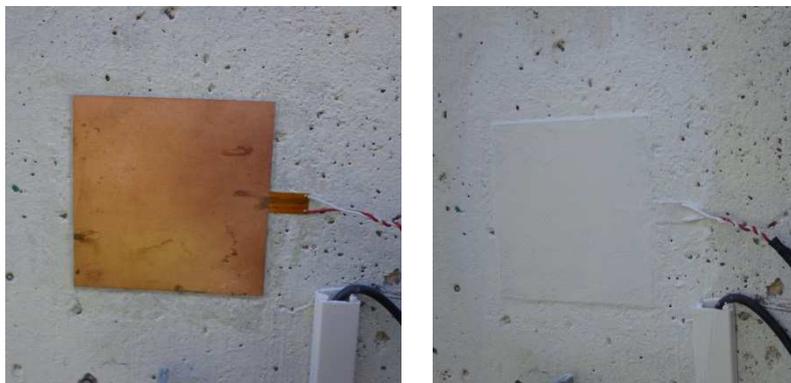


Figure 3-11 – Mise en place des capteurs de flux thermique

Par ailleurs, les capteurs de flux thermique sont constitués de plaques en cuivre de 10 x 10 cm². Leur mise en place nécessite une attention particulière pour que les mesures effectuées soient représentatives du flux traversant les façades au plus juste. Ces capteurs sont sensibles à l'humidité et leur utilisation à l'extérieur peut les détériorer. Pour remédier à cette contrainte, les six capteurs sont recouverts d'une couche de vernis et une mince couche de silicone les isolent sur les bords. Par la suite, les capteurs ont été collés contre les façades en béton à l'aide d'une colle époxy. Enfin, ils ont été repeints en blanc afin de leur conférer les mêmes propriétés radiatives que celles des façades blanches (cf. Figure 3-11).

Enfin, la sensibilité des capteurs de teneur en eau¹ n'est pas une caractéristique intrinsèque de l'élément sensible de la sonde à l'inverse des autres capteurs pour qui les fournisseurs mettent à disposition les fiches d'étalonnage. Les sondes utilisées sont des sondes capacitives qui permettent de mesurer la teneur en eau du sol sur un volume restreint autour de l'appareil. Elles mesurent, en effet, la constante diélectrique ou la permittivité du milieu. La permittivité globale du substrat dépend de la teneur en eau mais aussi des proportions entre les phases constituantes du

¹ Sonde diélectrique ECH₂O-EC5, gamme std 0-50% de Sols Mesures©

substrat (phases liquide, solide et gazeuse). Le signal électrique délivré par ce type de sondes dépend donc du type de substrat utilisé. L'étalonnage des six sondes implémentées dans le mur végétal a été réalisé grâce au montage illustré par la figure 3-12. Avant la mise en place des capteurs dans la maquette expérimentale, un module quasiment sec a été extrait de son emplacement dans le mur végétal afin de réaliser l'étalonnage au laboratoire. Les sondes de teneur en eau ont été reliées à la centrale d'acquisition puis insérées dans le substrat. Ensuite, le module végétal a été saturé en eau progressivement. La pesée du module à chaque fois que sa teneur en eau est augmentée a permis de relier les mesures effectuées par les sondes au poids apparent du module végétal. Enfin, Un échantillon de sphaigne a été mis dans une étuve pendant une semaine pour l'assécher. La pesée de cet échantillon a permis de déterminer la masse volumique apparente à sec de l'échantillon et par conséquent de relier la mesure des sondes à la teneur en eau volumique du substrat.



Figure 3-12 : Étalonnage des sondes de teneur en eau

4- Analyse des données expérimentales

Quelques résultats de mesures effectuées principalement durant l'été 2012 sont présentés dans cette partie de chapitre. Durant cet été, les conditions météorologiques à La Rochelle étaient représentatives du climat de cette ville française située sur la côte atlantique (cf. Figure 3-13). La température s'élevait souvent à jusqu'à 30°C dans l'après-midi et atteignait jusqu'à 35°C occasionnellement. L'éclairement solaire sur l'horizontal a atteint 1000 W.m² par ciel clair. Quant à l'humidité relative, l'examen des données météorologiques montre de grandes variations dans temps. La rose de vents, dessinée sur la base des mesures délivrées par l'anémomètre sonique placé à 28 cm au-dessus du toit du bâtiment central, montre que l'écoulement local du vent est influencé par l'environnement urbain et par l'orientation des bâtiments de

la maquette. En effet, l'écoulement dominant mesuré à cet emplacement est suivant l'axe des rues, c.à.d. l'axe Sud–Nord. À noter que cette mesure locale ne reflète pas forcément la structure de l'écoulement autour de la maquette, d'autant plus qu'en zones urbaines réelles, le vent est moins canalisés par les rues qu'il ne l'est dans la plateforme expérimentale.

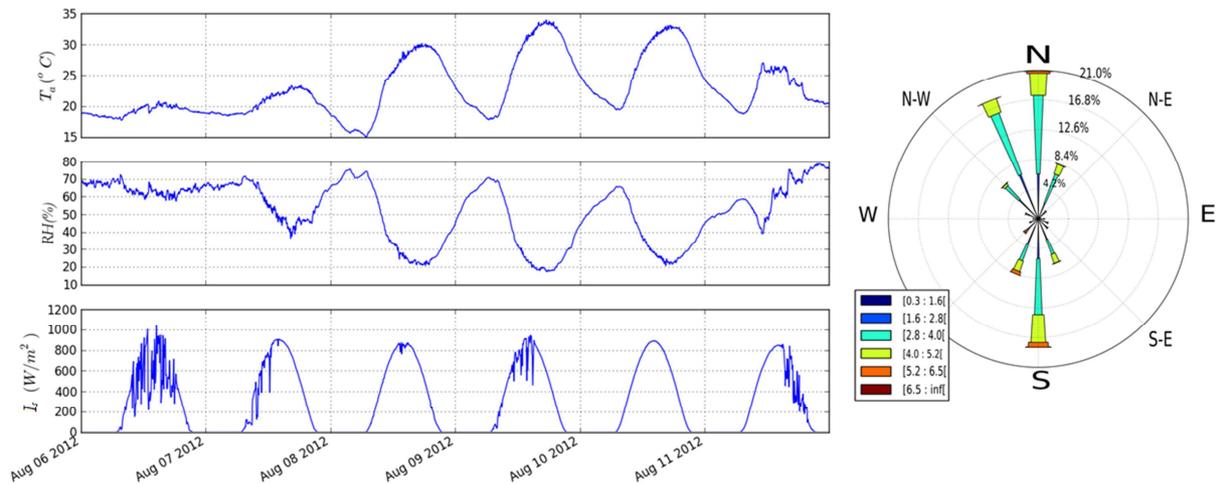


Figure 3-13 : Exemple de données météorologiques enregistrées au cours de l'été 2012 : Température de l'air ambiant T_a , Humidité relative HR , éclairement solaire I_s et rose des vents

4.1- Mesures hygrothermiques et hydriques dans le mur végétal

Les murs végétaux de façades nécessitent un arrosage régulier pour permettre le développement des plantes et résister à la sécheresse. Un programme assure l'irrigation automatique du mur végétal selon les fréquences et les durées d'arrosage préalablement programmées. Pendant les périodes chaudes de l'année, le mur était arrosé deux fois par jour. L'arrosage se met en marche à 5h00 puis à 17h00 et ce, pendant 5 min pour chaque séquence d'arrosage. L'analyse des mesures faites par les sondes de teneur en eau placées à différentes hauteurs montre que l'écoulement de l'eau dans le substrat de sphagnum est gouverné par les forces de gravité. L'évolution au cours du temps de la teneur en eau à 12, 45 et 97 cm du haut du mur ou s'effectue l'arrosage est illustrée par la figure 3-14. Il a été constaté que la partie basse du mur devient assez rapidement saturée après chaque séquence d'arrosage. L'eau coule vers le bas sous l'effet de la gravité et atteint la gouttière de drainage à moins de 30 minutes après le déclenchement de l'arrosage.

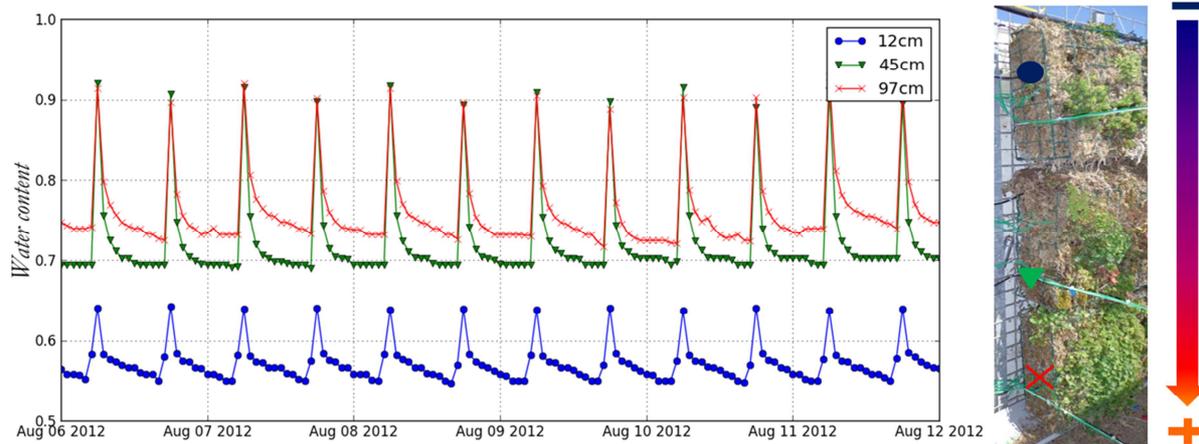


Figure 3-14 : Évolution de la teneur en eau volumétrique du substrat du mur végétal la paroi végétalisée à différentes distances de l'arrosage

Le suivi expérimental du mur végétal inclut des mesures de température dans la lame d'air formée par la grille métallique sur laquelle sont attachés les modules du mur végétal. Les mesures effectuées par les trois thermocouples placés à en haut, en bas et au milieu de cette lame d'air sont présentées sur le graphique (a) de la figure 3-15.

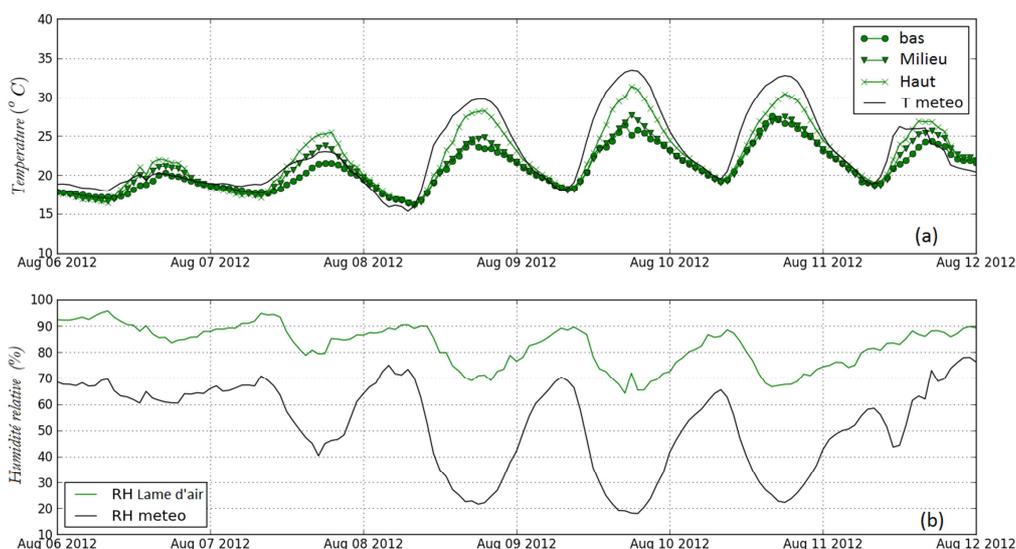


Figure 3-15 : (a) Températures d'air mesurées à trois hauteurs de la lame d'air, comparées à la température de l'air extérieur ; (b) Humidité relative mesurée au milieu de la lame d'air, comparée à l'humidité relative de l'air extérieur

Cette figure montre que la température de l'air est plus faible dans la partie basse du mur végétal. Étant donné que le substrat est plus humide dans la partie basse du mur, le refroidissement évaporatif de l'air dans la lame d'air y est plus important. De plus, la partie haute du mur végétal a un temps d'ensoleillement plus long. Un tirage thermique descendant s'établit entre le haut et le bas de lame d'air sous l'effet de cette différence de température et du réchauffement de l'air au-dessus de la chaussée ensoleillée au cours de la journée. L'écoulement de l'air dans la lame d'air est de

faible vitesse à cause des fortes pertes de charges qu'engendre la grille métallique utilisée. Cet écoulement permet d'assurer le renouvellement d'air dans la lame d'air qui maintient le flux de chaleur latent sur la surface intérieure du substrat. Le graphique (b) de la figure 3-15 permet de comparer l'humidité relative de l'air mesurée au milieu de la lame d'air à l'humidité relative de l'air extérieur. On constate que le déficit de saturation dans la lame d'air reste constamment égal à 1/3 du déficit de saturation de l'air extérieur.

La figure 3-16 permet de comparer la température mesurée sur la façade de référence et sur la façade végétalisée pour une journée typique d'été. Tandis que la température de la façade de référence RefF commence à augmenter avec la température de l'air dès 9h, la température de la surface extérieure du substrat n'augmente significativement qu'à partir de 15h quand la façade est directement exposée au rayonnement solaire. Ce comportement est dû, premièrement, aux interrétroactions qui sont réduites par la façade végétale et deuxièmement au fait que l'évapotranspiration dépend différemment de la température et de l'éclairement. Par ailleurs, la figure 3-16 permet de comparer les températures d'air mesurées à différentes distances de la façade végétale.

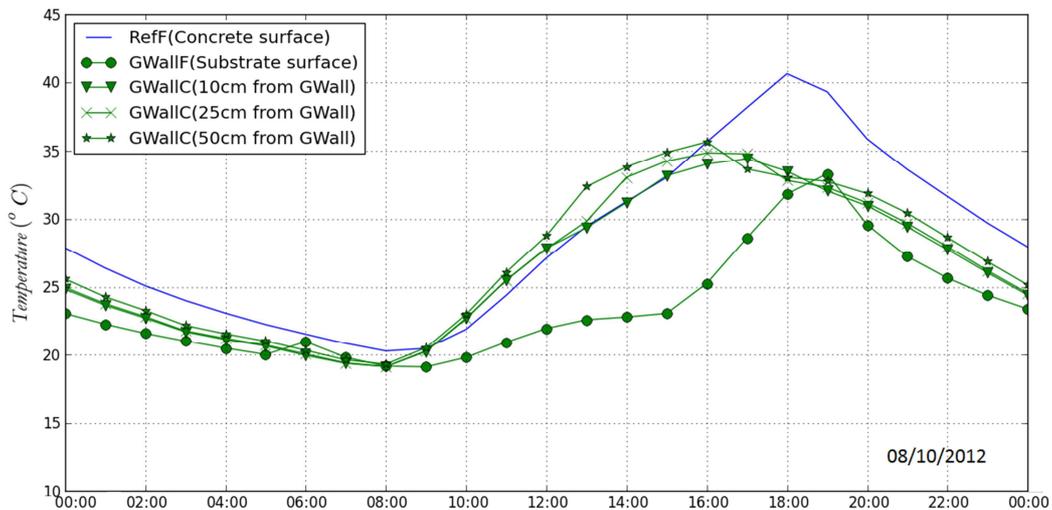


Figure 3-16 : Comparaison de la température de surface pour la façade de référence et pour la surface extérieure du substrat et températures d'air mesurées à 10, 25 et 50 cm de la façade végétale

Malgré des différences enregistrées de l'ordre de la résolution des capteurs, un gradient de température est mesuré. Le gradient de température maximal correspond aux heures de la journée où la température de la façade végétale (2^{ème} courbe) est minimale par rapport à la façade de référence. En d'autres termes, le rafraîchissement offert par le mur végétal est maximal pendant les heures de la journée où le canyon reçoit un maximum d'énergie solaire (cf. Figure 3-21).

4.2- Impacts thermiques sur le bâtiment végétalisé

Le mur végétal mis en place sur la façade ouest constitue une couche de matériaux supplémentaire pour cette paroi. Par conséquent, la résistance thermique additionnelle réduirait le flux thermique sur la façade d'origine même si le bilan énergétique à la surface extérieur reste inchangé. Or, compte tenu du bilan énergétique modifié à la surface et des propriétés thermiques et radiatives changeantes au cours de l'année en fonction des propriétés végétales et environnementales, la baisse de température mesurée sur la façade ne peut être associée uniquement à la résistance thermique additionnelle. Conjointement, le flux thermique transmis à travers la paroi végétalisée dépend, en partie, de l'éclairement solaire reçu par elle dans son contexte urbain. La majorité des études expérimentales concernant l'évolution de la température de surface extérieure du bâti ont été réalisées sur des toitures végétales ou des façades recouvertes de plantes grimpantes et sans confinement microclimatique (cf. Chapitre 1). Les mesures de température et de flux thermique effectuées sur la façade extérieure en béton recouverte du mur végétal sont analysées dans cette partie et les conséquences de la végétalisation sur la modification de la charge thermique des bâtiments sont déduites.

4.2.1- Effets thermiques en période estivale

La figure 3-17 permet de comparer les mesures de température effectuées sur la façade avec mur végétal (GwallF) aux mesures effectuées sur la façade blanche de référence (RefF).

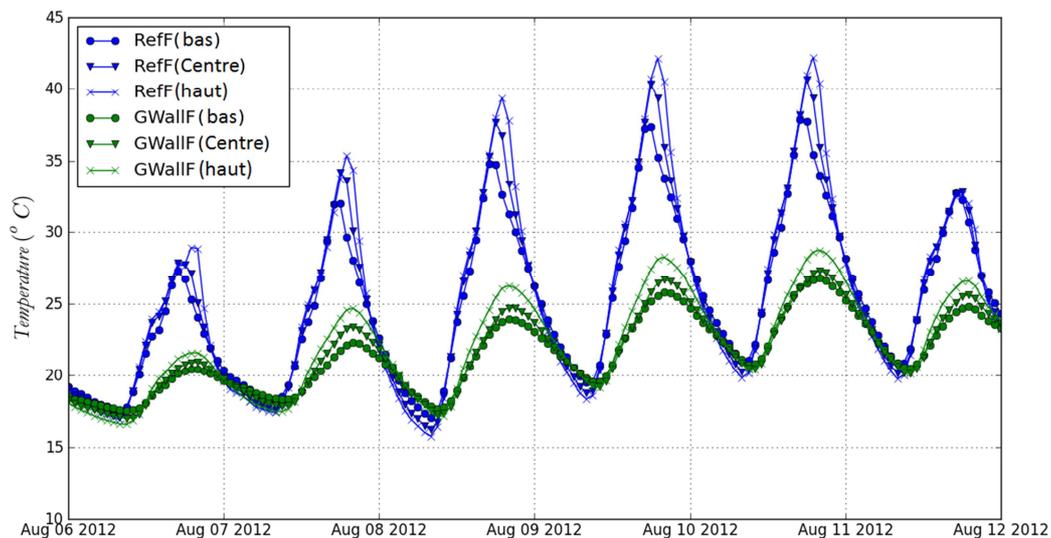


Figure 3-17 : Comparaison des températures mesurées sur les facettes en bas, au milieu et en haut de la façade végétalisée (GwallF) aux températures mesurées sur la façade de référence (RefF) durant une période estivale

On remarque que le mur végétal réduit les pics de température sur la façade végétalisée d'environ 15 °C. En effet, lorsque la température de la façade de référence atteint 45 °C, la température de la façade végétalisée ne dépasse pas 28 °C. Par ailleurs, le pic des températures augmente avec la hauteur des points de mesure. La différence entre les pics de température mesurés en haut et en bas est de 5 °C et 2,5 °C pour les façades RefF et GwallF respectivement. Cette différence de température est liée au temps d'ensoleillement direct qui est plus long pour la partie supérieure. De même, un déphasage dans le temps entre les trois pics de température mesurée aux trois hauteurs différentes est observé uniquement pour la façade de référence RefF. Durant cette période, les pics de température ont lieu respectivement à 17h, 18h et 19h pour la façade de référence tandis que les pics de toutes les températures mesurées sur la façade végétalisée ont lieu autour de 20h de fait de son inertie.

Au cours de la nuit, plus précisément entre minuit et 9h du matin, la température de la façade végétalisée est supérieure d'environ 2 °C à la température de la façade de référence. Le mur végétal réduit les déperditions radiatives de grandes longueurs d'ondes. Par ailleurs, ces déperditions sont plus importantes en haut des façades où le facteur de forme avec le ciel est plus important. Ainsi, la température mesurée en bas des façades RefF et GwallF est supérieure d'environ 1 °C et 0,5 °C respectivement aux températures mesurées en haut de ces façades.

Les mesures effectuées par les capteurs de flux thermique collés sur la façade avec mur végétal (GwallF) sont comparées, sur la figure 3-18, aux mesures effectuées sur la façade blanche de référence (RefF) à deux hauteurs différentes.

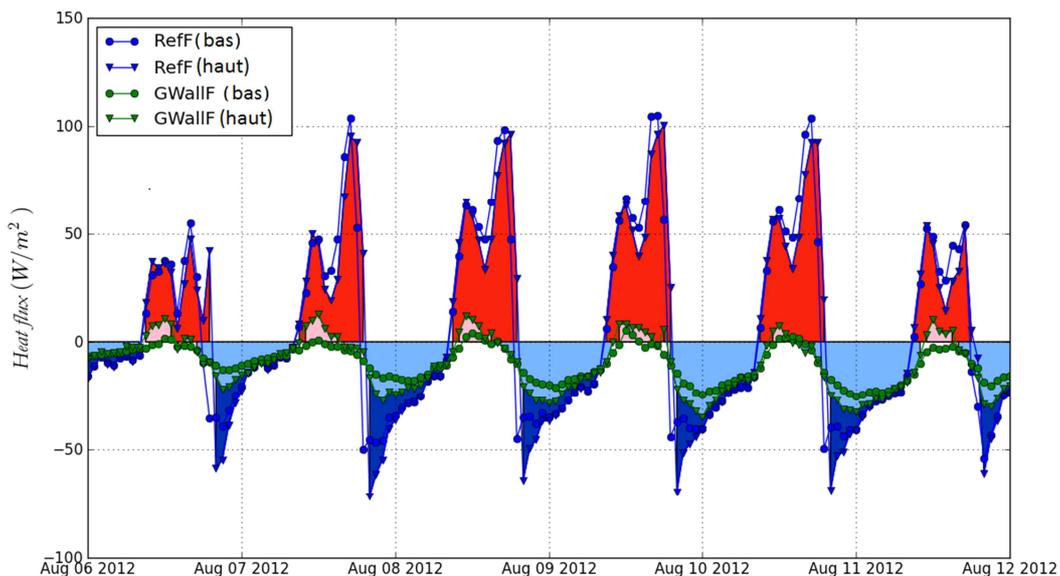


Figure 3-18 : Comparaison des flux thermiques mesurés en bas et en haut de la façade végétalisée (GwallF) aux flux thermiques mesurés sur la façade de référence (RefF) durant une période estivale

Sur cette figure, les valeurs positives du flux transféré à travers la paroi correspondent au flux entrant et les valeurs négatives correspondent aux flux sortant. La figure montre que le mur végétal réduit les flux thermiques traversant la façade dans les deux sens. Cependant la réduction du flux entrant est plus importante. L'orientation des façades et les interrélaxions dans les rues canyons sont à l'origine des deux pics de flux au cours de la journée. En effet, l'éclairement solaire est maximal dans l'après-midi quand les façades orientées vers l'ouest sont directement exposées au rayonnement solaire. Le deuxième pic journalier a lieu avant midi où l'éclairement direct du mur d'en face est partiellement réfléchi sur la façade considérée.

L'aire sous les courbes des flux représente l'énergie thermique mise en jeu. Les flux entrants donnent lieu aux gains thermiques représentés en rouge et les flux sortants donnent lieu aux pertes thermiques colorées en bleu. Les gains représentent l'énergie transmise par la façade au bâtiment et les pertes correspondent à l'énergie transférée de la façade à l'environnement. La figure 3-18 montre que le mur végétal a réduit les gains thermiques du bâtiment à travers la paroi végétalisée d'environ 97% alors qu'il n'a réduit les déperditions thermiques que d'environ 30 %. Ce résultat est visible sur cette figure où l'on peut comparer visuellement les aires rouges les aires bleues.

4.2.2- Effets thermiques en période hivernale

L'analyse des données expérimentales enregistrées pendant une période hivernale en complément des données estivales est nécessaire pour appréhender l'impact thermique annuel dans ce climat océanique. Contrairement aux données météorologiques estivales présentées séparément dans la figure 3-13, les principales variables météorologiques enregistrés durant une semaine de décembre 2012 sont fournies sur le graphique (a) de la figure 3-19. Les variations diurnes de la température étaient comprises entre 0 et 10 °C et l'éclairement solaire sur l'horizontale ne dépassait pas 360 W.m⁻² avec un temps d'ensoleillement de 9h.

La figure 3-19 présente des données expérimentales enregistrées durant cette semaine hivernale par les capteurs dont les données enregistrées en août ont été déjà analysées.

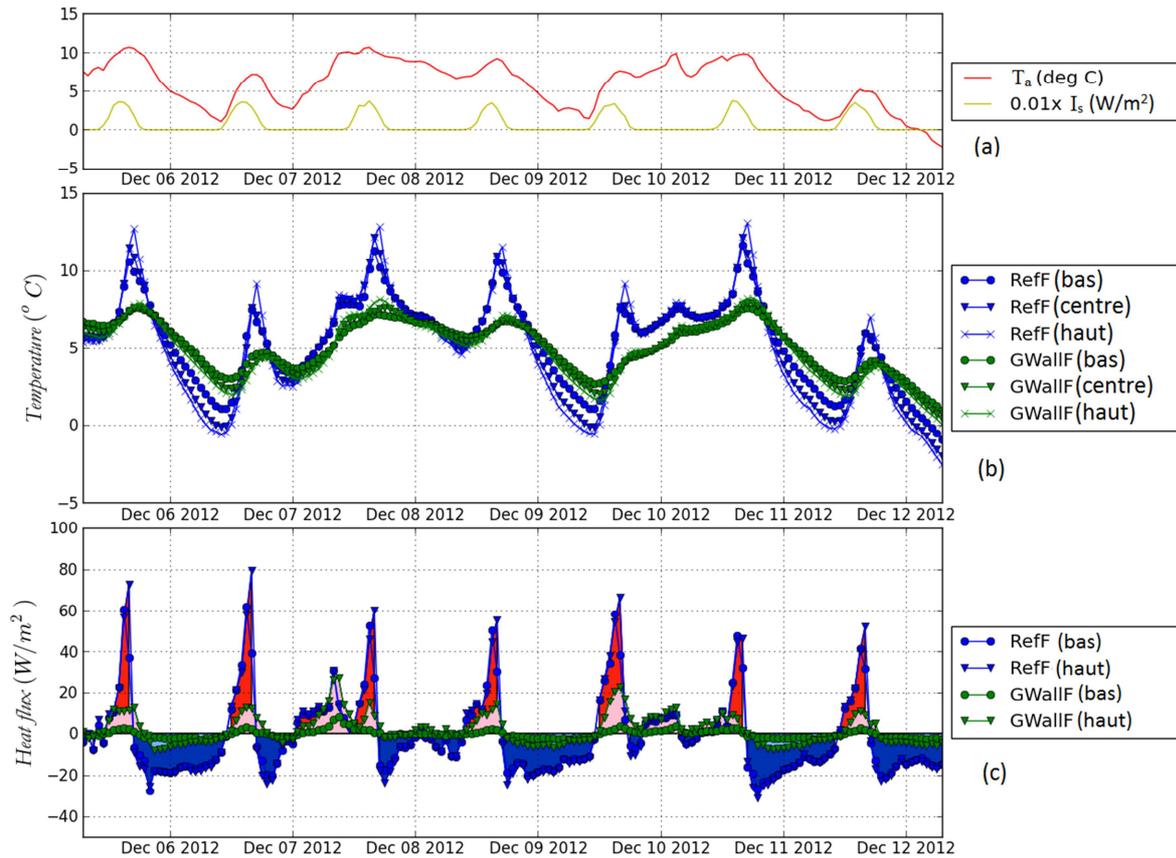


Figure 3-19 : (a) Variations de la température et de l'éclairement solaire pendant une période hivernale (déc. 2012) ; (b) Comparaison des températures mesurées sur les facettes en bas, au milieu et en haut de la façade végétalisée (GwallF) aux températures mesurées sur la façade de référence (Reff) ; (c) Comparaison des flux thermiques mesurés en bas en haut de la façade végétalisée (GwallF) aux flux thermiques mesurés sur la façade de référence (Reff)

La différence de température entre les façades Reff et GwallF est moins importante durant la journée et plus élevée durant la nuit en comparaison avec les résultats de la période estivale. Le mur végétal diminue la température de 3 à 5 °C durant le jour et l'augmente presque de même durant la nuit au contraire des mesures d'août où la différence nocturne était quasiment nulle. Des conclusions semblables peuvent être établies concernant les mesures du flux thermique transmis dans le bâtiment ou transféré vers l'environnement. En effet, le mur végétal réduit aussi bien les gains que les pertes thermiques. Cependant, la réduction des gains thermiques est d'environ 40 % et la réduction des pertes est d'environ 80 %. En comparaison avec l'été, les gains sont moins atténués et les pertes plus réduites.

4.2.3- Bilan énergétique de la paroi végétalisée

Afin d'évaluer l'incidence du mur végétal sur la charge thermique du bâtiment, les flux thermiques entrants et sortants à travers la façade de référence Reff et la façade végétalisée GwallF ont été intégrés sur une période de 3 semaines. La figure 3-20

illustre les résultats du calcul de l'énergie transmise vers le bâtiment ou transférée vers l'environnement exprimés en Wh par unité de surface de façade et par jour.

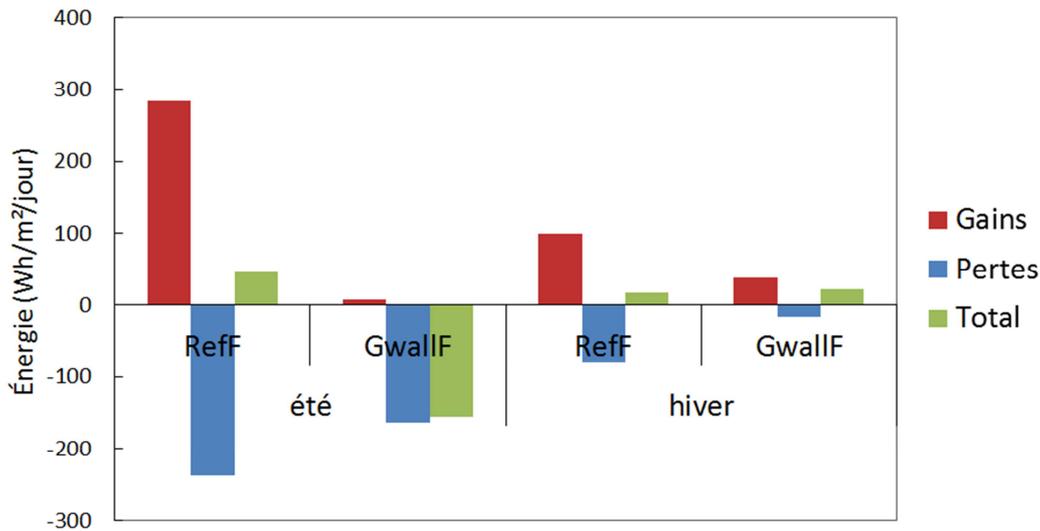


Figure 3-20 : Comparaison du bilan énergétique moyen journalier de la façade végétalisée (GwallF) au bilan énergétique de la façade de référence (RefF) pour les périodes estivales et hivernales

La figure montre que le mur végétal annule quasiment les gains en été au point où ceux-ci sont inférieurs aux gains de la façade de référence en hiver. Il en résulte un bilan énergétique rafraichissant en période estivale. En hiver, le mur végétal agit quasiment comme un isolant passif où les pertes et les gains thermiques sont tous les deux significativement réduits. Le bilan total de la façade végétalisée est tout de même supérieur de 20 % au bilan de la façade de référence ce qui signifie une meilleure performance.

En conclusion, le mur végétal favorise en été un bilan énergétique négatif, donc rafraichissant, vis-à-vis le bâtiment et favorise en hiver un bilan positif synonyme d'une meilleure isolation thermique. Il est à rappeler que ces observations expérimentales sont établies sur des bâtiments à échelle réduite sans chauffage ni climatisation.

4.3- Impacts microclimatiques à l'échelle d'une rue canyon

4.3.1- Impacts radiatifs

L'hétérogénéité des plantes du mur et l'irrégularité de sa couverture végétale lui confère une réflectivité solaire d'une grande variabilité spatiale. Les mesures spectrométriques de réflectivité solaire moyennées sur des disques de 20 cm de diamètre ont montré que la réflectivité solaire de la façade varie entre 0,15 et 0,30 selon le type et la densité de la végétation. Par conséquent, le mur végétal réduit la réflectivité de la façade étant donné que la peinture blanche d'origine est caractérisée

par une réflectivité solaire de l'ordre de 0,64. L'albédo équivalent de la rue canyon végétalisée est donc inférieur à celui de la rue de référence. Afin de pouvoir mesurer la modification du bilan radiatif due à la présence du mur végétal, un pyranomètre et un pyr géomètre ont été placés au milieu de chacune des deux rues expérimentées. Situés à la hauteur des toits et orientés vers le bas, ils permettent de comparer le rayonnement solaire réfléchi et les échanges radiatifs GLO dans les deux rues. Il est supposé que les mesures effectuées à ces emplacements sont représentatives des flux moyens rayonnés par l'ensemble des rues. Cette hypothèse peut être justifiée par le champ de vue hémisphérique de ce type de capteurs.

Le rayonnement solaire global réfléchi par les rues dépend des réflectivités solaires des façades et de la chaussée et varie au cours de la journée en fonction de la course du soleil. La figure 3-21 permet de comparer le flux radiatif solaires réfléchi par la rue GwallC et le flux réfléchi par la rue de référence RefC à l'éclairement solaire horizontal (I_s) pour un ciel clair.

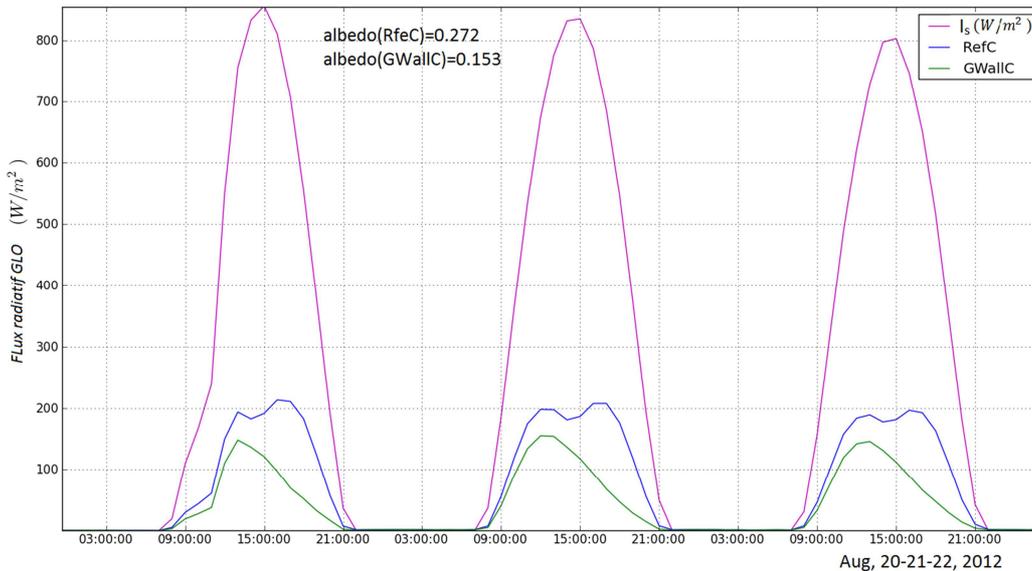


Figure 3-21 : Comparaison du rayonnement solaire réfléchi par la rue avec le mur végétal au rayonnement réfléchi par la rue de référence et à l'éclairement solaire

Le flux réfléchi par la rue de référence est symétrique par rapport au midi solaire tandis que le flux réfléchi par la rue GwallC est asymétrique. Ceci est dû au fait que les pyranomètres mesurent la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus réfléchis par les trois facettes des rues. Pour la rue GwallC, l'intensité du flux réfléchi dépend de la nature de la façade directement exposée au soleil. Étant donné que la façade végétalisée, à faible albédo, reçoit le rayonnement direct dans l'après-midi, l'intensité du flux en cette période de la journée est plus faible. L'albédo moyen équivalent des rues se calcule aisément à partir des courbes tracées sur cette figure. Tandis que l'albédo de la rue de référence est de 0,27, l'albédo de la rue végétalisée n'est que de 0,15.

De même, l'émittance équivalente de chacune des deux rues peut être assimilée aux mesures effectuées par les deux pyrromètres. Le graphique (a) de la figure 3-22 permet de comparer les mesures effectuées par ces deux capteurs.

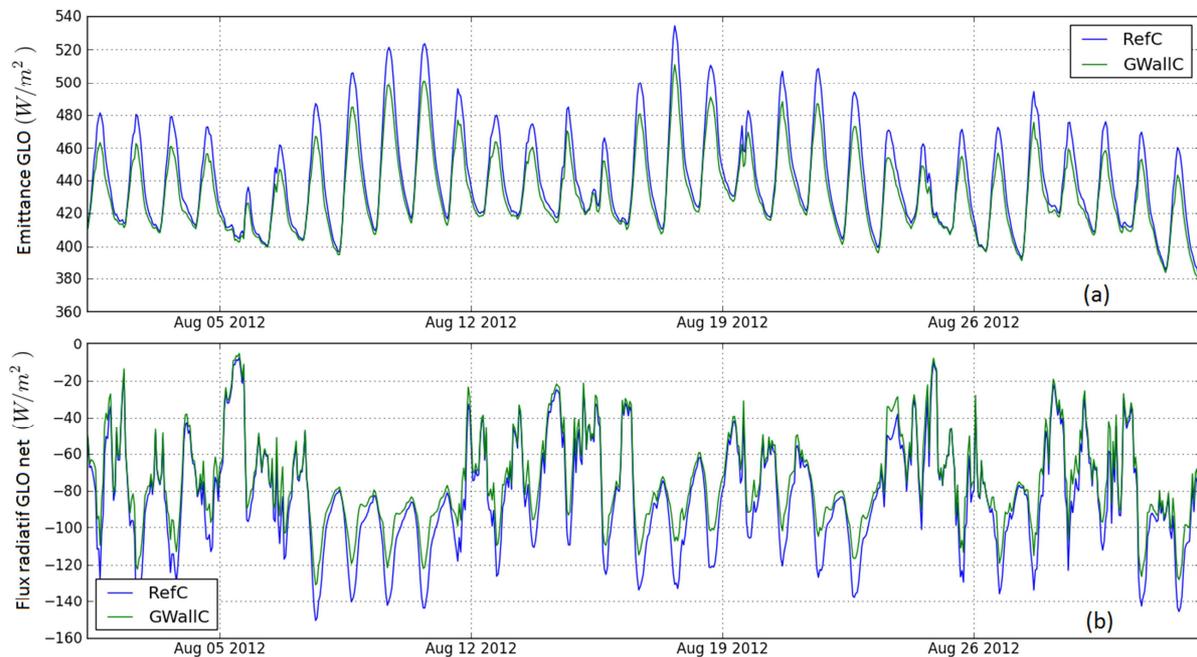


Figure 3-22 : (a) Flux radiatif de grandes longueurs d'ondes émis vers le ciel par les rues RefC et GwallC ; (b) Échange radiatif GLO net entre le ciel et les rues RefC et GwallC

On constate que le rayonnement GLO émis par la rue de référence est supérieur au rayonnement émis par la rue végétalisée au cours de la journée. Ceci est dû à de plus hautes températures sur les facettes de la rue de référence par rapport à la rue végétalisée notamment sur la façade ouest végétalisée. Au cours de la nuit, la différence entre ces mesures est négligeable et les déperditions infrarouges nocturnes pour les deux rues sont égales. Le graphique (b) de la figure 3-22 permet de comparer l'échange radiatif net qui s'établit entre le ciel et les deux rues. L'échange radiatif GLO net est donné par la différence entre l'éclairement GLO du ciel, mesuré par la station météorologique, et l'émittance GLO, mesurée par les deux pyrromètre, pour chacune des deux rues. La réduction du flux émis par la rue végétalisée correspond à un gain énergétique d'environ 20 à 25 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ dans le canyon au cours de l'après-midi.

En utilisant la même forme que l'équation (2-63), les températures radiantes moyennes (MRT) dans les rues RefC et GwallC peuvent être calculées à partir des émittances GLO en assimilant les facettes des rues à des corps noirs. Sur la figure 3-23, la variation diurne de la température radiante moyenne dans les rues RefC et GwallC est tracée sur le graphique (a) tandis que l'éclairement solaire et la différence entre ces deux températures sont tracées sur le graphique (b).

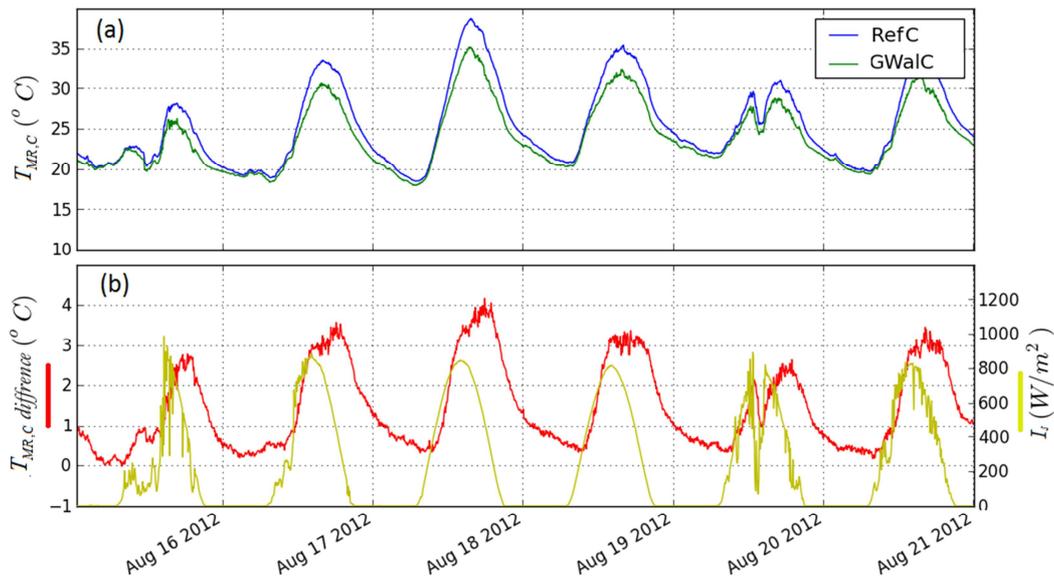


Figure 3-23 : Température radiante moyenne équivalente pour les canyons RefC et GwallC

On remarque que la différence entre les températures radiantes atteint 4 °C pour une journée avec ciel clair où la température de l'air est de 37°C. Cette différence de température reflète une différence dans la température des facettes des deux rues expérimentées. Étant donné que la façade végétalisée est directement exposée au soleil dans l'après-midi, la différence maximale de la température radiante a lieu aux alentours de 18h avec plus de 4h après le midi solaire.

En conclusion, bien que le bilan radiatif net du canyon végétalisé soit plus important que celui du canyon de référence, la température y est moins élevée en période estivale grâce à l'évapotranspiration qui contrebalance le bilan global.

4.3.2- Impacts thermiques

L'impact thermique des enveloppes végétales sur les conditions microclimatiques dans les rues canyons est analysé en termes des mesures de température à l'intérieur des canyons RefC, GwallC et GRoofC. Les mesures enregistrées toutes les 5 min ont été moyennées sur un pas de temps de 1 h pour éliminer les fluctuations de courtes périodes. La figure 3-24 permet de comparer les mesures effectuées par les capteurs de température placés aux centres des trois rues.

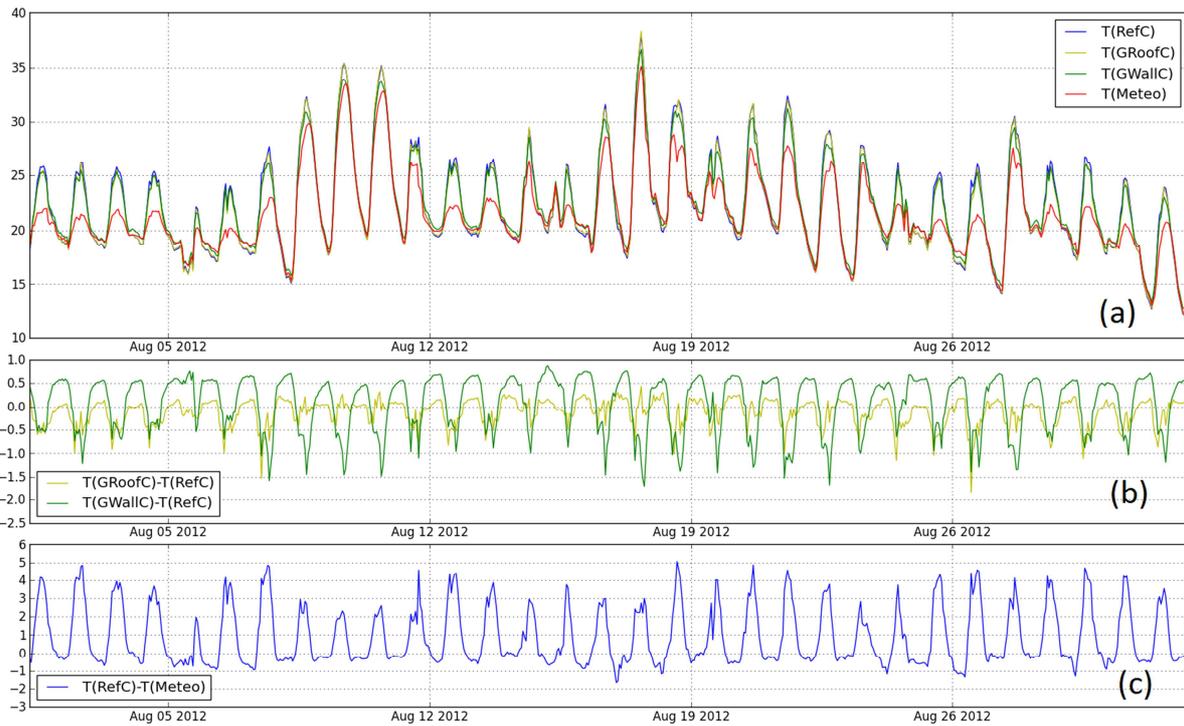


Figure 3-24 : (a) Variations des températures mesurées aux centres du canyon de référence (RefC) et des canyons végétalisés (GwallC et GRoofC) ; (b) Différences de températures dans les rues végétalisées par rapport à la rue de référence ; (c) Surchauffe de l'air dans la rue de référence par rapport à la météo

Le graphique (a) de cette figure montre l'existence d'écarts significatifs entre les trois rues canyons. La température des rues végétalisées est inférieure à la température de la rue de référence qui est, à son tour, inférieure à la température météorologique. Les graphiques (b) et (c) de la figure 3-24 représentent un zoom sur ces différences de température. Le graphique (b) illustre la différence de température entre la rue avec mur végétal et la rue entre deux toitures végétales d'une part et entre la rue de référence d'autre part. Au cours de la journée, la rue GwallC est la moins chaude avec une différence de température jusqu'à 1,5 °C de moins que la rue de référence. Au cours de la nuit, la rue GwallC est jusqu'à 0,5 °C plus chaude que la rue de référence RefC. Ceci est expliqué par la restitution de l'énergie solaire emmagasinée dans le mur végétal, orienté vers l'ouest, au cours de l'après-midi. Le graphique (c) illustre la différence entre la température de la rue de référence et la température météorologique. La surchauffe de l'air dans cette rue atteint jusqu'à 5 °C au cours de la journée, cela représente la capacité de la maquette expérimentale à produire des îlots de chaleur à l'échelle de ses rues canyons. L'écoulement d'air frais venant du voisinage de la plateforme expérimentale est à l'origine des différences négatives de températures enregistrées au cours de la nuit. En effet, la plateforme expérimentale est entourée d'espaces verts moins chauds que les rues canyons.

Ces résultats montrent que la végétalisation des enveloppes des bâtiments permet de réduire la surchauffe de l'air dans les rues canyons confinées. À l'échelle d'une ville,

cela aura un effet certain sur l'atténuation des îlots de chaleur urbain. Afin de déterminer le potentiel des enveloppes végétales à réduire la surchauffe à l'échelle d'une rue dans un milieu urbain dense, les mesures présentées sur la figure 3-24 ont été représentées par les nuages de points de la figure 3-25.

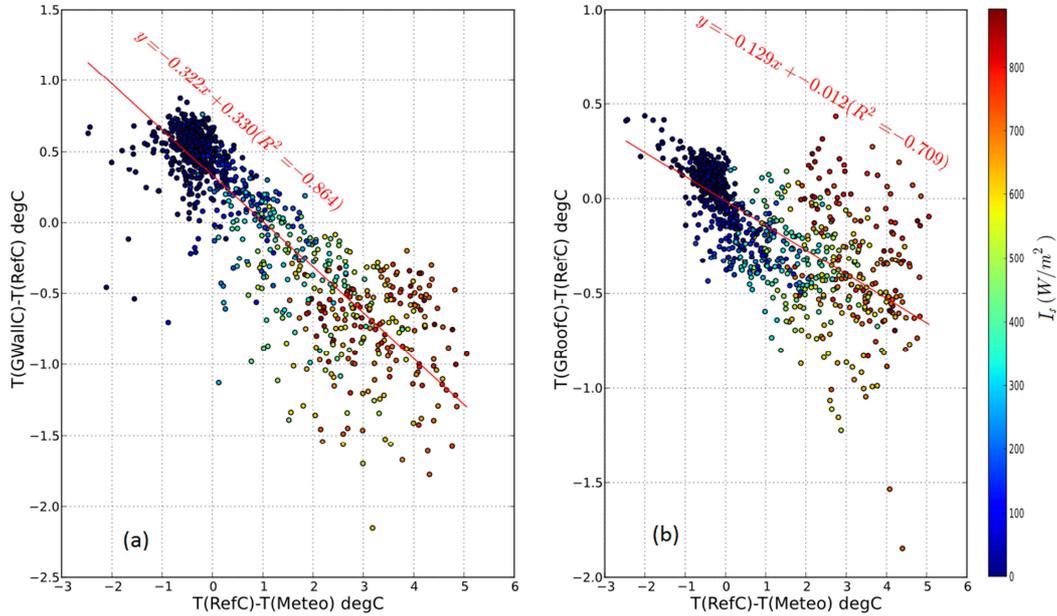


Figure 3-25 : Tracé de la différence de température entre les rues végétalisée et la rue de référence en fonction de la différence de température entre la rue de référence et la météo

Le nuage de gauche correspond au tracé de la différence de température entre la rue GwallC et la rue RefC en fonction de la différence entre la température de la rue RefC et la température météorologique. Similairement, le graphique de droite correspond aux données relatives à la rue des toitures végétales. Les nuages de points sont colorés en fonction de l'éclairement solaire. Ainsi, on constate que les surchauffes les plus importantes dans les rues correspondent aux plus grandes valeurs de l'éclairement solaire. De même, le rafraîchissement offert par les enveloppes végétales est d'autant plus important que le l'ensoleillement est important. Les valeurs négatives correspondent aux périodes nocturnes pendant lesquelles les mesures effectuées sont fortement influencées par le voisinage de la maquette ClimaBat. Cette représentation des données permet d'estimer le potentiel de la végétalisation à atténuer la surchauffe dans les rues de la maquette expérimentale. En effet, une corrélation linéaire notable existe entre ces variables avec un coefficient de corrélation de 0,86 pour la rue du mur végétal. Les pentes des droites de régression indiquent le pouvoir rafraîchissant de ces enveloppes végétales. Ainsi, le mur végétal, installé sur la façade ouest de la rue, permet d'atténuer la surchauffe dans le canyon de 1/3 et les toitures végétales atténuent la surchauffe dans le canyon de 1/8. Les conditions météorologiques autres que la température et l'éclairement solaire peuvent être à l'origine de la dispersion des nuages de points de la figure 3-24. En effet, l'intensité

des flux thermiques sensibles et latents dépend, en plus de ces variables, de l'humidité relative et de la vitesse du vent. Toutefois, il existe une bonne corrélation entre la surchauffe des canyons et le rafraîchissement passif de la végétalisation notamment pour le mur végétal maintenu humide par l'arrosage régulier et en contact direct avec l'ambiance de la rue.

4.3.3- Impacts hygrométriques

En plus de leurs impacts thermiques, les enveloppes végétalisées modifient l'hygrométrie de l'air à l'intérieur des rues confinées. La température maximale des surfaces végétalisées est atténuée en partie grâce aux flux thermique latents de l'évapotranspiration. L'évapotranspiration dépend de l'état hydrique des enveloppes végétales et l'accumulation de la vapeur d'eau augmente l'humidité spécifique de l'air dans le canyon. La figure 3-26 illustre (a) les variations des humidités relatives mesurées aux centres des trois rues et (b) la différence des humidités relatives mesurées dans les rues végétalisées par rapport à la rue de référence.

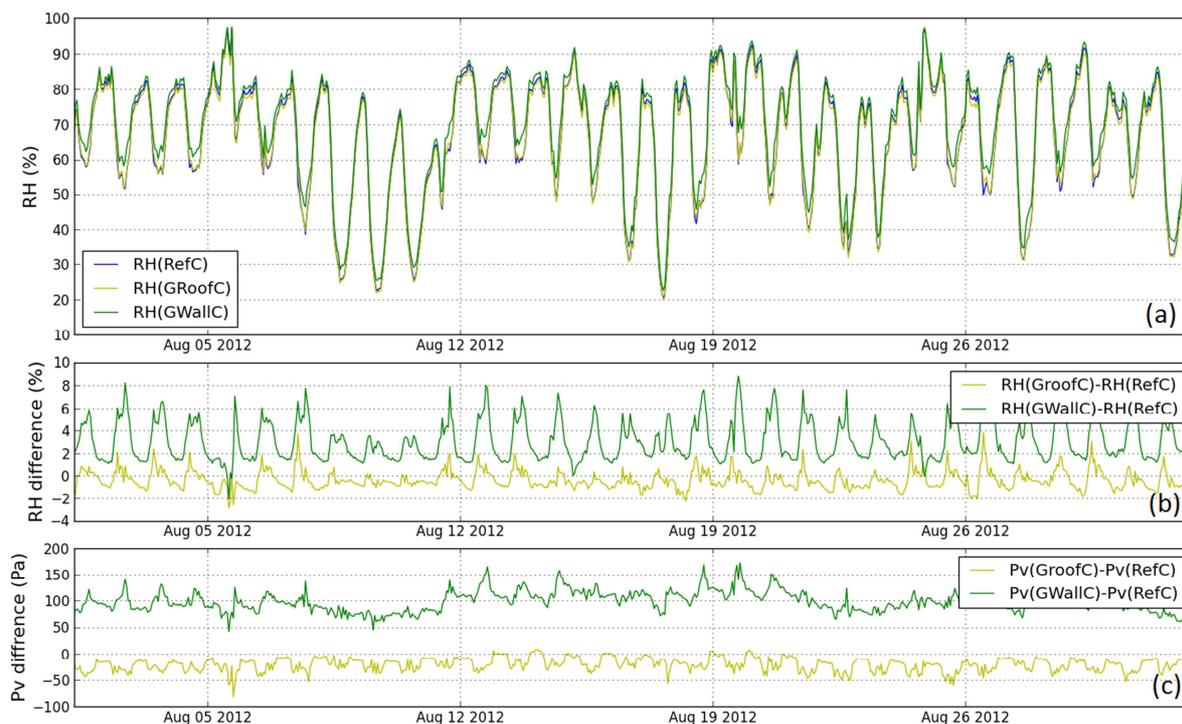


Figure 3-26 : (a) Variations des humidités relatives mesurées aux centres du canyon de référence (RefC) et des canyons végétalisés (GwallC et GRoofC) ; (b) Différences de de l'humidité relative dans les rues végétalisées par rapport à la rue de référence ; (c) Différences de pression de vapeur calculées dans les rues végétalisées par rapport à la rue de référence

D'après cette figure, l'humidité relative dans la rue de référence est inférieure à l'humidité dans les rues végétalisées. La différence maximale atteint 6 à 8 % vers 17h00 dans la rue du mur végétal. À cette heure de la journée, l'irrigation automatique est déclenchée et le mur végétal est exposé au rayonnement solaire. L'évapotranspiration est donc accentuée et l'humidité de l'air dans la rue augmente.

La différence de l'humidité relative entre la rue GwallC et la rue de référence est positive même au cours de la nuit. Malgré que les mêmes tendances sont retrouvées dans la rue GRoofC, les résultats sont moins concluants étant donné que l'amplitude des variations dans cette rue est inférieure à la précision des capteurs.

Pour quantifier les variations réelles de la teneur en vapeur dans les rues indépendamment des variations la température, la pression de vapeur ou l'humidité spécifique peuvent être analysées. Le graphique (c) de la figure 3-26 illustre les données présentées dans le graphique (b) en termes de pressions de vapeur d'eau. Ceci permet d'éliminer l'influence de la réduction de la température dans le canyon végétalisé. On constate que la pression de vapeur dans la rue GwallC est supérieure à celle de la rue de référence en moyenne d'environ 100 Pa. Cela explique l'augmentation de l'humidité relative au cours de la nuit où la température des deux rues est quasiment identique. Durant la nuit, les plantes ne transpirent pas mais l'évaporation directe à la surface du substrat maintient la hausse de l'humidité dans la rue. Les résultats sont moins significatifs pour les toitures végétales : elles se trouvent à l'extérieur du canyon et sont moins humides, elles peuvent même absorber la vapeur d'eau par effet tampon.

Cette augmentation d'humidité aurait un effet positif ou négatif, en termes de confort hygrothermique extérieur, en fonction du climat. Pour les climats chauds et secs, une faible augmentation d'humidité ne peut compromettre les effets positifs du rafraîchissement passif de la végétalisation. Au contraire, elle conduit à de meilleures sensations comme pour les systèmes de rafraîchissement passif par évaporation (Belarbi et al., 2006).

5- Conclusions

La maquette de scène urbaine ClimaBat a été construite à l'université de La Rochelle dans le but d'étudier l'incidence des revêtements d'enveloppe sur la performance énergétique et le microclimat urbain. L'expérimentation d'enveloppes végétales dans différentes configurations a permis de collecter des mesures utiles pour la calibration et la validation des modèles de parois végétalisées et des modèles de bâtiments couplés au microclimat urbain développés au sein du laboratoire. En outre, l'analyse des données expérimentales a permis d'identifier les impacts hygrothermiques des parois végétalisées sur les bâtiments et sur le microclimat extérieur à l'échelle d'une rue canyon.

Dans la suite, le modèle développé dans le chapitre 2 est implémenté dans un code de simulation thermique dynamique des bâtiments. Les mesures réalisées sur ClimaBat seront mis en service pour la calibration et la validation des modèles proposés.

Chapitre 4

Modélisation de l'interaction bâtiment enveloppe végétale microclimat

1- Introduction

Dans le chapitre 2, un modèle d'enveloppe végétale a été développé puis validé moyennant sa confrontation aux mesures effectuées sur les toitures végétales de la maquette expérimentale ClimaBat. Les simulations numériques réalisées à ce stade nécessitaient l'introduction de la température de jonction mesurée au-dessous du substrat entre le bloc initial et le complexe végétal. Cette démarche était motivée par le fait de vouloir confronter la prédiction numérique aux mesures en imposant au modèle les conditions aux limites expérimentales. Car, dans ce cas, la fiabilité de la prédiction du comportement thermique et hydrique de la toiture végétale n'est pas affectée par la modélisation du bâtiment. Cependant, pour que ce modèle développé présente un intérêt il est nécessaire de le coupler à un modèle thermique de bâtiment dans l'optique d'entreprendre de la prédiction de l'incidence de ces parois végétales sur la performance énergétique des bâtiments.

Ce chapitre présente la mise en œuvre du modèle de paroi végétale dans un outil de prédiction numérique des impacts énergétiques liés à la végétalisation. Pour cela, le modèle développé dans le chapitre 2 a été intégré dans un environnement de simulation thermique dynamique de bâtiments. Des cas d'études numériques sont réalisés dans le but d'évaluer l'incidence de la végétalisation sur la performance énergétique du bâtiment et sur le confort thermique des occupants. Ensuite, la prise en compte de l'interaction de bâtiment végétalisé-microclimat a été considérée à

l'échelle d'une rue canyon. Pour cela, un modèle aéraulique permettant le calcul de la température d'échange dans le canyon a été développé et ensuite implémenté dans l'environnement de simulation thermique dynamique. Ainsi, des simulations qui intègrent l'interaction microclimatique ont été entreprises afin d'évaluer l'incidence des enveloppes végétalisées sur le comportement des bâtiments en interaction avec le microclimat urbain.

2- Simulation thermique dynamique de bâtiments végétalisés

Le choix du modèle thermique de bâtiment est porté sur le modèle multizone (Type 56) disponible dans TRNSYS. Développé par le « Solar Energy Laboratory » de l'Université de Wisconsin, TRNSYS est distribué en France par le CSTB. Il possède un environnement de simulation modulaire de systèmes dynamiques. Il permet la simulation de systèmes complexes constitués de bâtiments y compris leurs équipements, les stratégies de contrôle et le comportement des occupants. La simulation des systèmes complexes dans l'environnement TRNSYS est basée sur l'établissement de schémas fonctionnels dans l'interface graphique STUDIO où le système global est décomposé en sous-systèmes interconnectés (cf. Figure 4-1).

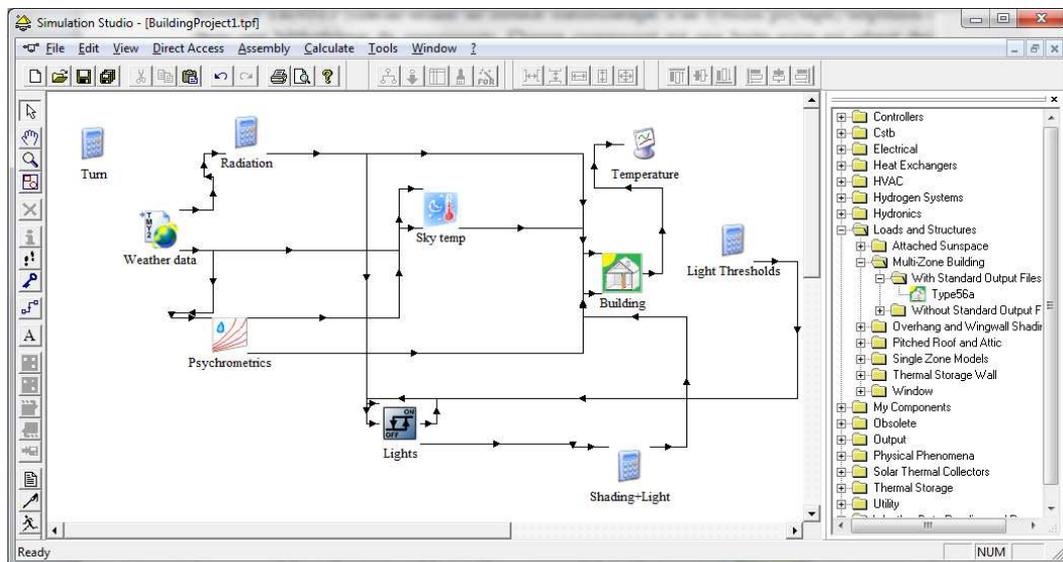


Figure 4-1 : Interface graphique TRNSYS Simulation Studio

Les modèles physiques disponibles sont regroupés dans une bibliothèque de modules, de composantes ou de « Types » unitaires. L'exécution de chacun de ces modules fait appel à une librairie de liens dynamiques (DLL). Certains modules permettent de lire des fichiers de données météorologiques ou d'appliquer des sollicitations imposées. D'autres modélisent des systèmes énergétiques, thermiques ou hydrauliques et des phénomènes physiques particuliers. Tandis que, certains d'autres permettent de

tracer les résultats des simulations numériques ou de les écrire dans des fichiers pour un post-traitement ultérieur. L'interface graphique de TRNSYS (cf. Figure 4-1) permet la création de simulations en reliant plusieurs modèles. Les modules sont définis par un certain nombre de paramètres, d'entrées et de sorties. Tous les modules nécessaires à la mise en œuvre d'une simulation sont insérés dans l'environnement de travail, les sorties des uns sont reliées aux entrées des autres de façon à former un système physique complet que le programme résout au pas de temps choisi.

2.1- Modélisation des bâtiments sous TRNSYS

TRNSYS contient parmi ses modèles physiques disponibles dans la bibliothèque standard, un modèle de bâtiment multizone (TYPE 56), modèle qui associe un nœud d'air à chaque zone de volume donné. Ce modèle fournit une description détaillée de la structure du bâtiment. Il permet de définir des parois multicouches composées de matériaux divers répertoriés dans des bases de données spécifiques. Il permet en outre de spécifier les gains (personnes, appareils..), le taux de ventilation, les taux d'infiltrations, les vitrages et les orientations. Le Type 56 permet de réaliser des simulations annuelles et de calculer les besoins de chauffage et de climatisation pour chaque zone et pour l'ensemble du bâtiment. La définition détaillée du bâtiment est fournie au Type 56 par un fichier dont la création et la modification sont facilitées par l'interface graphique TRNBuild.

Le Type 56 nécessite un certain nombre de variables météorologiques en entrée. Ces variables lui sont fournies par le Type 109 permettant de lire des fichiers météorologiques au format TMY2 et de calculer l'éclairement solaire sur des surfaces inclinées et de différentes orientations (fonctionnalités du Type 16 intégrées). Quant à la température fictive du ciel et aux masques solaires lointains, le calcul passe, respectivement, par le Type 69 et le Type 67.

Le Type 56 est basé sur l'établissement des équations de bilan énergétique pour chaque zone thermique. Le bilan des échanges thermiques convectifs dans une zone donnée prend en compte les :

- Échanges thermiques avec les surfaces intérieures des parois,
- Apports des infiltrations de l'air extérieur,
- Apports de la ventilation,
- Apports de l'air provenant de zones adjacentes
- Gains sensibles convectifs internes (occupants, équipements et éclairage artificiel)

Le bilan radiatif de la surface intérieure de chacune des parois délimitant la zone thermique est donné par la somme des termes suivants :

- Sources de rayonnement internes
- Rayonnement solaire transmis par les vitrages

- Échanges radiatifs GLO avec les autres parois de la zone
- Gain radiatif thermique défini par l'utilisateur

Les échanges radiatifs GLO et convectifs combinés entre les surfaces intérieures et le nœud d'air d'une zone sont approximés par un réseau en étoile (Seem, 1987). Tandis que la conduction thermique dans les murs est modélisée par la méthode des facteurs de pondération sous forme de séries temporelles de températures de surface et de flux de chaleur (Mitalas, 1972). D'amples informations sur le modèle thermique du Type 56 sont disponibles dans le volume 5 du manuel de TRNSYS.

2.2- Implémentation du modèle de paroi végétale dans TRNSYS

L'implémentation du modèle d'enveloppe végétale a lieu à travers la création d'un nouveau Type TRNSYS. Une fois implémenté dans le logiciel, le nouveau Type s'utilise de la même manière que tout autre Type standard. Physiquement, l'enveloppe végétale est collée à une paroi extérieure du bâtiment. Numériquement, ceci passe par un couplage permettant d'assurer la continuité du flux thermique et l'égalité de la température de jonction entre les deux modèles thermiques, et ce, à chaque pas de temps de la simulation.

La programmation des Types dans TRNSYS ne peut se faire naturellement qu'en C++ ou en FORTRAN. Or, le modèle thermohydrrique de l'enveloppe végétale a été développé et programmé, comme décrit auparavant, en langage Python. Face à cette problématique, une première solution qui consiste à reprogrammer le modèle d'enveloppe végétale en C++ en vue de son implémentation dans TRNSYS fût envisagée. Une solution alternative fût aussi examinée. Il s'agit d'appeler le programme écrit dans Python depuis le corps du nouveau Type écrit en C++ et permettant la gestion des flux d'information. Le choix a été porté sur la deuxième solution pour optimiser le temps de mise en œuvre et tirer avantage des facultés du langage interprété (Python) et des facilités de programmation et de développement qu'il procure. À noter que le développement du moyen d'exécution des programmes en Python depuis des modules de TRNSYS ouvre de nouvelles perspectives sur la simulation des phénomènes couplés. En effet, il serait possible d'exécuter TRNSYS avec d'autres outils numériques (ex. codes de rayonnement ou codes CFD) dans une simulation où l'environnement Python établirait la communication entre ces différents outils.

La figure 4-2 schématise le fonctionnement du couplage entre le Type 56 et le Type de l'enveloppe végétale. Le tableau 4-1 donne la liste des paramètres, des variables d'entrée et des variables de sortie du Type de l'enveloppe végétale.

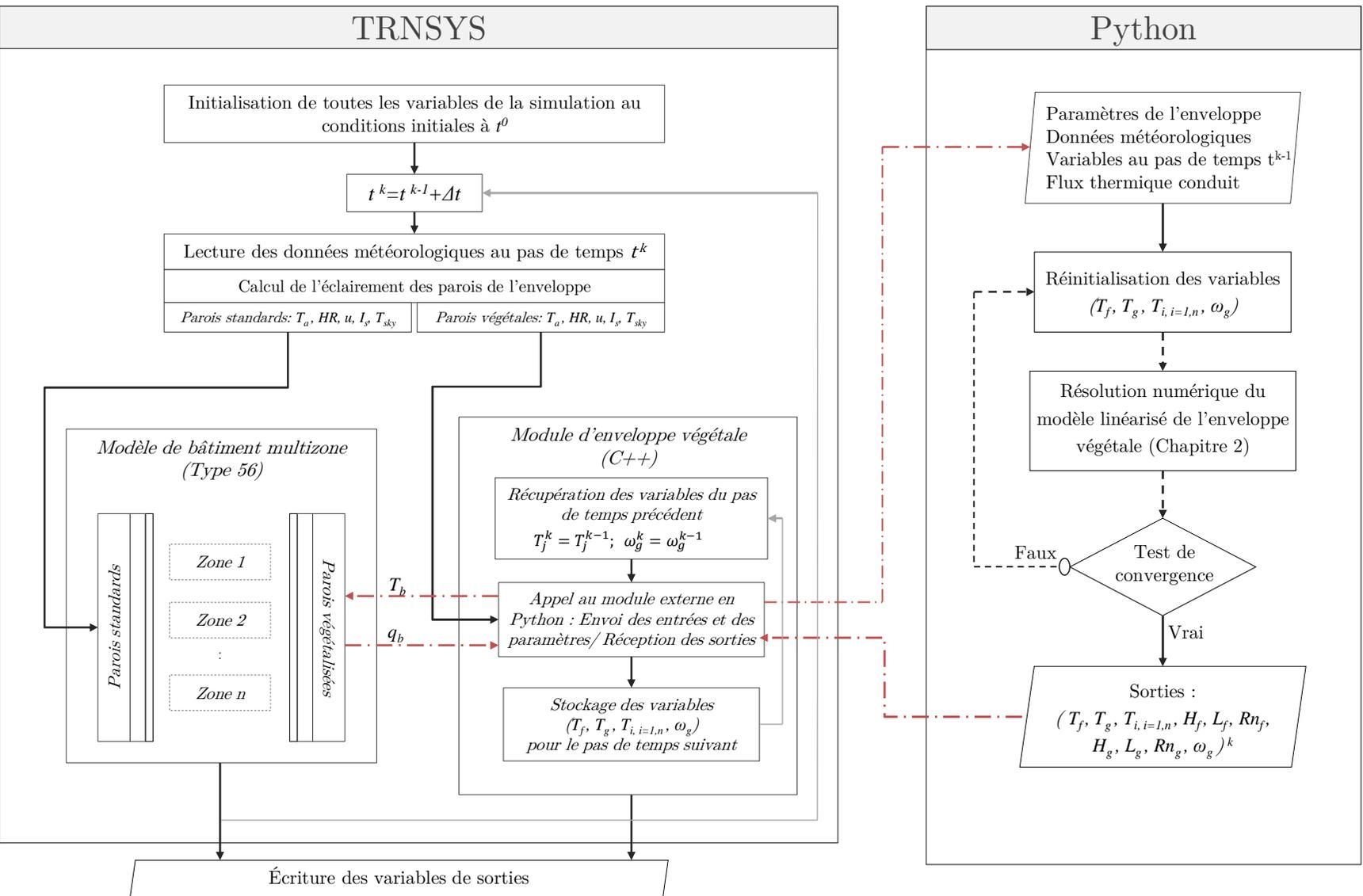


Figure 4-2 : Fonctionnement du couplage entre le modèle de bâtiment multizone de TRNSYS et le modèle d'enveloppe végétale (opérations itératives au pas de temps k sont en pointillé)

Tableau 4-1 : Liste des paramètres, entrées et sorties du module d'enveloppe végétale

Paramètres	
Taux de couverture	–
Coefficient d'extinction CLO	–
Coefficient d'extinction GLO	–
Réflectivité solaire du feuillage	–
Émissivité du feuillage	–
Hauteur du couvert végétal	(m)
Indice de surface foliaire	–
Épaisseur moyenne du feuillage	(m)
Masse volumique du feuillage	(kg.m ⁻³)
Capacité thermique du feuillage	(J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
Résistance stomatale minimale	(s.m ⁻¹)
Réflectivité solaire du substrat	–
Émissivité du substrat	–
Masse volumique apparente du substrat	(kg.m ⁻³)
Teneur en eau minimale du substrat	–
Teneur en eau maximale du substrat	–
Conductivité thermique du substrat à teneur en eau maximale	(W.m ⁻¹ K ⁻¹)
Conductivité thermique du substrat à teneur en eau minimale	(W.m ⁻¹ K ⁻¹)
Épaisseur du substrat	(m)
Distances du point de mesure du vent	(m)
Facteur de vue du ciel	–
Teneur en eau initiale	–
Entrées	
Température ambiante	(°C)
Humidité relative	(%)
Éclairement solaire total	(kJ.hr ⁻¹ .m ⁻²)
Température du ciel	(°C)
Flux conduit	(kJ.hr ⁻¹ .m ⁻²)
Vitesse du vent	(m.s ⁻¹)
Précipitation	(mm/Δt)
Drainage	(mm/Δt)
Arrosage	(mm/Δt)
Sorties	
Température du feuillage	(°C)
Température de surface du substrat	(°C)
Température à la base du substrat	(°C)
Teneur en eau	–
Flux radiatif net sur le feuillage	(W.m ⁻²)
Flux sensible sur le feuillage	(W.m ⁻²)
Flux latent sur le feuillage	(W.m ⁻²)
Flux radiatif net sur le feuillage	(W.m ⁻²)
Flux sensible sur le feuillage	(W.m ⁻²)
Flux latent sur le feuillage	(W.m ⁻²)

Sur la figure 4-2, les opérations directes sont représentées par des flèches en trait continu tandis que les opérations itératives, au pas de temps considéré, sont représentées par des flèches en trait discontinu. À chaque pas de temps, le solveur de TRNSYS exécute plusieurs fois tous les Types de la simulation jusqu'à la convergence de toutes les variables de sortie de tous les modèles utilisés. Ceci permet d'assurer, entre autre, la convergence des variables de couplage à l'interface (la température T_b et le flux thermique q_b) et la vérification des conditions aux limites.

2.3- Comparaison aux données expérimentales

Afin de montrer la pertinence du couplage enveloppe végétale-bâtiment qui a été réalisé dans TRNSYS, la prédiction numérique des modules assemblés de l'enveloppe végétale et du bâtiment a été comparée aux données expérimentales relevées sur la plateforme ClimaBat. Dans le chapitre 2, des mesures réalisées sur les toitures végétales ont été utilisées pour la validation expérimentale du modèle d'enveloppe végétale appliqué aux modules isolés des toitures végétalisées.

Dans ce paragraphe, la validation expérimentale porte sur la modélisation du bâtiment de ClimaBat comportant un mur végétal sur la façade orientée vers l'ouest. La figure 4-3 montre le bâtiment de la maquette ClimaBat utilisé dans cette comparaison aux données expérimentales. Le but est de comparer les mesures de température effectuées sur la façade végétalisée aux résultats des simulations numériques. Il s'agit de la façade extérieure du mur en béton qui se trouve en dessous du mur végétal (cf. Figure 4-3).

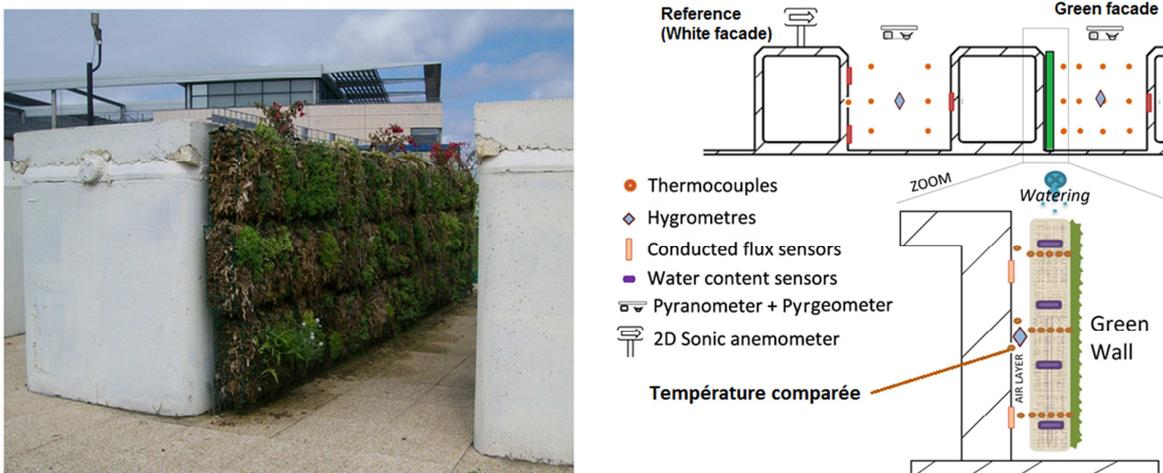


Figure 4-3 : Bâtiment de la maquette ClimaBat utilisé lors de la validation numérique des modèles couplés sous TRNSYS

La comparaison aux données expérimentales nécessite la réalisation des simulations numériques en introduisant dans TRNSYS les données météorologiques réelles mesurées au cours de la période de validation. Pour cela, les mesures réalisées in-situ,

par la station météorologique, ont été introduit dans un fichier de format lisible par le Type 109 permettant d'introduire des données météorologiques de l'utilisateur. Ainsi, les simulations présentées utilisent les données réelles de température, d'humidité relative, de vitesse et de direction du vent, de l'éclairement solaire et l'éclairement GLO. Cependant seul l'éclairement solaire global sur une surface horizontale est fourni dans ce fichier. Le rayonnement direct et le rayonnement diffus reçus par les surfaces inclinées sont calculés par le Type 109 en utilisant le modèle de Perez (Perez et al., 1986).

Parmi les effets microclimatiques, seuls les masques solaires et le rayonnement réfléchi sur la façade du bâtiment d'en face sont considérés. La prise en compte des différences de température et d'humidité dues au confinement aéraulique dans la rue canyon sera présentée après la description du modèle aéraulique de la rue canyon (cf. §3).

Les masques solaires sont formés par les bâtiments adjacents. Le Type 68 de TRNSYS permet de lire, dans un fichier de format spécifique, la hauteur angulaire des masques solaires formés par les obstacles lointains. Dans ClimaBat, les obstacles sont rapprochés et le temps d'ensoleillement des façades diminue de haut en bas. Pour prendre en compte cet effet, les façades orientées vers l'est et vers l'ouest sont divisées en trois facettes. Pour chaque facette, la hauteur angulaire fournie pour le Type 68 est calculée en fonction l'azimut (cf. Figure 4-4).

Avant le midi solaire, la façade orientée vers l'ouest ne reçoit directement du ciel que le rayonnement solaire diffus. Toutefois, elle est exposée au rayonnement réfléchi par les surfaces de la scène urbaine, en particulier, par la façade située en face et par la chaussée de la rue entre les deux façades. La façade blanche située en face réfléchit une grande partie du rayonnement solaire qu'elle reçoit en matinée. Une partie du rayonnement qu'elle réfléchit est directement reçu par la façade ouest considérée. Par conséquent, l'éclairement CLO de la façade ouest augmente significativement même avant que celle-ci ne soit exposée au rayonnement solaire direct. Le même constat est fait pour la façade orientée vers l'est qui reçoit plus de rayonnement solaire au cours de l'après-midi qu'elle ne l'aurait reçu si le bâtiment était isolé.

On note que TRNSYS tient compte du rayonnement réfléchi par le sol et que la réflexion de la chaussée est moins importante que celle de la façade blanche située en face (albédo et facteur de forme plus faibles). Pour mieux approcher l'éclairement des façades de la maquette ClimaBat, la réflexion plus ou moins importante de la façade blanche doit être prise en considération. Pour cela, l'éclairement de la façade ouest (resp. la façade est) est augmentée du produit $\rho_{s,b} \times F_{e-o} \times I_{s,e}$ (resp. $\rho_{s,b} \times F_{o-e} \times I_{s,o}$). Avec : $\rho_{s,b}$ la réflectivité solaire des façades repeintes en blanc, F_{o-e} et F_{e-o} les facteurs de forme des deux façades opposées et $I_{s,e}$ et $I_{s,o}$ sont les éclairements globaux reçus

par les façades orientées vers l'est et vers l'ouest respectivement avec prise en considération des masques solaires.

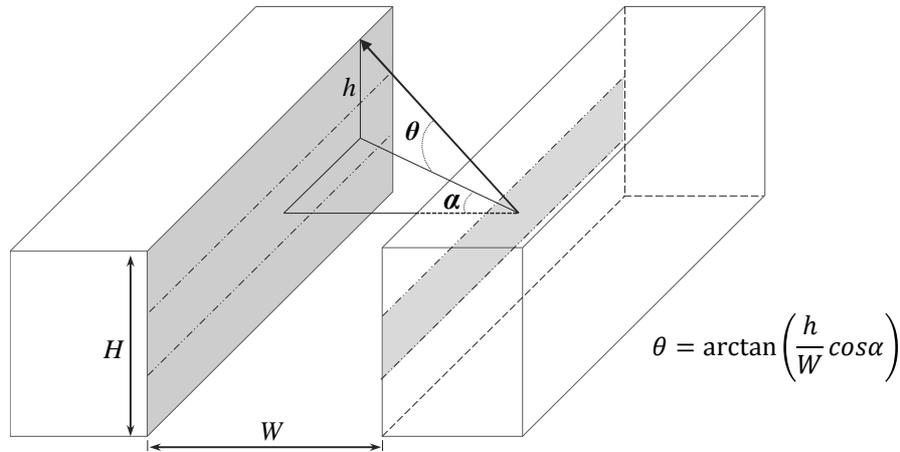


Figure 4-4 : Calcul de la hauteur angulaire des masques solaires pour son introduction dans le Type 68 de TRNSYS

À la différence des toitures végétales et en plus des spécificités liées aux transferts radiatifs, la modélisation des transferts thermohydriques dans le type de mur végétal expérimenté sur ClimaBat présente une difficulté supplémentaire liée au comportement de la lame d'air intercalée entre le substrat et la paroi du bâtiment. Dans d'autres systèmes de murs végétaux, cette lame d'air peut être plus ou moins ventilée, plus ou moins large ou ne pas exister. Le module d'enveloppe végétale a été développé de façon à permettre une modélisation générique qui peut s'adapter aux différentes technologies de végétalisation. De ce fait, le module d'enveloppe végétale n'intègre pas la modélisation d'une lame d'air de nature spécifique.

La lame d'air du mur végétal installé sur ClimaBat est formée par la grille métallique fixée à la paroi pour supporter les modules végétaux. La forme géométrique de cette grille minimise la circulation de l'air tout en permettant la diffusion de la chaleur et de vapeur vers l'extérieur que ce soit par le haut ou par les espaces inter-modules. Les échanges thermiques ayant lieu dans cette lame d'air sont de 4 types : i) convection thermique liée à la circulation de l'air et à la différence de température entre l'entrée et la sortie de la lame d'air ; ii) échanges radiatifs GLO entre la surface intérieure du substrat et la surface extérieure de la paroi ; iii) Conduction thermique dans la lame d'air de faible épaisseur (4-5 cm) ; iv) évaporation produite au niveau de la surface intérieure du substrat. Les trois premiers types d'échange thermique sont souvent modélisés par une résistance thermique équivalente. Le modèle retenu pour décrire le transfert thermique entre le substrat et la façade du bâtiment repose sur l'équation suivante (cf. Figure 4-5) :

$$q_b = \frac{T_b - T_s}{R_{th,air}} + \overline{h}_m (p_{v,b,sat} - p_{v,a}) \quad (4-1)$$

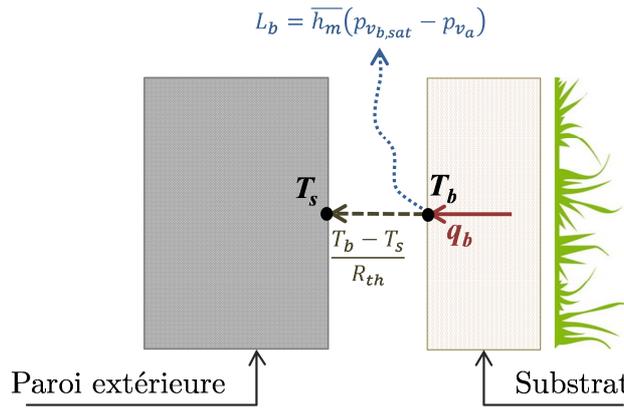


Figure 4-5 : Échanges thermiques modélisés dans lame d'air

Avec (T_b) la température de la surface intérieure du substrat, (T_s) la température de la surface extérieure de la paroi végétalisée, (R_{th}) $[\text{K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}]$ la résistance thermique équivalente de lame d'air, $(\overline{h_m})$ $[\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa}^{-2}]$ le coefficient moyen caractérisant le transfert de vapeur depuis la lame d'air vers l'ambiance et $(p_{v_{b,sat}} - p_{v_a})$ $[\text{Pa}]$ le déficit de pression de vapeur de l'air ambiant par rapport à la surface intérieure du substrat. La modélisation du flux latent d'évaporation par le produit d'un coefficient constant par le déficit de pression de vapeur est justifiée par les mesures hygrométriques réalisées dans la lame d'air (cf. Figure 3-15(b)). Selon ces mesures, le déficit de pression de vapeur au point de mesure localisé à l'intérieur de la lame d'air est quasiment proportionnel au déficit de vapeur de l'air ambiant.

Les simulations numériques dont les résultats sont présentés ci-après utilisent les données météorologiques réelles et prennent en considération les masques solaires, les interrélaxions et la lame d'air du mur végétal. Afin d'évaluer la pertinence de l'outil de modélisation développé, deux simulations numériques sont réalisées : la première concerne la simulation du bloc de référence et la deuxième concerne le bloc avec le mur végétal installé sur sa façade orientée vers l'ouest.

Le graphique (a) de la figure 4-6 illustre les données météorologiques mesurées pendant deux semaines du mois d'août 2012. Le graphique (b) de cette figure compare les résultats numériques et expérimentaux relatifs au bloc végétalisé et au bloc de référence en termes de température de la surface extérieure de la paroi.

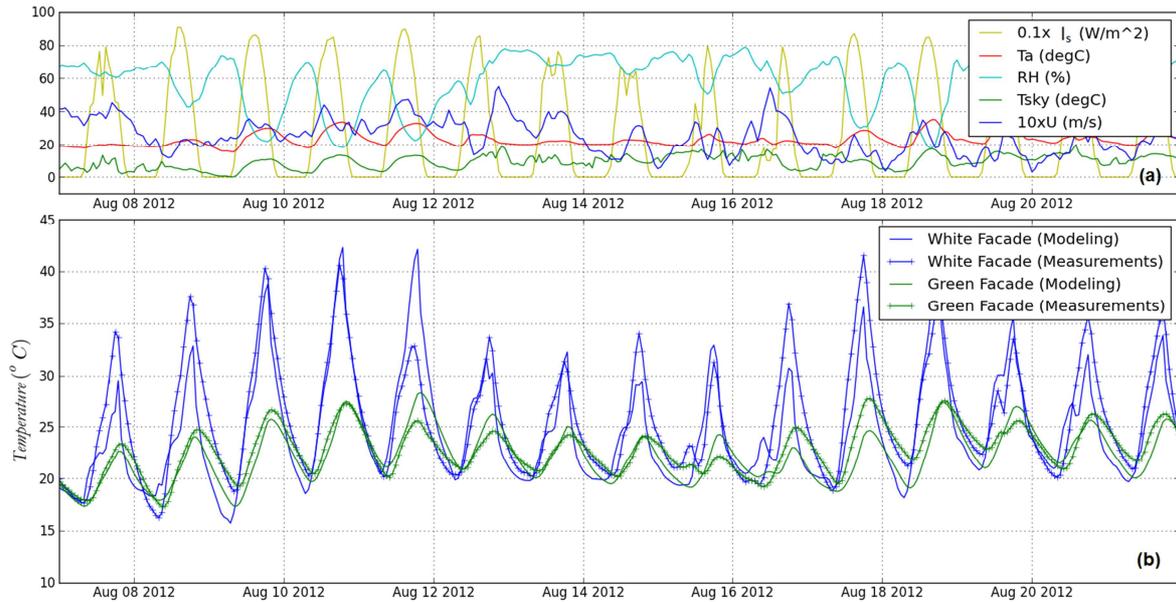


Figure 4-6 : (a) Données météorologiques mesurées en août 2012 et utilisées dans les simulations TRNSYS en vue de la validation expérimentale ; (b) Comparaison des résultats numériques et expérimentaux en termes de variations de la température de surface extérieure pour la paroi végétalisée et pour la paroi de référence

Majoritairement, les résultats numériques sont en accord avec les données expérimentales. La déviation moyenne de la prédiction numérique par rapport à l'observation expérimentale durant tout le mois d'août n'est que de 0,22 °C avec une erreur type RMSE = 2,75 °C. Cette erreur est relativement plus faible que celle constatée par Sailor (2008) lors de l'implémentation dans EnergyPlus de son modèle inspiré de Frankenstein et Koenig (2004). La déviation moyenne relevée était de 2,9 °C avec une erreur type de 4,1 °C. De plus, la figure 4-6(b) montre que la déviation dans la prédiction de la température de la façade végétalisée suit la déviation dans la prédiction de la température de la façade de référence. Par conséquent, les écarts parfois élevés entre la température simulée et la température mesurée sur la façade végétalisée sont dus en grande partie à la modélisation des blocs de bâtiments réalisée sous TRNSYS.

2.4- Cas d'études numériques

2.4.1- Impacts des façades végétales sur la thermique des bâtiments

Description du cas d'étude

Dans ce paragraphe, le module d'enveloppe végétale de TRNSYS est utilisé pour évaluer l'incidence thermique des parois végétales sur la performance énergétique des bâtiments. L'étude porte sur l'impact des murs végétaux de façade étant donné le manque d'études numériques sur ce sujet dans la littérature en comparaison avec

l'étude des toitures végétalisées. Le cas d'étude testé est un bâtiment de trois étages (cf. Figure 4-7) à structure légère équivalent aux blocs de la maquette ClimaBat (Doya et al., 2012). Les murs sont constitués de parpaings creux de 20 cm d'épaisseur. Les planchers et la toiture de béton armé font 12 cm. Les vitrages à l'est et à l'ouest représentent 20 % de la surface habitable. Le taux d'infiltration est fixé à $0,6 \text{ vol.h}^{-1}$ et les gains thermiques internes sont nuls. L'albédo des surfaces des façades est fixé à 0,5. Le bâtiment est seul et de longueur infinie, donc sans masques solaires ni d'effets microclimatiques particuliers.

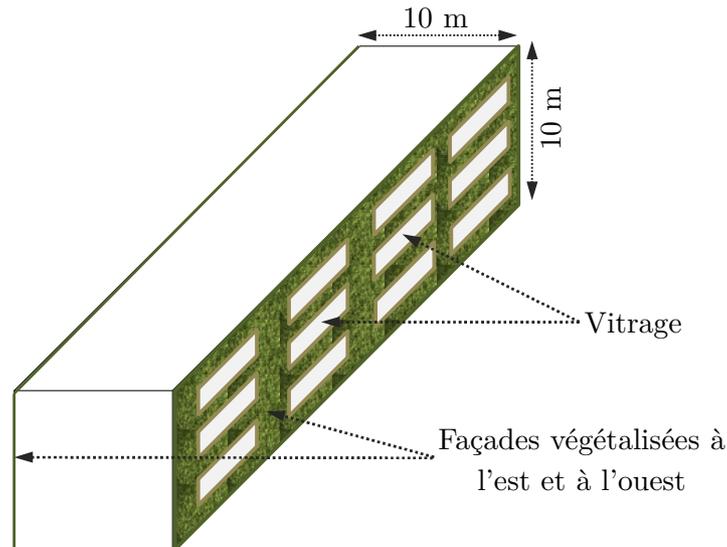


Figure 4-7 : Cas d'étude pour l'impact des murs végétaux sur la performance énergétique des bâtiments

L'étude est réalisée pour ce bâtiment avec ou sans végétalisation des façades est et ouest. L'épaisseur du substrat des murs végétaux installés sur ces façades est de 12 cm et sa teneur en eau est à 60 % de sa capacité de rétention. Le taux de couverture (σ_f) est de 1 et l'indice de surface foliaire est de 4. Les données météorologiques standards de deux types de climats sont utilisées. Il s'agit de la ville de La Rochelle avec son climat océanique et la ville d'Athènes d'un climat méditerranéen.

Impacts énergétiques des murs végétaux

Des simulations annuelles ont été réalisées pour évaluer l'incidence de la végétalisation des façades sur les consommations énergétiques durant la période de chauffage et celle de rafraîchissement. Il a été considéré lors de ces simulations, que le rafraîchissement est activé durant les mois de mai à septembre et que le chauffage est mis en marche du mois d'octobre au mois d'avril. La température de consigne estivale a été fixée à 26°C , celle de la période de chauffage a été fixée à 19°C durant la journée et à 15°C durant la nuit. La figure 4-8 donne les résultats des simulations numériques pour les climats de La Rochelle et d'Athènes.

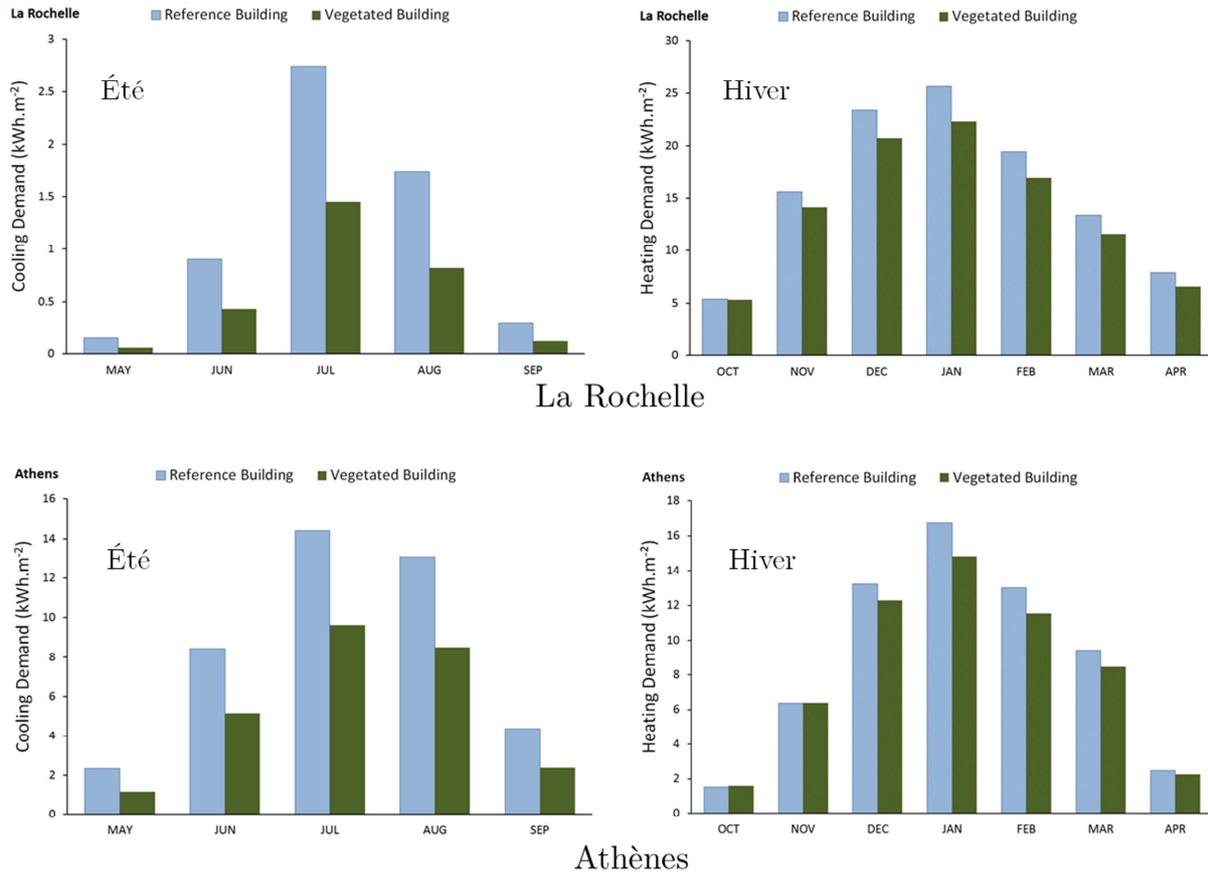


Figure 4-8 : Comparaison des charges mensuelles de chauffage en hiver et de rafraîchissement en été pour les deux bâtiments situés à La Rochelle et à Athènes

En période estivale, les murs végétalisés disposés sur les façades est et ouest du bâtiment testé réduisent la charge de climatisation dans les deux climats étudiés (Méditerranéen d'Athènes et Océanique de La Rochelle). L'amplitude de la réduction de cette charge est plus importante dans la ville d'Athènes relativement à celle de La Rochelle (15.9 kWh.m⁻² pour Athènes et 2.95 kWh.m⁻² pour La Rochelle).

Néanmoins, le facteur de couverture, défini par le ratio entre l'énergie utile apportée par les façades végétalisées et le besoin de rafraîchissement du bâtiment de référence (sans végétalisation), se trouve plus faible à Athènes qu'à La Rochelle (37.3 % à Athènes contre 50,6 % à La Rochelle).

En période hivernale, comme en période estivale, la charge thermique de chauffage est diminuée. L'amplitude de cette réduction est plus importante dans la ville de la rochelle relativement à celle d'Athènes (à La Rochelle : 13.15 kWh.m⁻², soit un facteur de couverture de 11.87 % ; à Athènes : 5.47 kWh.m⁻², soit un facteur de couverture de 8.7 %).

La figure 4-9 compare la charge thermique globale des bâtiments végétalisés aux bâtiments de référence pour La Rochelle et pour Athènes. La végétalisation des façades est et ouest du bâtiment d'étude réduit la charge thermique globale des

bâtiments dans les deux climats considérés. Toutefois, la réduction de la charge thermique est plus importante dans le bâtiment situé à Athènes (environ 21 kWh.m⁻², soit 20%, pour Athènes contre 16 kWh.m⁻², soit 14%, pour La Rochelle). Ceci est dû au fait que l'effet des façades végétalisées sur les besoins de rafraîchissement sont plus importants que leur incidence sur la charge de chauffage. À noter que ces bénéfices procurés par la végétalisation des façades concernent le bâtiment étudié avec les orientations choisies. Si l'une des façades était orientée vers le sud, l'augmentation des surfaces vitrées doit permettre de meilleures performances notamment pour la ville de La Rochelle. Par ailleurs, le calcul des besoins énergétiques réels doit tenir des rendements des systèmes de chauffage et de climatisation.

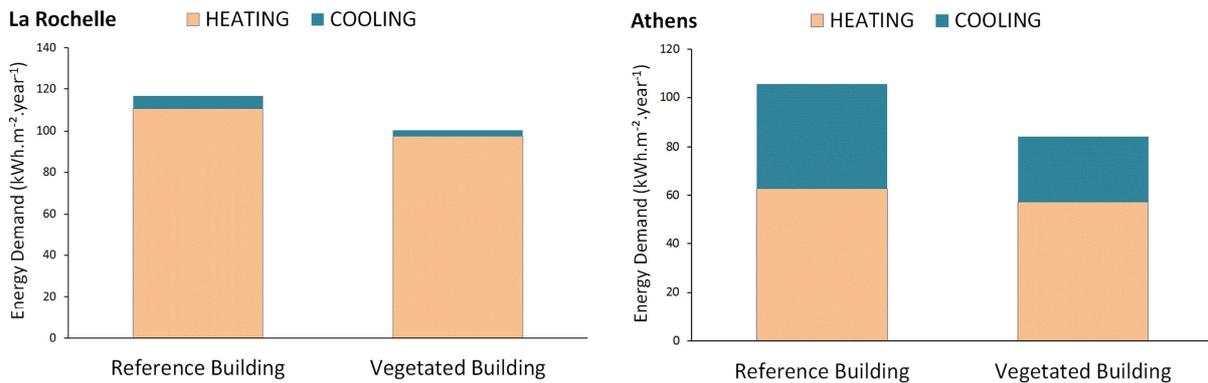


Figure 4-9 : Comparaison de la charge annuelle de chauffage et de climatisation pour les bâtiments situés à La Rochelle et à Athènes

La figure 4-10 illustre les évolutions de la température opérative (T_{op}) moyenne dans le bâtiment de référence et dans le bâtiment végétalisé.

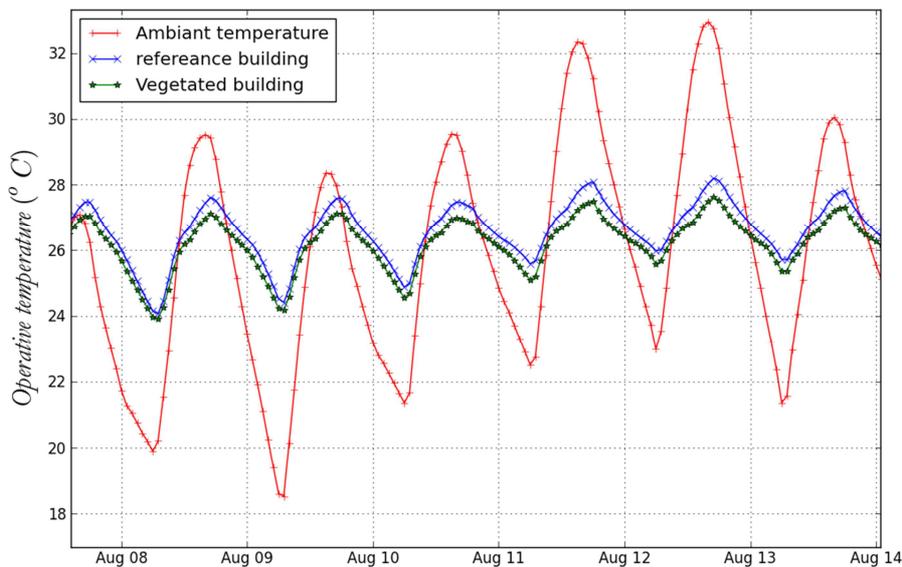


Figure 4-10 : Comparaison des variations de la température opérative dans le bâtiment végétalisé et dans le bâtiment de référence

Étant donné que les températures des surfaces intérieures des murs extérieurs sont élevées, la température opérative dépasse la température de l'air intérieur qui est limitée à 26 °C par le système de climatisation. En plus des économies d'énergies, les murs végétaux permettent d'améliorer le confort intérieur par la réduction des températures de surface. En effet, les résultats numériques de la figure 4-10 montrent que la température opérative du bâtiment végétalisé est constamment inférieure à celle du bâtiment de référence d'environ 0,5 °C (climatisation avec consigne sur la température d'air).

Influence de l'orientation des façades végétales

L'influence de l'orientation est étudiée sur le premier étage du bâtiment (étage intermédiaire) pour lequel les vitrages ont été supprimés pour éviter d'altérer les comparaisons par des orientations différentes des surfaces vitrées. Les bâtiments ne sont pas climatisés afin d'identifier l'incidence sur la température opérative dans le bâtiment selon l'orientation de la façade végétalisée.

La figure 4-11 montre que le mur végétal réduit le flux thermique de la paroi végétalisée.

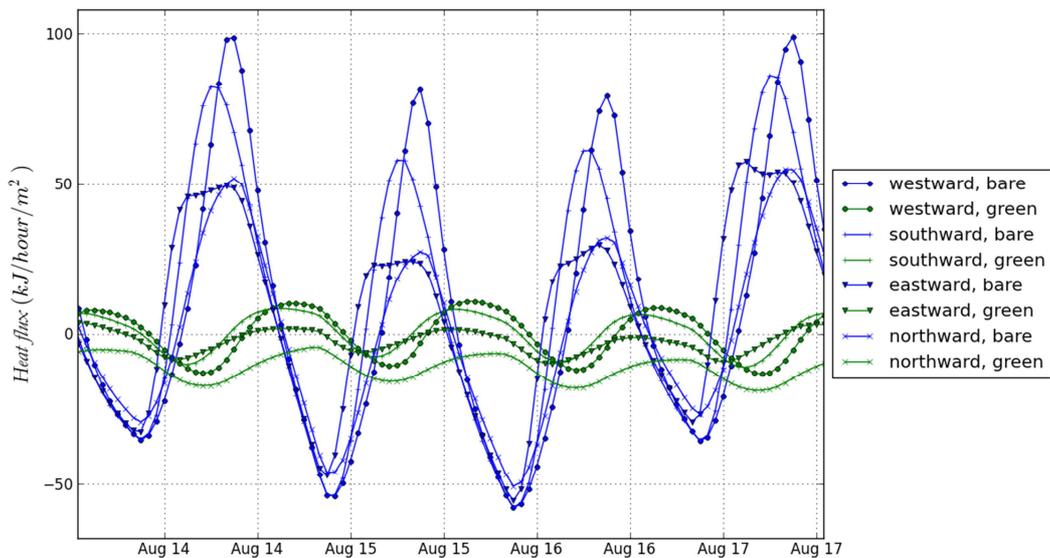


Figure 4-11 : Comparaison du flux thermique transmis au bâtiment situé à La Rochelle pour différentes orientations de la façade végétalisée

Le mur végétal réduit non seulement les gains mais aussi les pertes à travers la paroi végétalisée avec une plus grande atténuation pour les gains. Cette tendance est en accord avec les mesures présentées dans le chapitre 3 (cf. Figure 3-17, page 121). Par ailleurs, l'impact thermique le plus important est obtenu sur les façades soumises aux conditions extrêmes, en l'occurrence, les façades ouest et sud. L'impact est moins fort sur les façades orientées vers l'est et vers le nord. En effet, le flux thermique maximal

sur la façade ouest est réduit d'environ $50 \text{ kJ.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$ tandis que le flux maximal sur la façade nord n'est réduit que de $15 \text{ kJ.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$.

L'incidence du mur végétal sur les variations de la température opérative est analysée pour les quatre orientations. Le choix est porté sur l'analyse de la température opérative car celle-ci affecte directement le confort intérieur. Le tableau 4-2 donne les températures opératives maximales, moyennes et minimales obtenues pour les mois de juillet et d'août dans le bâtiment de référence et dans le bâtiment végétalisé pour les climats de La Rochelle et d'Athènes.

Tableau 4-2 : Influence de l'orientation de la façade végétalisée sur température opérative dans les bâtiments situés à La Rochelle et à Athènes durant les mois de juillet et d'août

Le Rochelle						
Orientation	T _{OP} Maximale		T _{OP} Moyenne		T _{OP} minimale	
	réf.	vég.	réf.	vég.	réf.	vég.
Ouest	25,05	21,87	20,53	19,49	17,05	17,21
Sud	24,68	21,99	20,46	19,37	16,83	17,01
Est	24,81	21,96	20,48	19,47	16,90	17,40
Nord	24,08	20,71	19,95	18,46	16,48	16,59
Athènes						
Orientation	T _{OP} Maximale		T _{OP} Moyenne		T _{OP} Minimale	
	réf.	vég.	réf.	vég.	réf.	vég.
Ouest	31,79	27,83	27,29	25,32	23,47	23,02
Sud	31,60	27,82	27,08	25,01	23,25	22,55
Est	31,58	27,98	27,26	25,28	23,34	21,88
Nord	30,89	26,76	26,67	24,31	22,85	21,84

On remarque que la température opérative maximale est réduite entre 2,7 et 4 °C dans les deux climats. Pour le climat d'Athènes, la température opérative minimale est réduite plus par la végétalisation de parois orientées vers l'est et l'ouest tandis qu'à La Rochelle, la température opérative minimale est plus élevée dans les bâtiments végétalisés. Ceci est dû au fait que dans ce climat moins chaud, la réduction des déperditions nocturnes par le mur végétal devient significative.

2.4.2- Analyse des impacts de la résistance thermique, de l'ombrage et de l'évapotranspiration

Les toitures végétalisées réduisent le flux thermique et atténuent le pic de température de la membrane d'étanchéité. Ceci est la résultante de trois effets distincts qui sont la résistance thermique du substrat qui diminue la valeur U de la toiture, l'ombrage par les feuilles qui diminue l'éclairement solaire et l'évapotranspiration qui dissipe la chaleur absorbée sous forme de chaleur latente. Bien qu'ils soient distincts, ces trois effets sont intimement liés et leurs incidences sont couplées. En effet, l'évapotranspiration modifie la teneur en eau du substrat, sa

conductivité thermique change et par conséquent la valeur U de la paroi. Par ailleurs, l'augmentation de l'ombrage nécessite d'augmenter l'indice de surface foliaire et le taux de couverture. Or, l'augmentation de ces paramètres signifie plus l'intensification de la transpiration végétale et ce au détriment de l'évaporation directe. Ceci affecte la température du substrat et la température du feuillage et influence les transferts sensibles et radiatifs de grandes longueurs d'onde.

On se propose d'étudier la contribution individuelle de la couche de substrat, de l'ombrage et de l'évapotranspiration en prenant en compte, successivement, ces différents effets. Pour cela, 4 cas d'études numériques sont examinés (cf. Figure 4-12):

- Dans le premier cas, noté « REF », représente la toiture de référence dont l'albédo est fixé à 0,7.
- Dans le deuxième cas, noté « SUB », une couche de substrat de 8 cm (albédo=0,2, sans évaporation) est rajoutée sur la toiture de référence.
- Dans le troisième cas, noté « LAI », un couvert végétal d'indice de surface foliaire $F=3$. Les effets radiatifs et aéraulique liés au feuillage sont pris en compte mais l'évapotranspiration est désactivée.
- Dans le dernier cas, noté « ETP », la modélisation de toiture végétale est complète y compris le processus de l'évapotranspiration.

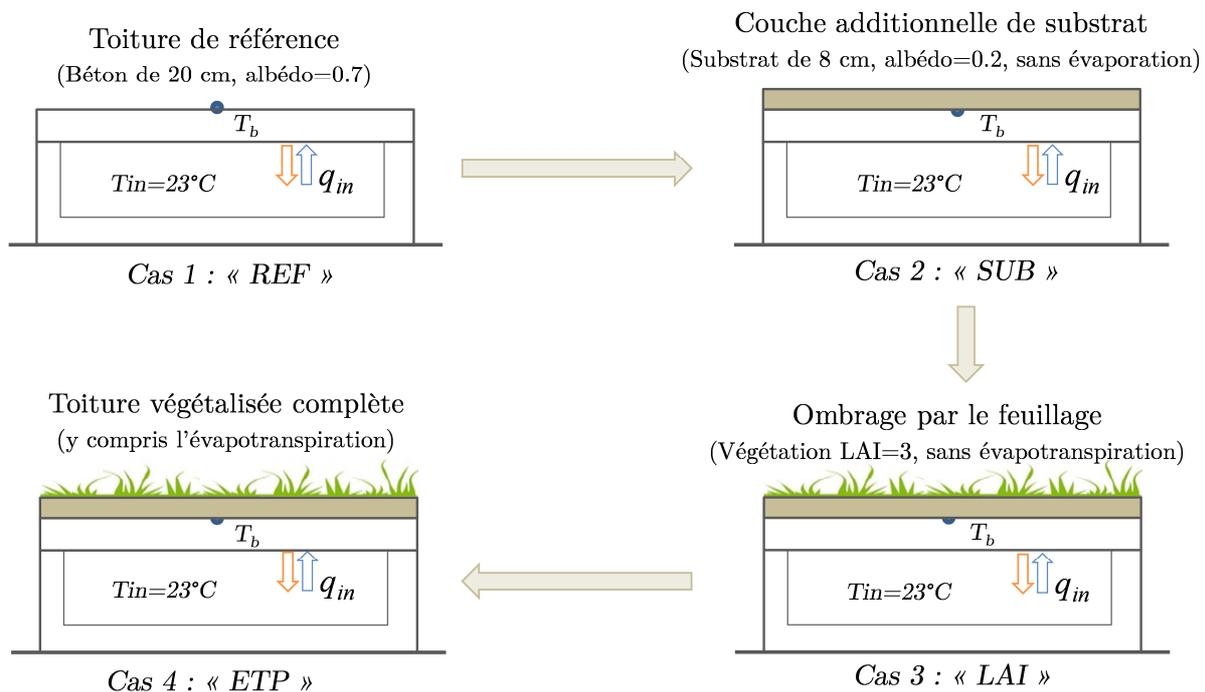


Figure 4-12 : Quatre cas d'étude pour l'évaluation des effets superposés de la couche de substrat, de l'ombrage foliaire et de l'évapotranspiration

Les résultats des simulations numériques pour le climat de La Rochelle sont présentés dans la figure 4-13. Celle-ci illustre dans le graphique (a) les variations de la

température de la membrane d'étanchéité (T_b) et dans le graphique (b) les variations du flux thermique (q_b) transmis à l'intérieur du bâtiment.

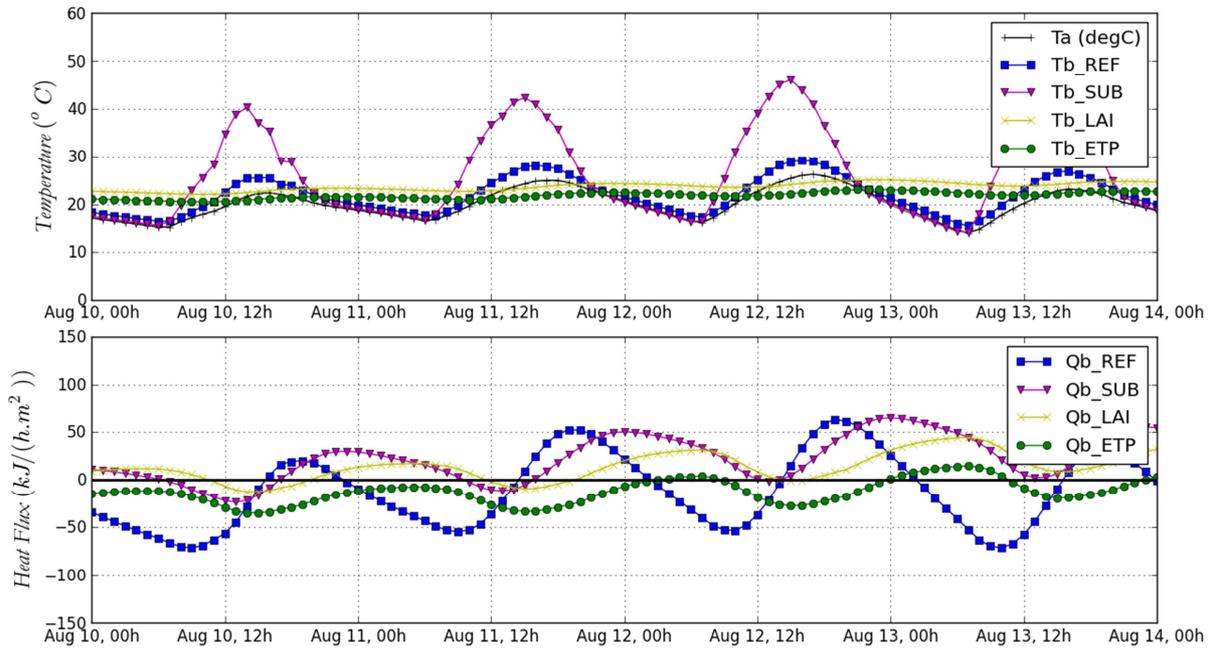


Figure 4-13 : (a) Comparaison de l'évolution de la température de la membrane d'étanchéité pour les quatre cas d'étude ; (b) Comparaison de flux thermique transmis par la toiture vers le bâtiment pour les quatre cas d'étude

Malgré la résistance thermique additionnelle du substrat, le pic de température dans la toiture « SUB » atteint jusqu'à 45 °C tandis qu'il ne dépasse pas 30 °C sur la toiture de référence et y reste assez proche de la température de l'air. Le pic de température élevé dans la toiture SUB, en l'absence d'évaporation, est dû à l'absorptivité solaire importante de la surface du substrat en comparaison avec celle de la toiture de référence. Il en résulte que les gains thermiques augmentent et que les pertes nocturnes diminuent. Ceci correspond à l'aire sous la courbe (Q_b _SUB) de la figure 4-13(b) qui est plus importante pour les valeurs positives et moindre pour les valeurs négatives de (q_b).

L'ombrage par le couvert végétal produit une baisse significative dans l'amplitude des variations de la température (T_b). Dans ce cas, la température varie entre 20 et 25 °C. Conjointement, les gains thermiques sont réduits car l'éclairement solaire sur le substrat diminue. Toutefois, le bilan thermique de la surface reste positif (voir la courbe Q_b _LAI). Donc, l'ombrage seul est peu efficace en l'absence de l'évapotranspiration. Enfin, avec la prise en compte de la transpiration végétale et de l'évaporation directe dans le bilan thermique de la toiture végétale (équations (2-28)-(2-47)), la température (T_b) diminue d'environ 3 °C. Ceci offre la propriété du rafraîchissement passif à la toiture modélisée puisque l'aire sous la courbe (Q_b _ETP) devient négative. Les résultats numériques de cette étude paramétrique permettent de mieux appréhender le transfert de chaleur dans les enveloppes végétales et de prévoir

le comportement que l'enveloppe aurait dans des conditions extrêmes suscitant le manque d'eau et de couverture végétale.

3- Modélisation de l'interaction microclimatique à l'échelle d'une rue canyon

La modélisation développée jusqu'ici permet de prédire le comportement thermohydrique d'une paroi végétalisée et son impact énergétique sur les bâtiments dans un emplacement géographique et un climat donnés. Cependant, l'outil de simulation thermique dynamique de bâtiments utilisé n'est pas destiné à prendre en compte l'interaction microclimatique. En effet, TRNSYS ne permet de prendre en compte que les masques solaires. C'est ainsi que l'ombre portée des blocs voisins a été prise en compte dans la simulation numérique de ClimaBat. Lors de ces simulations, la température et l'humidité relative des données météorologiques ont été utilisées et le confinement aéraulique n'a pas été pris en compte. Afin de palier à cette limitation et permettre de simuler l'incidence des enveloppes végétales à l'interface bâtiment-microclimat, un modèle de transport aéraulique à l'échelle de la rue canyon a été développé puis implémenté dans TRNSYS.

Le modèle implémenté dans TRNSYS est issu des travaux de Harman et al. (2004). Il s'agit d'un modèle de transport aéraulique de scalaires passifs depuis les parois d'une rue canyon. Ce modèle a été validé par des mesures expérimentales réalisées sur une rangée de canyons placés dans une soufflerie à l'aide de la technique de sublimation de naphthalène (Barlow et al., 2004). Ce modèle peut être utilisé dans la simulation du transfert convectif de la chaleur et de l'humidité. Le paragraphe suivant décrit ce modèle appliqué au transfert thermique sensible.

3.1- Modèle aéraulique d'un canyon urbain

Le modèle de Harman et al. (2004) considère les types d'écoulements transversaux définis par Oke (cf. Figure 1-15, p.50) dans les rues canyons. Selon la géométrie de rue considérée, celle-ci peut être partitionnée en deux zones séparées : une zone de recirculation et une zone ventilée (cf. Figure 4-14). La zone de recirculation est approximée par une forme trapézoïdale à l'image du modèle de simulation de la dispersion des polluants OSPM (Hertel et al., 1991). La longueur de la zone de recirculation (d_r) dépend de la turbulence de la couche limite et de la forme géométrique des bâtiments. Elle varie entre 2 et 3,5 selon les auteurs et est fixée à $d_r = 3 h$ dans ce modèle.

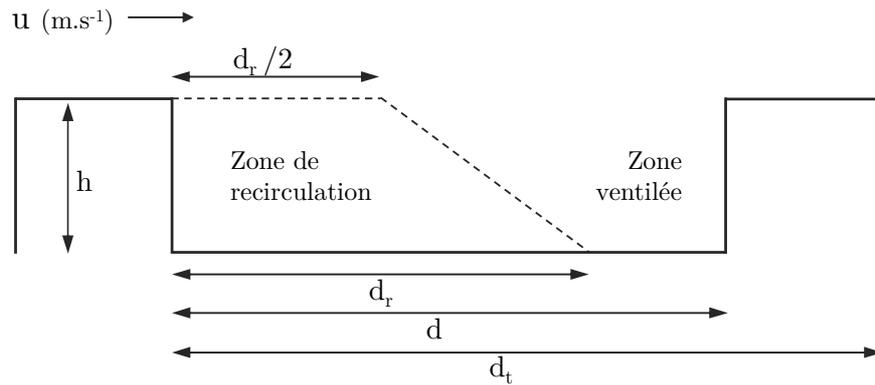


Figure 4-14 : Schématisation de la zone de recirculation et de la zone ventilée dans une rue canyon et leurs dimensions respectifs (d'après (Harman et al., 2004))

Pour les rues larges avec ($d_r < d$ c.à.d. $h/d < 1/3$), les deux zones sont distincts. Ceci correspond au régime de l'écoulement à rugosité isolée défini par (Oke, 1987). Les rues moins larges avec ($d_r/2 < d < d_r$ c.à.d. $1/3 < h/d < 2/3$) correspondent au régime d'écoulement à interférence. Enfin, dans les rues étroites avec ($d < d_r/2$ c.à.d. $h/d < 2/3$) tout l'espace est occupé par la zone de recirculation.

Les écoulements dans la zone de recirculation et dans la zone ventilée sont entraînés par le jet généré par le détachement d'air derrière la toiture qui se trouve en amont. D'après Harman et al. (2004), les observations expérimentales montrent que ce jet décélère au contact de la zone de recirculation et des parois rugueuses. Selon la taille de la zone de recirculation, l'écoulement de l'air le long des facettes de la rue canyon développe des couches limites pouvant être approximées par des profils logarithmiques au même titre que les écoulements au-dessus des canopées urbaines et végétales (équation (1-3)). L'analogie de cette modélisation avec le modèle de l'enveloppe végétale laisse envisager la possibilité du couplage du modèle de canyon urbain au modèle de l'enveloppe végétale appliqué sur une ou sur plusieurs parois de la rue.

Le transport convectif turbulent de la chaleur de l'humidité dans la rue canyon a lieu séparément dans la zone de recirculation, dans la zone ventilée et sur la toiture. Le transfert s'établit depuis le mur et la chaussée vers l'air dans ces deux zones d'une part, et depuis ces zones vers l'air libre dans la zone inertielle d'autre part.

La figure 4-15, illustre le réseau de résistance utilisé pour le calcul des flux transférés depuis les facettes 1, 3, 4, 6 et 8 vers la zone de recirculation B, la zone ventilée C et le point A au-dessus de la toiture en amont de l'écoulement.

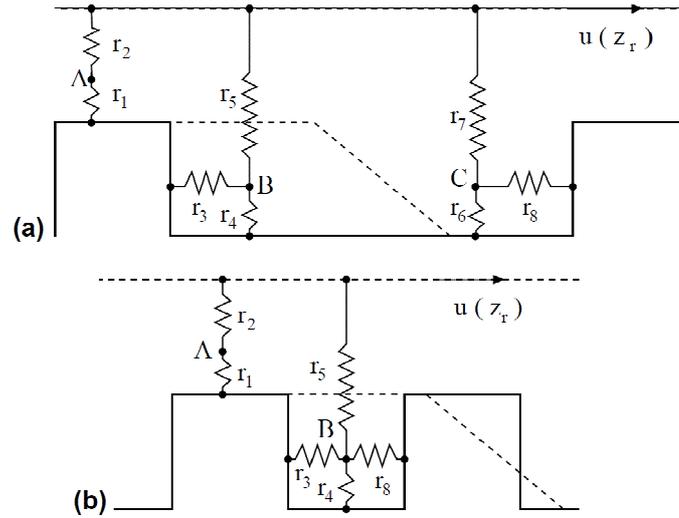


Figure 4-15 : Le réseau de résistances pour (a) un canyon large avec une zone de recirculation et une zone ventilée distincts et (b) un canyon étroit avec une zone de recirculation uniquement (Harman et al., 2004)

Pour le transport de la chaleur sensible et dans le cas d'une rue large (cf. figure 4-15a), le bilan des flux thermiques H_i , $i = 1,8$ [W.m^{-2}] traversant les résistances r_i , $i=1,8$ [s.m^{-1}] s'écrit comme ceci :

$$(d_t - d)H_1 = (d_t - d)H_2 \quad (4-2)$$

$$hH_3 + d_r H_4 = \frac{d_r}{2} H_5 \quad (4-3)$$

$$hH_8 + (d - d_r)H_6 = \left(d - \frac{d_r}{2}\right)H_7 \quad (4-4)$$

Dans le cas d'une rue étroite (cf. figure 4-15b) :

$$(d_t - d)H_1 = (d_t - d)H_2 \quad (4-5)$$

$$hH_3 + dH_4 + hH_8 = dH_5 \quad (4-6)$$

$$H_6 = H_7 = 0 \quad (4-7)$$

Les (H_i) sont calculés en fonction des différences de températures (ΔT_i) aux bornes des résistances (r_i) comme suit :

$$H_i = \frac{\rho_a c_{p,a}}{r_i} \Delta T_i \quad (4-8)$$

La figure 4-16 schématise l'emplacement des vitesses d'air (u_{xx}) utilisées dans le calcul des résistances (r_i). Le calcul de ces résistances se réduit à deux formes génériques données par les équations (4-9) et (4-10).

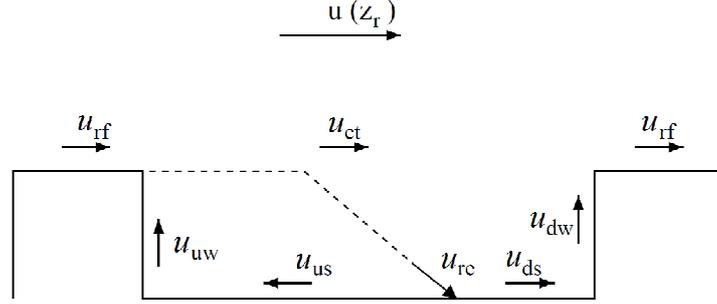


Figure 4-16 : Représentation schématique des vitesses de vent utilisées dans le calcul des résistances (r_i) (Harman et al., 2004)

D'une part, les résistances (r_1 , r_3 , r_4 , r_6 et r_7) sont liées aux couches limites en développement le long des toitures, de la chaussée et des parois verticales. Elles s'opposent au transport depuis les facettes du canyon vers les points intermédiaires A, B et C et sont calculées par l'équation suivante :

$$r_i = \ln\left(\frac{z_i}{z_{0m}}\right) \ln\left(\frac{z_i}{z_{0T}}\right) / \kappa^2 u_{xx} \quad (4-9)$$

Où (u_{xx}) représente la vitesse moyenne de l'air à une distance (z_i) de la surface considérée. Pour r_1 , r_3 , r_4 , r_6 et r_8 , correspondent les vitesses u_{rf} , u_{uw} , u_{us} , u_{ds} , et u_{dw} respectivement. Tandis que pour la résistance de la toiture (r_1), la hauteur (z_1) est égale à (δ_{rf}) tel que $\delta_{rf} = \min[0.1(d_i - d), z_r - h]$, la hauteur (z_i) pour les résistances à l'intérieur du canyon r_3 , r_4 , r_6 et r_8 est prise égale à ($0,1 h$).

D'autre part, les résistances (r_2 , r_5 et r_7), liées aux couches de cisaillement entre les points A, B et C et le niveau de référence (z_r), sont calculées par la formule suivante (Harman et al., 2004) :

$$r_i = (u(z_r) - u_{xx}) / u_*^2 \quad (4-10)$$

Avec (u_*) la vitesse de frottement et $u(z_r)$ la vitesse à la hauteur de référence (z_r). La vitesse (u_{xx}) représente les vitesses u_{rf} , u_{us} et u_{ds} pour les résistances r_2 , r_5 et r_7 respectivement.

Le calcul des 8 résistances se réduit donc au calcul des vitesses schématisées par la figure 4-16. Les vitesses u_{rf} et u_{ct} sont calculées en fonction de la vitesse du vent à la hauteur de référence (u_{z_r}) par extension du profil logarithmique de la zone inertielle :

$$\frac{u_{ct}}{u(z_r)} = \ln\left(\frac{h - d_0}{z_0}\right) / \ln\left(\frac{z_r - d_0}{z_0}\right) \quad (4-11)$$

$$\frac{u_{rf}}{u(z_r)} = \ln\left(\frac{h + \delta_{rf} - d_0}{z_0}\right) / \ln\left(\frac{z_r - d_0}{z_0}\right) \quad (4-12)$$

Avec (d_0) la hauteur de déplacement et (z_0) la longueur de rugosité de la canopée urbaine considérée. Ces deux paramètres sont calculés par le modèle de (Macdonald et al., 1998).

Par ailleurs, la vitesse (u_{re}) correspond à une décélération exponentielle avec un coefficient (α_1) à partir de (u_{ct}) (équation (4-13)). Tandis que les vitesses (u_{us}), (u_{uw}), (u_{ds}) et (u_{ct}) correspondent à la moyenne de la vitesse sur la facette correspondante décélérée depuis la vitesse (u_{re}) avec un coefficient (α_2) (moyenne de $u(x)$, équation (4-14), sur la facette considérée).

$$u_{re} = u_{ct} \exp(-\alpha_1 d'/h) \quad (4-13)$$

$$u(x) = u_{re} \exp(-\alpha_2 x/h) \quad (4-14)$$

D'après Harman et al. (2004) les valeurs des coefficients α_1 et α_2 qui correspondent le mieux aux mesures expérimentales sont de $\alpha_1=0,9$ et $\alpha_2=0,15 \times \max(1, 1,5h/d)$ (Barlow et al., 2004).

3.2- Implémentation sous TRNSYS

Afin de prendre en compte le confinement aéraulique dans la simulation des bâtiments, le modèle de Harman et al. (2004) a été programmé en Python puis implémenté dans TRNSYS par la création d'un nouveau Type au même titre que l'implémentation du modèle de l'enveloppe végétale.

Le Type « canyon » nécessite comme donnée d'entrée la vitesse du vent, la direction du vent et la température de l'air à la hauteur de référence. De plus, il nécessite l'introduction de 5 autres données, températures de surface ou flux thermiques sensibles, relatives aux échanges convectifs ayant lieu dans les 5 facettes de la rue canyon.

Le Type « canyon » a été paramétré d'une façon à permettre le choix d'introduire, pour chaque facette, soit une température soit un flux. En effet, les parois extérieures standards de TRNSYS ne permettent pas de récupérer les flux sensibles seuls mais la somme des flux sensibles et radiatifs GLO. Par conséquent, il est convient d'introduire dans le Type de canyon la température de surface extérieure pour les parois standards. En revanche, le module d'enveloppe végétale nécessite comme donnée d'entrée la température de l'air et fournit en retour les flux sensibles sur le feuillage (H_f) et sur le substrat (H_g). Par conséquent, il convient que la paroi végétalisée fournisse le flux sensible au Type du canyon qui lui retourne la température d'air dans le canyon calculée pour le point B ou le point C de la zone de recirculation et de la zone ventilée.

La figure 4-17 illustre le principe de couplage entre le modèle du bâtiment, le modèle de paroi végétale et le modèle de rue. Sur cette figure sont représentées les variables

de couplage sur lesquelles TRNSYS itèrent pour chaque pas de temps jusqu'à la convergence de la simulation.

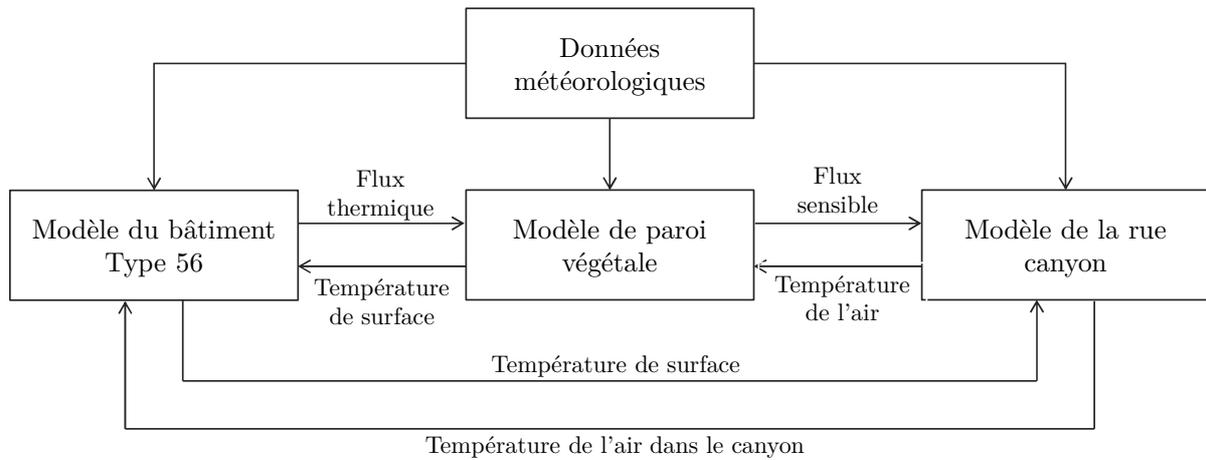


Figure 4-17 : Principe du couplage bâtiment–enveloppe végétale–microclimat de la rue

3.3- Calibration des paramètres du modèle aéraulique

Avant d'appliquer ce modèle aéraulique aux canyons urbains et de le coupler aux modèles de bâtiments et de parois végétales, les paramètres du modèle ont été calés sur les mesures expérimentales effectuées dans les rues canyons RefC et GwallC de la maquette ClimaBat. Pour cela, l'ensemble des données expérimentales ont été regroupés dans des fichiers lisibles par le Type 9 de la bibliothèque standard de TRNSYS. Ceci a permis d'introduire dans le modèle de canyon les températures mesurées dans les façades et les chaussées de ClimaBat. Cela afin de comparer les résultats des simulations numériques en termes des températures aux centres des rues canyons aux mesures effectuées dans ces rues.

La figure 4-18 illustre l'emplacement des capteurs dont les mesures ont été données au Type de canyon et ceux des mesures qui ont servies pour la comparaison. Il s'agit des températures de surface mesurées par les thermocouples insérés dans les façades orientées vers l'est et vers l'ouest et dans les chaussées de chacune des rues RefC et GwallC.

Dans ces simulations, les paramètres modélisant la décélération du jet d'air en aval des toitures sont fixés au mêmes valeurs que celles qui sont donnés par Harman et al. (2004). Cependant, la longueur de rugosité doit être adaptée à l'expérimentation en cours. Les résultats obtenus avec les paramètres $\alpha_1=0,9$, $\alpha_2=0,225$, z_{0m} pour le béton de 0,005 m et z_{0m} pour le végétal 0.01 m sont donnés par la figure 4-19.

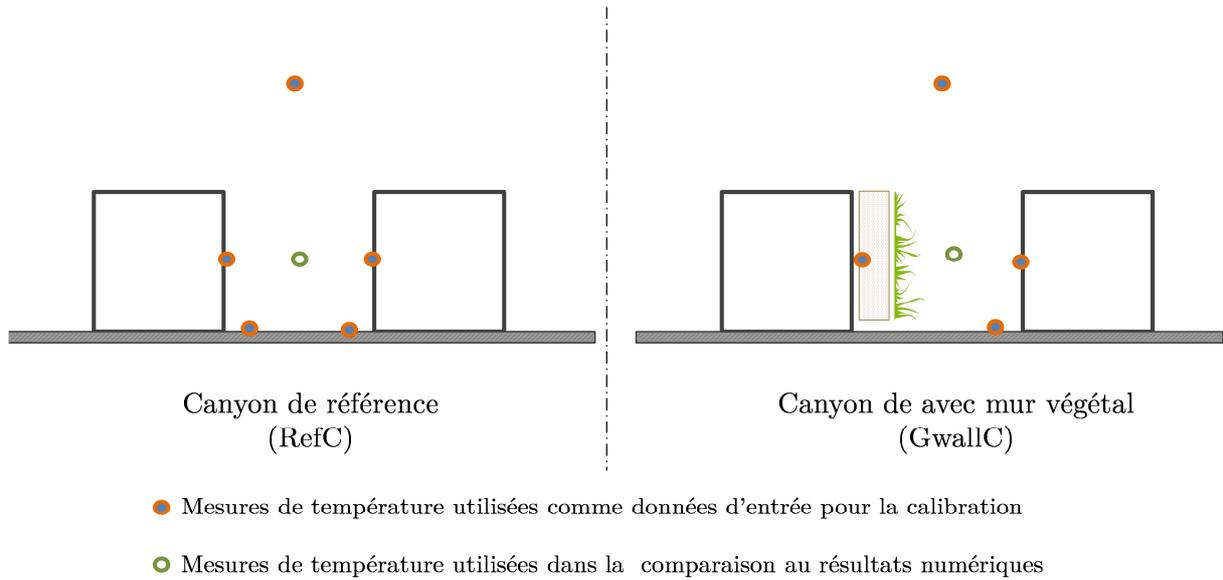


Figure 4-18 : Mesures de température utilisées dans la calibration du modèle aéraulique et les mesures de température dans les canyons utilisées dans la comparaison aux données expérimentales

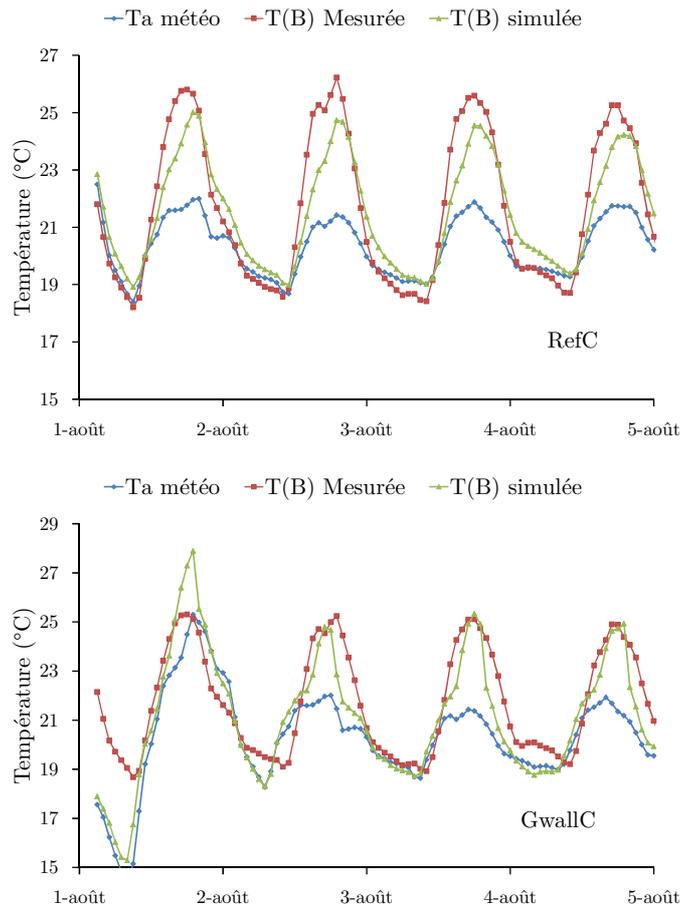


Figure 4-19 : Comparaison entre la température simulée par le modèle aéraulique implémentée sous TRNSYS et la température mesurée au centres des rues RefC et GwallC pour des paramètres $\alpha_1=0,9$, $\alpha_2=0,225$, $z_{0m}(\text{béton})=0,005$ et $z_{0m}(\text{végétal})=0,01$

Cette figure montre la possibilité de simuler les évolutions diurnes de la température dans les canyons urbains par une paramétrisation judicieuse du modèle aéraulique. En effet avec le jeu de paramètres testés, la prédiction de la température dans les rues de la maquette ClimaBat est relativement bonne. Ceci permettra de simuler des rues à échelle réelle à condition d'avoir des mesures de référence permettant de choisir le meilleur jeu de paramètres.

Le couplage du modèle aéraulique au modèle du bâtiment et au modèle de paroi végétale permettra de tenir en compte le réchauffement de l'air dans les rues canyons confinées qui, en plus de ses impacts radiatifs, impacte directement les transferts à l'interface du bâtiment.

3.4- Simulation couplée de l'interaction bâtiment – enveloppe végétale – microclimat

L'implémentation du modèle de parois végétales et du modèle aéraulique de canyons offre la possibilité de simuler l'impact énergétique des parois végétales en interaction avec les bâtiments et le microclimat urbain. Des simulations numériques dans lesquelles le modèle de parois végétales et le modèle de canyons urbains sont couplés avec le modèle de bâtiment ont été réalisées. Les simulations portent sur le même bâtiment étudié précédemment pour évaluer l'impact des murs végétaux sur la performance énergétique d'un bâtiment isolé (cf. §2.4.1 page 143). La scène urbaine simulée est constituée d'une série de bâtiments et de rues canyons identiques (cf. Figure 4-20). Les masques solaires et les interréflections sont pris en considération de la même façon que dans la simulation de ClimaBat (voir page 141).

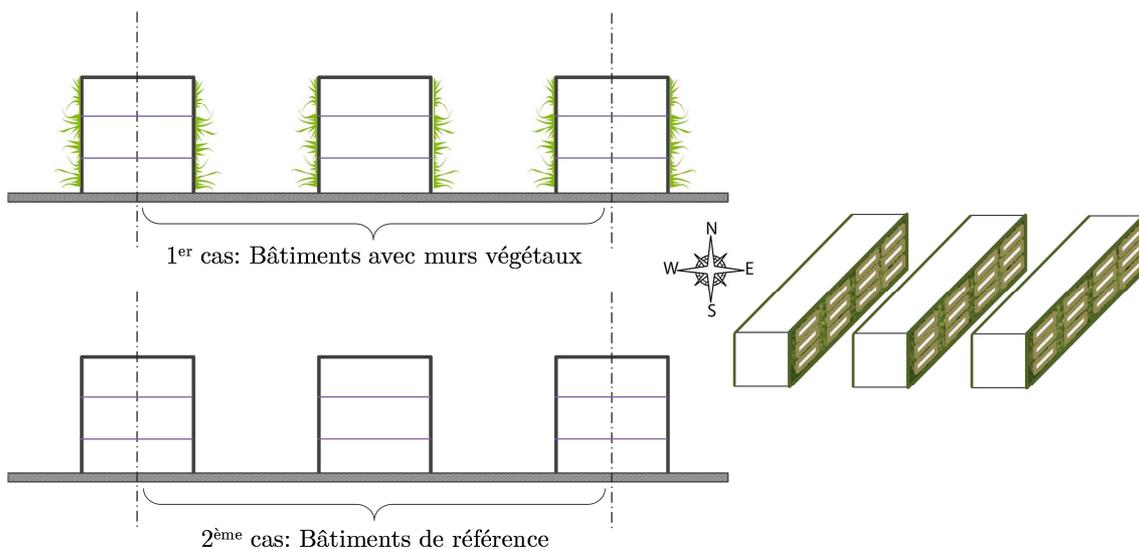


Figure 4-20 : Cas d'études numériques pour la simulation de l'impact énergétique des murs végétaux en interaction avec le bâtiment et le microclimat de la rue

La figure 4-21 illustre l'assemblage des modèles de bâtiments, de parois végétales et de canyons sous TRNSYS.

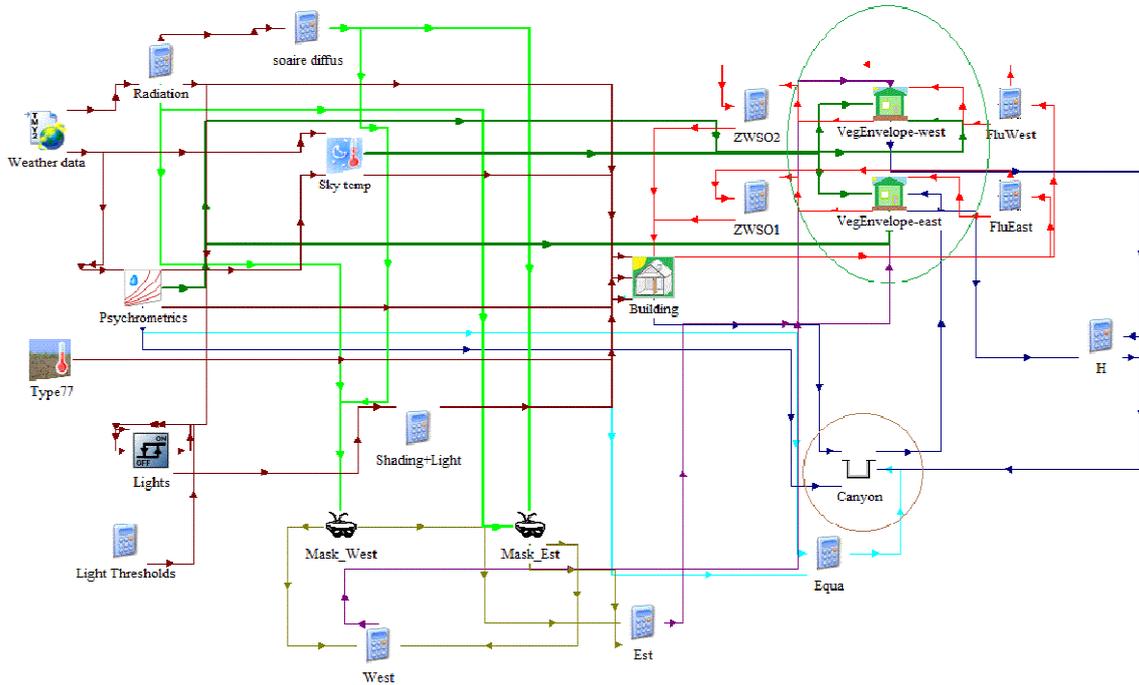


Figure 4-21 : Simulation thermique dynamique de l'impact des murs végétaux en façade est et ouest des bâtiments et couplage au modèle aéralique de canyons urbains

En haut à gauche, on discerne les Types standards permettant de calculer l'éclairement solaire des parois inclinées et de modéliser le sol et la température du ciel. En bas à gauche, les modules utilisés dans le calcul des masques solaires et des interréllexions. Au centre, le modèle thermique zonal des bâtiments de TRNSYS. En haut à droite les modules de parois végétales et plus bas le module de rue canyon.

La charge de rafraîchissement obtenue pour les bâtiments végétalisés et pour les bâtiments de référence est comparée aux résultats obtenus pour les bâtiments traités auparavant sans prendre en considération le confinement aéralique. La comparaison concerne la charge de climatisation du mois de juillet pour le bâtiment situé à Athènes (cf. Figure 4-22).

La figure 4-22 montre que la charge de climatisation des bâtiments situés entre des rues canyons est supérieure à celle des bâtiments isolés (seuls, sans confinement). En effet, la charge de climatisation du bâtiment de référence est de 14.42 kWh.m^{-2} lorsqu'il est isolé. Avec le confinement de la rue, cette charge croît à 17.54 kWh.m^{-2} soit une augmentation de 22%. De même, la charge de climatisation du bâtiment végétalisé passe de 9.62 kWh.m^{-2} à 11.39 kWh.m^{-2} , soit une augmentation de 18%.

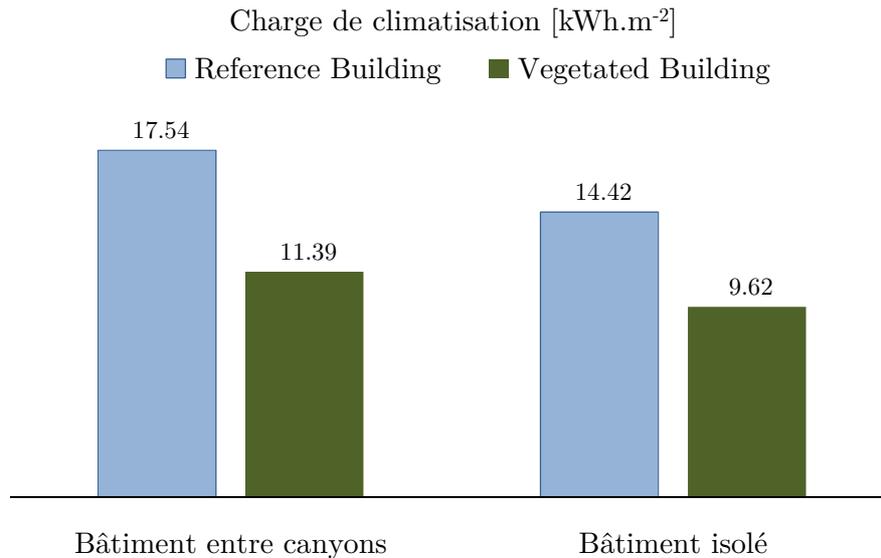


Figure 4-22 : Comparaison de la charge de climatisation dans le bâtiment végétalisé et dans le bâtiment de référence avec la charge obtenue pour les bâtiments isolés pour le mois de juillet et le climat d'Athènes

Par ailleurs, la charge de climatisation des bâtiments végétalisés est moins élevée que celle des bâtiments de référence aussi bien pour le cas d'un bâtiment isolé que pour le cas des bâtiments avec des rues canyons. En effet, la figure 4-22 montre que la végétalisation de façades orientées vers l'est et vers l'ouest réduit la charge de climatisation de 14.42 à 9.62 kWh.m⁻² pour le bâtiment isolé, soit une réduction de 33%, et réduit cette charge de 17.54 à 11.39 kWh.m⁻² pour le bâtiment entre deux rues canyons, soit une réduction de 37% de la charge de climatisation.

4- Conclusions

L'implémentation du modèle thermique de paroi végétale développé et validé dans le chapitre 2 dans un code de simulation thermique dynamique a été présentée. Cette implémentation permet d'évaluer l'impact des enveloppes végétales sur la performance énergétique des bâtiments. La comparaison des résultats numériques de simulation avec les mesures effectuées sur la maquette expérimentale met en avant la pertinence de la modélisation développée dans la prédiction du comportement thermique des parois végétales. Ainsi, une analyse approfondie de la contribution des différentes parties d'une paroi végétale dans le comportement thermique global est effectuée. L'implémentation sous TRNSYS d'un modèle aéraulique décrivant l'intensité des flux en fonction de la vitesse du vent a permis de simuler l'interaction des bâtiments végétalisés avec le microclimat à l'échelle d'une rue canyon. Par ailleurs, l'aspect technique de l'implémentation de ces modèles ouvre de nouvelles perspectives et la possibilité du couplage de TRNSYS avec d'autres logiciels de simulations.

Conclusions générales et perspectives

La végétalisation de l'enveloppe du bâtiment constitue une solution technique et architecturale permettant de réduire la demande énergétique et d'atténuer les îlots de chaleur urbains. Ce travail constitue une contribution à l'étude de l'impact des parois végétales sur la performance énergétique des bâtiments, sur le confort hygrothermique des occupants et sur le microclimat urbain. Dans ce travail, une modélisation numérique et expérimentale de différentes typologies de parois végétales dans plusieurs configurations microclimatiques a été entreprise.

La modélisation numérique repose sur le développement d'un modèle physique décrivant les mécanismes complexes liés aux transferts couplés de masse et de chaleur dans les parois végétales. À la différence des modèles antérieurs décrits dans l'étude bibliographique, le modèle développé s'affranchit de certaines hypothèses en considérant l'inertie et les variations de l'état hydrique des parois végétales. De plus, le modèle tient compte du couplage entre les transferts thermiques et les transferts hydriques. Par ailleurs, le transport aéraulique par-dessus du feuillage et au niveau du substrat est modélisé et le comportement radiatif particulier des feuilles est pris en considération. Ce modèle a été, ensuite, confronté aux données expérimentales en vue de sa validation. Pour cela, une plateforme échelle 1:10 a été mise en place sur le campus de l'Université de La Rochelle.

Les résultats de comparaison sur les évolutions de la température et de la teneur en eau du substrat ont montré des écarts peu significatifs entre la prédiction et les mesures. En effet, l'écart de température moyen relevé est de 0.8 °C avec une dispersion relativement faible et l'évolution de la teneur en eau est prédite avec un biais maximum de 5%. Cela nous a amené à implémenter, avec confiance, le modèle de paroi dans un code de simulation dynamique des bâtiments (TRNSYS). Le couplage du modèle développé avec le modèle de bâtiments a permis d'entreprendre, dans l'environnement TRNSYS, des simulations thermohydriques à l'échelle du bâtiment en vue de l'évaluation de l'incidence des parois végétalisées sur les performances énergétiques des bâtiments et sur le confort thermique des occupants.

Les résultats des simulations réalisées sur un bâtiment de trois étages équivalent aux bâtiments de la plateforme expérimentale ont montré que la disposition de murs

végétaux sur les façades est et ouest permet de réduire la charge thermique du bâtiment en été et en hiver. Ce résultat est en accord avec les observations expérimentales effectuées sur la plateforme à échelle réduite. À titre d'exemple, les simulations montrent que la végétalisation des façades est et ouest réduit la charge de rafraîchissement de 50% pour un climat océanique (La Rochelle) et de 37% pour un climat méditerranéen (Athènes). De même, la charge de chauffage est réduite de 12% pour le climat océanique et de 9% pour le climat méditerranéen. En termes de confort thermique, il a été montré que la végétalisation atténue de 4°C le pic de la température opérative ce qui améliore le confort thermique d'été. Par ailleurs, les effets superposés de la résistance thermique du substrat, de l'ombrage des feuilles et de l'évapotranspiration ont été analysés moyennant des simulations numériques entreprises sur une toiture végétalisée. Les résultats montrent que l'ombrage réduit les gains thermiques et que l'évapotranspiration procure un rafraîchissement.

L'étude de l'interaction bâtiment–microclimat urbain a été entreprise moyennant le développement et d'un modèle de rues canyons. Ce modèle, aéraulique, a été ensuite implémenté sous TRNSYS en vue de son couplage aux modèles du bâtiment et de la paroi végétalisée. Cette démarche a permis de tenir compte, dans la simulation des besoins énergétiques, de l'interaction entre le bâtiment (couplé au modèle de paroi végétale) et le microclimat de la rue. Les résultats montrent que la végétalisation réduit l'incidence du confinement en diminuant de 37% la charge de rafraîchissement d'un bâtiment confiné au lieu d'une baisse de 33% pour un bâtiment seul.

La modélisation expérimentale concerne la conception, la végétalisation et le suivi de la maquette de scène urbaine à échelle réduite construite sur la plateforme expérimentale ClimaBat. L'expérimentation concerne plusieurs typologies de parois végétales disposées dans différentes configurations microclimatiques. L'analyse des mesures montre que la végétalisation atténue les pics de température de surface sur les parois végétalisées (en été, à La Rochelle, jusqu'à 15°C sur la paroi ouest). De plus, il a été observé que le mur végétal réduit le bilan énergétique de la paroi en été, ce qui favorise le rafraîchissement, et l'augmente en hiver, ce qui favorise l'isolation thermique. Par ailleurs, les mesures de température dans les rues canyons ont permis d'estimer le potentiel de la végétalisation dans l'atténuation des îlots de chaleur urbain. En effet, les mesures montrent que le mur végétal a réduit de 1/3 le réchauffement de l'air dans les rues de la plateforme expérimentale. Enfin, les mesures effectuées ont permis de former une base de données utile pour la validation des modèles développés.

L'ensemble des travaux réalisés dans cette étude ouvrent de nombreuses perspectives tant au niveau du développement des modèles proposés, qu'au niveau des applications dans l'étude énergétique des bâtiments. On peut en citer :

- La prise en compte de la variation des propriétés thermiques et radiatives de la végétation en fonction des conditions climatiques et de la disponibilité en eau. Les cycles de vie saisonniers peuvent aussi être modélisés.
- La prise en compte de l'aspect directionnel de la réflectivité solaire du feuillage en fonction de leur distribution spatiale, de la forme géométrique et de l'orientation moyenne des feuilles.
- La modélisation de l'écoulement de l'eau sous l'effet de la gravitation dans les murs végétaux.
- La modélisation détaillée des couches associées aux parois végétales telles que la couche de drainage des toitures extensives et lame d'air de murs végétaux.
- L'expérimentation de l'impact des murs végétaux sur le microclimat d'un canyon urbain à échelle réelle.

Références

- Aida, M., 1982. Urban albedo as a function of the urban structure — A model experiment. *Boundary-Layer Meteorol* 23, 405–413.
- Akbari, H., Shea Rose, L., Taha, H., 2003. Analyzing the land cover of an urban environment using high-resolution orthophotos. *Landscape and Urban Planning* 63, 1–14.
- Alexandri, E., Jones, P., 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* 42, 2835–2849.
- Alexandri, E., Jones, P., 2008. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment* 43, 480–493.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., others, 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage paper*, Rome 300, 6541.
- Aluwihare, S., Watanabe, K., 2003. Measurement of evaporation on bare soil and estimating surface resistance. *Journal of Environmental Engineering* 129, 1157–1168.
- Avissar, R., Pielke, R.A., 1991. The impact of plant stomatal control on mesoscale atmospheric circulations. *Agricultural and Forest Meteorology* 54, 353–372.
- Balick, L.K., Scoggins, R.K., Link, L.E., 1981. Inclusion of a Simple Vegetation Layer in Terrain Temperature Models for Thermal IR Signature Prediction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* GE-19, 143–152.
- Banting, D., Doshi, H., Li, J., Missios, P., Au, A., Currie, B.A., Verrati, M., 2005. Report on the environmental benefits and costs of green roof technology for the City of Toronto.
- Barlow, J.F., Harman, I.N., Belcher, S.E., 2004. Scalar fluxes from urban street canyons. Part I: Laboratory simulation. *Boundary-Layer Meteorology* 113, 369–385.
- Belarbi, R., Ghiaus, C., Allard, F., 2006. Modeling of water spray evaporation: Application to passive cooling of buildings. *Solar Energy* 80, 1540–1552.
- Berndtsson, J.C., Bengtsson, L., Jinno, K., 2009. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs. *Ecological Engineering* 35, 369–380.
- Bouyer, J., 2009. Modélisation et simulation des microclimats urbains - Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments. Université de Nantes.
- Bozonnet, E., 2005. Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments - Cas de la rue canyon (Thèse de doctorat). Université de La Rochelle.
- Bozonnet, E., Doya, M., Allard, F., 2011. Cool roofs impact on building thermal response: A French case study. *Energy and Buildings* 43, 3006–3012.
- Brenneisen, S., 2006. Space for urban wildlife: designing green roofs as habitats in Switzerland. *Urban Habitats* 4, 27–36.
- Britter, R.E., Hanna, S.R., 2003. Flow and Dispersion in Urban Areas. *Annual Review of Fluid Mechanics* 35, 469–496.
- Brooks, R.H., Corey, A.T., 1964. Hydraulic Properties of Porous Media. Colorado State University.
- Bruse, M., Fleer, H., 1998. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software* 13, 373–384.

- Campbell, G.S., Norman, J.M., 1998a. Introduction to environmental biophysics. Springer.
- Campbell, G.S., Norman, J.M., 1998b. Conductances for Heat and Mass Transfer, in: An Introduction to Environmental Biophysics. Springer New York, pp. 87–111.
- Campbell, G.S., Norman, J.M., 1998c. Wind, in: An Introduction to Environmental Biophysics. Springer New York, pp. 63–75.
- Castleton, H.F., Stovin, V., Beck, S.B.M., Davison, J.B., 2010. Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings* 42, 1582–1591.
- Cermak, J.E., 1995. Wind Climate in Cities. Springer.
- Cheng, C.Y., Cheung, K.K.S., Chu, L.M., 2010. Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls. *Building and Environment* 45, 1779–1787.
- Coffman, R.R., 2007. Vegetated roof systems: Design, productivity, retention, habitat, and sustainability in green roof and ecoroof technology (PhD thesis). The Ohio State University.
- Czemieli Berndtsson, J., 2010. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering* 36, 351–360.
- Del Barrio, E.P., 1998. Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings* 27, 179–193.
- Djedjig, R., Belarbi, R., Bozonnet, E., 2013a. Experimental Study of a Green Wall System Effects in Urban Canyon Scene. Presented at the CLIMA 2013 -11th REHVA World Congress and the 8th International Conference on Indoor Air, Prague, Czech Republic.
- Djedjig, R., Bozonnet, E., Belarbi, R., 2013b. Experimental study of the urban microclimate mitigation potential of green roofs and green walls in street canyons. *Int. J. Low-Carbon Tech.*
- Djedjig, R., Bozonnet, E., Belarbi, R., 2013c. Développement dans TRNSYS d'un nouveau module de parois et de toitures intégrant de la végétation (Rapport du projet VegDUD). Université de La Rochelle.
- Djedjig, R., Ouldboukhitine, S.-E., Belarbi, R., Bozonnet, E., 2012. Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 39, 752–761.
- Doya, M., 2010. Analyse de l'impact des propriétés radiatives de façades pour la performance énergétique de bâtiments d'un environnement urbain dense (Thèse de doctorat). Université de La Rochelle.
- Doya, M., Bozonnet, E., Allard, F., 2012. Experimental measurement of cool facades' performance in a dense urban environment. *Energy and Buildings* 55, 42–50.
- Doya, M., Briottet, X., 2011. Compte rendu des mesures de réflectivité spectrale sur la façade végétalisée CLIMABAT (VegDUD project report). ONERA DOTA.
- Dupont, S., 2001. Modélisation dynamique et thermodynamique de la canopée urbaine: réalisation du modèle de sols urbains pour SUBMESO. Université de Nantes.
- Erell, E., Williamson, T., 2006. Simulating air temperature in an urban street canyon in all weather conditions using measured data at a reference meteorological station. *International Journal of Climatology* 26, 1671–1694.
- Eumorfopoulou, E.A., Kontoleon, K.J., 2009. Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes. *Building and Environment* 44, 1024–1038.
- Feng, C., Meng, Q., Zhang, Y., 2010. Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. *Energy and Buildings* 42, 959–965.
- Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L.G., Principi, P., 2010. Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Building and Environment* 45, 1890–1904.
- Frankenstein, S., Koenig, G., 2004. FASST Vegetation Models (Technical Report No. TR-04-25). US Army Corps of Engineers® Engineer Research and Development Center.
- Gartland, L., 2008. Heat islands: understanding and mitigating heat in urban areas. Earthscan.

- Godowitch, J.M., Ching, J.K.S., Clarke, J.F., 1985. Evolution of the Nocturnal Inversion Layer at an Urban and Nonurban Location. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 24, 791–804.
- Gorsevski, V., Haider, T., Quattrochi, D., Luvall, J., 1998. Air Pollution Prevention Through Urban Heat Island Mitigation: An Update on the Urban Heat Island Pilot Project. Presented at the ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, American Council for an Energy Efficient Economy, Pacific Grove, CA.
- Gosse, G., 1971. Profil de vent au-dessus d'un gazon en régime de neutralité thermique : détermination des coefficients d'échange. ORSTOM, Adiopodoumé.
- Goudriaan, J., 1977. Crop micrometeorology: a simulation study. Pudoc, Center for Agricultural Publishing and Documentation.
- Grant, G., 2006. Extensive green roofs in London. *Urban Habitats* 4, 51–65.
- Grimmond, C.S.B., Cleugh, H.A., Oke, T.R., 1991. An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere* 25, 311–326.
- Gros, A., 2013. Modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l'échelle d'un quartier (Thèse de doctorat). Université de La Rochelle, La Rochelle.
- Harman, I.N., Barlow, J.F., Belcher, S.E., 2004. Scalar Fluxes from Urban Street Canyons Part II: Model. *Boundary-Layer Meteorology* 113, 387–410.
- Hartig, T., Mang, M., Evans, G.W., 1991. Restorative effects of natural environment experiences. *Environment and behavior* 23, 3–26.
- He, H., Jim, C.Y., 2010. Simulation of thermodynamic transmission in green roof ecosystem. *Ecological Modelling* 221, 2949–2958.
- Hertel, O., Berkowicz, R., Larssen, S., 1991. The Operational Street Pollution Model (OSPM), in: Dop, H. van, Steyn, D.G. (Eds.), *Air Pollution Modeling and Its Application VIII*, NATO · Challenges of Modern Society. Springer US, pp. 741–750.
- Hooker, J., Hendriks, N., 1994. The Green Roofs of Europe. Presented at the 107th Annual Convention and Exhibit of the National Roofing Contractors Association, San Francisco.
- Howard, L., 1833. The climate of London: deduced from meteorological observations made in the metropolis and at various places around it. Harvey and Darton, J. and A. Arch, Longman, Hatchard, S. Highley [and] R. Hunter.
- Ichinose, T., Shimodozono, K., Hanaki, K., 1999. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmospheric Environment* 33, 3897–3909.
- Ip, K., Lam, M., Miller, A., 2010. Shading performance of a vertical deciduous climbing plant canopy. *Building and Environment* 45, 81–88.
- Jaffal, I., Ouldboukhitine, S.-E., Belarbi, R., 2012. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy* 43, 157–164.
- Jarvis, P.G., 1976. The Interpretation of the Variations in Leaf Water Potential and Stomatal Conductance Found in Canopies in the Field. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 273, 593–610.
- Jones, H.G., Vaughan, R.A., 2010. *Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications*. Oxford University Press.
- Kadas, G., 2006. Rare invertebrates colonizing green roofs in London. *Urban Habitats* 4, 66–86.
- Kämpf, J.H., Robinson, D., 2007. A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows. *Energy and Buildings* 39, 445–453.
- Karl, T.R., Diaz, H.F., Kukla, G., 1988. Urbanization: Its Detection and Effect in the United States Climate Record. *Journal of Climate* 1, 1099–1123.
- Kawashima, S., Ishida, T., Minomura, M., Miwa, T., 2000. Relations between Surface Temperature and Air Temperature on a Local Scale during Winter Nights. *Journal of Applied Meteorology* 39, 1570–1579.

- Kikegawa, Y., Genchi, Y., Kondo, H., Hanaki, K., 2006. Impacts of city-block-scale countermeasures against urban heat-island phenomena upon a building's energy-consumption for air-conditioning. *Applied Energy* 83, 649–668.
- Kloppers, J.C., Kröger, D.G., 2005. The Lewis factor and its influence on the performance prediction of wet-cooling towers. *International Journal of Thermal Sciences* 44, 879–884.
- Köhler, M., 2008. Green facades—a view back and some visions. *Urban Ecosystems* 11, 423–436.
- Körner, C., 1994. Leaf Diffusive Conductances in the Major Vegetation Types of the Globe, in: Schulze, P.D.E.-D., Caldwell, P.D.M.M. (Eds.), *Ecophysiology of Photosynthesis*, Springer Study Edition. Springer Berlin Heidelberg, pp. 463–490.
- Kustas, W.P., Choudhury, B.J., Kunkel, K.E., Gay, L.W., 1989. Estimate of the aerodynamic roughness parameters over an incomplete canopy cover of cotton. *Agricultural and Forest Meteorology* 46, 91–105.
- Lin, Y.-J., Lin, H.-T., 2011. Thermal performance of different planting substrates and irrigation frequencies in extensive tropical rooftop greeneries. *Building and Environment* 46, 345–355.
- Liu, K., 2003. Engineering performance of rooftop gardens through field evaluation, in: RCI 18th International Convention and Trade Show (Tampa, Florida, 3/13/2003). pp. 1–15.
- Macdonald, R.W., Griffiths, R.F., Hall, D.J., 1998. An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays. *Atmospheric Environment* 32, 1857–1864.
- Malys, L., 2012. Évaluation des impacts directs et indirects des façades et des toitures végétales sur le comportement thermique des bâtiments (Thèse de doctorat). École Nationale Supérieure d'Architecture nantes.
- Manley, G., 1958. On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 84, 70–72.
- Martens, R., Bass, B., Alcazar, S.S., 2008. Roof-envelope ratio impact on green roof energy performance. *Urban Ecosyst* 11, 399–408.
- Masson, V., 2000. A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models. *Boundary-Layer Meteorology* 94, 357–397.
- Mentens, J., Raes, D., Hermy, M., 2006. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning* 77, 217–226.
- Miller, G.T., 2007. *Living in the environment: principles, connections, and solutions*. Thomson Brooks/Cole, Belmont, CA.
- Mitalas, G.P., 1972. Transfer function method of calculating cooling loads, heat extraction & space temperature. *ASHRAE Journal* 14, 54–56.
- Miyazaki, T., 2006. *Water flow in soils*. Taylor & Francis.
- Monteith, J.L., Unsworth, M.H., 2008. *Principles of environmental physics*. Academic Press.
- Morris, C. j. g., Simmonds, I., 2000. Associations between varying magnitudes of the urban heat island and the synoptic climatology in Melbourne, Australia. *International Journal of Climatology* 20, 1931–1954.
- Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., Tsangrassoulis, A., Mihalakakou, G., 2001. Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings* 33, 719–729.
- Nobel, P.S., 2005a. 6 - Bioenergetics, in: *Physicochemical and Environmental Plant Physiology* (Third Edition). Academic Press, Burlington, pp. 267–306.
- Nobel, P.S., 2005b. 7 - Temperature and Energy Budgets, in: *Physicochemical and Environmental Plant Physiology* (Third Edition). Academic Press, Burlington, pp. 307–350.
- Norman, J.M., Kustas, W.P., Humes, K.S., 1995. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology* 77, 263–293.
- Oke, T.R., 1987. *Boundary Layer Climates*. Taylor & Francis Group.

- Oke, T.R., 1988. Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings* 11, 103–113.
- Oke, T.R., 2006. Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites (Report No. 81), Instruments and observing methods. World Meteorological Organization.
- Oke, T.R., Johnson, G.T., Steyn, D.G., Watson, I.D., 1991. Simulation of surface urban heat islands under “ideal” conditions at night part 2: Diagnosis of causation. *Boundary-Layer Meteorology* 56, 339–358.
- Onmura, S., Matsumoto, M., Hokoi, S., 2001. Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens. *Energy and Buildings* 33, 653–666.
- Ottelé, M., Perini, K., Fraaij, A.L.A., Haas, E.M., Raiteri, R., 2011. Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems. *Energy and Buildings* 43, 3419–3429.
- Ouldboukhitine, S.-E., 2012. Modélisation théorique et expérimentale du comportement énergétique et environnemental des toitures végétalisées (Th ese de doctorat). Université de La Rochelle.
- Ouldboukhitine, S.-E., Belarbi, R., Djedjig, R., 2012. Characterization of green roof components: Measurements of thermal and hydrological properties. *Building and Environment* 56, 78–85.
- Ouldboukhitine, S.-E., Belarbi, R., Jaffal, I., Trabelsi, A., 2011. Assessment of green roof thermal behavior: A coupled heat and mass transfer model. *Building and Environment* 46, 2624–2631.
- Peck, S.W., Callaghan, C., Kuhn, M.E., Bass, B., 1999. Greenbacks from green roofs: forging a new industry in Canada. CMHC/SCHL.
- Perez, R., Stewart, R., Arbogast, C., Seals, R., Scott, J., 1986. An anisotropic hourly diffuse radiation model for sloping surfaces: Description, performance validation, site dependency evaluation. *Solar Energy* 36, 481–497.
- Raffan, J., 2002. La nature nourricière: une étude du potentiel d’apprentissage dans les cours d’ cole. Evergreen, Toronto.
- Renou, E., 1862. Différences de température entre Paris et choisy-le-roi. Société M t orologique de France, *Annuaire* 10, 105–109.
- Robinson, D., Haldi, F., K mpf, J.H., Leroux, P., Perez, D., Rasheed, A., Wilke, U., 2009. CitySim: comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning. Presented at the Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland.
- Rosenfeld, A.H., Akbari, H., Bretz, S., Fishman, B.L., Kurn, D.M., Sailor, D., Taha, H., 1995. Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates. *Energy and Buildings* 22, 255–265.
- Sailor, D.J., 2008. A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings* 40, 1466–1478.
- Sailor, D. J., 2008. A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings* 40, 1466–1478.
- Santamouris, M., Pavlou, C., Doukas, P., Mihalakakou, G., Synnefa, A., Hatzibiros, A., Patargias, P., 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* 32, 1781–1788.
- Santamouris, M., Synnefa, A., Karlessi, T., 2011. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy* 85, 3085–3102.
- Schmidt, D.W., 1917. Zum Einflu  gro er St dte auf das Klima. *Naturwissenschaften* 5, 494–495.
- Seem, J.E., 1987. Modeling of heat transfer in buildings. Wisconsin Univ., Madison (USA).
- Snyder, R.L., Paw, K.T., 2002. Penman- Monteith equation derivation [WWW Document]. URL <http://biomet.ucdavis.edu/Evapotranspiration/PMDerivation/PMD.htm> (accessed 8.19.13).
- Spala, A., Bagiorgas, H.S., Assimakopoulos, M.N., Kalavrouziotis, J., Matthopoulos, D., Mihalakakou, G., 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* 33, 173–177.
- Stanghellini, C., de Jong, T., 1995. A model of humidity and its applications in a greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology* 76, 129–148.
- Stearns, C., 1970. Determining surface roughness and displacement height. *Boundary-Layer Meteorol* 1.
- Stec, W.J., van Paassen, A.H.C., Maziarz, A., 2005. Modelling the double skin façade with plants. *Energy and Buildings* 37, 419–427.
- Steyn, D.G., Lyons, T.J., 1985. Comments on “The determination of view-factors in urban canyons”. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 24, 383–385.
- Stoll, M.J., Brazel, A.J., 1992. Surface-Air Temperature Relationships in the Urban Environment of Phoenix, Arizona. *Physical Geography* 13, 160–179.
- Tabares-Velasco, P.C., Srebric, J., 2012. A heat transfer model for assessment of plant based roofing systems in summer conditions. *Building and Environment* 49, 310–323.
- Taha, H., 1997. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings* 25, 99–103.
- Taha, H., Akbari, H., Rosenfeld, A., Huang, J., 1988. Residential cooling loads and the urban heat island--the effects of albedo. *Building and Environment* 23, 271–283.
- Teemusk, A., Mander, Ü., 2009. Green roof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: A case study from Estonia. *Building and Environment* 44, 643–650.
- Thoennessen, M., 2002. Elementdynamik in fassadenbegrünendem Wilden Wein, *Kölner Geograph. Arbeiten Heft* 78, 1–110.
- Tsoumarakis, Assimakopoulos, V., Tsiros, I., Hoffman, M.E., Chronopoulou, A., 2008. Thermal performance of a vegetated wall During hot and cold weather conditions. Presented at the 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin.
- Van de Griend, A.A., Owe, M., 1994. Bare soil surface resistance to evaporation by vapor diffusion under semiarid conditions. *Water Resources Research* 30, 181–188.
- Van Den Berg, A.E., Hartig, T., Staats, H., 2007. Preference for Nature in Urbanized Societies: Stress, Restoration, and the Pursuit of Sustainability. *Journal of Social Issues* 63, 79–96.
- Van Renterghem, T., Botteldooren, D., 2009. Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs. *Building and Environment* 44, 1081–1087.
- Van Renterghem, T., Hornikx, M., Forssen, J., Botteldooren, D., 2013. The potential of building envelope greening to achieve quietness. *Building and Environment* 61, 34–44.
- Vardoulakis, S., Fisher, B.E., Pericleous, K., Gonzalez-Flesca, N., 2003. Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric Environment* 37, 155–182.
- Vershinin, P.B., Agriculture, U.S.D. of, (U.S.), N.S.F., 1966. Fundamentals of agrophysics (Osnovy agrofiziki). Israel Program for Scientific Translations; [available from the U.S. Dept. of Commerce, Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information, Va.].
- Vinet, J., 2000. Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l’impact de l’eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs. Université de Nantes.
- Vos, P.E.J., Maiheu, B., Vankerkom, J., Janssen, S., 2012. Improving local air quality in cities: To tree or not to tree? *Environmental Pollution*.
- White, E.V., Gatersleben, B., 2011. Greenery on residential buildings: Does it affect preferences and perceptions of beauty? *Journal of Environmental Psychology* 31, 89–98.
- Wong, Nyuk Hien, Chen, Y., Ong, C.L., Sia, A., 2003. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Building and Environment* 38, 261–270.

- Wong, N. H., Cheong, D.K.W., Yan, H., Soh, J., Ong, C.L., Sia, A., 2003. The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore. *Energy and Buildings* 35, 353–364.
- Wong, N.H., Kwang Tan, A.Y., Chen, Y., Sekar, K., Tan, P.Y., Chan, D., Chiang, K., Wong, N.C., 2010. Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment* 45, 663–672.
- Yang, J., Yu, Q., Gong, P., 2008. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment* 42, 7266–7273.
- Yasuda, N., 1988. Turbulent diffusivity and diurnal variations in the atmospheric boundary layer. *Boundary-Layer Meteorol* 43, 209–221.
- Zinzi, M., Agnoli, S., 2012. Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. *Energy and Buildings* 55, 66–76.

Impacts des enveloppes végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain

Impacts of green envelopes at the interface between buildings and urban microclimate

Résumé :

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet ANR-Villes Durables VegDUD : Rôle du végétal dans le développement urbain durable ; une approche par les enjeux liés à la climatologie, l'hydrologie, la maîtrise de l'énergie et les ambiances (2010-2013). Elle traite de la modélisation et de l'expérimentation de toitures et de façades végétales en vue de l'évaluation de leurs impacts hygrothermiques sur les bâtiments et sur les microclimats urbains.

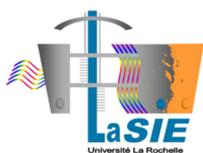
Un modèle physique a été développé pour décrire les mécanismes de transferts couplés de chaleur et de masse (hydrique) au sein de la paroi végétale. L'implémentation de ce modèle dans un code de simulation thermique dynamique permet de prédire l'impact de la végétalisation sur la performance énergétique des bâtiments. L'extension de cette démarche à l'échelle d'une rue canyon permet d'inclure l'interaction microclimatique dans la simulation thermohydrrique des bâtiments.

Sur le plan expérimental, une maquette reconstituant une scène urbaine est mise en place pour étudier l'impact de différentes typologies de parois végétales dans plusieurs configurations microclimatiques. La confrontation des résultats expérimentaux et ceux issus de la modélisation numérique a été entreprise à l'échelle du système constitué du bâtiment et du microclimat urbain environnant. Pour cela, l'étude du comportement d'un bâtiment et d'une rue végétalisés par rapport au comportement du même bâtiment et d'une rue témoin a permis d'évaluer l'incidence des transferts thermiques, hygrométriques et radiatifs de la végétalisation. Ceci a permis d'entreprendre la validation des outils de prédiction numérique développés.

Les résultats de l'étude montrent que les transferts thermiques et hydriques sont fortement couplés et que le comportement thermique des parois végétales est tributaire de l'état hydrique du substrat de culture. Pour l'été comme pour l'hiver, les simulations numériques et les données expérimentales montrent que la végétalisation permet d'améliorer la performance énergétique des bâtiments et de réduire les ilots de chaleur urbains

Mots clés : Modélisation thermohydrrique, Toiture végétale, mur végétal, performance énergétique des bâtiments, microclimat urbain.

Keywords: Heat and moisture modeling, green roofs, green walls, building energy performance, urban microclimate.



Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE)

Avenue Michel Crépeau 17042 La Rochelle Cedex 1 - France