

Évaluation des impacts directs et indirects des
façades et des toitures végétales sur le
comportement thermique des bâtiments

Laurent Malys

22 novembre 2012

*à Stanislas,
Sidonie et Capucine,*

Évaluation des impacts directs et indirects
des façades et des toitures végétales
sur le comportement thermique des bâtiments

Financement

ADEME



Laboratoire



École nationale supérieure d'architecture de Nantes
6, quai François Mitterrand
BP 16202
44262 Nantes Cedex 2
Tél : +33 (0)2 40 59 43 24
Fax : +33 (0)2 40 59 11 77
<http://www.cerma.archi.fr>

Encadrement

Marjorie Musy, Cerma, ensa Nantes, co-directrice
Christian Inard, LaSIE, Université de La Rochelle, co-directeur

Comité de suivi

Emmanuel Bozonnet, LaSIE, Université de La Rochelle
Samira Kherrouf, Ingénieur Ademe
Francis Miguet, Cerma, ensa Nantes

Résumé

La synergie d'un réchauffement climatique planétaire et d'un effet d'îlot de chaleur urbain nécessite d'apporter des réponses rapides qui solutionnent à la fois les problématiques sanitaires, de confort et énergétiques. L'un de ces enjeux est l'adaptation de l'aménagement urbain de manière à maîtriser le phénomène d'îlot de chaleur urbain et son impact sur la consommation d'énergie des bâtiments. Dans un contexte de densification urbaine, l'apport de végétation, notamment sur l'enveloppe des bâtiments, est une solution envisagée. L'objectif de ce travail de thèse est de fournir un outil de simulation permettant de représenter les effets de la végétalisation des enveloppes de bâtiments sur leur comportement thermique, qu'ils agissent directement ou bien par l'intermédiaire de la modification du microclimat. Une étude préalable a montré la nécessité de mettre en oeuvre un couplage entre un code CFD et le modèle thermo-radiatif **Solene** pour l'évaluation de l'impact du microclimat sur le comportement thermique des bâtiments. Un modèle d'enveloppe végétale a ensuite été intégré au modèle de simulation microclimatique développé au CERMA, **Solene-microclimat**, et validé à partir de résultats expérimentaux. Plusieurs scénarios de végétalisation du quartier du Pin sec de Nantes densifié ont ensuite été étudiés. Il a été montré que l'effet direct de la végétalisation des façades et des toits permettait de supprimer l'inconfort d'été à l'intérieur de bâtiments sans isolation thermique. La végétalisation des façades des constructions voisines permet d'améliorer indirectement les conditions de confort dans le cas d'un bâtiment qui n'est ni isolé, ni végétalisé.

Abstract

The combination of global warming and urban 'heat island' effect raises health, energy consumption and discomfort concerns that require quick and realistic answers. One of the issues is the adaptation of the city planning in order to mitigate the urban 'heat island' phenomenon and its impact on the energy consumption of buildings. In a context of urban intensification, coating the building envelope with vegetation is one solution considered. The main objective of this thesis is thus to provide a simulation tool which is able to describe how the vegetation of buildings' envelopes affects the thermal behaviour of the building directly but also indirectly, through induced micro-climate changes. A preliminary study showed that coupling a CFD code and **Solene**, a thermo-radiative model, is necessary to assess the impact of micro-climate on buildings' thermal behaviour. Then, a thermal model of green walls has been implemented in **Solene-microclimat**, a micro-climatic model developed at CERMA laboratory. This model has been subsequently validated using experimental data. Finally several scenarios of vegetation applied to the "Pin Sec" district, a suburban neighbourhood of the city of Nantes (France) previously densified, have been simulated. From these empirical results, it has been shown that, in the case of uninsulated buildings, the direct effect of the green façades and roofs can avoid indoor thermal discomfort in summer. Covering with vegetation the external walls of neighbouring buildings also allows to indirectly improve the thermal comfort in a building which is neither insulated nor coated with vegetation.

Sommaire

Liste des figures	xv
Liste des tableaux	xxi
Nomenclature	xxiii
Introduction	1
I Contexte	5
1 Modélisation des microclimats urbains	7
1.1 Densification et microclimat urbain	8
1.1.1 Densifier la ville pour limiter son étalement	8
1.1.2 L'îlot de chaleur urbain	9
1.1.3 Deux objectifs contradictoires	10
1.1.4 Consommation énergétique et microclimat urbain	12
1.2 La végétation pour atténuer l'îlot de chaleur	13
1.2.1 La végétation en ville	13
1.2.2 Le projet VegDUD	14
1.2.3 Problématique de la thèse	16
1.3 Outils de simulation	17
1.3.1 À l'interface entre deux champs de recherche	17
1.3.2 Modèles atmosphériques	21
1.3.3 Modèles radiatifs	23
1.3.4 Modèles paramétriques, modèles de rue canyon	25
1.4 Conclusion	28
2 Présentation de l'outil microclimatique du CERMA	31
2.1 Simulations radiatives avec Solene	32
2.1.1 Calcul du rayonnement incident	32
2.1.2 Calcul des inter-réflexions	33
2.1.3 Représentation des arbres	34
2.1.4 Bilan de rayonnement thermique GLO	35

2.2	Modèle thermique de bâtiment	36
2.2.1	Modèle de paroi élémentaire	37
2.2.2	Modélisation des différents composants du bâtiment	38
2.2.3	Modèle de bâtiment	39
2.3	Simulation thermoaéraulique avec <code>Code_Saturne</code>	42
2.3.1	Présentation de <code>Code_Saturne</code>	42
2.3.2	Modèle de turbulence	43
2.3.3	Technique de la veine numérique	44
2.3.4	Conditions aux limites en entrée de veine	45
2.3.5	Conditions aux limites pour les murs	45
2.3.6	Représentation hygro-aéraulique des arbres	46
2.4	Couplage	49
2.4.1	Principe du couplage	49
2.4.2	Mise en œuvre du couplage	51
2.4.3	Chaîne de traitement géométrique	56
2.4.4	Retour d'expériences	57
2.5	Conclusion	58

II Modèles de surface 61

3	Validation des modèles de surface	63
3.1	Méthodes de validation de l'outil de couplage	64
3.1.1	Validation du modèle thermique de bâtiment	64
3.1.2	Validation du modèle microclimatique	65
3.1.3	Validation des modèles thermiques de surface	65
3.2	Présentation de la campagne FluxSAP	66
3.2.1	Choix du quartier Pin Sec	66
3.2.2	Données météorologiques	67
3.2.3	Données utilisées pour la validation	68
3.3	Modèle de sol	69
3.3.1	Présentation du modèle de sol	69
3.3.2	Méthodologie	70
3.3.3	Résultats	72
3.3.4	Conclusion	74
3.4	Température du toit	75
3.4.1	Données expérimentales	75
3.4.2	Méthodologie	76
3.4.3	Résultats	77
3.4.4	Sensibilité du modèle thermique	78
3.4.5	Conclusion	80
3.5	Température de façade	81
3.5.1	Méthodologie	81
3.5.2	Résultats	81

3.6	Conclusion	83
4	Modélisation et simulation des enveloppes végétales	85
4.1	Typologie des façades végétales	86
4.1.1	Définition d'une typologie	87
4.1.2	La végétation comme revêtement de façade	87
4.1.3	La végétation comme brise-soleil	89
4.1.4	La végétation comme élément de paroi	90
4.1.5	Conclusion	92
4.2	État de l'art sur le comportement hydrothermique des façades végétales	92
4.2.1	Étude des dispositifs de façades végétales	92
4.2.2	Effet des façades végétales sur le comportement thermique des bâtiments	99
4.2.3	Effet sur le microclimat	103
4.2.4	De l'expérimentation à la modélisation	108
4.3	Modélisation des façades végétales	109
4.3.1	Modélisation des toitures végétales	109
4.3.2	Modèle implémenté dans <i>Solene-microclimat</i>	113
4.3.3	Implémentation	121
4.4	Comparaison avec l'expérimentation	124
4.4.1	Présentation du dispositif expérimental	125
4.4.2	Exploitation des mesures thermiques et hydriques	129
4.4.3	Méthodologie de la validation expérimentale	135
4.4.4	Résultats	139
4.5	Conclusion	145
III	Couplage	147
5	Étude du couplage	149
5.1	Calcul des coefficients d'échange superficiel par convection	150
5.1.1	Expressions générales des corrélations existantes	151
5.1.2	Vitesses de référence	152
5.1.3	Méthode d'obtention de la loi	152
5.1.4	Corrélations utilisées dans le cas de <i>Solene-microclimat</i>	153
5.1.5	Conclusion	154
5.2	Importance relative des flux convectifs et radiatifs	154
5.2.1	Cas de référence	155
5.2.2	Impact du coefficient d'échange superficiel par convection	157
5.2.3	Impact du bilan de rayonnement grande longueur d'onde	160
5.2.4	Conclusion	163
5.3	Sensibilité du modèle thermique de bâtiment au mode couplage	164
5.3.1	Couplage avec la vitesse de l'air	164

5.3.2	Couplage avec la température de l'air	165
5.3.3	Calcul d'une température d'air équivalente sur une zone de contrôle	166
5.3.4	Méthodologie de l'analyse de sensibilité	168
5.4	Résultats	170
5.4.1	Résultats bruts	171
5.4.2	Impact de l'utilisation d'une zone de bilan	174
5.4.3	Impact du choix du mode de couplage	176
5.5	Conclusion et discussion	178
6	Application au quartier Pin Sec	179
6.1	Présentation du cas d'application	180
6.1.1	Le quartier Pin Sec	180
6.1.2	Bâtiment d'étude	184
6.1.3	Scénario de densification	184
6.1.4	Scénario de végétalisation	186
6.2	Méthodologie	188
6.2.1	Prise en compte du confort adaptatif	189
6.2.2	Période de simulation	191
6.2.3	Choix des configurations végétales	192
6.2.4	Quatre axes d'analyse	194
6.3	Résultats	195
6.3.1	Axe 1 : effets de la végétalisation des surfaces en fonction du niveau d'isolation thermique	195
6.3.2	Axe 2 : comparaison des effets directs et indirects des façades végétales	196
6.3.3	Axe 3 : effets directs des enveloppes végétales	201
6.3.4	Axe 4 : effets indirects de la végétalisation des surfaces urbaines	205
6.4	Conclusion et discussion	209
	Conclusion	213
	Annexes	221
	Annexe A : Liste des logiciels utilisés	221
	Annexe B : Résultats détaillés du chapitre 6	225
	Références bibliographiques	231

Liste des figures

1.1	Étalement urbain à Nantes de 1960 à 2010 (source : ©AURAN)	8
1.2	Profil d'un îlot de chaleur urbain (source : wikimedia)	9
1.3	Intensité de l'ICU observée pour des villes américaines, européennes et australiennes en fonction du rapport de forme moyen des rues [Oke, 1987]	11
1.4	Classification des modèles de surface urbaine [Grimmond et al., 2011]	20
1.5	Simulation avec ENVI-Met de l'impact des arbres sur la température de l'air en journée (source : [Wong et Jusuf, 2008])	21
1.6	Schéma de principe du modèle DART	24
1.7	Modélisation zonale de la rue canyon	26
1.8	Schéma de principe du modèle TEB [Masson, 2000]	27
2.1	Repère et angles sphériques (à gauche), distribution des luminances pour une latitude de 40° à 14h TSV pour un ciel clair CIE (milieu) et pour un ciel couvert clair $\varepsilon = 1$; $\Delta = 0,35$ (à droite) (d'après [Bouyer, 2009])	33
2.2	Résultats de simulation avec Solene : flux solaire diffus avec un ciel clair, 21/6 17 :00 TSV	34
2.3	Attribution du flux solaire surfacique aux cellules volumiques [Robitu, 2005]	35
2.4	Modèle de paroi élémentaire [Bouyer, 2009]	37
2.5	Détails des modèles élémentaires composant le modèle de bâtiment [Bouyer, 2009]	38
2.6	Discrétisation extérieure de l'enveloppe du bâtiment [Bouyer, 2009]	39
2.7	Schématisation de la modélisation thermique complète d'un bâtiment dans l'outil de simulation [Bouyer, 2009]	41
2.8	Simulation de la vitesse du vent : coupe verticale dans une veine numérique	44
2.9	Analogie électrique du cheminement de l'eau dans la plante [Guyot, 1999]	47
2.10	Simulation thermo-hygro-aéraulique pour un arbre isolé	48

LISTE DES FIGURES

2.11	Principe de la simulation couplée	50
2.12	Schéma de la structure de l'outil de couplage	52
2.13	Schéma de principe de la gestion des types de surface dans l'outil de couplage	55
2.14	Principe du traitement géométrique	57
3.1	Conditions météorologiques mesurées sur le toit de l'immeuble Dunant du 23 au 27 mai 2010	68
3.2	Schématisation du modèle de sol [Bouyer, 2009]	69
3.3	Paramétrage du sol pour l'analyse de sensibilité	71
3.4	Moyenne des écarts quadratiques entre les températures mesurées et simulées : (a) sonde 2 – (b) sonde 4	72
3.5	Températures de surface mesurées et simulées après paramétri- sation	73
3.6	Comparaison entre les températures du sol mesurées et simulées du 28/4/210 au 3/6/2010	74
3.7	Températures mesurées sur la surface du toit Dunant	75
3.8	Maquette d'étude de la température du toit : températures de surface le 12/05/2010 à 13h00 (température extérieure de 10,4 [°C])	76
3.9	Températures simulées sur le toit Dunant après paramétrisation	77
3.10	Bilan de flux sur la surface extérieure du toit Dunant	78
3.11	Températures de surface du toit simulées pour différentes cor- rélations entre le coefficient d'échange convectif et la vitesse du vent	79
3.12	Températures de la surface extérieure du toit simulées en fonc- tion de l'isolation thermique du toit	80
3.13	Mesure de la température de surface en façade : (a) façade étudiée – (b) mesure au thermoradiomètre ©IRSTV	81
3.14	Évolution des températures de surface simulées et mesurées en façade	82
4.1	Exemples de revêtements de lierre grim pant	88
4.2	Protection solaire végétale	89
4.3	Exemples de mur végétaux	90
4.4	Localisation géographique des études effectuées sur les façades végétales	94
4.5	Diminution de la température maximale de la surface ex- térieure due à la couverture végétale, en fonction de la tem- pérature de surface sans végétation	95
4.6	Transmissivité solaire des couvertures végétales	96
4.7	Transmissivité solaire d'une couverture végétale en fonction de la densité foliaire	97

4.8	Diminution de la température intérieure maximale due à la couverture végétale, en fonction de la température intérieure sans végétation	99
4.9	Diminution relative de la consommation énergétique pour la climatisation, due à la couverture végétale	101
4.10	Flux convectif échangé avec l'air intérieur	102
4.11	Bilan de flux sur la végétation et sur la surface extérieure du mur	103
4.12	Modèle de rue canyon par la méthode des différences finies [Alexandri et Jones, 2008]	103
4.13	Diminution de la température au sein de la rue canyon : (a) cas avec façades végétales – (b) cas avec façades végétales et toitures végétales [Alexandri et Jones, 2008]	105
4.14	Scénarios de végétalisation [Wong et al., 2009]	106
4.15	Champs de température minimale déterminée par STEVE pour les scénarios : (a) 1A – (b) 1B – (c) 2A – (d) 2E (source : [Wong et al., 2009])	107
4.16	Flux thermiques dans une canopée végétale [Sailor, 2008] . . .	110
4.17	(a) Modèle de canopée végétale – (b) Modèle de toiture végétale [Alexandri et Jones, 2007]	111
4.18	Modèle de façade végétale [Zaiyi et Niu, 1998]	113
4.19	Modèle de façade végétale	117
4.20	Prototype de façade végétale en céramique - ©Hépia	126
4.21	Les trois échantillons de murs vivants (source : Hépia)	127
4.22	Photographie panoramique du dispositif expérimental sur le toit de l'Hépia, de gauche à droite : bardage acoustique, brique modifiée, céramique, mur témoin	128
4.23	Données météorologiques du 14 mai au 21 mai 2010	129
4.24	Températures du feuillage et du substrat mesurées sur les 4 échantillons [$^{\circ}C$]	130
4.25	Quantité d'eau drainée par les trois façades végétales	131
4.26	Irrigation et évapotranspiration journalière moyennes mesurées du 14 au 21 mai 2010	133
4.27	Flux latent mesuré au pas de temps horaire - échantillon 2 . . .	134
4.28	Comparaison des méthodes de calcul de l'évapotranspiration pour l'échantillon 2	134
4.29	Coefficient d'évapotranspiration (f) en fonction du stock d'eau	136
4.30	Adaptation du modèle de paroi, modèle de paroi végétale dans : (a) <code>simulation_Ts</code> — (b) <code>simulation_ts_hepia</code> . . .	138
4.31	Variation temporelle des températures de substrat (T_{sub}) et de feuillage (T_{veg}) mesurées et simulées après optimisation des paramètres	140

LISTE DES FIGURES

4.32	Comparaison entre les températures de substrat (T_{sub}) et de feuillage (T_{veg}) mesurées et simulées durant le mois de mai 2010	141
4.33	Comparaison entre les flux latents simulés et mesurés	142
4.34	Évolutions des flux thermiques simulés pour les trois échantillons, le 19 mai 2010 : (a) à la surface du substrat — (b) dans la couverture végétale	144
5.1	Maquette numérique du fragment simulé du Pin sec (le bâtiment d'étude est le seul dont le vitrage est représenté)	156
5.2	Consommation de chauffage surfacique moyenne et par étage, par rapport au cas de référence : (a) impact des flux convectifs – (b) impact des flux radiatifs	159
5.3	Différence de température de surface extérieure entre le cas de référence et : (a) le cas <i>no GLO</i> – (b) le cas <i>v(profil)</i> , façade sud160	
5.4	Comparaison entre les flux atmosphériques mesurés et estimés à partir de la température de l'air	161
5.5	Températures de surface simulées, le 25/01/2010 à 12h00 ($T_{ext} = 4^{\circ}C$)	162
5.6	Flux thermiques infrarouges nets pour le cas de référence (<i>ref</i>) et le cas sans échange avec la scène (<i>no GLO</i>)	163
5.7	Comparaison des différentes méthodes de calcul de la vitesse de l'air autour du bâtiment	165
5.8	Vitesse moyenne sur la surface extérieure du bâtiment d'étude pour les 240 cas simulés : (a) vitesse absolue – (b) vitesse normalisée par rapport à la vitesse incidente	166
5.9	Niveaux de représentation des paramètres climatiques extérieurs	167
5.10	Conditions météorologiques du 23 au 30 janvier 2010	169
5.11	Conditions météorologiques du 23 au 30 août 2010	170
5.12	Consommations énergétiques surfaciques pour les deux dernières semaines de janvier	172
5.13	Puissance thermique pour les quatorze cas simulés en hiver	172
5.14	Température intérieure moyenne pendant la dernière semaine d'août	173
5.15	Évolution de la température intérieure pour les cas <i>v(cfd)</i>	173
5.16	Écart entre les températures extérieures utilisées dans le bilan thermique du bâtiment (T_{ext}) et la température météorologique (T_{meteo})	174
5.17	Comparaison avec les cas non-couplés : écart entre les puissances obtenues avec et sans prise en compte d'une température de bilan	175

5.18	Effet de la prise en compte d'une température de bilan : (a) écart relatif entre les consommations énergétiques obtenues avec et sans couplage (cas hiver) — (b) écart entre les températures intérieures moyennes avec ou sans couplage (cas été)	176
5.19	Impact du couplage : (a) écart relatif entre les consommations énergétiques obtenues avec et sans couplage (cas hiver) — (b) écart entre les températures intérieures moyennes avec et sans couplage (cas été)	177
6.1	Orthophotographies du Pin Sec en 1956, 1968 et 2009 (sources : ©IGN/Géoportail)	180
6.2	Situation géographique du quartier Pin Sec (images ©CNES/SPOT cartographie ©Google	181
6.3	Orthophotographie du quartier Pin Sec (images Géoportail ©IGN)	182
6.4	Logements individuels groupés dans le quartier Bottière/Chénaie	183
6.5	Circuit vert du Pin Sec (source : SEVE)	183
6.6	Bâtiment Dunant : (a) façade sud – (b) façade nord	183
6.7	Plan directeur du GPV Malakoff Centre (date : 07/2012, source : Nantes Métropole Aménagement)	185
6.8	Plans masses du quartier Pin Sec : (a) situation actuelle – (b) scénario de densification	186
6.9	Limites des catégories de confort en fonction de la température extérieure en moyenne glissante journalière	190
6.10	Conditions météorologiques mesurées sur le toit de l'immeuble Dunant du 25 mai au 2 juillet 2010	192
6.11	Évolutions de la température mesurée, de la température moyenne journalière et de la température moyenne journalière en moyenne glissante	193
6.12	Quartier Pin Sec densifié : repérage des classes de surface	194
6.13	Scène urbaine simulée pour les deux cas de végétalisation extrêmes : (a) sans surface végétalisée – (b) entièrement végétalisée	194
6.14	Évolution de la température de l'air intérieur en moyenne sur les cinq étages dans les cas isolés et non isolés	196
6.15	Évolution de la température intérieure du deuxième étage (en bleu) et écart par rapport au cas sans végétation (en rouge) - les cas "bâtiment végétalisé" et "bâtiment végétalisé et façades végétales sur la scène" sont confondus	197
6.16	Répartition en catégories de confort pour le deuxième étage	198
6.17	Moyenne surfacique de la consommation d'eau journalière des différents types de surface	199

LISTE DES FIGURES

6.18	Évolution de la température de surface intérieure des murs et des vitrages, de la température de l'air (T_{air}) et de la température radiante moyenne (T_{mr}) à l'intérieur du deuxième étage, le 26 juin 2010	202
6.19	Densité de flux à la surface extérieure de la façade sud du deuxième étage, au cours de la journée du 26 juin 2010	203
6.20	Flux thermiques moyens sur la surface extérieure du deuxième étage au cours de la journée du 26 juin 2010	204
6.21	Évolution de la température intérieure pour le deuxième étage en fonction de la végétalisation de la scène urbaine	206
6.22	(a) Répartition des catégories de confort thermique pour le deuxième étage – (b) Diminution relative des catégories de confort chaudes par rapport au cas sans végétation	207
6.23	Évolution des flux convectifs et radiatifs GLO à la surface extérieure du deuxième étage, en fonction de la végétalisation de la scène urbaine	208
6.24	Bilan journalier des flux convectifs et radiatifs GLO à la surface extérieure du deuxième étage	209

Liste des tableaux

2.1	Classes de surface	54
3.1	Caractéristiques de la couche de sol superficielle	71
3.2	Meilleures combinaisons des paramètres pour les sondes 2 et 4	73
4.1	Bilan des effets climatiques liés aux différents types de façade végétale	93
4.2	Villes et climats étudiés par Alexandri et Jones [2008]	104
4.3	Résultats des simulations d'îlot de chaleur urbain, en [$^{\circ}C$] [Wong et al., 2009]	106
4.4	Récapitulation des paramètres du modèle et des grandeurs thermiques dans lesquelles ils entrent en jeu	121
4.5	Paramètres avant et après optimisation pour les échantillons de façade végétale	139
5.1	Description des cas simulés	157
5.2	Consommation de chauffage annuelle surfacique (en [kWh/m^2])	158
5.3	Modes de couplage traités : un croisement des niveaux de représentation de la vitesse et de la température de l'air	168
6.1	Liste des cas traités	193
6.2	Quantité d'eau évaporée par les différents types de surface rapportée à leur emprise au sol et aux précipitations	201

Nomenclature

Lettres latines

<i>symbole</i>	<i>définition</i>	<i>unité</i>
A_T	Demi-amplitude annuelle de l'onde thermique climatique en surface	[K]
C	Capacité thermique	[J/K]
c_p	Capacité thermique massique	[J/K/kg]
$C_{4\varepsilon}$	Constante empirique de fermeture de la turbulence du modèle $k - \varepsilon$ spécifique à la végétation	–
C_a	Capacité thermique de l'air au sein de la canopée	[J/K]
C_d	Coefficient de traînée pour les arbres	–
C_e	Capacité thermique extérieure	[J/K]
C_f	Capacité thermique du feuillage	[J/K]
C_i	Capacité thermique intérieure	[J/K]
C_μ	Constante empirique du modèle de turbulence $k - \varepsilon$	–
C_s	Capacité thermique du sol	[J/K]
d	Hauteur de déplacement	[m]
Dr	Volume d'eau drainée	[l]
e	Épaisseur	[m]
e_a	Pression partielle de vapeur d'eau dans l'air	[Pa]
e_{sat}	Pression de vapeur saturante	[Pa]
E_{th}	Évapotranspiration horaire	[l]
E_{tj}	Évapotranspiration journalière	[l]
ETP_c	Évapotranspiration climatique potentielle	[kg/m ² /s]
E_v	Taux d'évapotranspiration volumique	[kg/m ³ /s]
F	Nombre de facettes extérieures pour le bâtiment d'étude	–
f	Taux d'évapotranspiration	–
$F_{i \rightarrow j}$	Facteur de forme de la surface i vers la surface j	–
F_{sky}	Facteur de vue du ciel	–
H	Flux thermique transmis à l'air par convection	[W/m ²]
h	Hauteur solaire	[°]

NOMENCLATURE

$h_{a\infty}$	Coefficient d'échange par advection entre l'air au sein de la canopée végétale et l'environnement	$[W/m^2K]$
h_c	Coefficient d'échange par convection à la surface extérieure du mur	$[W/m^2K]$
h_{fa}	Coefficient d'échange convectif entre l'air au sein de la canopée végétale et le feuillage	$[W/m^2K]$
h_{int}	Coefficient d'échange convectif à la surface intérieure du mur	$[W/m^2K]$
h_r	Coefficient d'échange radiatif entre le feuillage et la surface extérieure du substrat	$[W/m^2K]$
Ir	Volume d'eau d'irrigation	$[l]$
K_{\downarrow}	Flux de rayonnement courte longueur d'onde montant	$[W/m^2]$
k_e	Énergie cinétique turbulente en entrée de veine	–
k_s	Coefficient d'extinction	–
K_{\uparrow}	Flux de rayonnement courte longueur d'onde descendant	$[W/m^2]$
L_v	Chaleur latente de vaporisation de l'eau	$[J/kg]$
L	Épaisseur du couvert	$[m]$
LAD	Densité volumique de feuillage	–
LAI	Densité foliaire	–
λ	Conductivité thermique	$[W/m^2/K]$
L_c	Longueur caractéristique	$[m]$
L_{\downarrow}	Flux de rayonnement grande longueur d'onde montant	$[W/m^2]$
L_{\uparrow}	Flux de rayonnement grande longueur d'onde descendant	$[W/m^2]$
N	Nombre d'étage du bâtiment d'étude	–
Nu	Nombre de Nusselt	–
Pr	Nombre de Prandlt	–
Pr	Précipitations	$[l]$
Q^*	Bilan radiatif net	$[W/m^2]$
Q_e	Flux turbulent latent	$[W/m^2]$
Q_f	Flux antropique	$[W/m^2]$
Q_h	Flux turbulent sensible	$[W/m^2]$
q_{sat}	Humidité spécifique à saturation	$[kg/kg]$
q_{zref}	Humidité spécifique à la hauteur de référence	$[kg/kg]$
R	Taux de renouvellement de l'air au sein de la canopée végétale	$[s^{-1}]$
r_{aero}	Résistance hydrique du couvert végétal	$[s/m]$
r_a	Résistance hydrique du couvert végétal	$[s/m]$
Re	Nombre de Reynolds	–
r_f	Résistance hydrique d'une feuille isolée	$[s/m]$
R_j	Résistance thermique de la couche i	$[m^2K/W]$

NOMENCLATURE

R_{net}	Rayonnement net	$[W/m^2]$
r_{sto}	Résistance hydrique des stomates	$[s/m]$
r_s	Résistance hydrique des stomates	$[s/m]$
S_h	Terme source pour la température	$[K/m^3]$
S_i	Aire de la surface i	$[m^2]$
S_k	Terme source dans la première équation de fermeture de la turbulence	–
S_ε	Terme source dans la deuxième équation de fermeture de la turbulence	–
S_{v_i}	Terme source dans l'équation de quantité de mouvement	–
T_a	Température de l'air au sein de la canopée végétale	$[K]$
T_{ext}	Température d'air extérieure	$[K]$
T_f	Température du feuillage	$[K]$
T_∞	Température de sol profond	$[K]$
T_m	Température moyenne annuelle de l'air	$[K]$
$T_{se,i}$	Température de surface extérieure de la surface i	$[K]$
T_{si}	Température de surface intérieure	$[K]$
V	Nombre de facettes végétalisées pour le bâtiment d'étude	–
v_e	Vitesse du vent en entrée de la veine numérique	$[m/s]$
V_{max}	Volume d'eau maximum contenu dans le substrat	$[l]$
v_{ref}	Vitesse du vent à la hauteur de référence	$[m/s]$
V_t	Volume d'eau contenue dans le substrat au pas de temps t	$[l]$
z_d	Profondeur d'amortissement	$[m]$
z_{ref}	Hauteur de référence de la mesure météorologique	$[m/s]$

Lettres grecques

symbole	définition	unité
α_{lat}	Facteur de répartition du flux latent	–
α_R	Coefficient de pondération de la vitesse du vent pour le calcul du taux de renouvellement d'air	–
α_s	Diffusivité thermique du sol	$[m^2/j]$
β_d	Coefficient empirique de conversion d'énergie cinétique turbulente moyenne en énergie cinétique turbulente par deflection	–
β_p	Coefficient empirique de conversion d'énergie cinétique turbulente moyenne en énergie cinétique turbulente par effet de sillage	–
Δ	Pente de la courbe de pression de vapeur saturante	$[Pa/K]$
Δm	Variation de la masse de l'échantillon	$[kg]$

NOMENCLATURE

ΔQ_s	Flux stocké par la surface	$[W/m^2]$
γ	Constante psychrométrique	$[Pa/K]$
κ	Constante de Von Karman	–
ω	Pulsation	–
ρ	Masse volumique	$[kg/m^3]$
ρ_f	Reflectivité solaire du feuillage	–
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$[W/m^2/K^4]$
τ	Transmittivité solaire	–
τ_f	Transmittivité solaire du feuillage	–
ε_e	Taux de dissipation d'énergie turbulence en entrée de veine	–
ε_i	Émissivité de la surface i	–
$\varphi_{clo,f}$	Flux de rayonnement solaire absorbé par les feuilles	$[W/m^2]$
$\varphi_{clo,se}$	Flux de rayonnement solaire absorbé par la surface extérieure du substrat	$[W/m^2]$
$\varphi_{cond,se-n1}$	Flux transmis à travers la paroi par conduction	$[W/m^2]$
$\varphi_{conv,a-\infty}$	Flux convectif échangé entre l'air au sein de la canopée et l'environnement extérieur	$[W/m^2]$
$\varphi_{conv,a-se}$	Flux convectif échangé entre l'air au sein de la canopée et la surface extérieure du substrat	$[W/m^2]$
$\varphi_{conv,fa}$	Flux convectif échangé entre l'air au sein de la canopée et le feuillage	$[W/m^2]$
$\varphi_{GLO,emis,i}$	Flux infrarouge émis par la surface i	$[W/m^2]$
$\varphi_{glo,\infty}$	Flux de rayonnement GLO échangé entre les feuilles et l'environnement	$[W/m^2]$
$\varphi_{GLO,net,i}$	Flux infrarouge net échangé par la surface i avec l'environnement	$[W/m^2]$
$\varphi_{glo,se}$	Flux de rayonnement GLO entre le feuillage et la surface extérieure du substrat	$[W/m^2]$
$\varphi_{lat,f}$	Flux d'évapotranspiration pour les feuilles	$[W/m^2]$
$\varphi_{lat,se}$	Flux d'évaporation à la surface extérieure du substrat	$[W/m^2]$

Acronymes

ANR	Agence National de la Recherche
AURAN	Agence d'Urbanisme de l'Agglomération Nantaise
ASHRAE	American Society for Heating, Refrigerating, Air-conditioning Engineers
CERMA	CENtre de Recherche Méthodologique d'Architecture
CFD	Computational Fluide Dynamics
CHTC	Convection Heat Transfer Coefficient
CLO	Courte Longueur d'Onde
CNRM	Centre National de la Recherche Météorologique

NOMENCLATURE

CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
DNS	Direct Numerical Simulation
EPHYSE	Écologie fonctionnelle et PHYsique de l'Environnement
ESO	Espace et SOciété
GAME	Groupe d'Étude de l'Atmosphère Météorologique
GLO	Grande Longueur d'Onde
Hépia	Haute École du Paysage, d'Ingénierie et d'Architecture
ICU	Îlot de Chaleur Urbain
IFSTTAR	Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux
IGN	Institut National Géographique
INRA	Institut National de Recherche Agronomique
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire
IRSTV	Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville
LAD	Leaf Area Density
LAI	Leaf Area Index
LaSIE	Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement
LEEA	Laboratoire Énergie, Environnement et Architecture
LES	Large Eddy Simulation
LHEEA	Laboratoire de Recherche en Hydrodynamique, Énergétique et Environnement Atmosphérique
LIENSs	Littoral, ENvironnement et Sociétés
LPGNantes	Laboratoire de Planétologie et Géodynamique de Nantes
ONERA	Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales
ONEVU	Observatoire Nantais des EnVironnements Urbains
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes Simulation
SEVE	Service des Espaces Verts et de l'Environnement de la ville de Nantes
SHON	Surface Hors Œuvre Net
SIG	Système d'Information Géographique

Introduction

En 2007, un seuil symbolique a été franchi à l'échelle planétaire : plus de 50% de la population mondiale résiderait désormais en ville, alors que ce taux était déjà de 80% dans beaucoup de pays développés. Apparues à leurs origines ancestrales comme une forme de protection par rapport à un environnement hostile, les villes se développent depuis en fonction de critères économiques et sociologiques bien plus qu'environnementaux. Jusqu'à présent, la technologie et l'utilisation massive de systèmes énergétiques actifs dans les bâtiments a été la principale réponse en terme d'adaptation climatique, permettant aux acteurs de la planification urbaine de se soustraire à un travail au niveau de l'aménagement.

Depuis la prise de conscience de la nécessité d'une transition énergétique afin de faire face à l'épuisement des ressources fossiles, ainsi que celle de l'impact humain sur le climat à l'échelle globale, la donne a changé.

Il apparaît désormais nécessaire à la fois de limiter l'impact environnemental de la ville et de l'adapter au changement climatique auquel elle a elle-même contribué. En effet, les implications du développement et de l'étalement des villes sont multiples : consommation de terres naturelles et arables pour implanter des bâtiments et des infrastructures, pollution atmosphérique et consommation d'énergie pour des déplacements de plus en plus nombreux, augmentation du coût de certains services publics de proximité...

D'un autre côté, la densification des centres urbains n'est pas non plus sans risque. Les fortes densités sont notamment impliquées dans l'apparition du phénomène d'îlot de chaleur urbain, lui-même mis en cause dans l'augmentation de la consommation énergétique pour la climatisation, mais également pour ses impacts sanitaires qui se sont manifestés de manière dramatique en Europe lors de la canicule de 2003. Les politiques de développement des villes se trouvent donc confrontées à la question suivante : Comment limiter l'étalement urbain tout en rendant efficace en termes environnementaux et socialement acceptable la nécessaire densification du tissu urbain existant ?

La végétation joue un rôle majeur dans les processus évoqués précédemment. La place restreinte qu'elle occupe en ville est un des facteurs mis en évidence dans l'aggravation de l'effet d'îlot de chaleur. En effet, les surfaces minérales comme le béton et l'asphalte absorbent et stockent une partie

importante de l'énergie solaire reçue au cours de la journée, alors que les surfaces végétales sont à même d'en évacuer une partie grâce au phénomène d'évapotranspiration. L'augmentation de la quantité de végétation dans la ville serait donc en mesure d'atténuer son réchauffement. Elle présenterait en outre une influence sur la densité perçue, jouant le rôle de "dédensificateur". On se heurte néanmoins au même paradoxe : Comment lui accorder une place suffisante alors que l'on cherche à optimiser l'espace occupé par les bâtiments ?

La végétalisation de l'enveloppe des bâtiments est une solution envisagée. L'utilisation de toitures jardins a déjà été étudiée et mise en œuvre par certaines agglomérations. Celle des façades est de plus en plus mise en avant, notamment depuis l'apparition de nouvelles solutions techniques comme les murs vivants. Outre ses avantages climatiques et sa plus-value esthétique, d'autres intérêts pour l'environnement urbain sont mis en avant parmi lesquels le rôle de protection solaire et d'isolation pour les bâtiments, qui nous intéresse plus particulièrement, mais aussi la gestion des eaux pluviales, l'absorption acoustique et l'augmentation de la biodiversité.

On manque néanmoins d'outils pour évaluer l'intérêt des façades végétales sur le microclimat et sur le comportement thermique des bâtiments.

Dans cette thèse, on cherchera à estimer à la fois les impacts directs et indirects des façades végétales sur le comportement thermique des bâtiments, l'effet direct étant lié à la modification du bilan thermique à la surface extérieure du mur, tandis que l'effet indirect est dû à la modification des paramètres climatiques locaux, comme la température ou l'humidité de l'air.

La simulation numérique paraît être un moyen d'investigation approprié pour atteindre ces objectifs. En effet, il est nécessaire de disposer d'un outil qui représente à la fois le comportement thermique des bâtiments en interaction avec le microclimat et les effets des enveloppes végétales sur l'un et l'autre. Les progrès continus en terme de puissance de calcul, de qualité et de modularité des modèles informatiques permettent d'envisager la prise en compte de phénomènes et d'interactions de plus en plus complexes.

La première partie de cette thèse place notre étude dans son contexte scientifique en constituant un état de l'art de la modélisation des microclimats urbains.

Le chapitre 1 passe en revue différents outils de simulation en mettant l'accent sur la représentation des phénomènes au sein des éléments qui nous intéressent : la végétation, le microclimat et le comportement thermique des bâtiments. Cet état de l'art atteste de l'absence d'un modèle qui nous permettrait en l'état de mener à bien nos objectifs. Il justifie ainsi le développement d'un nouveau modèle de surface pour les enveloppes végétales dans le logiciel de simulation microclimatique développé au CERMA :

solene-microclimat.

Celui-ci est basé sur un couplage entre **solene**, un modèle thermo-radiatif auquel a été intégré un modèle thermique de bâtiment, et **Code_saturne** un logiciel de mécanique des fluides numérique. Ces différentes entités ainsi que la mise en œuvre du couplage sont présentées dans le chapitre 2.

La deuxième partie met en avant les contributions de cette thèse aux modèles thermiques de surface utilisés par **solene-microclimat**.

Le chapitre 3 présente une validation des modèles de sols, de façades et de toits à partir de résultats expérimentaux obtenus à l'ONEVU dans le cadre du projet ANR VegDUD.

Le chapitre 4 porte sur la modélisation des enveloppes végétales et plus particulièrement des façades végétales. À partir d'une typologie des dispositifs existants et d'une étude de la littérature scientifique les concernant, un modèle de façade végétale permettant de représenter la présence d'un substrat humide a été développé, puis validé à partir de mesures thermiques et hydriques réalisées sur des échantillons.

La troisième partie est constituée d'une application du modèle couplé au quartier du Pin Sec.

Dans le chapitre 5, différents modes de couplage entre le modèle thermo-radiatif et le modèle aéraulique sont comparés afin d'étudier la sensibilité du modèle de bâtiment aux niveaux de détail de la représentation des conditions climatiques extérieures.

Le cas d'application final est présenté dans le chapitre 6. Des scénarios de densification et de végétalisation ont été simulés sur le quartier du Pin Sec afin de montrer la capacité des façades végétales à limiter la dégradation du confort d'été à l'intérieur des bâtiments.

Première partie

Contexte

Chapitre 1

Modélisation et simulation des systèmes microclimatiques urbains

Sommaire

1.1	Densification et microclimat urbain	8
1.2	La végétation pour atténuer l'îlot de chaleur . .	13
1.3	Outils de simulation	17
1.4	Conclusion	28

Que ce soit pour l'étude de la pollution atmosphérique, de l'hydrologie urbaine, de la prévision micro-météorologique ou microclimatique ou pour des questions énergétiques, la modélisation et la simulation des microclimats urbains est un enjeu qui concerne des champs de recherche variés et dans lequel de nombreux acteurs scientifiques sont impliqués. Cela a abouti à la cohabitation d'un grand nombre de modèles dont chacun a ses caractéristiques et domaines d'application propres, bien qu'ils s'appuient tous à la base sur la représentation de phénomènes physiques communs, avec des variations dans le détail de leur description suivant les objectifs poursuivis.

À mesure que s'affinent ces modèles, la représentation de l'hétérogénéité de la ville, et notamment dans un contexte péri-urbain, celle de la végétation, apparaît comme une problématique transversale de plus en plus critique. Ainsi, les approches développées par les spécialistes des milieux naturels ou agricoles et celles développées pour le milieu urbain, qui étaient autrefois très différentes, sont confrontées les unes aux autres et cohabitent parfois dans des modèles de villes qui permettent de prendre en compte la végétation.

Dans un contexte scientifique en évolution voire en rupture, il convient

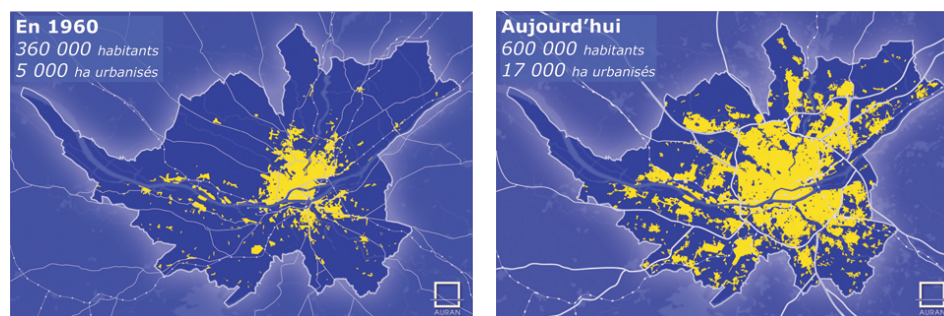


FIGURE 1.1 – Étalement urbain à Nantes de 1960 à 2010 (source : ©AURAN)

de bien situer notre approche et notre questionnement par rapport à la recherche urbaine et aux autres modèles. Après avoir présenté la problématique, nous présenterons différents modèles microclimatiques existants suivant qu'ils sont issus de modèles atmosphériques, de modèles radiatifs, de modèles paramétriques ou de modèles la thermique du bâtiment.

1.1 Densification et microclimat urbain

1.1.1 Densifier la ville pour limiter son étalement

La maîtrise de l'étalement urbain est actuellement un enjeu majeur de la politique d'aménagement du territoire. À titre d'exemple, la Figure 1.1 montre l'évolution de l'emprise urbaine de l'agglomération nantaise entre 1960 et 2010. La surface occupée par la ville a plus que triplé alors que la population n'a pas doublé. Cette tendance s'explique par de nombreux facteurs économiques et sociaux parmi lesquels sont souvent cités le développement des transports individuels dans les années soixante, la gentrification des centres-villes et l'idéal social de la maison individuelle. À l'échelle de la France, cela se traduit par une diminution significative de la surface de la terre agricole, une augmentation de l'imperméabilisation des sols, ainsi qu'une augmentation tout aussi significative de la consommation énergétique et des rejets de polluants liés au transport.

La mesure de cet enjeu a été prise et il a été affiché comme un des objectifs de la loi "Solidarité et Renouvellement Urbain" du 13 septembre 2000 puis développé pendant le Grenelle de l'environnement. L'article 7 de la loi "Grenelle I" du 9 août 2009 précise ainsi :

II. – Le droit de l'urbanisme devra prendre en compte les objectifs suivants, dans un délai d'un an suivant la publication de la présente loi :

a) Lutter contre la régression des surfaces agricoles et naturelles, les collectivités territoriales fixant des objectifs chiffrés en la matière après que des indicateurs de consommation d'espace auront été définis. Dans les six mois suivant la publication de la présente loi, une étude sur la réforme de la fiscalité et sur les incitations possibles pour limiter l'extension du foncier artificialisé sera effectuée ;

b) Lutter contre l'étalement urbain et la déperdition d'énergie, ainsi que permettre la revitalisation des centres-villes, les collectivités territoriales disposant désormais, ou étant dotées dans l'année qui suit l'adoption de la présente loi, d'outils leur permettant en particulier de conditionner la création de nouveaux quartiers, d'opérations d'aménagement à dominante d'habitat ou de bureaux à la création ou au renforcement correspondant des infrastructures de transport, ainsi que de prescrire, dans certaines zones, des seuils minimaux de densité ou des performances énergétiques supérieures à la réglementation ;

Compte tenu de la croissance démographique et de l'attractivité des villes, mener à bien ces objectifs passe nécessairement par la densification du tissu urbain existant. Cette augmentation de la densité bâtie et de la densité d'habitants ne va pas sans risques d'impacts négatifs sur la qualité de vie, liés notamment, au delà des aspects purement sociaux, à une dégradation du climat urbain.

1.1.2 L'îlot de chaleur urbain

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) est défini comme l'apparition d'une différence de température entre un centre urbain et son envi-

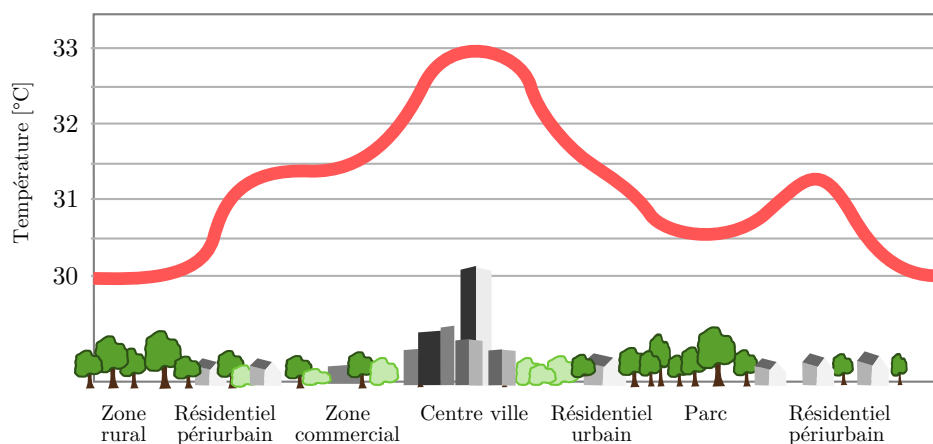


FIGURE 1.2 – Profil d'un îlot de chaleur urbain (source : wikimedia)

ronnement rural (Figure 1.2). Il peut se mesurer ou s'estimer à partir de différentes données comme des mesures de températures d'air ou issues de la télédétection infrarouge.

Les conditions climatiques souvent singulières des villes et leur grande hétérogénéité rendent pourtant difficile la caractérisation de l'ICU. De nombreuses corrélations entre son intensité et des caractéristiques de la ville ont été avancées. Les paramètres utilisés sont : la densité de population ou la population totale d'une agglomération, les caractéristiques morphologiques telles qu'un rapport de forme des rues, les consommations énergétiques totales. Les phénomènes physiques en cause sont effectivement multiples. Citons ceux invoqués par Oke [1987] :

- le piégeage radiatif du rayonnement solaire dû à la morphologie et aux phénomènes d'inter-réflexions,
- la diminution du refroidissement par le rayonnement infrarouge vers l'atmosphère, à cause de la diminution du facteur de vue du ciel,
- les sources de chaleur anthropiques liées à la consommation énergétique pour le chauffage, la climatisation, le transport,
- la diminution de l'évapotranspiration due à l'absence de végétation,
- l'effet de serre accru par la présence de pollution atmosphérique,
- la réduction de la vitesse du vent à cause d'une forte rugosité.

On peut finalement classer les divers facteurs entrant en compte dans ces phénomènes dans trois catégories :

- les paramètres morphologiques,
- les caractéristiques thermiques des surfaces,
- les apports anthropiques.

Cette classification permet d'avancer sur les leviers utilisables pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique et à l'ICU. Il paraît en effet plus facile d'actionner celui des caractéristiques thermiques des surfaces notamment dans l'existant. La diminution des apports anthropiques, c'est-à-dire de la consommation énergétique pour l'habitation et pour le transport, est quant à elle plutôt consensuelle.

Il est plus compliqué d'agir sur les paramètres morphologiques de la ville. En effet, la solution consisterait essentiellement à réduire la densité urbaine, ce qui serait en contradiction avec l'objectif de maîtrise de l'étalement urbain.

1.1.3 Limiter l'étalement et maîtriser l'îlot de chaleur : deux objectifs contradictoires

L'intensité de l'îlot de chaleur urbain est directement liée à la densité urbaine. Ainsi, Oke [1987] propose une relation simple entre un rapport

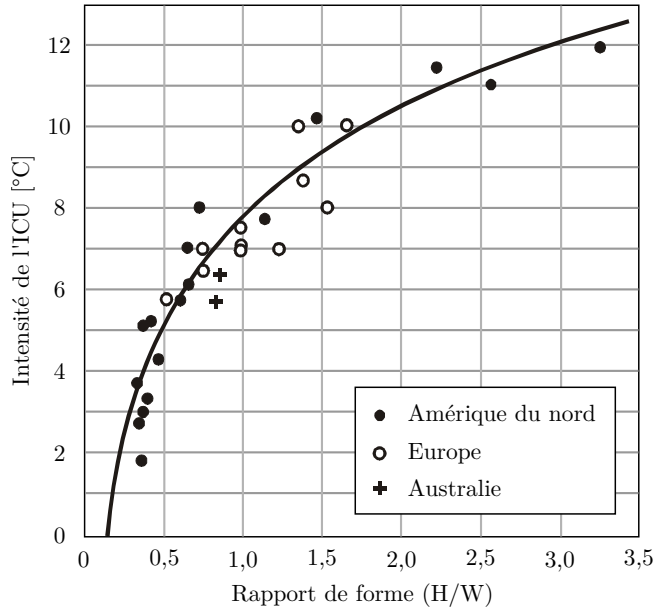


FIGURE 1.3 – Intensité de l'ICU observée pour des villes américaines, européennes et australiennes en fonction du rapport de forme moyen des rues [Oke, 1987]

d'aspect d'une rue canyon moyenne (ratio de la hauteur des bâtiments sur la largeur de la rue : $\frac{H}{W}$) et l'intensité de l'îlot de chaleur, dont il montre qu'elle se vérifie assez bien sur un échantillon de villes américaines et européennes (Figure 1.3) :

$$\Delta T_{max} = 7,54 - 3,97 \ln \left(\frac{H}{W} \right) \quad (1.1)$$

En cherchant à limiter la contribution de la ville à l'effet de serre planétaire par la limitation de l'étalement urbain, on risque donc de provoquer son réchauffement local et éventuellement sa consommation énergétique. Ainsi, cette nécessaire densification des villes doit être pensée de manière à limiter les effets microclimatiques qui mettraient à mal non seulement les engagements relatifs au facteur 4, mais aussi ceux relatifs au bien être des citoyens.

Avant de prendre des décisions qui peuvent donc se montrer contre-productives, il faut évaluer leurs effets potentiels en prenant en compte ces interactions complexes. Dans ce contexte, les modèles à différentes échelles ont un rôle important à jouer afin de déterminer les impacts respectifs des différents phénomènes en jeu et de quantifier les performances que l'on peut en attendre. Une des interactions encore rarement prise en compte dans ces modèles concerne l'effet du microclimat urbain sur la consommation énergé-

tique des bâtiments.

1.1.4 Consommation énergétique et microclimat urbain

Le microclimat urbain a un impact significatif sur la consommation énergétique des bâtiments. Il est pourtant rarement pris en compte dans les logiciels de calcul de charges thermiques. Par exemple, ce sont souvent les conditions météorologiques mesurées sur des stations en général situées dans des zones aéroportuaires, où l'effet urbain n'est pas présent, qui sont considérées. Les masques solaires sont plus fréquemment pris en compte, mais cela reste le seul effet radiatif qui l'est. Le calcul des échanges convectifs est également simplifié, dépendant de la vitesse du vent tout au plus, prise en valeur moyenne, mais rarement calculée en fonction de la rugosité urbaine. Bouyer [2009] présente de manière assez détaillée les paramètres climatiques locaux qui ont une influence sur la consommation énergétique des bâtiments. Il cite naturellement la température de l'air, les effets de masque solaire mais également infrarouge, la diminution du vent qui atténue les flux convectifs en surface extérieure des bâtiments mais limite aussi les possibilités de ventilation naturelle, et enfin l'humidité de l'air, bien que celle-ci soit encore plus rarement prise en compte.

S'il a été montré que l'îlot de chaleur urbain pouvait conduire à une diminution de la consommation énergétique pour le chauffage en hiver, c'est son impact sur l'augmentation des charges de climatisation qui est préoccupant. Santamouris et al. [2001] montrent que l'augmentation des consommations énergétiques en Grèce et aux États-Unis peut être directement liée à celle de l'effet d'îlot de chaleur urbain.

Ce phénomène est d'autant plus préjudiciable que l'effet est cumulatif : l'augmentation de l'effet d'îlot de chaleur implique celle de l'utilisation des systèmes de rafraîchissement et la chaleur rejetée par ces systèmes aggrave encore l'effet d'îlot de chaleur. Un autre effet indirect est la diminution du coefficient de performance des systèmes d'air conditionné qui peut être réduit de 25%.

En plus de l'augmentation de la température moyenne, la température maximale peut également être plus importante, entraînant la nécessité de sur-dimensionner les systèmes, et provoquant d'importantes surcharges des réseaux électriques durant des heures de pointe pour la climatisation [Bozonnet, 2005].

De nombreuses études mettent ainsi en évidence l'effet de la modification du microclimat urbain sur la consommation énergétique. Sur la base des paramètres cités précédemment comme impliqués dans la constitution de l'ICU, Akbari et Konopacki [2005] ainsi que beaucoup d'autres publica-

tions du *Heat Island Group* [Akbari, 1992; Rosenfeld et al., 1995; Akbari et al., 2001] cherchent à quantifier les économies d'énergie qui peuvent être réalisées avec différents scénarios d'atténuation de l'ICU. Ces stratégies portent essentiellement sur les matériaux qui sont certainement les leviers les plus faciles à activer dans des villes existantes : utilisation de couleurs claires ou de "coolpaints", utilisation de la végétation ou de l'eau, etc... Les effets sont discutés selon l'emplacement et la répartition des mesures d'atténuation (sur les façades, au sol, sur les toits) et suivant la nature de l'effet sur la consommation énergétique (directe ou indirecte).

La distinction est ainsi clairement établie entre les effets que l'on peut estimer sans prendre en compte le microclimat et ceux qui vont justement agir par l'intermédiaire d'une modification du microclimat. Les premiers sont les effets directs. Pour les peintures réfléchissantes ou la végétation, il s'agit pour l'essentiel de leur effet radiatif qui va diminuer le flux thermique transmis à l'intérieur des bâtiments.

Mais cela va conduire également à une réduction du réchauffement des surfaces et de l'énergie transmise à l'air, diminuant ainsi la température extérieure et augmentant éventuellement l'hygrométrie. Ce sont les effets indirects. Pour représenter ces derniers, il faut donc que les modèles prennent en compte la modification du microclimat due au changement des caractéristiques thermiques des surfaces ou de l'aménagement urbain.

1.2 La végétation pour atténuer l'îlot de chaleur

1.2.1 La végétation en ville

La végétalisation des villes est une solution avancée pour lutter contre leur réchauffement local et du même coup contre le réchauffement climatique mondial. Dans un récent rapport de l'Agence Européenne de l'Environnement sur l'adaptation des villes au réchauffement climatique [EEA, 2012], les seuls facteurs utilisés pour estimer la vulnérabilité des villes aux vagues de chaleur sont la densité d'habitants et la part d'espace urbain occupée par l'eau et la végétation. Les plantes ont plusieurs effets sur la consommation énergétique des bâtiments et sur le confort dans les espaces extérieurs :

- effets directs, liés essentiellement au rôle de protection solaire ;
- effets indirects, par l'intermédiaire de la modification du microclimat.

Les avantages de la régulation du climat par la végétation sont nombreux. Il s'agit d'une solution passive, a priori sans risque comparée à des solutions de haute technologie, favorisant la biodiversité et une meilleure gestion des écoulements pluviaux. À ces arguments techniques et scientifiques, nous ajouterons les plus-values esthétiques et psychologiques liées à la présence de verdure en milieu urbain. L'action par le biais de la modification du microclimat a par ailleurs l'avantage d'être équitable.

Dans un contexte de densification urbaine, de lutte contre l'étalement urbain et de pression foncière élevée, la solution végétale pose cependant un simple problème d'espace disponible pour planter. C'est pourquoi on parle de plus en plus de mobiliser l'enveloppe des bâtiments et en particulier les toitures. Des mesures réglementaires en ce sens ont déjà été prises dans des villes méditerranéennes comme Barcelone. Une autre voie qui commence seulement à être étudiée est celle de l'utilisation des murs. Des façades végétales contenant des plantes choisies pour leur valeur esthétique ont vu le jour dans des solutions techniques comme les murs végétaux. Suite à des premières réalisations, de nombreux produits ont été mis sur le marché, dont les argumentaires commerciaux commencent à valoriser des rôles techniques d'isolation sonore et thermique.

Expérimentations et projections à grande échelle des différentes solutions végétales dans des modèles permettront d'évaluer leurs performances relatives aux différents enjeux (acoustique, climatique, énergétique, etc...).

1.2.2 Le projet VegDUD

C'est dans ce contexte sociétal et environnemental que le projet VegDUD propose d'étudier la végétalisation de la ville comme une des solutions pour rendre la ville dense acceptable. Ce projet financé par l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre de l'appel à projets "Villes Durables 2009", a démarré en janvier 2010. Il est coordonné par l'IRSTV et réunit des partenaires de recherche de différents organismes : le CERMA (ENSA de Nantes), le LHEEA (Ecole Centrale de Nantes), l'ESO (Université de Rennes, de Nantes et d'Angers), l'IFSTTAR, Plante & Cité, le LaSIE et le LIENSs (Université de La Rochelle), le LPGNantes (Université de Nantes), l'ONERA, le GAME (CNRM Météo France), le CSTB, l'IRSN, et l'EPHYSE (INRA).

La question du rôle du végétal dans le développement urbain durable étant très large, les partenaires se sont restreints aux rôles climatiques, énergétiques et ambiantaux du végétal urbain.

Le projet est structuré en six volets dont nous allons décrire rapidement les objectifs et les résultats déjà établis.

Le volet TYPOLOGIE

Un volet TYPOLOGIE du végétal urbain a permis de réunir une documentation pluridisciplinaire des dispositifs végétaux et de leurs caractéristiques. Afin d'identifier les formes de végétation actuelles et leurs évolutions possibles dans le cadre de la densification des villes et des préoccupations de développement durable, différents points de vue (gestionnaires, urbanistes,

paysagistes, citoyens...) ont été confrontés. Un cahier des charges des dispositifs végétaux pouvant composer les scénarios alternatifs de végétation a été établi. Les dispositifs sélectionnés sont :

- les enveloppes végétales des bâtiments (façades et toitures) ;
- les arbres ;
- les solutions alternatives de gestion des eaux pluviales utilisant le végétal (noues...);
- les surfaces enherbées (mises en concurrence avec les surfaces minérales) ;
- les surfaces végétales sans contact avec le sol profond (surfaces végétales construites au dessus de parking, plantes en pots...).

Ces "dispositifs" seront étudiés associés à deux paramètres de variation :

- le mode de gestion, intensif ou extensif ;
- la distribution spatiale par rapport à la forme construite (dispositifs regroupés ou dispersés).

A partir de ce cahier des charges, les modélisateurs ont construit des scénarios à évaluer à différentes échelles et pour les différents impacts à étudier.

Le volet *PHYSIOGRAPHIE*

Dans le volet *PHYSIOGRAPHIE*, la structure du SIG OrbisGIS développé par l'IRSTV a été adaptée pour intégrer les données relatives à la végétation en ville, en lien avec la typologie proposée par le volet *TYPLOGIE*. Ce SIG intègre les acquisitions faites par télédétection hyperspectrale ainsi que toutes les données acquises tant sur la présence de la végétation que lors des campagnes expérimentales. Un modèle d'évolution de la ville a également été intégré, qui propose des simulations dans lesquelles des contraintes influant sur la densification ou l'étalement urbain peuvent être imposées. Ces simulations seront celles utilisées pour la construction des scénarios évalués.

Le volet *EXPÉRIMENTATION*

Le volet expérimental a pour objectif de mettre en place des techniques de mesure adaptées à la compréhension des phénomènes physiques induits par la présence du végétal en milieu urbain. Deux campagnes expérimentales ont été conduites, en 2010 (FluxSAP 2010) et en 2012 (FluxSAP 2012). En plus de ces deux campagnes, deux sites sont instrumentés en continu et un réseau de capteurs THR (Température et Humidité Relative) a été mis en place. Des mesures sont également réalisées sur des maquettes, in situ ou en soufflerie. Les données produites permettent de valider les modèles produits dans le volet *MODÉLISATION*, comme nous l'avons fait.

Le volet MODÉLISATION

Le volet MODÉLISATION est celui dans lequel s'inscrit ce travail de thèse. Il a pour objectif de réaliser la représentation de la végétation urbaine dans les modèles de climatologie, d'hydrologie, d'acoustique urbaine et de thermique des bâtiments. En effet, la plupart de ces modèles considéraient une représentation de la ville presque exclusivement minérale. Différentes échelles sont abordées : de l'échelle architecturale jusqu'à celle de la ville. Les modèles concernés par ce volet sont :

- ARPS-canopée, développé par le LHEEA et l'EPHYSE ;
- TEB, modèle microclimatique développé par le GAME/CNRM ;
- URBS, modèle hydrologique développé par l'IFSTTAR ;
- la méthode TLM, pour l'acoustique, développée par l'IFSTTAR ;
- TRNSYS, modèle de thermique dynamique des bâtiments dans lequel le LaSIE développe des modules pour les murs végétaux et façades végétales ;
- Solene-microclimat qui est notre environnement de travail.

Les volets d'ÉVALUATION

L'évaluation est effectuée au sein de deux volets qui distinguent un usage privé (jardins, dispositifs architecturaux) et un usage collectif (squares, parcs, ...) de la végétation.

Dans chacun des volets, qui démarrent tout juste au moment de la rédaction de cette thèse, il s'agit d'évaluer les différents impacts de la végétation. Les évaluations reposent principalement sur la réalisation de simulations comparatives à l'aide des modèles développés dans MODÉLISATION. Les dispositifs seront évalués individuellement pour leurs effets à petite échelle, puis des projections à grande échelle des dispositifs les plus intéressants seront analysées dans les scénarios d'évolution de la ville construits dans le volet PHYSIOGRAPHIE.

Les évaluations ne s'arrêtent toute fois pas aux rôles physiques de la végétation. Les contraintes économiques, les aspects sensibles et les usages du végétal sont également étudiés. L'objectif final de ces évaluations est de compléter la typologie mise en place dans le premier volet de recherche pour proposer un outil opérationnel permettant d'orienter une politique de la végétalisation urbaine.

1.2.3 Problématique de la thèse

Cette thèse s'inscrit donc dans le volet MODÉLISATION, et plus particulièrement dans la modélisation de l'impact énergétique de la présence de végétation en ville.

La problématique de la thèse, issue des considérations précédentes, est basée sur la question suivante :

Dans un contexte de densification urbaine et de réchauffement global, la végétalisation des enveloppes des bâtiments est-elle en mesure de limiter l'impact de l'îlot de chaleur urbain sur la consommation énergétique des bâtiments ?

La méthode adoptée pour répondre à la problématique consiste à tester différentes configurations urbaines et végétales (scénarios), et à comparer les résultats en termes de modification du microclimat et d'impact sur la consommation énergétique.

Pour cela, il était dans un premier temps nécessaire de mettre à niveau le modèle *Solene-microclimat*, afin que celui-ci puisse prendre en compte les dispositifs végétaux étudiés dans le projet VegDUD. Le contexte du projet VegDUD présentait par ailleurs l'intérêt de mettre à notre disposition de nombreuses données expérimentales permettant de mettre en place une validation partielle du modèle. Enfin, sans aller jusqu'à l'évaluation des scénarios, il était nécessaire de vérifier qu'il serait possible de réaliser les simulations du quartier Pin Sec avec une prise en compte de la végétation enveloppant les bâtiments.

1.3 Outils de simulation des microclimats urbains et de la consommation énergétique des bâtiments

1.3.1 À l'interface entre deux champs de recherche

Les questionnements relatifs au climat urbain ou à la consommation énergétique des bâtiments sont traditionnellement traités par des chercheurs de communautés différentes : les sciences de l'univers et plus précisément la climatologie pour les premiers et les sciences pour l'ingénieur et plus précisément le génie civil ou le génie climatique pour les seconds. Les phénomènes physiques restent les mêmes, même si les dénominations peuvent différer (flux de chaleur sensible et flux convectif par exemple), mais les approches sont différentes. Dès lors que l'on se place à l'interface de ces deux champs de recherche, l'enjeu est de les faire dialoguer au mieux.

Bilan énergétique des bâtiments : une approche systémique ou volumique

La simulation thermique des bâtiments a le plus souvent des objectifs opérationnels ou réglementaires. Les outils développés sont largement utilisés par les entreprises du bâtiment et les bureaux d'études thermiques, notamment à des fins d'optimisation et d'aide à la conception. L'approche consiste

généralement en un bilan énergétique sur un volume contenu dans l'enveloppe du bâtiment. Cependant, la géométrie n'est pas forcément représentée explicitement. Le calcul purement thermique de déperdition par conduction ou par ventilation n'est qu'un facteur dans ce bilan où interviennent également le fonctionnement des systèmes et les facteurs énergétiques liés aux usages du bâtiment. Au plus simple, le bâtiment est parfois défini comme un simple coefficient de déperdition, qui donne les pertes en watts en fonction de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Les conditions climatiques extérieures sont souvent représentées avec peu de précision, la priorité étant donnée aux aspects plus technologiques liés en particulier aux techniques de régulation.

Les approches sont ainsi majoritairement systémiques ou nodales, où l'air intérieur d'une ou de plusieurs zones thermiques est uniquement représenté par un nœud dans un circuit représentant par ailleurs les composants d'un système de chauffage ou de climatisation de façon explicite.

Nous ne ferons pas ici un état de l'art de ces modèles, mais on pourra se référer aux travaux de Mora [2003].

Bilans énergétiques des surfaces urbaines : l'interface entre le ciel et la terre

Les modèles urbains sont encore essentiellement du domaine de la recherche. Il existe des applications opérationnelles comme la prévision météorologique, ou des prévisions d'évolution à long terme destinées à donner des orientations aux pouvoirs publics, mais celles-ci sont le plus souvent le fait de laboratoires de recherche ou d'organisations gouvernementales. Ces modèles visent pour la plupart à développer les connaissances sur les phénomènes physiques au sein de la canopée urbaine, notamment les échanges de flux d'énergie et de matière.

Ils diffèrent au niveau de la représentation de la ville et des échelles utilisées. Les modèles urbains traitent souvent la canopée urbaine uniquement du point de vue de sa surface extérieure. Elle constitue en réalité l'interface entre le sol, dont on s'intéresse plus particulièrement aux données hydriques, et l'atmosphère dans laquelle on étudie les flux verticaux de particules et d'énergie.

Les variables de sortie sont donc les composantes du bilan énergétique de surface qui seront des conditions aux limites pour les modèles atmosphériques :

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S \quad (1.2)$$

avec :

- Q^* le bilan radiatif net, lui-même exprimé en fonction des flux de rayonnement montants et descendants de courte longueur d’onde (K) et de grande longueur d’onde (L) :

$$Q^* = (K_{\downarrow} - K_{\uparrow}) + (L_{\downarrow} - L_{\uparrow}) \quad (1.3)$$

- Q_F : flux anthropiques
- Q_H : flux turbulent sensible
- Q_E : flux turbulent latent
- ΔQ_S : chaleur stockée par la surface

Pour avoir un aperçu de la diversité des approches et des enjeux actuels, on peut se référer à la comparaison internationale sur 32 modèles de surface urbaine coordonnée et synthétisée par Grimmond et al. [2010, 2011].

La classification adoptée utilise huit critères (Figure 1.4) :

- la représentation de la végétation,
- la prise en compte des flux anthropiques,
- la prise en compte de l’évolution journalière des flux anthropiques,
- la représentation verticale de la morphologie urbaine,
- la représentation de l’orientation des surfaces verticales,
- la prise en compte des réflexions solaires,
- les surfaces prises en compte dans le bilan radiatif,
- la prise en compte du stockage thermique.

Les équipes ont réalisé des simulations en évoluant selon quatre niveaux d’information de plus en plus détaillés. Les résultats ont ensuite été comparés avec des mesures de flux.

La première des conclusions de ce benchmark est que la grande variété des modèles est justifiée par le fait qu’aucun ne donne des bons résultats pour tous les flux à la fois. Elle met aussi en avant l’importance de la végétation car les modèles donnant les meilleurs résultats sont bien ceux qui la prennent en compte, même d’une manière très approximative. Enfin, disposer de modèles plus ou moins détaillés est également jugé nécessaire car permettant d’adapter l’approche au niveau de précision disponible pour les variables d’entrée.

Étant donné le lien étroit entre l’ICU, qui reste le phénomène que les modèles de surface urbaine cherchent à reproduire en priorité, et la consommation énergétique des bâtiments et notamment les rejets des systèmes de climatisation, certains de ces modèles cherchent désormais à représenter de manière plus précise le comportement thermique des bâtiments en prenant en compte les systèmes de chauffage et de climatisation.

Class	Vegetation (V)	Cap	1	2	3	4	Representation
1	Not included (n) Separate tile (s) Integrated (i)	7 16 2	10 13 2	7 16 2	7 16 2	7 16 2	None Separate tile Integrated
2	Q_f (AN) Negligible or ignored (n) Prescribed (p) Internal Temp. (i)* Modelled (m) i, p^*	9 5 3 6 2	15 2 3 3 2	15 2 3 3 2	15 2 3 3 2	15 2 3 3 2	Prescribed Internal temperature Modelled Q_f Q_r
3	Temporal Q_f variation (T) None (n) Fixed (f) Variable (v)	9 3 13	15 3 7	15 3 7	15 3 7	14 4 7	None Fixed Variable
4	Urban Morphology (L) Slab(s) Single layer(1) Multiple layer (m)	8 10 7	8 10 7	8 10 7	8 10 7	8 10 7	Slab Single-layer Multi-layer
5	Facets & orientation (FO) Whole (w) No orientation (n) Orientation (o) no intersections Orientation (i) with intersections	3 14 5 3	3 14 5 3	3 14 5 3	3 14 5 3	3 14 5 3	Whole Roof, walls, road, without orientation Roof, walls, road with orientation, no intersections Roof, walls, road with orientation with intersections
6	Reflection (R) Single (s) Multiple (m) Infinite (i)	7 11 7	8 10 7	8 10 7	8 10 7	8 10 7	Single Multiple Infinite
7	Albedo, Emissivity (AE) Bulk (b) Two facets (2) Three or more facets (f)	3 4 18	4 4 17	3 4 18	3 4 18	3 4 18	Bulk Two facets Three facets Infinite
8	ΔQ_s (S) Residual (r)* Conduction (c) Net radiation based (n)*	4 20 1	5 19 1	5 19 1	5 19 1	5 19 1	Residual Conduction Net radiation

FIGURE 1.4 – Classification des modèles de surface urbaine [Grimmond et al., 2011]

Nous faisons maintenant une classification rapide des modèles correspondant à notre échelle d'étude, c'est-à-dire, ceux permettant d'exprimer les flux à la surface d'un ensemble de bâtiments. Nous en présenterons quelques-uns dans chaque catégorie. Le but n'est pas d'en donner une liste exhaustive mais d'en présenter un nombre réduit que nous considérons comme représentatifs de certaines approches.

Pour cette classification, nous avons ainsi remarqué que les chercheurs qui ont développé ces modèles sont partis de la représentation d'un phénomène ou flux, qui a justifié l'approche notamment spatiale à la base de la construction de leur modèle. Ils ont ensuite pour certains, intégré d'autres phénomènes ou flux dans cette base. Nous avons donc ainsi distingué trois familles de modèles : les modèles atmosphériques, les modèles radiatifs et les modèles paramétriques.

1.3.2 Modèles atmosphériques

ENVI-Met

ENVI-Met a été développé pour évaluer le confort thermique des piétons dans un environnement urbain [Bruse et Fleer, 1998]. Il est basé sur la résolution des équations de l'écoulement du vent sur une maquette numérique 3D avec un maillage structuré sous forme de cubes. Les interactions entre les surfaces, l'atmosphère et la végétation sont représentées de façon particulièrement soignée, notamment le calcul de l'évapotranspiration et l'effet des arbres sur l'écoulement. Il a ainsi été beaucoup utilisé pour étudier à la fois l'effet de la morphologie urbaine et de la végétation, ce à plusieurs échelles et pour différents types de végétation :

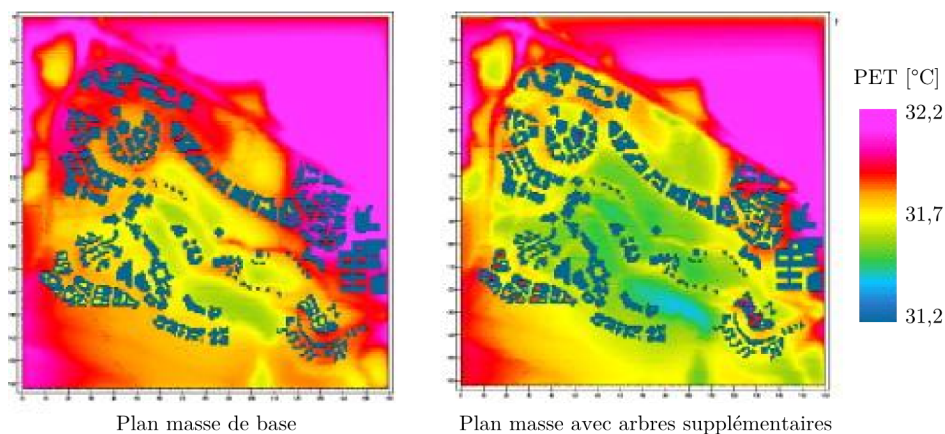


FIGURE 1.5 – Simulation avec ENVI-Met de l'impact des arbres sur la température de l'air en journée (source : [Wong et Jusuf, 2008])

- Lahme et Bruse [2003] traitent le cas de l’impact d’un parc dans un environnement urbain dense, les résultats d’**ENVI-Met** étant comparés à des mesures sur sites,
- Ali-Toudert et Mayer [2007] étudient les arbres d’alignement dans les rues canyon,
- Wong et Jusuf [2008] comparent les impacts relatifs des arbres et de différents types de toitures végétales sur un campus à Singapour (Figure 1.5),
- Fahmy et Sharples [2009] présentent le rafraîchissement passif d’un quartier résidentiel du Caire.

Logiciel de référence pour le calcul des indices de confort extérieur, **ENVI-Met** montre des limites du côté des calculs radiatifs et de la représentation thermique des surfaces urbaines en particulier pour la version 3.0 qui ne prend pas en compte les caractéristiques thermiques des façades. La version 4.0 doit normalement apporter d’importantes améliorations, notamment l’utilisation d’un modèle nodal pour les parois et la réalisation d’un bilan thermique pour le bâtiment, permettant de suivre leur consommation énergétique. Elle n’est malheureusement pas encore disponible et aucun résultat ne semble avoir été publié.

Code_Saturne

Dans sa thèse, Milliez [2006] intègre un modèle radiatif pour l’environnement urbain ainsi qu’un modèle thermique de paroi dans **Mercure**, avant que celui-ci ne devienne le module atmosphérique de **Code_Saturne**. Qu [2011] utilise ce modèle afin de réaliser une validation expérimentale à partir des résultats de la campagne MUST [Biltoft, 2001] ainsi qu’une comparaison avec **Solene** sur l’estimation des flux solaires incidents et l’évolution des températures de surface. Le bilan thermique n’étant pas réalisé sur le bâtiment, la température intérieure doit être forcée [Qu et al., 2012].

La méthode utilisée pour les calculs radiatifs est celle des ordonnées discrètes qui consiste à prendre en compte les transferts radiatifs de proche en proche entre les cellules d’une scène maillée en trois dimensions à partir d’un nombre de directions données. Cette méthode paraît effectivement adaptée à l’outil utilisé puisque celui-ci réalise déjà la résolution des équations de Navier-Stokes sur un maillage volumique non-structuré.

Si les améliorations apportées font leurs preuves sur les cas académiques présentés, le modèle thermique de bâtiment est loin d’avoir un niveau de détail aussi fin que celui développé dans **Solene-microclimat**. De plus, aucun effet de la végétation n’est pris en compte dans le modèle.

Des modèles adaptés à la représentation de l'extérieur

La convergence entre les modèles atmosphériques à petite échelle qui sont présentés est remarquable dans le sens où ceux-ci se préoccupent de plus en plus de représenter l'intérieur du bâtiment. Mais leur objectif est bien d'améliorer la représentation de ce qui se passe à l'extérieur du bâtiment : confort thermique pour ENVI-Met et effets aérodynamiques pour Code_Saturne.

1.3.3 Modèles radiatifs

S'il est un phénomène qu'on ne peut se soustraire à représenter avec une précision minimale, c'est le rayonnement solaire. L'optimisation de la forme urbaine afin de maximiser le rayonnement solaire pour des raisons énergétiques ou d'éclairage naturel, ou encore afin de s'en protéger, est étudié de longue date. Le rayonnement incident de courte longueur d'onde ainsi que les inter-réflexions vont effectivement jouer un rôle majeur. C'est également le cas du rayonnement infrarouge qui est d'autant plus déterminant que les différences de température sont élevées entre des surfaces en vis-à-vis. Celui-ci est également critique du fait de l'importance du phénomène de rafraîchissement radiatif vers le ciel, dont la température de rayonnement est généralement plus faible que celle des surfaces urbaines, particulièrement la nuit.

Les techniques pour les représenter sont nombreuses, les deux principales étant la méthode des radiosités et la méthode des ordonnées discrètes. La première repose sur le calcul des facteurs de vue entre chacun des éléments de la surface urbaine discrétisée. La seconde utilise une discrétisation des directions de propagation du rayonnement puis considère cette propagation de proche en proche sur une scène maillée en trois dimensions. La méthode des lancers de rayon, largement utilisée dans le domaine de l'éclairage et du rendu informatique, l'est pour l'instant moins dans les modèles urbains.

DART-EB

DART-EB (pour DART-Energy Building) [Belot, 2007] est basé sur le modèle radiatif DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer). Il a été développé au départ pour modéliser les transferts radiatifs au sein des canopées végétales Gastellu-Etchegorry et al. [1996]. Il est depuis également utilisé afin de reproduire et d'inverser les images obtenues par télédétection spatiale. Le modèle de rayonnement est donc particulièrement précis, en particulier en ce qui concerne la végétation. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- longueurs d'onde multiples,
- anisotropie pour toutes les grandeurs, notamment les caractéristiques radiatives des surfaces,

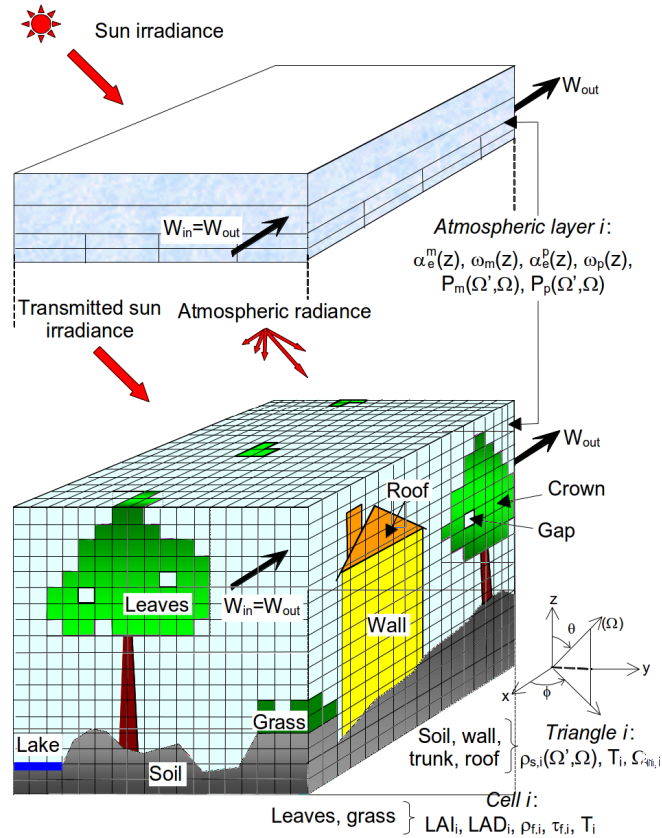


FIGURE 1.6 – Schéma de principe du modèle DART

- prise en compte de la turbidité du milieu pour l’atmosphère et les couverts végétaux.

DART utilise une approche combinant le suivi de rayon et la méthode des ordonnées discrètes sur un maillage volumique structuré dont les conditions aux limites latérales ont la particularité d’être périodiques (Figure 1.6). Le rayonnement peut ainsi être reproduit depuis le dessus de l’atmosphère terrestre, ce qui fait qu’il peut constituer en lui-même un modèle de ciel anisotrope. La représentation du comportement hydrique du sol est particulièrement détaillée dans DART-EB et permet ainsi de faire varier la disponibilité en eau pour la végétation.

En termes de modélisation radiative solaire et infrarouge DART-EB est sans doute ce qu’on peut imaginer de mieux, y compris pour le contexte urbain, même s’il a très peu été exploité sur cet objet. Il ne comprend cependant aucune représentation de l’intérieur du bâtiment et n’apporte donc rien en termes de modélisation de la demande énergétique ou du confort thermique

intérieur.

CitySIM

CitySIM [Robinson et al., 2009] est issu de travaux sur un outil de simulation de ressources solaires disponibles dans un environnement urbain (SUNTool [Robinson et al., 2007]) auquel a été ajouté un modèle de thermique du bâtiment [Kämpf et Robinson, 2007]. Cette fois-ci, un soin particulier a été apporté aux facteurs les plus influents sur la consommation énergétique, notamment le comportement des habitants [Page et al., 2008] et celui des systèmes de chauffage et de climatisation. Cet outil étant issu d'un modèle radiatif, le rayonnement solaire et le bilan de rayonnement infrarouge sont bien représentés grâce à une méthode optimisée utilisant les radiosités et les facteurs de vue. C'est bien la totalité des flux énergétiques de la ville que l'on cherche à représenter dans CitySIM puisqu'il a même vocation à être couplé avec le modèle de transport de personnes et de biens MATsim. Un autre intérêt de cet outil est la possibilité d'utiliser des maquettes non structurées, permettant par exemple d'utiliser directement des données spatiales issues de systèmes d'information géographique.

La contrepartie de cette précision au niveau énergétique est l'absence de représentation du microclimat urbain, et spécialement d'un modèle aérodynamique, ce qui n'empêche pas d'utiliser un forçage des conditions climatiques correspondant à un îlot de chaleur urbain, car c'est bien la rétroaction du bâtiment sur le climat qui n'est pas pris en compte.

D'autre part, il n'est fait aucune mention de la végétation ni de prise en compte de la transparence qui aurait pu permettre de la représenter au moins du point de vue radiatif.

Des modèles adaptés au calcul des températures de surface

Il existe de nombreux autres modèles radiatifs urbains en plus des deux cités plus tôt, notamment TUF3D [Krayenhoff et Voogt, 2007], SOLWEIG [Lindberg et Grimmond, 2011]. À notre connaissance, CitySIM est le seul, avec Solene à proposer un modèle thermique de bâtiment. De par l'importance significative des rayonnements solaires et infrarouges sur les températures de surface, c'est le plus souvent à cette fin qu'ils sont utilisés. Finalement, aucun de ces modèles n'utilise de couplage aérodynamique. L'effet de la température de l'air est en effet limité sur l'évolution des températures de surface compte tenu des fortes amplitudes de variation de ces dernières.

1.3.4 Modèles paramétriques, modèles de rue canyon

Le concept de rue canyon appliqué à la climatologie urbaine a été introduit par Oke [1987]. Il consiste à ne considérer qu'une rue dont la longueur

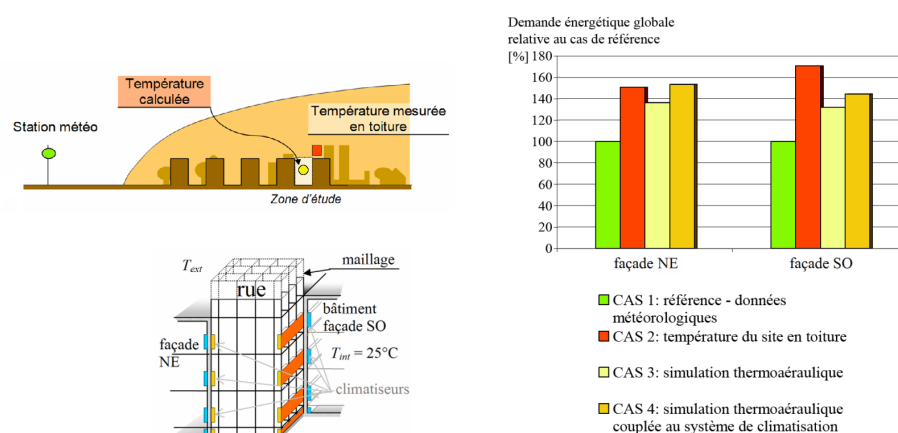


FIGURE 1.7 – Modélisation zonale de la rue canyon

est supposée infinie. Sa géométrie peut ainsi être caractérisée par un seul paramètre : le rapport d’aspect, défini comme le rapport entre sa hauteur et sa largeur.

Les modèles qui s’y réfèrent sont abondants dans la littérature sur la modélisation du climat urbain. Il en existe même pour l’étude de l’impact des façades végétales [Alexandri et Jones, 2008]. Leur attrait tient à plusieurs facteurs parmi lesquels la simplicité de développement, la sobriété en termes de temps de calcul, la paramétrisation réduite. Ils permettent de réaliser aisément des comparaisons entre les résultats obtenus avec des modèles différents. Ils facilitent également la réalisation de validations expérimentales, sur des modèles plus ou moins réduits. Les ressources sont nombreuses, notamment sur les régimes d’écoulement en fonction du rapport d’aspect et des conditions de vent.

Simcanyon

Simcanyon est un modèle de rue canyon prenant en compte les effets aérauliques au sein de la rue grâce à un modèle zonal [Bozonnet, 2005; Bozonnet et al., 2005]. Il est utilisé par Doya et al. [2012] pour valider des mesures sur l’effet des peintures réfléchissantes dites “cools” sur la consommation énergétique des bâtiments. Les calculs du rayonnement sont réalisés à partir de la méthode des enceintes fictives.

Il permet un couplage complet entre le comportement thermique du bâtiment et la circulation de l’air en prenant en compte l’effet de la convection naturelle sur le déplacement de l’air ainsi que celui des rejets des systèmes de climatisation sur la température d’air extérieur. Le graphique de droite de la Figure 1.7 montre ainsi l’influence de différentes hypothèses de couplage

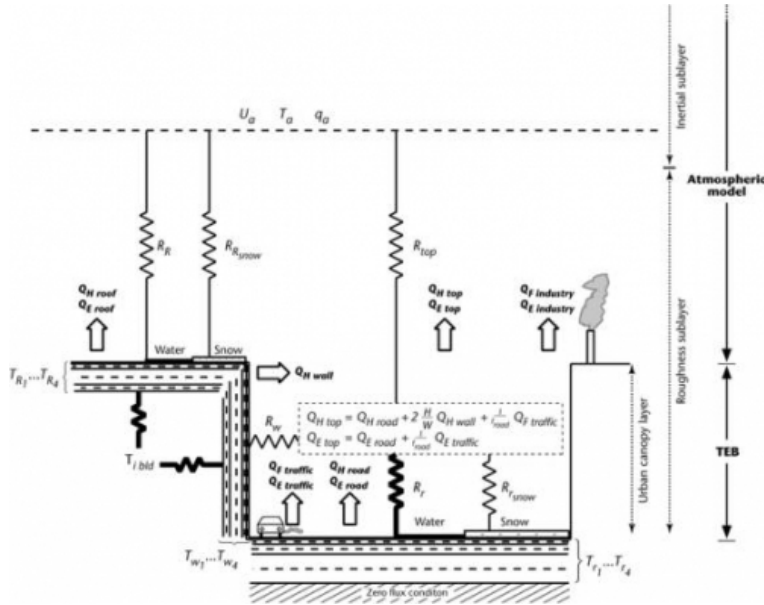


FIGURE 1.8 – Schéma de principe du modèle TEB [Masson, 2000]

sur la consommation énergétique pour quatre cas appliqués à une rue canyon d'Athènes :

- cas 1 : données météorologiques,
- cas 2 : température du site en toiture,
- cas 3 : simulation thermoaéraulique,
- cas 4 : simulation thermoaéraulique couplée au système de climatisation.

La consommation énergétique estimée à partir des données météorologiques est ainsi plus faible de 30 à 70%. La prise en compte de l'effet indirect de la climatisation alourdit la facture énergétique de l'ordre de 15% en moyenne, ce qui est loin d'être négligeable.

TEB-Veg

TEB (Town Energy Balance) constitue la partie urbaine de SURFEX, un modèle de surface de Météo France, qui peut être couplé avec un modèle atmosphérique ou fonctionner en conditions forcées. Il est ainsi fait pour être appliqué à l'échelle de l'agglomération entière. Il reprend le concept de rue canyon pour effectuer un bilan énergétique complet en prenant en compte les effets d'ombrage et de piégeage radiatif [Masson, 2000] (Figure 1.8). Le bilan énergétique du bâtiment est également réalisé en prenant en compte son inertie thermique.

Les sols végétaux ont été intégrés en reprenant le modèle ISBA, égale-

ment utilisé par **SURFEX** pour les surfaces naturelles [Lemonsu et al., 2012]. En effet, jusqu'à présent, les tissus hétérogènes étaient représentés par une juxtaposition de parcelles de **TEB** et d'**ISBA** sans qu'il n'y ait d'interaction entre les deux.

Les développements dans **TEB** sont nombreux et ce dans le cadre de plusieurs projets :

- amélioration du modèle de bâtiment en prenant en compte les vitrages et les systèmes énergétiques, notamment pour évaluer les effets de la climatisation [de Munck et al., 2012; Pigeon, 2012],
- représentation des toitures végétales et des arbres, dans le cadre du volet **MODÉLISATION** du projet **VegDUD** [de Munck, 2012].

Des modèles adaptés à la prise en compte d'interactions complexes

De par leur simplicité géométrique, les modèles de rue canyon sont particulièrement adaptés à la prise en compte d'interactions complexes entre différents phénomènes physiques éventuellement couplés. Ce sont finalement les seuls à intégrer réellement tous les phénomènes couplés intervenant dans la canopée urbaine. Ils présentent néanmoins certaines limites. On peut d'abord se poser la question de la représentativité d'une rue canyon sur un ensemble urbain très hétérogène et notamment dans le cas de tissus fortement discontinus et ouverts (grands ensembles par exemple). Si les modèles sont faciles à paramétrer dans un premier temps, il est ensuite difficile d'étendre largement les situations à représenter notamment pour la prise en compte d'asymétries.

L'intérêt de ces modèles n'est pas à démontrer. Ils se limitent cependant à deux cas d'application : celui de la rue canyon et celui d'une ville moyenne représentée avec des paramètres morphologiques très simplifiés. Un modèle avec des géométries en trois dimensions complètement explicites comme **Solene-microclimat** semble donc avoir toute sa place, d'autant plus qu'il est toujours possible d'y représenter une rue canyon, notamment à des fins de comparaison.

1.4 Conclusion

Ce chapitre avait pour but d'établir la problématique de la thèse et de présenter les enjeux de modélisation auxquels elle doit faire face. Nous avons ainsi montré l'intérêt de la modélisation dans le contexte actuel de maîtrise du développement urbain et de ses effets indésirables, dont les impacts négatifs pourraient être modérés par une plus forte végétalisation de la ville.

Nous nous situons clairement à l'interface entre deux types de modèles issus de communautés scientifiques différentes qu'il s'agit de faire interagir. La

présentation succincte de l'état de l'art en termes de modélisation du microclimat urbain couplée avec le comportement thermique des bâtiments permet de bien situer **Solene-microclimat** dans cet ensemble. Dans le chapitre suivant qui est dédié à la présentation du modèle, nous ne manquerons pas de faire le lien avec les considérations présentées ici.

Chapitre 2

Présentation de l’outil microclimatique du CERMA

Sommaire

2.1	Simulations radiatives avec Solene	32
2.2	Modèle thermique de bâtiment	36
2.3	Simulation thermoaéraulique avec Code_Saturne	42
2.4	Couplage	49
2.5	Conclusion	58

Le modèle microclimatique utilisé au CERMA a été développé au cours de trois thèses successives [Vinet, 2000; Robitu, 2005; Bouyer, 2009]. Vinet [2000] a mis en place un modèle à partir de l’outil radiatif *Solene* auquel est incorporé un modèle thermique de paroi couplé à un code de mécanique des fluides numérique¹. Un modèle de bassin d’eau [Robitu, 2005], puis un modèle thermique de bâtiment [Bouyer, 2009] furent ensuite ajoutés. L’outil initialement utilisé pour évaluer la qualité des ambiances urbaines permet alors d’évaluer l’influence des aménagements et de la modification du microclimat local sur la consommation énergétique d’un bâtiment.

Il paraît donc particulièrement adapté pour répondre à la problématique de la thèse, à condition qu’y soit ajouté un modèle plus précis de comportement de la végétation² et en particulier des enveloppes végétales. Le détail des modèles est présenté dans la thèse de Bouyer [2009]. Les principales hypothèses seront néanmoins rappelées.

Outre le développement d’un nouveau modèle pour les enveloppes végétales, qui sera présenté dans le chapitre 4, cette thèse apporte de nombreuses

1. *N3S* dans un premier temps, puis *FLUENT* dans les travaux de Robitu.

2. Bien qu’elle fut prise en compte dès la première thèse.

contributions à **Solene-microclimat**, en particulier par rapport à la mise en œuvre du couplage et à des améliorations dans les procédures, qui ont permis de réduire les temps de calcul.

2.1 Simulations radiatives avec Solene

Le rayonnement solaire incident ainsi que les échanges infrarouges sont calculés par le logiciel de simulation radiatif **Solene** [Miguet et Groleau, 2002], en prenant en compte le rayonnement diffusé par le ciel et les inter-réflexions dans la scène urbaine.

Solene repose sur un ensemble d'exécutables appelés "fonctions externes". Leurs champs d'investigation vont du traitement de la lumière naturelle ou du rayonnement solaire en prenant en compte les réflexions multiples jusqu'à des analyses purement géométriques comme des calculs d'inter-visibilité ou d'indicateurs morphologiques.

Bien qu'il existe une interface graphique pour **Solene**, nous ne pouvons pas l'utiliser dans nos applications étant donné l'important degré d'automatisation nécessaire au couplage. De plus, beaucoup des fonctions externes n'y sont pas accessibles, notamment celles qui traitent du rayonnement thermique.

Solene permet d'utiliser des géométries complexes représentant fidèlement une scène urbaine à partir d'un maillage surfacique en trois dimensions.

2.1.1 Calcul du rayonnement incident

L'énergie solaire directe sur une surface perpendiculaire à la direction des rayons est calculée en fonction de la hauteur solaire h par la formule de Perrin de Brinchambault [Miguet, 2000] :

$$I = 1230 \exp \frac{-1}{3,8 \sin(h + 1,6)} \quad (2.1)$$

Si le soleil est visible depuis la facette considérée, le flux solaire direct qu'elle reçoit ($\varphi_{sol,direct}$) correspond à la valeur du rayonnement énoncé précédemment (I) pondérée par l'angle d'incidence des rayons solaires sur la facette.

Le flux solaire diffus correspond au rayonnement diffusé par l'ensemble de la voûte céleste. Celle-ci est représentée par un modèle géométrique de ciel sous la forme d'un dôme géodésique de rayon infini qui peut être plus ou moins discrétisé. Le flux est alors réparti sur la totalité de la voûte céleste en

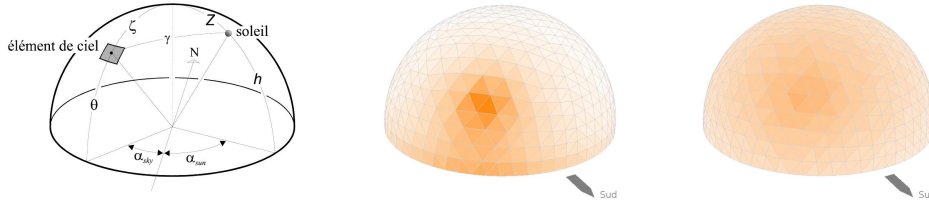


FIGURE 2.1 – Repère et angles sphériques (à gauche), distribution des luminances pour une latitude de 40° à 14h TSV pour un ciel clair CIE (milieu) et pour un ciel couvert clair $\varepsilon = 1$; $\Delta = 0,35$ (à droite) (d’après [Bouyer, 2009])

fonction de la nébulosité du ciel (Figure 2.1). *Solene* permet d’utiliser différents types de ciel normalisé ou bien de calculer les luminances à partir de la formulation de Perez et al. [1987] qui utilise deux paramètres pour définir la nébulosité du ciel : le degré de pureté du ciel (ε) et sa luminosité (Δ). Un exemple de résultats de simulation du flux solaire diffus pour un ciel clair est donné à la Figure 2.2.

Dans nos simulations, les flux directs et diffusés par le ciel sont le plus souvent recalculés à partir de flux mesurés horizontalement sur les différents sites expérimentaux traités. Des fonctions externes dédiées permettent en effet de retrouver la répartition sur l’ensemble des facettes du modèle de ciel du rayonnement diffus mesuré sur un plan horizontal.

2.1.2 Calcul des inter-réflexions

Toute surface dont le coefficient de réflexion est non nul devient à son tour émettrice si elle est elle-même éclairée par un rayonnement. Dans le domaine du visible, qui constitue environ 40% de l’énergie solaire transmise par l’atmosphère, les valeurs de ces coefficients, qu’on appelle également albédos ou réflectivités, dépendent principalement de la couleur du matériau en question. Les albédos des surfaces courantes couvrent ainsi un large spectre allant de 5% d’énergie réfléchie pour les surfaces sombres à plus de 50% pour les surfaces blanches. La quantité d’énergie redistribuée par les réflexions multiples est donc significative.

Il existe plusieurs méthodes numériques pour modéliser les inter-réflexions. La méthode des radiosités, utilisée par *Solene*, ne considère que des réflexions totalement diffuses et isotropes. Ce n’est pas toujours le cas dans la réalité mais cela correspond assez bien aux surfaces mates qui constituent la majorité des revêtements urbains. Miguet [2000] rappelle les principales hypothèses du modèle qu’il a développé dans *Solene* :

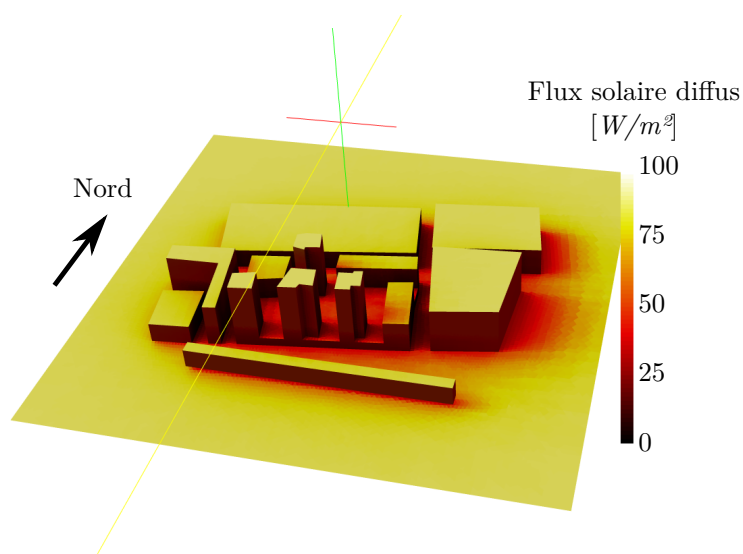


FIGURE 2.2 – Résultats de simulation avec *Solene* : flux solaire diffus avec un ciel clair, 21/6 17 :00 TSV

- aucun rayonnement n'est réfléchi vers la voûte céleste,
- les caractéristiques radiatives et les rayonnements reçus sont uniformes sur l'élément traité, ce qui nécessite une discrétisation de la scène étudiée,
- toutes les surfaces opaques réfléchissent de manière lambertienne.

La méthode consiste à redistribuer de façon itérative le rayonnement réfléchi par une surface sur toutes celles qui lui sont visibles, en considérant à chaque itération l'élément de surface qui a le plus d'énergie à redistribuer.

Cela nécessite le calcul des facteurs de forme qui correspondent à la visibilité d'une facette par une autre. Géométriquement, il s'agit du rapport entre l'angle solide sous lequel la surface émettrice voit une surface réceptrice et l'angle solide correspondant à une hémisphère. En termes énergétiques, ils correspondent au ratio de rayonnement émis ou ré-émis par la surface émettrice qui atteint effectivement la surface réceptrice. Dans *Solene*, une fonction est utilisée pour calculer une seule fois pour chaque géométrie la totalité des facteurs de forme qui sont ensuite stockés.

2.1.3 Représentation des arbres

La représentation des arbres dans *Solene* est particulière car leur bilan thermique est réalisé dans *Code_Saturne* contrairement aux autres composants de l'aménagement. Seule leur enveloppe est prise en compte dans le bilan radiatif. Elle est caractérisée par un albédo et une transmittivité. Le

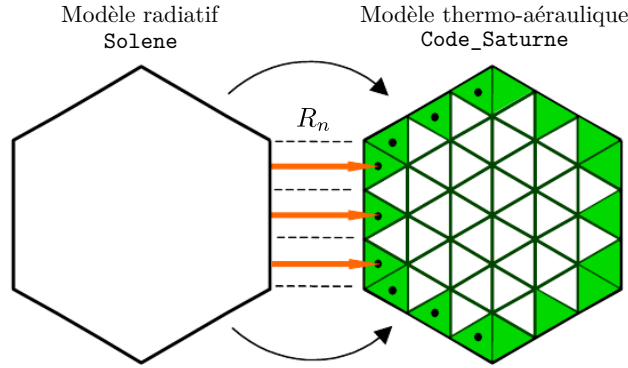


FIGURE 2.3 – Attribution du flux solaire surfacique aux cellules volumiques [Robitu, 2005]

complément constitué du rayonnement absorbé par les feuilles est attribué comme source de chaleur dans les cellules périphériques de l'arbre (Figure 2.3).

Les arbres sont considérés opaques au rayonnement thermique infrarouge, leur température de surface apparente étant définie pour chaque facette comme la température de l'air de la cellule contiguë contenue dans le volume d'arbre. Le bilan thermique et les effets hygro-aérouliques des arbres seront présentés plus en détail dans la description des développements faits dans *Code_Saturne*.

2.1.4 Bilan de rayonnement thermique GLO

Le bilan de rayonnement de grande longueur l'onde (ou GLO) utilise la même méthode des radiosités que le rayonnement solaire, à la différence notable que toutes les surfaces sont également émettrices primaires, le flux émis étant fonction de la température de surface comme exprimé par la loi de Stefan-Boltzmann :

$$\varphi_{GLO,mis,i} = S_i \sigma \varepsilon_i T_{se,i}^4 \quad (2.2)$$

avec :

- $\varphi_{GLO,mis,i}$: flux infrarouge émis par la surface i ,
- S_i : aire de la surface i ,
- σ : constante de Stefan-Boltzmann,
- ε_i : émissivité de la surface i ,
- $T_{se,i}$: température de surface de la facette i .

Le rayonnement net émis par une surface i vers les autres surfaces j s'exprime ainsi en fonction des facteurs de forme $F_{i \rightarrow j}$:

$$\varphi_{GLO,net,i} = \sum_{j=1}^n \sigma F_{i \rightarrow j} (\varepsilon_i T_{se,i}^4 - \varepsilon_j T_{se,j}^4) \quad (2.3)$$

Cette expression nécessite donc de connaître les températures de surface. Un bilan thermique de surface pour chaque élément est donc réalisé à chaque pas de temps, avec un modèle nodal de paroi qui dépend du type de surface considérée. Ce bilan est dynamique puisqu'il prend en compte le stockage thermique dans la paroi. Ainsi, par rapport aux calculs solaires qui pouvaient se faire indépendamment les uns des autres à chaque moment de la journée, le bilan infrarouge nécessite la prise en compte d'un pas de temps qui correspond à l'heure dans toutes les simulations qui ont été effectuées.

Étant donné le caractère lui-même itératif du bilan thermique, il n'est pas possible de prendre en compte toutes les inter-réflexions infrarouges comme c'est le cas pour le rayonnement de courte longueur d'onde. On se limite donc à une seule réflexion, ce qui est déjà satisfaisant car les émissivités des surfaces urbaines considérées sont généralement supérieures à 90%.

Le bilan complet de rayonnement infrarouge se déroule en plusieurs étapes. D'abord, le rayonnement en provenance du ciel est réparti entre toutes les facettes en prenant en compte les réflexions. Des itérations sont ensuite effectuées entre les bilans thermiques de surface (et de bâtiment dans le cas où celui-ci est considéré) et le bilan de rayonnement, jusqu'à ce que les températures de surface convergent.

À ce propos, un important gain de temps de simulation a pu être obtenu en optimisant le calcul des T_{se}^4 dans l'Équation (2.3). En effet, il est apparu que cette opération pouvait occuper plus de 90% du temps car elle était effectuée pour les deux surfaces à chaque fois qu'un flux net était calculé, c'est-à-dire n^2 fois à chaque itération (pour n surfaces). En stockant la valeur des T_{se}^4 , cette opération coûteuse n'est plus réalisée que n fois par itération.

2.2 Modèle thermique de bâtiment

Le comportement thermique du bâtiment dont on suit la consommation est représenté à l'aide d'un modèle thermique nodal développé dans *Solene*. Il a les caractéristiques suivantes :

- modèle multi-zone avec une zone par étage,
- un noeud d'air et de température de mur et de vitrage intérieur par étage,
- conditions aux limites non homogènes à l'extérieur,

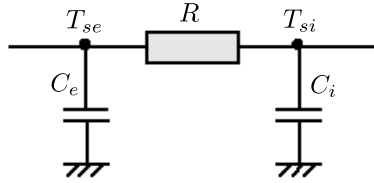


FIGURE 2.4 – Modèle de paroi élémentaire [Bouyer, 2009]

- estimation de la consommation énergétique pour une température de consigne fixée ou de la température intérieure en régime libre,
- calcul des charges latentes et sensibles, en prenant en compte les apports internes et le renouvellement d'air,
- pas de prise en compte directe des ponts thermiques.

2.2.1 Modèle de paroi élémentaire

Les parois en relation avec l'extérieur, qu'elles soient opaques ou vitrées, sont représentées par un modèle nodal avec une résistance et deux capacités thermiques (R2C) calculées à partir d'hypothèses similaires à celles du logiciel CoDyBa [Roux, 1984]. Celles-ci consistent à supposer que les profils de température sont linéaires dans chacune des couches de la paroi, ce qui est acceptable pour le pas de temps horaire qui est utilisé. Ce modèle élémentaire, dont plusieurs déclinaisons vont être utilisées, est représenté sur la Figure 2.4. La résistance thermique R , la capacité thermique de la surface intérieure C_i et la capacité thermique de la surface extérieure C_e sont calculées en fonction des paramètres thermiques et de l'épaisseur de chacune des couches composant la paroi.

La résistance thermique est calculée de manière à ce que le régime permanent soit restitué de manière exacte :

$$R = \sum_j R_j \quad (2.4)$$

avec

- R_j la résistance thermique de la couche j [m^2K/W].

À partir de l'hypothèse des profils linéaires de température au sein des couches, on obtient les expressions suivantes pour les capacités thermiques :

$$C_i = \sum_{j=1}^n \rho_j c_j e_j \beta_j \quad (2.5)$$

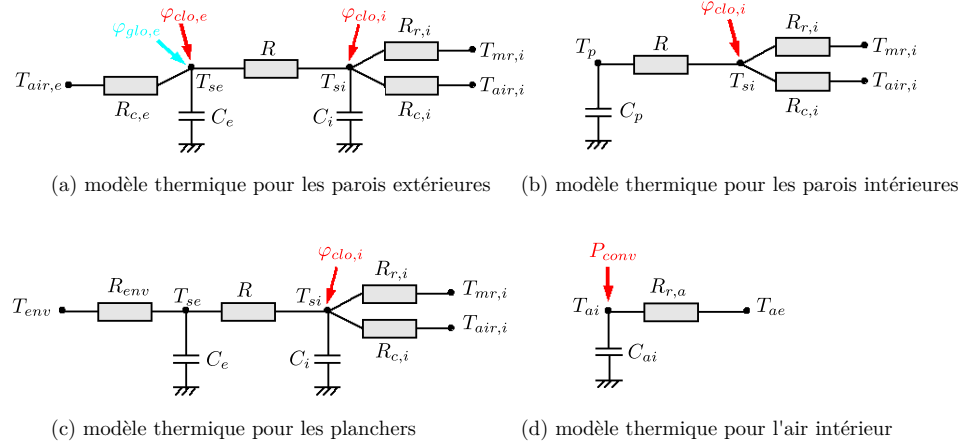


FIGURE 2.5 – Détails des modèles élémentaires composant le modèle de bâtiment [Bouyer, 2009]

$$C_e = \sum_{j=1}^n \rho_j c_j e_j (1 - \beta_j) \quad (2.6)$$

avec

- ρ_j, c_j, e_j : masse volumique, capacité thermique massique et épaisseur de la couche j ,
- β_j exprimé pour chaque couche par la relation :

$$\beta_j = \frac{\frac{R_j}{2} + \frac{R_{j-1}}{2}}{R} \quad (2.7)$$

2.2.2 Modélisation des différents composants du bâtiment

Pour chaque étage, quatre types de paroi sont représentés :

- les murs extérieurs,
- les vitrages,
- les murs intérieurs,
- les planchers ou les plafonds.

Le même modèle est utilisé pour les murs extérieurs, les vitrages et le toit (Figure 2.5(a)).

Les murs intérieurs sont pris en compte principalement pour leur effet sur l'inertie thermique du bâtiment (Figure 2.5(b)). Ils sont en contact thermique uniquement avec l'ambiance intérieure (température de l'air et température radiante). Une capacité thermique égale à la somme des capacités de chacune des couches est donc considérée.

Les planchers ont la particularité de séparer deux zones thermiques. La température de surface extérieure (T_{se} sur la Figure 2.5(c)) est donc reliée à la température de surface du plafond de l'étage inférieur, sauf pour le rez-de-chaussée pour lequel il s'agit de la température superficielle du modèle de sol. Le flux solaire directement transmis par les fenêtres est attribué en premier lieu au nœud de température de surface du plancher avant qu'une partie soit réfléchiée vers les autres surfaces intérieures.

Enfin, la capacité thermique de l'air est également considérée (Figure 2.5(d)). Sa température peut être régulée par une puissance thermique fournie par un système de chauffage ou de climatisation (P_{conv}). Sur la Figure 2.5(d), seul le flux de renouvellement d'air est représenté mais ce nœud échange également par convection avec toutes les surfaces intérieures.

2.2.3 Modèle de bâtiment

Modèle thermique nodal

L'objectif du modèle de bâtiment intégré à **Solene-microclimat** n'est pas d'atteindre le niveau de précision des codes de calcul de thermique du bâtiment commerciaux mais de permettre d'estimer la sensibilité du comportement thermique des bâtiments à des conditions extérieures hétérogènes. Sa spécificité est donc que les conditions aux limites sont finement discrétisées à l'extérieur, alors qu'il ne comprend par ailleurs qu'une seule zone ther-

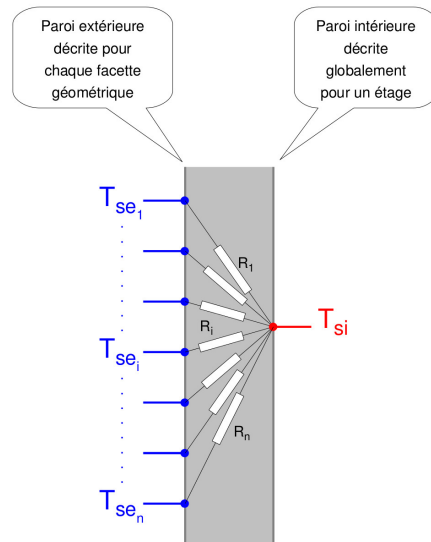


FIGURE 2.6 – Discrétisation extérieure de l'enveloppe du bâtiment [Bouyer, 2009]

mique par étage pour l'air intérieur. De plus, pour des raisons d'économie de temps de calcul, on se restreint à un seul nœud thermique intérieur par paroi pour toutes les orientations (Figure 2.6). Les échanges infrarouges entre les surfaces se font par l'intermédiaire d'un nœud de température radiante moyenne, tandis qu'elles échangent par convection avec le nœud d'air intérieur. Le réseau complet est représenté sur la Figure 2.7. Chaque étage courant est ainsi représenté par huit nœuds thermiques :

- deux pour les températures de surface intérieure des murs extérieurs et des vitrages,
- trois pour les températures de surface du plancher, du plafond et des murs intérieurs,
- un pour la température interne des murs intérieurs,
- un pour la température d'air intérieure,
- un pour la température radiante moyenne.

Des réseaux thermiques spécifiques sont utilisés pour le dernier étage dont le plafond est en contact avec le toit, et pour le rez-de-chaussée, dont le nœud de plancher est lié au modèle de sol.

Renouvellement d'air, charges internes, flux solaires

Le renouvellement d'air est pris en compte pour chaque étage. On a la possibilité de choisir la position des entrées d'air neuf ou de les répartir sur l'ensemble des façades. Par défaut, il est calculé en fonction de l'occupation du bâtiment. Si le modèle a été conçu pour un bâtiment ventilé mécaniquement avec un débit maîtrisé, rien n'empêche de l'adapter à la ventilation naturelle en calculant les fuites en fonction du vent ou même de la pression dynamique en façade, puisqu'elle est accessible grâce au couplage aéraulique.

Les apports internes dus aux équipements et aux occupants sont attribués directement aux nœuds d'air intérieur, qu'il s'agisse de flux sensibles ou latents.

Un bilan hydrique est réalisé sur l'air intérieur et permet de calculer l'éventuelle charge latente du système de climatisation.

Enfin, le flux solaire direct transmis par les vitrages est attribué au nœud de surface du plancher. Le rayonnement diffus transmis par les vitrages et le flux direct réfléchi par le sol sont répartis entre toutes les parois intérieures au prorata de leur surface.

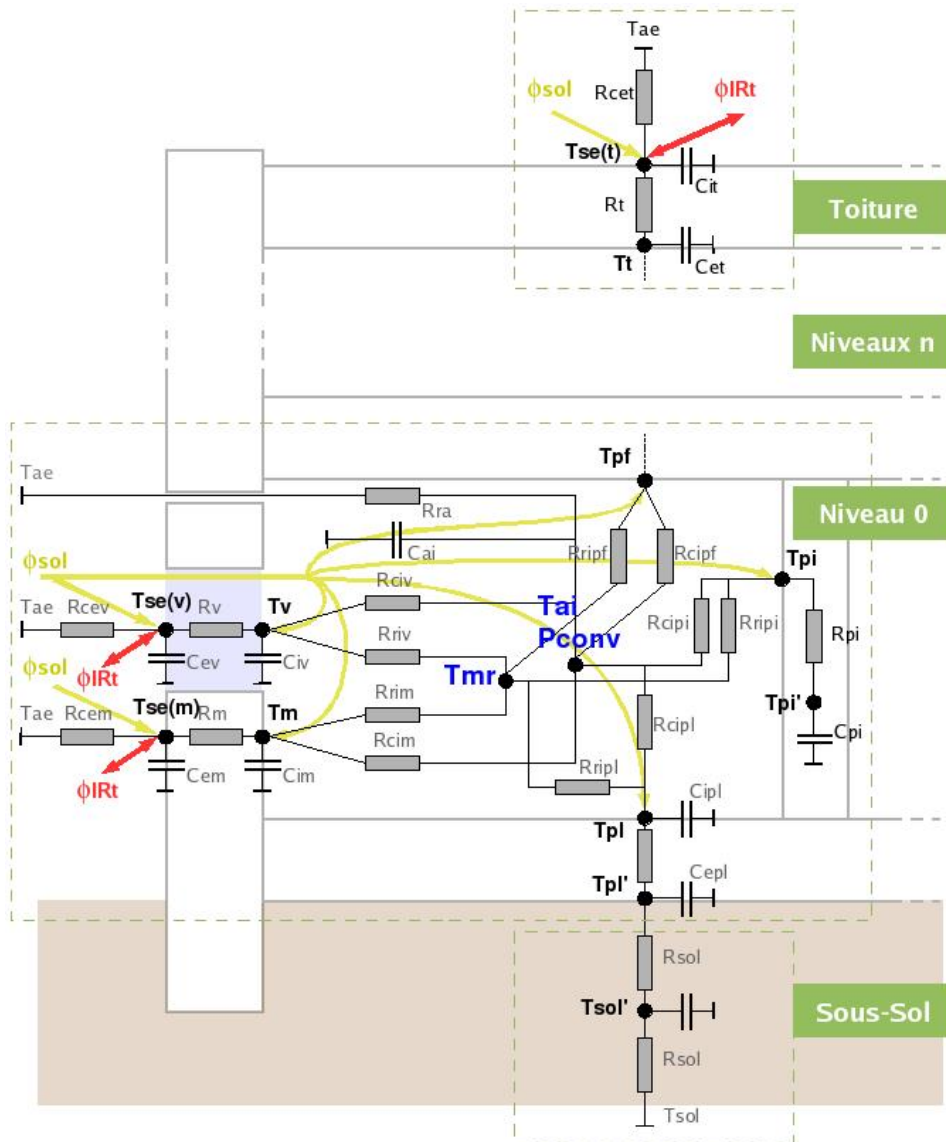


FIGURE 2.7 – Schématisation de la modélisation thermique complète d'un bâtiment dans l'outil de simulation [Bouyer, 2009]

2.3 Simulation thermoaéraulique avec Code_Saturne

Par rapport aux différents modèles présentés dans le chapitre 1, l'intérêt de **Solene-microclimat** réside dans le fait qu'il comprend à la fois un modèle thermo-radiatif et un modèle atmosphérique à petite échelle et que les deux peuvent être couplés, c'est-à-dire qu'ils vont s'échanger des données et interagir itérativement à chaque pas de temps.

La mécanique des fluides numérique consiste à résoudre les équations des écoulements dites de Navier-Stokes généralement grâce à la méthode des volumes finis. Elle permet ainsi de représenter sur chaque maille du volume de calcul les caractéristiques de vitesse et de turbulence du vent, ainsi que les transferts d'énergie et de masse. Dans notre cas, on s'intéresse ainsi à l'enthalpie de l'air, c'est-à-dire à l'énergie sensible qu'elle transporte, ainsi qu'à son humidité spécifique. Pour le modèle aéraulique, ces deux grandeurs sont des scalaires dont il convient de prendre en compte le transport et la diffusion.

Depuis la première mise en place du couplage thermoaéraulique avec **Solene**, plusieurs codes de mécanique des fluides ont été utilisés. Cela a commencé avec **N3S** [Vinet, 2000], un code déjà développé par EDF, puis **Fluent** [Bouyer, 2009]. Pour différentes raisons stratégiques, le logiciel désormais employé est **Code_Saturne**, un programme open-source développé par EDF.

2.3.1 Présentation de Code_Saturne

Code_Saturne est un code de calcul de mécanique des fluides numérique générique développé par EDF depuis 1997. Il est distribué sous licence open-source **GPL** depuis 2007. Il est principalement composé en langage **fortran**. Une interface graphique est disponible, avec des fichiers de configuration au format **xml**. Ces données techniques sont en effet déterminantes pour le contrôle des simulations :

- les modèles spécifiques utilisés pour représenter l'atmosphère urbaine, notamment les profils verticaux en entrée de veine, sont définis dans des routines en **fortran** prévues à cette effet, lesquelles auront accès à des fichiers de données spécifiques,
- le contrôle et la paramétrisation des simulations se font par l'intermédiaire du fichier de configuration en **xml**, qui est édité à partir des scripts de l'outil de couplage écrit en langage **python**.

2.3.2 Modèle de turbulence

Il existe plusieurs techniques pour résoudre les équations de Navier-Stokes. La plus précise consiste à les résoudre de façon exacte et est appelée DNS pour Direct Numerical Simulation. Le temps de calcul requis est malheureusement rédhibitoire pour une utilisation avec une géométrie complexe en raison de la précision du maillage que cette technique requiert pour un écoulement turbulent. On rencontre le même problème avec l'approche intermédiaire appelée LES (pour Large Eddy Simulation), qui consiste à prendre en compte différentes échelles pour la turbulence et pour les écoulements visqueux proches des parois.

Les techniques les plus souvent utilisées pour représenter les écoulements dans la couche limite urbaine à petite échelle sont les méthodes RANS (pour Reynolds-Averaged Navier-Stokes simulation). Il s'agit de considérer une turbulence moyenne au lieu de valeurs instantanées. Compte tenu de la non-linéarité des équations de Navier-Stokes, cela fait apparaître de nouvelles variables inconnues. Des équations supplémentaires sont alors définies permettant de "fermer" le système d'équations. Nous utiliserons le modèle de turbulence $k - \varepsilon$ standard en régime permanent.

Si la mécanique des fluides numérique est de plus en plus utilisée pour l'étude du vent en milieu urbain, elle n'en demeure pas moins soumise à de nombreuses réserves. Celles-ci sont notamment émises par plusieurs référentiels préconisant les meilleures pratiques à mettre en œuvre dans ce contexte de modélisation [Tominaga et al., 2008; Franke et al., 2007]. La difficulté à représenter un domaine ouvert avec des échelles très différentes et des surfaces fortement hétérogènes en montre les limites, notamment celles des modèles de turbulence pour les méthodes RANS qui sont les plus économes. Tominaga et al. [2008] précisent ainsi qu'il n'est pas possible de connaître à l'avance le meilleur modèle de turbulence à utiliser, ni une valeur de finesse de maillage optimale. Il faut ainsi nécessairement passer par une comparaison expérimentale en soufflerie et réaliser au moins une étude de sensibilité sur la finesse du maillage.

Ces réserves sont justifiées en ce qui concerne les phénomènes pour lesquels une grande précision est requise dans la description de l'écoulement de l'air, comme c'est le cas pour l'étude de la dispersion des polluants ou du confort thermique extérieur. La mécanique des fluides numérique apporte une représentation très détaillée par rapport à ce qui se fait habituellement pour prendre en compte les conditions de vent dans les modèles thermiques de bâtiment. Il conviendra donc d'analyser les résultats aérauliques avec ces précautions. Cette approche fine n'en paraît pas moins pertinente pour une application à la thermique du bâtiment.



FIGURE 2.8 – Simulation de la vitesse du vent : coupe verticale dans une veine numérique

2.3.3 Technique de la veine numérique

La technique employée est celle de la veine numérique, qui consiste à reconstituer de façon virtuelle un tunnel de vent atmosphérique utilisé pour des expériences sur modèles réduits. Les simulations sont donc réalisées sur un domaine ouvert, avec des conditions de glissement sur la face supérieure, et des faces latérales qui sont soit des entrées avec un profil vertical de vent et de turbulence, soit des sorties libres. Un exemple est donné Figure 2.8. On peut y remarquer la variation verticale de la vitesse du vent correspondant au profil puissance, l'effet de sillage en aval des bâtiments ainsi que l'effet des recirculations en amont.

Seule la surface extérieure des bâtiments est représentée et constitue une partie de l'enveloppe de la veine numérique. Traditionnellement, la veine a une forme correspondant effectivement à celle d'un tunnel expérimental avec une distance plus importante entre la maquette urbaine et la surface définie comme une sortie libre. Afin de pouvoir représenter toutes les directions du vent sans changer de maquette numérique, notre veine comporte une base carrée. En fonction de la direction du vent, les faces verticales de la veine sont définies comme des entrées ou des sorties.

Les simulations aérauliques comporteront une phase d'initialisation consistant à calculer les champs de vitesse pour des classes dominantes de conditions de vent. Les simulations ensuite utilisées lors du couplage avec **Solene** sont réalisées sur des champs de vitesse et de turbulence fixés. Techniquement, toutes les simulations réalisées pour l'initialisation sont enregistrées et repérées par un numéro qui permet également de retrouver la vitesse et la direction du vent en entrée. Lors des simulations thermiques, on repère les conditions d'entrée les plus proches de celles observées pour le pas de temps donné.

2.3.4 Conditions aux limites en entrée de veine

Le profil vertical de vitesse en entrée de veine est défini par une loi puissance [Guyot, 1999] :

$$v_e(z) = v_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (2.8)$$

avec :

- v_{ref} : vitesse du vent à la hauteur de référence
- z_{ref} : hauteur de référence de la mesure météorologique
- $\alpha = 0,3$

Le profil vertical d'énergie cinétique turbulente est considéré homogène [Sini et al., 1996] :

$$k_e = I v_{ref}^2 \quad (2.9)$$

avec :

- $I = 0,3\%$: intensité de turbulence.

Le profil vertical du taux de dissipation d'énergie turbulente est donné par l'équation [Sini et al., 1996] :

$$\varepsilon_e(z) = C_\mu^{3/4} \frac{k_e^{3/2}}{\kappa z} \quad (2.10)$$

avec :

- $\kappa = 0,41$: constante de Von Karman,
- $C_\mu = 0,09$: constante empirique du modèle de turbulence $k - \varepsilon$.

Enfin, les profils verticaux de température et d'humidité spécifique en entrée de veine sont homogènes avec des valeurs égales aux mesures ou aux données météorologiques.

2.3.5 Conditions aux limites pour les murs

La condition de non glissement est respectée pour les parois solides que constituent la face inférieure de la veine et les surfaces urbaines.

Compte tenu des exigences en termes de temps de simulation, il n'est pas envisageable d'utiliser des maillages assez fins pour que des lois de paroi développées pour représenter les couches limites soient applicables. Les transferts thermiques et d'humidité se feront donc directement comme des sources volumiques dans les cellules proches des parois.

2.3.6 Représentation hygro-aéraulique des arbres

Effet des arbres sur la quantité de mouvement et sur la turbulence

Les arbres ralentissent plus ou moins le vent en fonction de leur densité de feuillage. Cet effet est représenté par l'apparition d'un terme source attribué aux cellules d'arbre dans l'équation de quantité de mouvement qui s'exprime de la manière suivante :

$$S_{v_i} = -\rho_{air} C_d LAD \|\vec{v}\| v_i \quad (2.11)$$

avec

- $C_d = 0,2$: coefficient de traînée pour les arbres
- LAD : densité volumique de feuillage [m/m^3]

Le terme source pour la turbulence est donné en fonction de deux coefficients empiriques β_p et β_d :

$$S_k = \rho_{air} C_d LAD (\beta_p \|\vec{v}\|^3 - \beta_d \|\vec{v}\| k) \quad (2.12)$$

avec :

- $\beta_p = 1,00$: coefficient empirique de conversion d'énergie cinétique moyenne en énergie cinétique turbulente par l'effet de sillage,
- $\beta_d = 5,03$: coefficient empirique de dissipation d'énergie cinétique turbulente par déflexion.

Le terme source dans la deuxième équation de fermeture de la turbulence est donné par :

$$S_\varepsilon = C_{4\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} S_k \quad (2.13)$$

avec :

- $C_{4\varepsilon} = 0,78$: constante empirique de fermeture de la turbulence du modèle $k - \varepsilon$, spécifique à la végétation.

Sources de chaleur et d'humidité dues aux arbres

Le calcul de la quantité d'eau évaporée par les feuilles d'un arbre se base sur une analogie électrique considérant des résistances hydriques depuis le système racinaire jusqu'à l'air (Figure 2.9). Le taux d'évaporation volumique (E_v en [$kg.m^{-3}.s^{-1}$]) est calculé en considérant les résistances hydriques des stomates (r_{sto}) et du couvert végétal (r_{aero}), entre l'air sous les stomates (saturé en humidité, q_{sat}) et l'air de référence situé en dehors de la zone

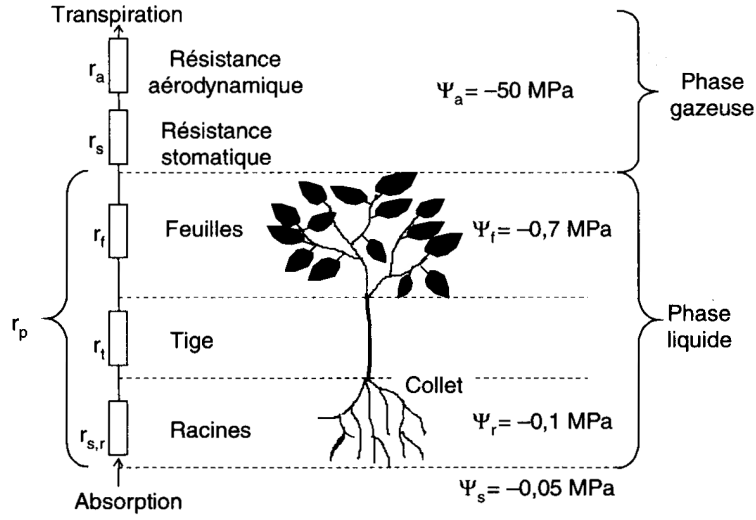


FIGURE 2.9 – Analogie électrique du cheminement de l'eau dans la plante [Guyot, 1999]

de perturbation aéraulique de la plante (d'humidité spécifique $q_{z_{ref}}$), le tout multiplié par la densité foliaire (LAD).

$$E_v = \rho_{air} \cdot LAD \frac{q_{sat} - q_{z_{ref}}}{r_{aero} + r_{sto}} \quad (2.14)$$

Le point de référence utilisé pour le calcul des flux évaporatifs pose question. En effet, on peut se demander quel est l'intérêt de prendre en compte les paramètres locaux, comme cela a été fait jusqu'à présent, si la loi utilisée a été établie pour une prise en compte de paramètres météorologiques. Une solution envisagée est de considérer l'humidité locale à l'intérieur du volume et de ne pas utiliser de résistance aéraulique, celle-ci étant justement sensée représenter les effets de résistance à l'échelle de l'arbre, qui sont pris en compte dans le calcul aéraulique par la porosité.

Du point de vue thermique, il est important de noter que le stockage dans le feuillage est négligé et que celui-ci est considéré à la température de l'air dans la cellule correspondante. Le bilan thermique peut donc s'écrire somme suit :

$$R_{net} = H + LE_v \quad (2.15)$$

H étant le flux thermique transmis à l'air par convection. En passant en volume, on peut donc calculer le flux transmis à l'air par une cellule d'arbre

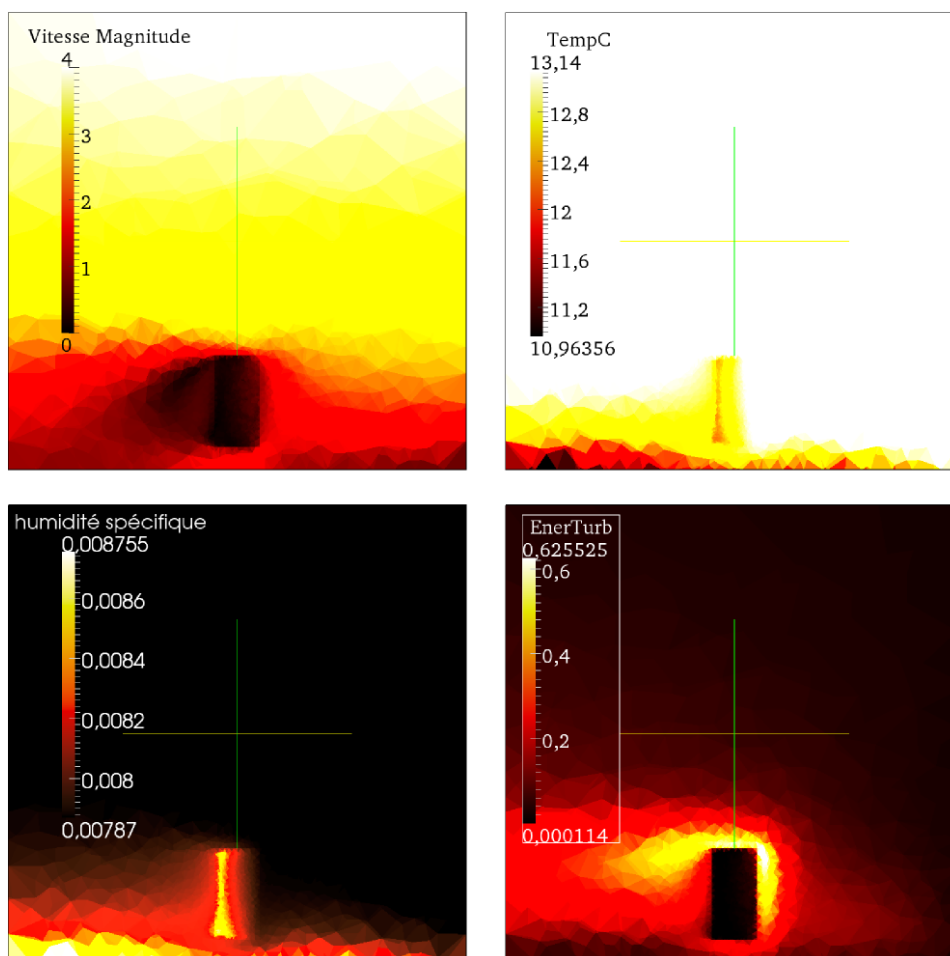


FIGURE 2.10 – Simulation thermo-hygro-aéraulique pour un arbre isolé

(S_h) en fonction du rayonnement incident reçu et de la quantité d'énergie utilisée pour l'évapotranspiration :

$$S_h = R_{net,v} - LAD \cdot L \cdot E_s \quad (2.16)$$

La conservation de l'énergie a été respectée. Pour les cellules périphériques, le terme source est la différence entre le flux radiatif incident et le flux évaporatif, tandis que les cellules centrales n'ont qu'un terme puits évaporatif.

Les résultats pour un arbre isolé sont présentés Figure 2.10. On remarque que la température diminue d' $1^\circ C$ dans l'arbre et jusqu'à $2^\circ C$ dans son sillage où l'effet de l'eau évaporée par l'arbre s'ajoute à celui du sol végétal. On remarque que la vitesse est quasiment nulle dans l'arbre, ce qui explique la forte concentration en humidité et le refroidissement de l'air en son sein.

2.4 Couplage

2.4.1 Principe du couplage

Les possibilités offertes par le couplage sont nombreuses. On peut relever trois principaux niveaux d'interactions.

Dans le premier cas, le modèle aéraulique ne sert qu'à fournir des conditions aux limites pour le modèle thermique de bâtiment sans qu'il n'y ait de retour. On ne peut pas vraiment dire qu'il s'agit d'un couplage.

Dans le second cas, seuls la diffusion et le transport de la chaleur et de l'humidité de l'air sont considérés. Il y a bien un couplage mais celui-ci ne perturbe pas le champ d'écoulement. La convection naturelle n'est pas moteur de l'écoulement.

Le couplage le plus fort consiste à prendre en compte l'effet de la température sur la densité de l'air. Le modèle thermique va donc induire des écoulements gravitaires liés à la convection naturelle. C'était l'approche utilisée au départ de *Solene-microclimat* alors qu'elle était effectivement justifiée pour l'évaluation du confort dans les espaces extérieurs. Elle peut être également déterminante dans le cas de la dispersion de polluants, particulièrement dans les endroits confinés comme les rues canyon. Bouyer [2009] a néanmoins montré qu'elle n'était pas utile dans le cas de l'estimation de la consommation énergétique du bâtiment, ce qui a été confirmé par quelques essais que nous avons pu mener.

Le couplage que nous avons utilisé est représenté à la Figure 2.11. Après deux étapes d'initialisation, il correspond à une imbrication de résolutions itératives. Pour un pas de temps, la simulation se déroule de la manière suivante :

Étape 1 L'étape d'initialisation aéraulique consiste à réaliser une simulation des écoulements du vent avec *Code_Saturne* en conditions de température et d'humidité de l'air extérieur homogènes. Pour des conditions de vent données, on obtient ainsi les champs de vitesse et de turbulence autour des bâtiments. À partir de là et tant qu'on ne passe pas au pas de temps suivant, les champs de quantité de mouvement sont figés pour les simulations aérauliques.

Étape 2 La première simulation *Solene* est effectuée en considérant les vitesses de vent issues de l'étape 1 pour le calcul des coefficients d'échange superficiel par convection, mais avec une température extérieure et une humidité spécifique homogènes correspondant toujours aux conditions météorologiques. On obtient ainsi les flux latents et sensibles à introduire comme termes sources dans les cellules périphériques du modèle aéraulique.

Étape 3 La deuxième simulation réalisée avec *Code_Saturne* prend en compte les termes sources pour la chaleur et l'humidité. Elle permet d'obtenir

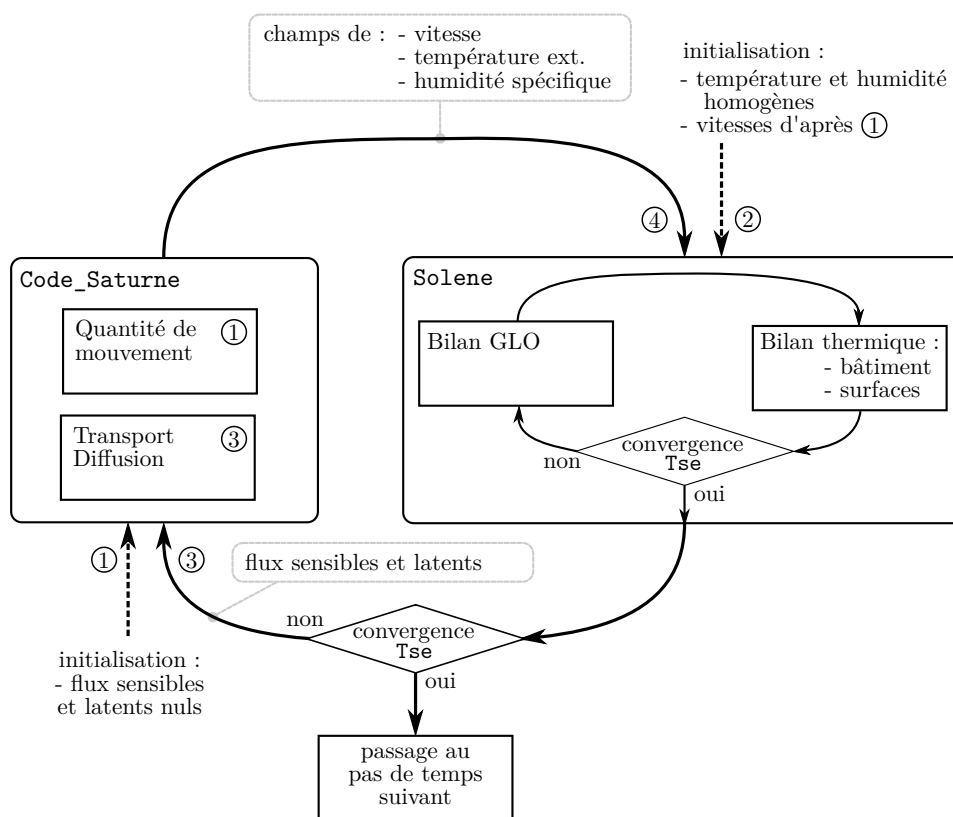


FIGURE 2.11 – Principe de la simulation couplée

les températures d'air proches des parois, qui sont cette fois différentes de la température d'air en entrée de veine.

Étape 4 La deuxième simulation avec **Solene** prend cette fois en compte la modification des températures d'air et de l'humidité. On obtient de nouvelles températures de surface et de nouveaux flux thermiques. Les étapes 3 et 4 peuvent ensuite être répétées jusqu'à ce que les écarts obtenus sur les températures de surface extérieures respectent les critères de convergence définis.

Dans la grande majorité des cas, après les deux étapes d'initialisation, une seule itération est nécessaire. Si le troisième calcul avec **Code_Saturne** conduit encore souvent à un changement de la température d'air à certains endroits, l'effet de cette modification est négligeable sur les résultats issus du troisième calcul de **Solene**.

2.4.2 Mise en œuvre du couplage

Le choix de python

Le début de cette thèse a été marqué par le choix de changer d'outil CFD. Ce choix a rendu obsolète la plupart des développements qui avaient été faits pour réaliser le couplage, essentiellement basés sur des exécutables écrits en **C** (qui appelaient eux-mêmes d'autres exécutables) et des scripts **batch** (pour MS Windows) ou **shell** pour linux. Plutôt que de réécrire ces fonctions sur le même principe, le choix a été fait de passer à un environnement plus flexible basé sur le langage de script orienté objet, **python**. Ses atouts en font une solution technique particulièrement bien adaptée à nos besoins. À mi-chemin entre les langages de scripts et les langages compilés orientés objet comme le **C++**, il permet également de reproduire des environnements interactifs à la manière de **Matlab** grâce à une console évoluée : **ipython**.

Il permet :

- d'exécuter aisément des programmes,
- d'interagir directement avec certains logiciels dotés d'une interface avec **python**
- de gérer des fichiers de configuration complexes, en s'interfaçant avec des bases de données,
- de traiter des données numériques et de réaliser directement des rendus graphiques,
- de créer des exécutables indépendants.

Pour permettre le couplage, l'outil doit être capable de :

- paramétrer correctement les deux outils : de nombreuses informations sont redondantes entre les deux modèles, en particulier la géométrie utilisée. Leur correspondance doit être minutieusement respectée. Le principe est donc d'utiliser une paramétrisation commune et de laisser l'outil éditer les fichiers de paramétrisation propres à chacun des modèles.
- transmettre les données entre les différents outils,
- coordonner le lancement des simulations.

En plus du couplage en tant que tel, l'outil développé a été utilisé pour :

- convertir et manipuler les fichiers géométriques, notamment depuis les empreintes des bâtiments issues d'un SIG jusqu'au maillage volumique de la veine numérique, en générant également un format surfacique de **Solene**,
- gérer les différents cas de simulation par l'intermédiaire de fichiers de configuration et d'une arborescence de fichiers d'entrée et de sortie,
- automatiser et gérer les analyses paramétriques, notamment la tech-

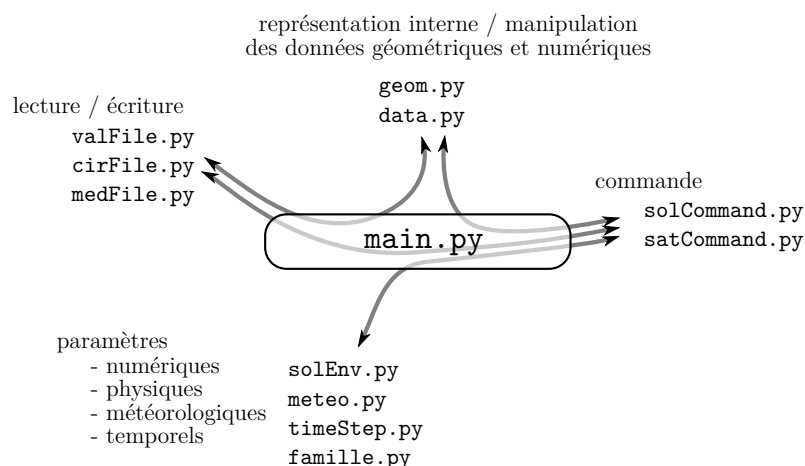


FIGURE 2.12 – Schéma de la structure de l'outil de couplage

– nique d'optimisation des paramètres pour le modèle de façade végétale,
 – traiter les données de sortie, par l'intermédiaire d'outils statistiques ou graphiques.

Structure de l'outil de couplage

L'objectif visé dans le choix de l'adoption d'une approche orientée objet est de se rapprocher un peu des canons actuels du génie logiciel afin d'améliorer l'adaptabilité et la flexibilité du code. Cette démarche n'a pas la prétention de proposer une nouvelle interface à *Solene* mais vise à explorer les potentialités de son utilisation dans un environnement objet et à contribuer ainsi à son redéploiement actuellement en cours.

Le principe du fonctionnement de l'outil de couplage est représenté à la Figure 2.12. Il consiste à séparer la lecture et l'écriture des fichiers, la représentation des données à traiter telles que les géométries et les résultats de simulation, la gestion des différentes catégories de paramètres (numériques, temporels...) et le contrôle des composants externes.

Ainsi, l'interface avec les logiciels est réalisée à chaque fois par deux objets dédiés : le premier pour éditer les fichiers de configuration (par exemple `solEnv.py`), le deuxième pour lancer les exécutables (`solCommand.py`). Depuis la routine principale, il devient aisé d'adapter l'interface avec un autre logiciel en gardant exactement les mêmes processus.

La même démarche est utilisée pour la gestion des fichiers : des objets de lecture et d'écriture des fichiers sont spécifiques à chaque format de fichier, en étant liés à une représentation interne commune des données, notamment

en ce qui concerne la géométrie et l'identification des éléments.

Enfin, les routines dédiées à la paramétrisation permettent de séparer la gestion des fichiers de paramètres de chacun des logiciels pour ce concentrer sur les paramètres en tant que tels. Il y a donc, par exemple, une représentation interne des données météorologiques qui permet d'ajouter facilement de nouveaux types de fichiers météorologiques ou de relevés de mesures sur site.

Gestion des types de surface

La variété des types de surface et le fait qu'elles soient prises en compte différemment suivant les modèles rend la gestion des données attributaires des facettes particulièrement délicate.

Ontologiquement, chaque maille surfacique appartient à plusieurs ensembles :

une face, qui est une forme géométrique plane constituée d'autres facettes coplanaires. Elle est également définie par un contour extérieur et un ou plusieurs trous. Elle peut être utilisée en tant que telle pour traiter les données mais elle est surtout nécessaire à la définition des masques dans **Solene**, dont le traitement est plus efficace s'ils ne sont pas maillés.

une famille, qui correspond à l'ensemble des faces et des facettes ayant les mêmes caractéristiques,

une classe, qui correspond au type de surface urbaine (toit, sol, façade, enveloppe d'arbre...), qui va définir de quelle manière la surface est prise en compte dans chacun des modèles.

Toutes les facettes doivent appartenir à une seule famille et à une seule classe. Il existe des classes qui ne sont pas définies géométriquement et n'ont donc pas de facettes attribuées. C'est le cas des murs intérieurs du bâtiment.

Les classes utilisées sont présentées dans le Tableau 2.1. Il y est précisé si elles interviennent dans le bilan radiatif CLO, ce qui nécessite que soient connues leurs caractéristiques radiatives. Si elles font l'objet d'un bilan thermique de façon isolée ou connectées à un modèle de bâtiment, il faudra également renseigner les caractéristiques thermiques de chaque couche (épaisseur, conductivité thermique et capacité thermique massique). Certaines classes nécessitent que soient attribuées les caractéristiques de la végétation (*LAI*, épaisseur et coefficient d'extinction et éventuellement taux d'évapotranspiration). Enfin, elles peuvent être considérées par **Code_Saturne** comme des murs auxquels peuvent être attribuée une rugosité, ou comme une surface interne au maillage qui n'est utilisée que pour le repérage mais n'a pas de

nom	bilan radiatif CLO	bilan thermique de surface et GLO	bilan thermique du bâtiment	modèle végétal	face de bord pour Code_Saturne	face interne pour Code_Saturne
mur	x	x	x		x	
mur_veg	x	x	x	x	x	
vitrage	x	x	x		x	
toit	x	x	x		x	
toit_veg	x	x	x	x	x	
plancher_int			x			
plancher_bas			x			
interieur			x			
batiments	x	x			x	
paroi_veg	x	x		x	x	
sol	x	x			x	
sol_veg	x	x		x	x	
masque_sol	x				x	
surface_arbre	x					x
sat_wall					x	

TABLEAU 2.1 – Classes de surface

représentation physique (c'est le cas des surfaces extérieures d'arbre).

La chaîne de traitement des données attributaires de surface est représentée à la Figure 2.13. Trois niveaux de description sont utilisés et constituent autant de fichiers de configuration. Leur chemin d'accès est précisé dans le fichier de configuration principal, `param.xml`. Les familles sont décrites dans le fichier `familles.xml`. Pour chacune d'elles, la classe de surface et les paramètres qui sont nécessaires à sa représentation y sont précisés. Les couches qui constituent les parois sont décrites en termes d'épaisseur et de type de matériaux, le fichier `matériau.xml` permettant de faire le lien avec leurs propriétés thermiques. Enfin, les familles sont attribuées aux mailles surfaciques par l'intermédiaire d'un descripteur contenant leur identifiant pour chaque facette.

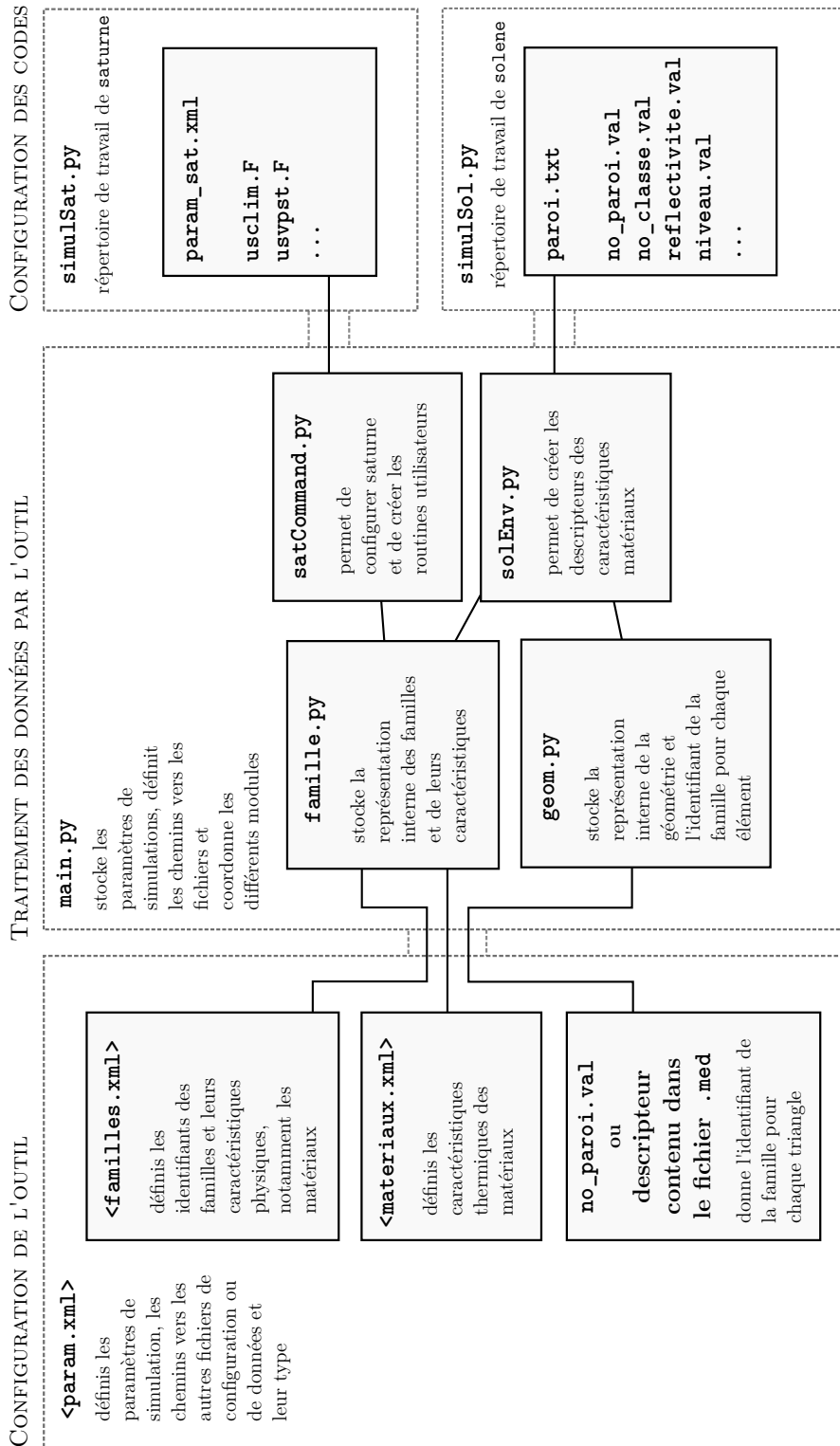


FIGURE 2.13 – Schéma de principe de la gestion des types de surface dans l'outil de couplage

La représentation interne de la géométrie et de ses données attributaires permet ensuite aux routines de contrôle de chacun des deux logiciels d'éditer les fichiers de configuration qui leur sont nécessaires.

2.4.3 Chaîne de traitement géométrique

Le choix d'utiliser une maquette géométrique réaliste pour la scène urbaine rend assez complexe la chaîne de traitement géométrique, la principale contrainte étant de disposer des formats de fichier nécessaires à **Solene** et à **Code_Saturne** tout en gardant une cohérence entre les deux. En effet, de par leurs caractéristiques intrinsèques, ces outils nécessitent des informations géométriques différentes :

- le maillage de **Solene** est uniquement surfacique, et nécessite de pouvoir identifier les faces en plus des mailles élémentaires afin d'optimiser un certain nombre d'opérations géométriques,
- celui de **Code_Saturne** est volumique et ne représente que l'air extérieur. Il nécessite de déterminer un domaine de simulation correspondant à la veine numérique.

Les formats utilisés par les outils de pré-traitement (modeleur, SIG) ainsi que pour le post-traitement sont également différents. Ces contraintes conditionnent d'ailleurs en partie leur choix.

Le principe de traitement des géométries est représenté à la Figure 2.14. Les données extraites de la base de données topographiques de l'IGN avec **Orgis-GIS** comprennent l'empreinte au sol des bâtiments, l'altitude de chacun des points qui délimitent leur contour ainsi que la hauteur moyenne des bâtiments. La première étape consiste donc à aplanir les toits constitués de surfaces gauches (Figures 2.14(a) et (b)). Elle est réalisée à partir de la représentation interne de la géométrie dans l'outil de couplage. Les surfaces des toits sont ensuite importées dans l'outil de modélisation géométrique de la plate-forme **salome**. Grâce à une routine **python**, elles sont extrudées jusqu'au niveau du sol. On obtient ainsi le volume des bâtiments et leurs enveloppes (Figure 2.14(c)). Enfin, après avoir modélisé la veine numérique, les volumes des bâtiments lui sont soustraits par une opération booléenne. Il ne reste alors plus que le volume d'air de la veine numérique. Les bâtiments ne sont plus représentés que par leurs enveloppes (Figure 2.14(d)).

Les étapes suivantes, qui ne sont pas représentées, consistent à réaliser le même type d'opérations volumiques pour les arbres, puis de découper dans l'enveloppe des bâtiments les faces correspondants aux différents types de surface (mur, vitrage, végétation...) et à la répartition des étages pour le modèle thermique de bâtiment.

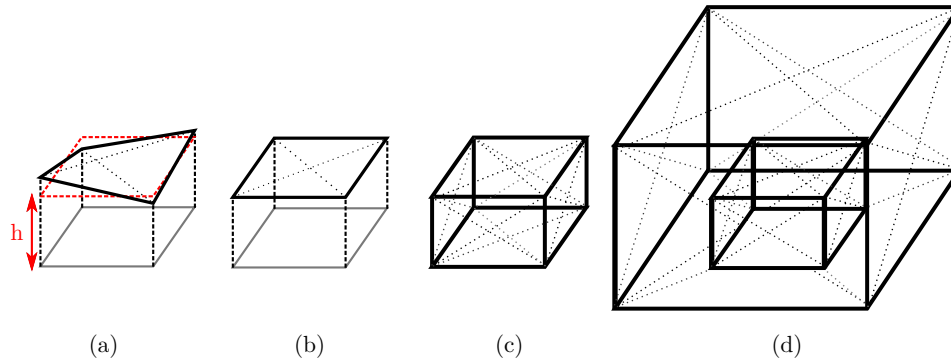


FIGURE 2.14 – Principe du traitement géométrique

Une fois la maquette complète, elle est chargée dans le logiciel de maillage `gmsh` par l'intermédiaire d'un fichier au format `brep`. Des longueurs caractéristiques sont attribuées à chacun des points afin de déterminer la taille des mailles. Enfin, les maillages surfacique puis volumique sont effectués. La géométrie maillée est ensuite exportée au format d'entrée de `Code_Saturne`, `med`, dans lequel le nom des familles est également attribué.

La dernière étape consiste à extraire la maquette `Solene` du maillage volumique. L'opération de maillage entraînant malheureusement un appauvrissement sémantique, il faut retrouver les contours des faces et identifier les facettes qui les composent.

2.4.4 Retour d'expériences

Si le principe d'origine de l'outil de couplage a fait ses preuves et qu'il s'est montré efficace, son niveau de finition n'est pourtant pas de la qualité espérée. Il aurait sans doute fallu une couche d'abstraction supplémentaire, notamment pour deux aspects critiques :

- la représentation des données de simulation et de leurs discrétisations temporelle et spatiale,
- la prise en compte de l'échelle de temps, qui est restée calquée sur celle de `Solene` par souci, initialement, d'efficacité et qui a montré ses limites.

Pour d'autres aspects, notamment la gestion des familles, l'approche était sans doute la bonne mais n'a pas toujours été respectée encore une fois par souci d'efficacité, conduisant encore à certaines incohérences dans la gestion des données attributaires.

Le temps important qui a été consacré au développement de l'outil de couplage s'est néanmoins avéré payant à plusieurs points de vue.

La manipulation aisée des formats géométriques a permis de s'adapter rapidement aux exigences diverses des modèles et aux différents types de données d'entrée. Si la représentation interne peut encore être grandement améliorée, elle a déjà permis une grande flexibilité et une grande réactivité dans le traitement des fichiers géométriques, à la fois pour le pré-traitement et la définition des données attributaires et pour le traitement des données de sortie et leur représentation graphique.

L'automatisation de la paramétrisation a permis de gérer facilement les grands nombres de simulations pour les analyses paramétriques, notamment dans le cadre des comparaisons avec les résultats expérimentaux (chapitre 3). La modularité des scripts de contrôle a également permis de faciliter grandement la mise en œuvre du couplage à la fois à des fins de test, de développement de modèles (celui de la façade végétale présenté au chapitre 4) et de simulations, notamment pour l'analyse de sensibilité du couplage (chapitre 5). Elle a permis de gérer sereinement les différents scénarios de végétalisation et d'optimiser les longues périodes des simulations nécessaires à l'étude finale (chapitre 6). À l'aide de plusieurs entités de l'outil de couplage, il a ainsi été possible de faire tourner une dizaine de cas sur deux stations de travail effectuant des calculs en parallèle (une pour **Solene** et l'autre pour **Code_Saturne**) pendant plus d'une semaine sans intervention extérieure.

Enfin, si la manipulation de l'outil demande encore des compétences techniques assez pointues, un pas important a été franchi pour en faire un logiciel maîtrisable par des utilisateurs moins portés sur la programmation.

2.5 Conclusion

La prise en main des outils de simulation radiative, de la thermique du bâtiment et de la mécanique des fluides numérique n'est pas vraiment aisée quand il s'agit de les utiliser chacun de leur côté. Elle l'est encore moins quand il s'agit de les faire travailler ensemble. Si l'essentiel des hypothèses et des techniques de mise en œuvre avait déjà été validé et testé par des travaux précédents au CERMA, il a quand même fallu tout adapter à un nouvel outil de simulation thermo-aéraulique. Cela s'est effectué par le développement d'un nouvel outil de couplage dont la modularité s'est montrée appréciable tout au long des études réalisées dans cette thèse.

La mise en place de ce modèle couplé n'est pas qu'un exercice ou une performance, c'est une réponse à la réalité des difficultés rencontrées pour représenter le milieu urbain et les interactions complexes entre les phéno-

mènes radiatifs, thermiques, hydriques et aérauliques, notamment à petite échelle. Ce modèle doit donc faire ses preuves à l'aune de comparaisons avec des données de terrain, ce qui sera l'objet du chapitre suivant, mais aussi montrer son intérêt dans la prise en compte de processus couplés dans lesquels intervient la végétation, ce qui constitue la problématique de cette thèse.

Deuxième partie

Modèles de surface

Chapitre 3

Comparaison avec les données expérimentales du quartier Pin Sec : Validation des modèles de surface

Sommaire

3.1	Méthodes de validation de l'outil de couplage .	64
3.2	Présentation de la campagne FluxSAP	66
3.3	Modèle de sol	69
3.4	Température du toit	75
3.5	Température de façade	81
3.6	Conclusion	83

`Solene-microclimat` est un assemblage de plusieurs modèles physiques issus de domaines variés. Certains d'entre eux sont largement utilisés et ont été validés dans leurs champs d'application respectifs, qu'il s'agisse de `Code_Saturne` pour la mécanique des fluides, de `Solene` pour l'ensoleillement et le rayonnement thermique. L'utilisation de l'analogie électrique pour la représentation thermique multizone du bâtiment, ainsi que le modèle de paroi ont également fait leurs preuves. Des validations supplémentaires restent néanmoins nécessaires à la fois pour obtenir des combinaisons de paramètres correspondant à des conditions réalistes, et pour se prémunir de certains écueils qui peuvent être liés à la mise en œuvre du couplage, à une mauvaise implémentation des modèles, à des problèmes numériques ou encore à une mauvaise utilisation des codes existants.

Du fait de son objectif de représentation fine des interactions entre le bâtiment et son environnement, `Solene-microclimat` donne accès à un grand

nombre de variables physiques : consommation énergétique et température intérieure dans un bâtiment (qui sont ceux qui nous intéressent en premier lieu), mais également flux énergétiques échangés avec la couche limite urbaine, températures de surface et température de l'air ou température ressentie au sein de la rue. Ce sont autant de variables sur lesquelles des validations peuvent être mises en œuvre.

Dans le cadre du projet VegDUD [Musy, 2012], nous disposons de relevés de température sur différents types de surfaces effectués lors de la campagne FluxSAP 2010. Ces données nous ont permis de montrer la capacité des modèles de surface à représenter l'évolution des températures superficielles avec une précision satisfaisante. Ainsi, des valeurs réalistes pour certains paramètres sensibles de ces modèles ont pu être obtenues. Dans certains cas, des analyses de sensibilité sur ces paramètres ont également été effectuées.

Dans ce chapitre, nous commencerons par évoquer les différentes méthodes de validation qui ont pu être envisagées. Nous présenterons ensuite la campagne FluxSAP dont proviennent les données que nous avons utilisées. Enfin, les méthodologies et les résultats obtenus seront détaillés, pour les trois types de surface étudiés : sol, toit et façade.

3.1 Méthodes de validation de l'outil de couplage

3.1.1 Validation du modèle thermique de bâtiment

Les validations les plus intéressantes pour notre cas d'application du modèle de couplage auraient été celles des consommations énergétiques et des températures intérieures du bâtiment.

Une première approche aurait pu consister à valider le modèle thermique pour un bâtiment seul, sans représentation explicite de son environnement et avec des conditions extérieures simplifiées, afin de comparer les résultats issus de *Solene-microclimat* avec ceux obtenus à partir de codes de calcul répandus et largement validés comme *EnergyPlus*, *TRNSys* ou *Esp-r*. Cette validation numérique, dont l'absence se faisait déjà sentir lors des travaux précédents, n'a malheureusement toujours pas été effectuée. Cependant, le principe sur lequel repose le modèle a largement été validé [Roux, 1984].

La deuxième approche, plus complexe, aurait consisté à comparer les résultats du modèle avec des relevés in situ de consommation énergétique ou de température intérieure. Elle n'a pas été réalisée car elle pose plusieurs problèmes en plus de celui, récurrent, de la disponibilité des données. En effet, il aurait sans doute été compliqué voire impossible de comparer les sorties du modèle avec les mesures. Avec une seule zone par étage, le modèle thermique n'est pas en mesure de représenter les paramètres thermiques à l'intérieur

d'un appartement seul et on peut se demander si l'utilisation d'une température intérieure moyenne sur un étage aurait été pertinente. Il aurait été possible de comparer des grandeurs intégrées pour la consommation énergétique mais il aurait fallu modéliser plus finement les systèmes thermiques et le comportement des occupants, au détriment de la représentation des interactions avec l'extérieur.

Une troisième alternative plus crédible est l'utilisation d'expériences sur modèles réduits en conditions réelles telles que JAPEX ou la plateforme ClimaBAT [Doya et al., 2012], pour lesquels l'évolution de la température intérieure est mesurée. Qui plus est, la forme simple des cuves de béton qui sont utilisées pour représenter les bâtiments se serait bien prêtée à la modélisation mono-zone qui peut être utilisée dans *Solene-microclimat*.

3.1.2 Validation du modèle microclimatique

La validation microclimatique à partir de mesures in situ, par exemple celle des paramètres thermiques extérieurs, pose également des problèmes essentiellement liés à des questions d'échelle. Dans le cadre des campagnes FluxSAP par exemple, les mâts de mesure et les capteurs hygrothermiques sont situés dans un périmètre largement plus vaste que notre domaine d'étude. De ce fait, nos simulations ne contiendraient pas plus qu'un seul point de mesure.

Il serait par contre envisageable d'utiliser des données obtenues avec des modèles réduits comme celui de la plate-forme ClimaBAT [Doya et al., 2012]. Cette maquette de rues de type canyon à l'échelle 1/10 est largement instrumentée pour suivre l'évolution de la température dans de nombreux points au sein des rues, ainsi que les flux radiatifs.

Enfin, des comparaisons avec des logiciels traitant de la même échelle urbaine aurait également pu être envisagées, comme par exemple *EnviMET* [Bruse et Fleer, 1998].

3.1.3 Validation des modèles thermiques de surface

Les modèles thermiques de surface sont à l'interface entre chacun des modules de *Solene-microclimat*. Le bilan thermique de la surface extérieure fait intervenir :

- les flux latent et sensible échangés avec l'air extérieur, qui sont des conditions aux limites pour le modèle aéraulique,
- les flux de rayonnement CLO et GLO échangés avec la scène urbaine et avec le ciel,

- les flux stockés et conduits à travers la paroi, liés à l’inertie et aux déperditions thermiques représentés dans le modèle thermique de bâtiment.

Une grandeur clé dans l’estimation de chacun de ces flux est la température de surface extérieure. Elle est en elle-même difficile à appréhender et à mesurer de façon très précise, que ce soit par l’utilisation de thermocouples, de thermo-radiomètres ou d’imagerie infrarouge. Hénon et al. [2011] cherche à reproduire des images infrarouges aéroportées avec des émittances obtenues en utilisant le modèle de surface historique de **Solene**. Ce n’est donc pas la température de surface qui est directement comparée, mais le flux infrarouge émis et réfléchi en chaque point. Dans ce cadre, un modèle thermo-radiatif avec une représentation explicite du volume des bâtiments et des surfaces urbaines comme **Solene** est particulièrement bien adapté. Une campagne aéroportée similaire a été menée sur notre quartier d’étude dans le cadre de FluxSAP. Cependant, sans développement supplémentaire, il n’est à l’heure actuelle possible que de comparer des images issues de la télédétection avec celles produites à partir d’un point de vue dans **Solene**, comme l’a fait Hénon et al. [2011]. Pour une validation grande échelle du modèle, il serait nécessaire de développer les outils permettant d’importer les images de télédétection dans **Solene** (visée avant et visée arrière) afin de plaquer les flux mesurés sur le modèle 3D. Ces traitements spécifiques sortant largement du sujet de thèse, l’exploitation de ces données pour la validation de **Solene-microclimat** a été reporté.

Une approche plus simple par des mesures directes de température a été utilisée pour différents types de surfaces correspondant à des modèles thermiques particuliers. Les mesures utilisées sont les suivantes :

- modèle de sol** : mesures permanentes réalisées à l’aide de thermocouples à différentes profondeurs dans le sol, dans plusieurs sondages,
- modèle de toit** : mesures durant FluxSAP 2010 (mai 2010) à l’aide de thermocouples sur la toiture d’un bâtiment,
- modèle de façade** : mesures manuelles à partir du sol durant la campagne FluxSAP 2010 (mai 2010) réalisées à l’aide d’un thermo-radiomètre à main.

3.2 Présentation de la campagne FluxSAP

3.2.1 Choix du quartier Pin Sec

Le choix du quartier Pin Sec recouvre plusieurs objectifs pratiques et stratégiques. Il s’explique en premier lieu parce qu’il s’agit de la zone géographique de l’ONEVU (Observatoire Nantais des EnVironnements Urbains)

où se déroule le volet expérimental du projet ANR VegDUD. Le principal intérêt réside donc dans la disponibilité et l'accessibilité des données, avec une base de données commune dans le cadre du volet PHYSIO du projet VegDUD. Les mesures réalisées sur ce site sont nombreuses et variées, puisqu'elles recouvrent les domaines de l'hydrologie, de la microclimatologie et de la télédétection, ce qui permet des utilisations complémentaires (utilisation des mesures locales hydriques et thermiques, des données microclimatiques et hydriques...). Du fait des interactions avec les équipes chargées des campagnes expérimentales de l'ONEVU, un retour d'expérience sur l'utilisation des données afin de préparer les futures campagnes est également souhaité. Enfin, le quartier Pin Sec a été choisi comme cas d'étude commun à différents partenaires du projet VegDUD pour les simulations liées à la microclimatologie, l'hydrologie et la thermique du bâtiment. Des approches croisées sont envisagées en terme de projection et de comparaison de résultats.

Les stations météorologiques de l'ONEVU permettent d'avoir un ensemble de paramètres climatiques réalistes et cohérents correspondant à un quartier péri-urbain.

3.2.2 Données météorologiques

Les données météorologiques sont issues de mesures réalisées en continu sur deux sites :

- sur le toit de l'immeuble Dunant : T, HR, rayonnement CLO et GLO, vitesse et direction du vent,
- sur le terrain de l'usine GOSS : mât de 26m comportant des capteurs hygrométriques et des anémomètres à différentes hauteurs.

La température et l'humidité de l'air mesurées sur le site Dunant, ainsi que la vitesse du vent, sont utilisées comme conditions extérieures pour les simulations réalisées avec les modèles de surface.

Le rayonnement solaire global mesuré sur le toit Dunant est utilisé pour calculer les flux solaires dans **Solene**. Comme il manque des informations sur la répartition entre les flux directs et diffus, des analogies ont été utilisées pour répartir le flux total : lorsque le flux total est supérieur à 50% du flux total théorique par ciel clair, les flux sont répartis entre le direct et le diffus comme pour un ciel clair issu du modèle de Perez. Lorsqu'il est inférieur à 50% les flux sont répartis à 50% chacun.

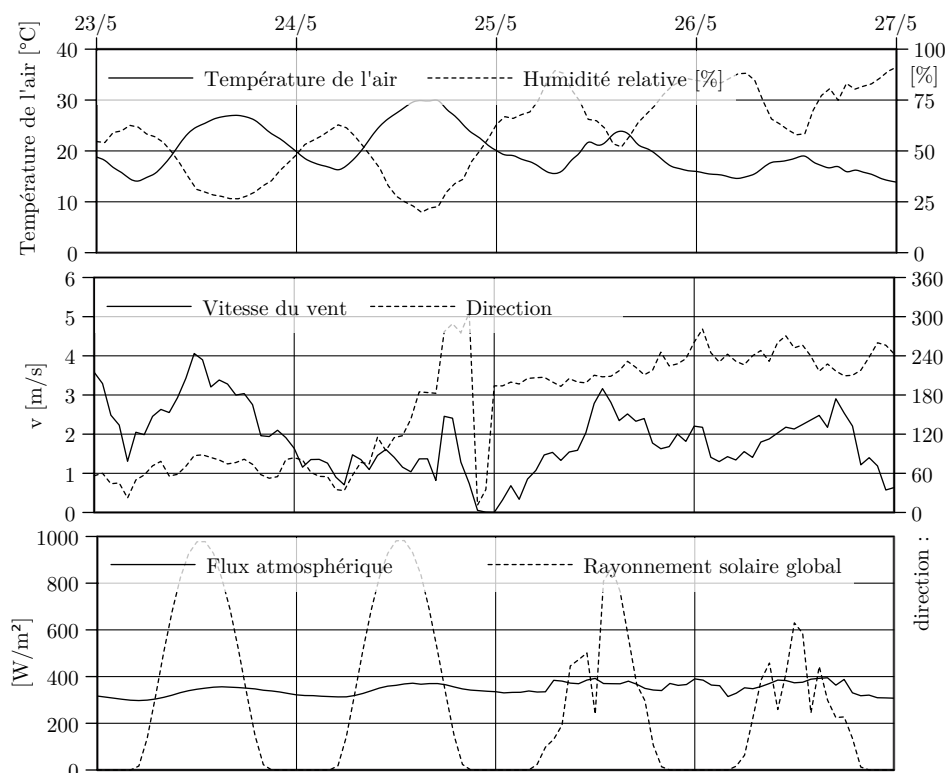


FIGURE 3.1 – Conditions météorologiques mesurées sur le toit de l'immeuble Dunant du 23 au 27 mai 2010

3.2.3 Données utilisées pour la validation

Les simulations ont été réalisées sur la période du mois de mai 2010 afin de pouvoir en comparer les résultats aux mesures effectuées dans le cadre de FluxSAP 2010, notamment celles des températures de surface sur le toit, qui n'ont été relevées qu'une semaine du 20 au 28 mai, et celles des températures de surface sur les façades, effectuée du 21 au 23 mai. Pour comparer les résultats de manière qualitative, quatre jours consécutifs ont été choisis du 23 au 27 mai 2010 à cause de l'hétérogénéité des conditions météorologiques sur cette période. Les évolutions des caractéristiques de l'air, du vent et de l'intensité des rayonnements solaire et infrarouge sur les quatre jours en question sont présentées à la Figure 3.1.

Les 23 et 24 mai sont deux jours de ciel clair, avec des conditions d'air comparables, qui diffèrent principalement par l'intensité du vent et sa direction. On peut donc vérifier l'effet du vent sur les échanges convectifs. Les deux jours suivants sont des jours plus ou moins couverts, avec de fortes variations du rayonnement solaire, mais des vitesses de vent et une direction

relativement stables.

3.3 Modèle de sol

3.3.1 Présentation du modèle de sol

Les sols constituent une part importante de la surface totale d'une scène urbaine. Leur température a de plus un rôle prépondérant dans le bilan radiatif des façades. La justesse de leur calcul est donc importante. Auparavant, le même modèle de surface était utilisé pour les parois de bâtiment et pour les sols, ce qui constituait une limite importante. La création d'un modèle de surface spécifique aux sols dans *Solene-microclimat* est une des contributions majeures de Bouyer [2009]. Il s'agit d'un modèle mono-dimensionnel à quatre nœuds dont la schématisation est représentée Figure 3.2.

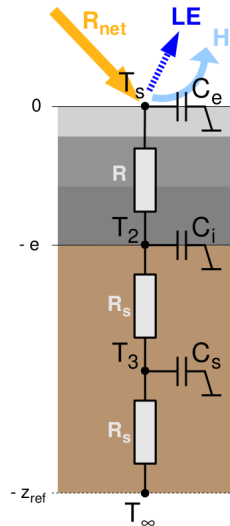


FIGURE 3.2 – Schématisation du modèle de sol [Bouyer, 2009]

Dans cette paramétrisation, les caractéristiques thermiques superficielles (capacités thermiques de surface et de sous-couche superficielle C_e et C_i , résistance thermique de la couche superficielle R) sont définies pour chaque type de surface urbaine, alors que celles de la couche de profondeur (C_s et R_s) sont constantes sur toute la scène. La température à la profondeur de référence T_∞ , supposée constante au cours de la journée, est calculée en fonction du jour de l'année d'après l'Équation (3.1) [Guyot, 1999].

$$T_\infty(z, t) = T_m - A_T \exp \left[-\frac{z}{z_d} \right] \cos \left[\omega(t - t_0) - \frac{z}{z_d} \right] \quad (3.1)$$

- z : profondeur [m]
- z_d : profondeur d'amortissement, $z_d = \sqrt{\frac{2\alpha_s}{\omega}}$ [m]
- t : numéro du jour de l'année (de 0 à 365)
- t_0 : jour de l'année correspondant au minimum de l'onde thermique climatique en surface
- ω : pulsation, $\omega = \frac{2\pi}{365}$
- T_m : température moyenne annuelle [$^{\circ}C$]
- A_T : demi-amplitude annuelle de l'onde thermique climatique en surface [$^{\circ}C$]
- α_s : diffusivité thermique du sol, $\alpha_s = \frac{\lambda_{sol}}{\rho_{sol}C_{sol}} \times 86400 [m^2 \cdot j^{-1}]$.

Les flux radiatifs (R_{net}) sont issus du calcul des flux solaires et infrarouges. Le flux latent (LE) est estimé par l'équation de Penman-Monteith. Le calcul du flux convectif est ici estimé à partir de la température d'air météorologique et d'un coefficient d'échange superficiel par convection calculé en fonction de la vitesse du vent par une relation linéaire dont les coefficients seront estimés dans cette étude.

Il convient de noter que le modèle de sol a été validé tel qu'il était utilisé jusqu'à présent, c'est-à-dire avec le flux latent prélevé directement sur le nœud superficiel et non pas avec le nouveau modèle de végétation qui a été introduit plus tard.

3.3.2 Méthodologie

Afin de tester la sensibilité du modèle de sol et de trouver les paramètres permettant de s'approcher des mesures des sondes de température traitées, une simulation a été réalisée à partir des données météorologiques. Dans le modèle géométrique, des caractéristiques thermiques différentes ont été assignées à chaque triangle d'une géométrie qui en comporte 1190. Les paramètres étudiés sont les suivants :

- a_h , coefficient directeur de la relation linéaire entre le coefficient d'échange convectif et le vent ($h = a_h \cdot v + b_h$),
- b_h , ordonnée à l'origine de cette même droite,
- f , taux d'évapotranspiration, ($0 < f < 1$) qui définit la part de l'évapotranspiration potentielle qui est effectivement évaporée,
- constitution du sol : épaisseur de la couche de terre, densité, capacité calorifique et conductivité thermique de la terre.

Ces paramètres ont tous une influence directe sur le calcul d'un terme du bilan : flux convectif pour a_h et b_h , flux latent pour f et stockage thermique dans le sol et conduction pour la composition de la couche superficielle. Seule l'influence du flux solaire n'est pas étudiée car l'albédo du sol est considéré constant avec une valeur de 0,3.

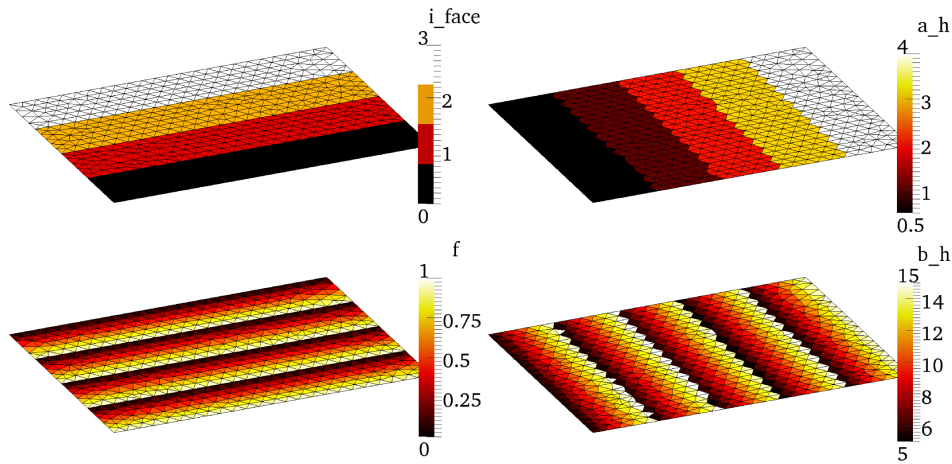


FIGURE 3.3 – Paramétrage du sol pour l'analyse de sensibilité

Les simulations ont été réalisées sur une année entière. Comme support, un sol sans masque a été utilisé et divisé en plusieurs parties (voir Figure 3.3) :

- 4 bandes avec des constitutions de sol différentes,
- 5 bandes dans l'autre sens avec 5 valeurs de a_h : 0,5 ; 1 ; 2 ; 3 et 4,
- une variation continue de b_h entre les bords de chaque bande dans un sens : de 5 à 15,
- une variation continue de f entre les bords de chaque bande dans l'autre sens : de 0 à 1.

Les caractéristiques superficielles des quatre types de sol traités sont présentées dans le Tableau 3.1.

i_{face}	e [m]	λ_{sol} [W/m/K]	C_{sol} [J/kg/K]	ρ_{sol} [kg/m ³]
0	0,5	1,4	900	1600
1	1,5	2	900	1600
2	0,1	0,5	2000	1600
3	0,1	1,4	1500	1600

TABLEAU 3.1 – Caractéristiques de la couche de sol superficielle

Les sondes 2 et 4 ont été choisies pour la validation car elles semblent exposées au rayonnement solaire tout au long de la journée. La modélisation des masques solaires est ainsi évitée. Il s'agit alors de trouver les meilleures combinaisons des paramètres précédents pour représenter le comportement ther-

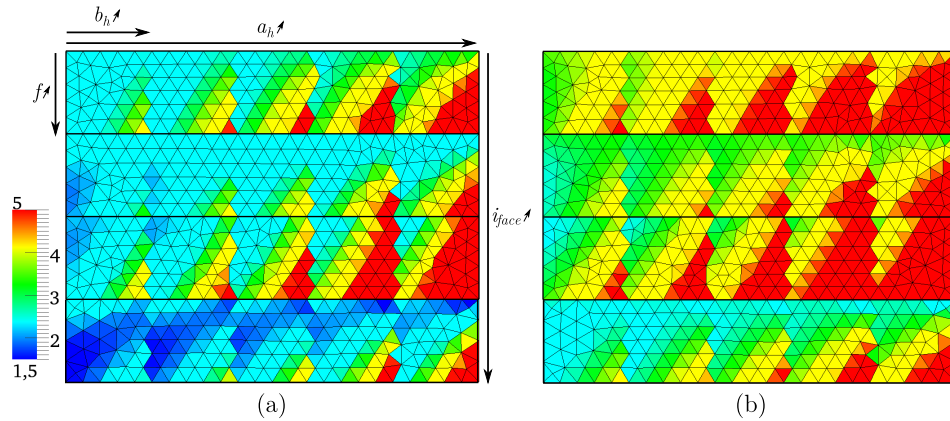


FIGURE 3.4 – Moyenne des écarts quadratiques entre les températures mesurées et simulées : (a) sonde 2 – (b) sonde 4

mique de ces sols. Les résultats des simulations sont comparés aux mesures sur la totalité du mois de mai. Les meilleures combinaisons sont déterminées en cherchant le minimum de la moyenne de l'écart quadratique entre les valeurs mesurées et simulées.

3.3.3 Résultats

La Figure 3.4 montre la moyenne des écarts quadratiques entre les températures simulées et mesurées par les sondes 2 et 4 pour chaque triangle de la géométrie. La période étudiée s'étend du 28 avril au 6 juin 2010. Les meilleures combinaisons permettent d'obtenir une moyenne des erreurs moyennes quadratiques de 1,4 [$^{\circ}C$] pour la sonde 2 et de 2,3 [$^{\circ}C$] pour la sonde 4. Les valeurs obtenues pour la sonde 2 sont globalement plus faibles. À ce décalage près, leur répartition semble être la même pour les deux cas. Les caractéristiques du sol qui donnent les meilleurs résultats sont celles de la face 3 qui correspond à une couche superficielle peu épaisse, avec une conductivité thermique et une capacité thermique moyennes. On remarque que les influences des flux latent et convectif peuvent dans une certaine mesure se compenser : lorsque les valeurs du coefficient d'échange convectif superficiel sont minorées, une augmentation du coefficient d'évaporation permet d'obtenir de meilleurs résultats.

Les combinaisons de paramètres qui donnent les meilleurs résultats pour chacune des sondes sont données dans le Tableau 3.2. Leur évolution sur la période de comparaison sont représentées sur la Figure 3.5.

Les mesures effectuées du 23 au 27 mai 2010 montrent des évolutions de la température assez similaires, avec des extrêmes atteints simultanément sur les deux sites. Les amplitudes totales sur les quatre jours sont respective-

sonde	a_h	b_h	f	e [m]	λ_{sol} [W/m/K]	C_{sol} [J/kg/K]
2	3,0	5,2	0,95	0,1	1,4	1500
4	4,0	13,9	0,83	0,1	1,4	1500

TABLEAU 3.2 – Meilleures combinaisons des paramètres pour les sondes 2 et 4

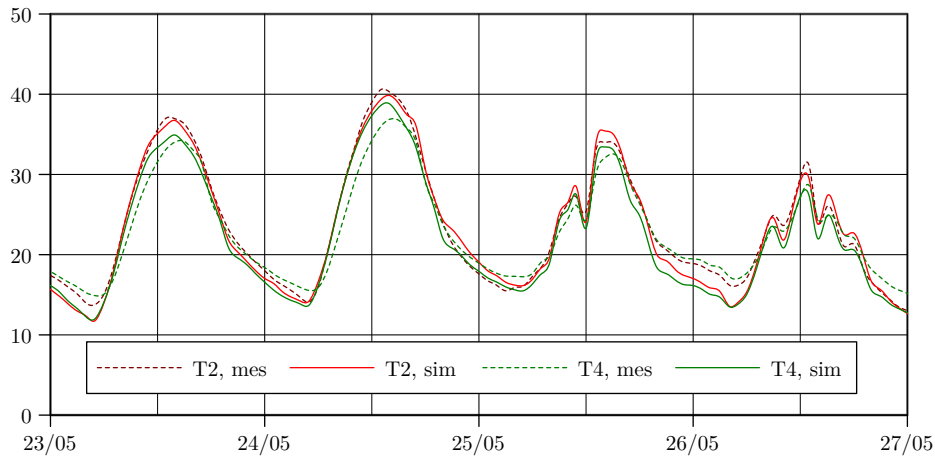


FIGURE 3.5 – Températures de surface mesurées et simulées après paramétrisation

ment de 28 et 27 [$^{\circ}C$] pour les sondes 2 et 4. La température maximale est supérieure de quelques degrés le 25 mai par rapport au 24 mai, avec des conditions de rayonnement semblables, ce qui s'explique par une température d'air plus importante et un vent plus faible. Les deux jours suivants, l'évolution des températures a la même allure que celle du rayonnement solaire incident.

On remarque que les deux simulations arrivent à reproduire l'effet de la diminution du flux convectif entre les deux premiers jours, avec une erreur inférieure à 1 [$^{\circ}C$] pour la sonde 2. Ce n'est pas aussi précis pour la sonde 4, pour laquelle les pentes obtenues pour le réchauffement de début de journée sont généralement plus importantes que celles observées. Par ailleurs, le modèle a tendance à surestimer le rafraîchissement nocturne, avec un écart régulier de quelques degrés.

Cette limite concernant l'évolution des températures de nuit peut également être observée sur les corrélations pour une période recouvrant la totalité du mois de mai (Figure 3.6) pour lesquelles les faibles températures sont généralement en dessous de la bissectrice principale, particulièrement pour la sonde 4.

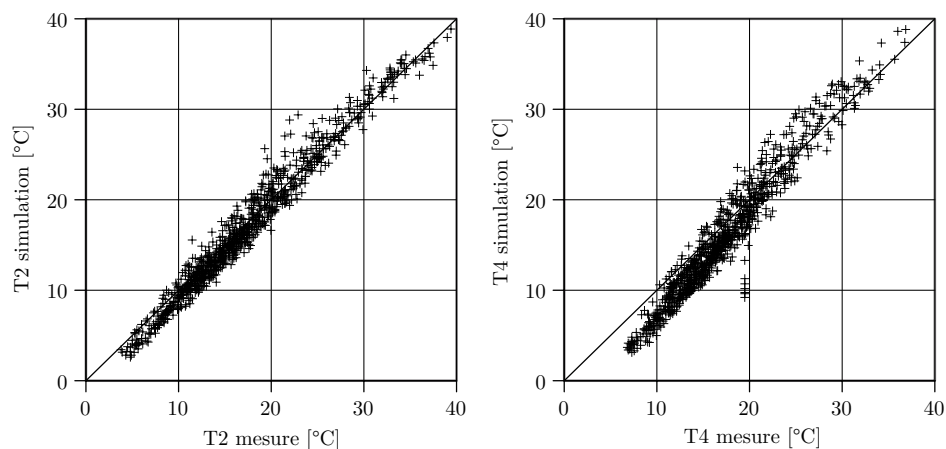


FIGURE 3.6 – Comparaison entre les températures du sol mesurées et simulées du 28/4/210 au 3/6/2010

3.3.4 Conclusion

Les résultats présentés montrent qu'il est indispensable de représenter l'évapotranspiration en surface, même de façon simplifiée. C'est notamment le cas de la sonde 4 pour laquelle aucune combinaison de paramètres n'a donné de résultats précis sans un coefficient d'évapotranspiration assez élevé. Les températures de nuit sont généralement sous estimées. Cela peut être dû au fait que l'environnement extérieur n'était pas modélisé dans ces simulations. La précision de la température de profondeur et du comportement thermique du sol profond peut également être en cause. Malheureusement, nous disposions de données à 1[m] de profondeur tandis que le noeud profond était situé dans les simulations à une profondeur de 2[m]. Malgré l'absence de comparaison directe, la représentation de l'évolution annuelle de la température de profondeur semble cohérente.

Avec une méthode d'analyse de sensibilité assez grossière sur un nombre de paramètres limité, les résultats obtenus semblent satisfaisants. En plus de l'utilisation de méthodes plus précises pour estimer les valeurs des paramètres étudiés, les résultats pourraient sans doute être encore améliorés en étendant l'étude à l'albédo ou aux propriétés thermiques de la couche de sol profonde. Il serait également intéressant de tester le modèle de végétation développé dans cette thèse et implémenté dans le code par la suite.

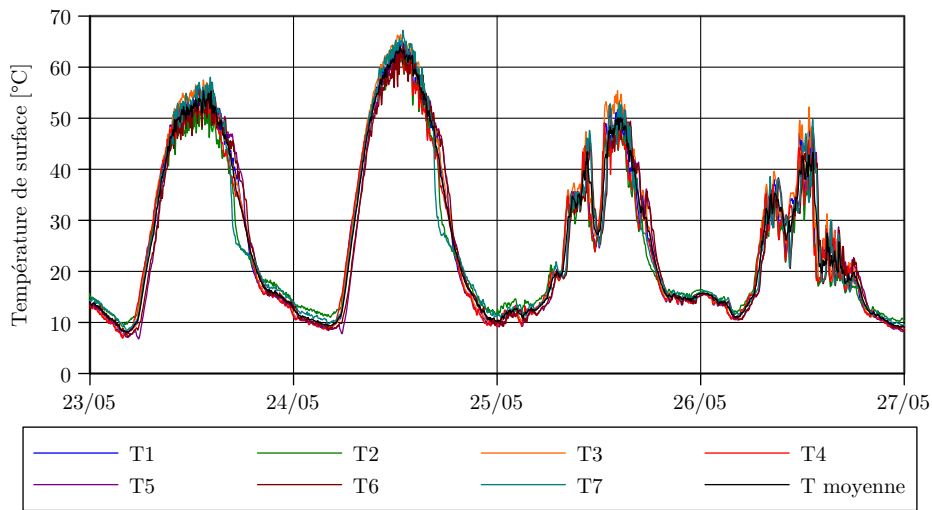


FIGURE 3.7 – Températures mesurées sur la surface du toit Dunant

3.4 Température du toit

3.4.1 Données expérimentales

Huit thermocouples ont été placés sur la surface du toit pendant une semaine en mai 2010. Les résultats de ces huit thermocouples étant assez proches, c'est leur moyenne que l'on va chercher à simuler (Figure 3.7). Une amplitude journalière maximale de $50[^\circ\text{C}]$ a été mesurée lors d'une journée de plein soleil, avec un maximum de $65[^\circ\text{C}]$ et un minimum inférieur à $10[^\circ\text{C}]$. Il est intéressant de constater que la température de surface nocturne est généralement inférieure à la température de l'air, en particulier pour les jours de ciel clair.

Seuls deux capteurs sont masqués en fin d'après midi. Ce sont d'ailleurs ceux qui ont la température la plus élevée la nuit, ce qui confirme qu'il ont effectivement un facteur de vue du ciel plus limité que les autres, limitant le rafraîchissement nocturne par rayonnement avec le ciel.

Les autres thermocouples donnent des températures de surface très similaires pour la nuit puisqu'ils se tiennent généralement dans un intervalle de $2[^\circ\text{C}]$ tout au plus. En journée, les valeurs se tiennent dans un intervalle de $10[^\circ\text{C}]$ au sein duquel chaque capteur présente une variabilité assez importante que l'on peut attribuer aux variations locales de la vitesse du vent.

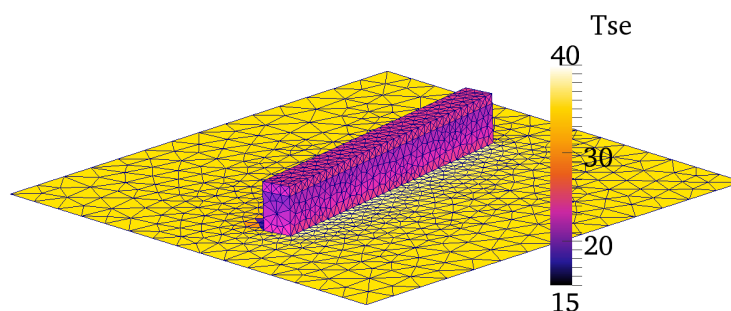


FIGURE 3.8 – Maquette d’étude de la température du toit : températures de surface le 12/05/2010 à 13h00 (température extérieure de 10,4 [°C])

3.4.2 Méthodologie

Les simulations sont menées à partir du premier mai tandis que les comparaisons se font sur une période d’étude définie du 23 au 27 mai, ce qui laisse 3 semaines complètes d’initialisation. La méthodologie utilisée est la suivante : nous avons commencé par rechercher le jeu de paramètres le mieux à même de représenter l’évolution de la température mesurée. Ce réglage par tâtonnement a permis d’estimer grossièrement la variabilité des résultats du modèle par rapport à chaque paramètre étudié. Dans un second temps, nous avons mené une étude de sensibilité succincte en faisant varier à chaque fois un des paramètres.

Le modèle de bâtiment utilisé est simplifié. La température du toit étant très peu sensible à la prise en compte des bâtiments environnants, la maquette numérique est restreinte à un seul bâtiment. La géométrie utilisée correspond à celle du bâtiment sur le toit duquel les mesures sont effectuées (Figure 3.8). Les hypothèses sont :

- modélisation du bâtiment par une seule zone thermique partiellement vitrée,
- évolution libre de la température intérieure,
- pas d’occupation ni de charge interne,
- température extérieure homogène égale à la température mesurée sur site.

Il est vite apparu que le choix de certains paramètres comme le taux de vitrage et le taux de renouvellement d’air était décisif pour éviter une augmentation trop importante de la température intérieure. L’albédo du toit a été fixé à 0,3.

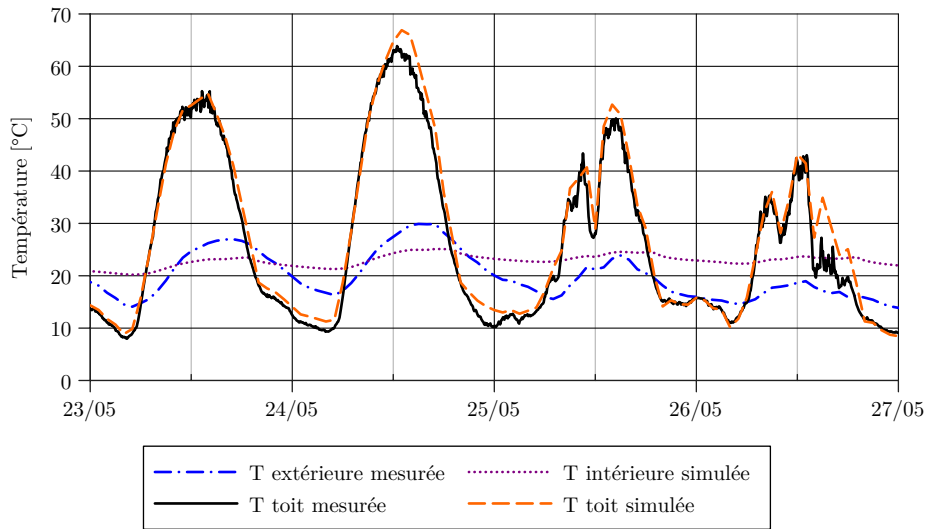


FIGURE 3.9 – Températures simulées sur le toit Dunant après paramétrisation

3.4.3 Résultats

La Figure 3.9 montre les évolutions de la température de surface du toit et de la température intérieure pour la meilleure corrélation obtenue. Hormis quelques courtes périodes, la température simulée est très proche de celle mesurée. Cela montre à la fois une certaine cohérence entre les différentes grandeurs mesurées (notamment les températures et les flux radiatifs) ainsi que la pertinence du modèle utilisé. Il y a donc au moins une combinaison de paramètres thermiques qui permet de représenter avec fidélité l'évolution de la température de surface du toit.

Il y a deux courtes périodes où aucune combinaison de facteur n'a permis de représenter correctement les mesures. Il s'agit de la nuit du deuxième au troisième jour, lorsque le vent est quasiment nul ($4 [^{\circ}C]$ d'écart maximum), et de la soirée du quatrième jour ($10 [^{\circ}C]$ d'écart). Pour ce dernier épisode, on peut penser qu'il s'agit d'un problème lié au pas de temps horaire utilisé pour les flux solaires. Les conditions de ciel pour cette fin d'après-midi semblent en effet très variables.

L'équilibre des flux dont les évolutions sont représentées sur la Figure 3.10, montre que l'énergie solaire incidente se répartit à peu près par tiers entre le flux échangé avec l'air par convection, le flux rayonné vers le ciel et le flux transmis à la paroi (qui est par la suite soit transmis à la pièce soit stocké dans la paroi). On y retrouve une diminution du flux convectif induisant une augmentation de la température lorsque le vent diminue, entre

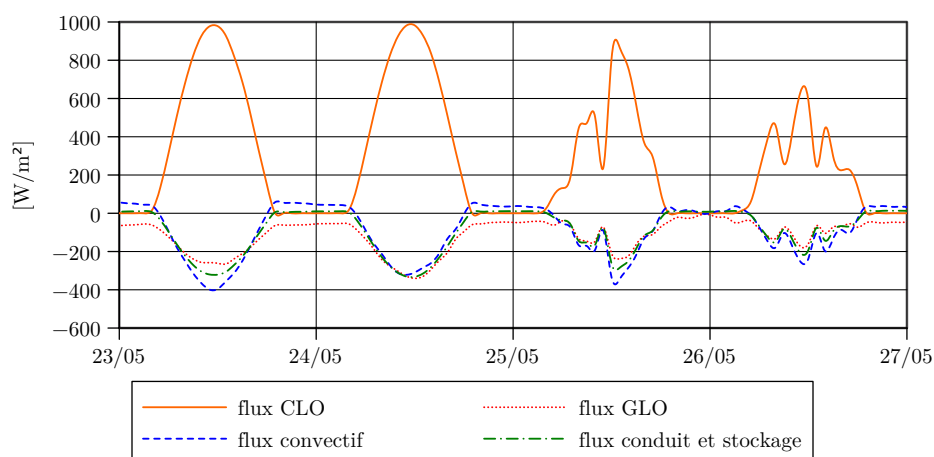


FIGURE 3.10 – Bilan de flux sur la surface extérieure du toit Dunant

les deux premiers jours. De nuit, les températures de surface sont généralement plus faibles que celle de l'air extérieur. On retrouve bien une inversion du sens du flux convectif et du flux transmis entre le jour et la nuit. Cela montre l'importance du rafraîchissement radiatif nocturne et l'influence de la température intérieure.

3.4.4 Sensibilité du modèle thermique

Faire varier un à un les différents paramètres thermiques permet d'avoir un aperçu de la sensibilité du modèle de toit. Cela peut aider à mieux prévoir l'influence de certaines valeurs impliquées dans l'estimation du flux convectif ou des échanges radiatifs sur les températures de surface diurnes ou nocturnes. Les simulations dynamiques permettent en effet de répondre à des questions complexes : la valeur de l'albédo ou des coefficients d'échange superficiel par convection a-t-elle une influence sur l'évolution de la température de nuit alors que le flux solaire est absent, et que l'écart entre les températures de surface et la température de l'air est limité ? Quelle est la contribution du flux stocké dans la paroi et de la résistance thermique du toit ?

Calcul des échanges convectifs

Nous avons estimé la sensibilité du modèle thermique à une variation du flux convectif en utilisant différentes valeurs pour les coefficients de la corrélation entre le coefficient d'échange convectif et la vitesse du vent, telle qu'elle a été exprimée pour le modèle de sol (voir §3.3.2).

On remarque sur la Figure 3.11 que le choix de la loi pour le coefficient d'échange convectif a peu d'effet la nuit, lorsque la température du

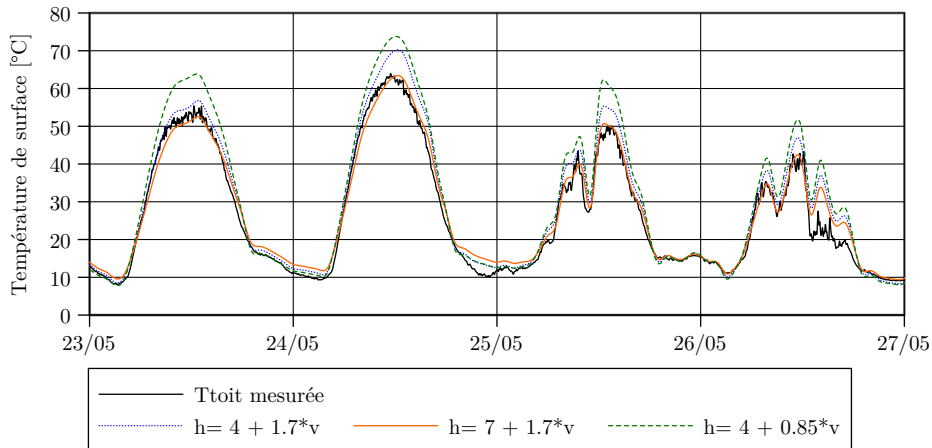


FIGURE 3.11 – Températures de surface du toit simulées pour différentes corrélations entre le coefficient d'échange convectif et la vitesse du vent

toit est proche de celle de l'air. Durant le jour, des valeurs trop faibles du coefficient d'échange convectif peuvent faire apparaître des écarts avec les mesures supérieures à 10 [°C]. On peut également observer les effets différents de chacun des coefficients de la loi d'estimation. Les valeurs de la meilleure combinaison obtenue sont supérieures à la plupart des corrélations existantes dans la littérature, présentées dans le chapitre 5. L'effet étant principalement diurne, on peut penser qu'il aurait été possible de trouver une combinaison de coefficients plus faibles en attribuant au toit un albédo un peu plus important, grâce auquel une diminution du flux solaire absorbé aurait pu compenser la diminution du flux convectif.

Isolation thermique du toit

Des simulations ont été effectuées pour différentes constitutions du toit et des murs. Si l'isolation thermique ou l'épaisseur des murs a un impact fort sur la température intérieure, et sur la consommation énergétique le cas échéant, il est en revanche limité sur la température de surface extérieure du toit (Figure 3.12). L'écart entre le cas non isolé et les cas isolés est cependant loin d'être négligeable puisqu'il atteint plus de 10 [°C] le 24 mai à midi et reste relativement stable la nuit, entre 3 et 5 [°C]. Ces paramètres sont particulièrement décisifs pour obtenir des températures nocturnes assez faibles. Le modèle de toit ne permet pas d'observer de différence sur la température de surface extérieure entre l'isolation intérieure et extérieure, alors qu'elle est visible bien que limitée sur la température intérieure.

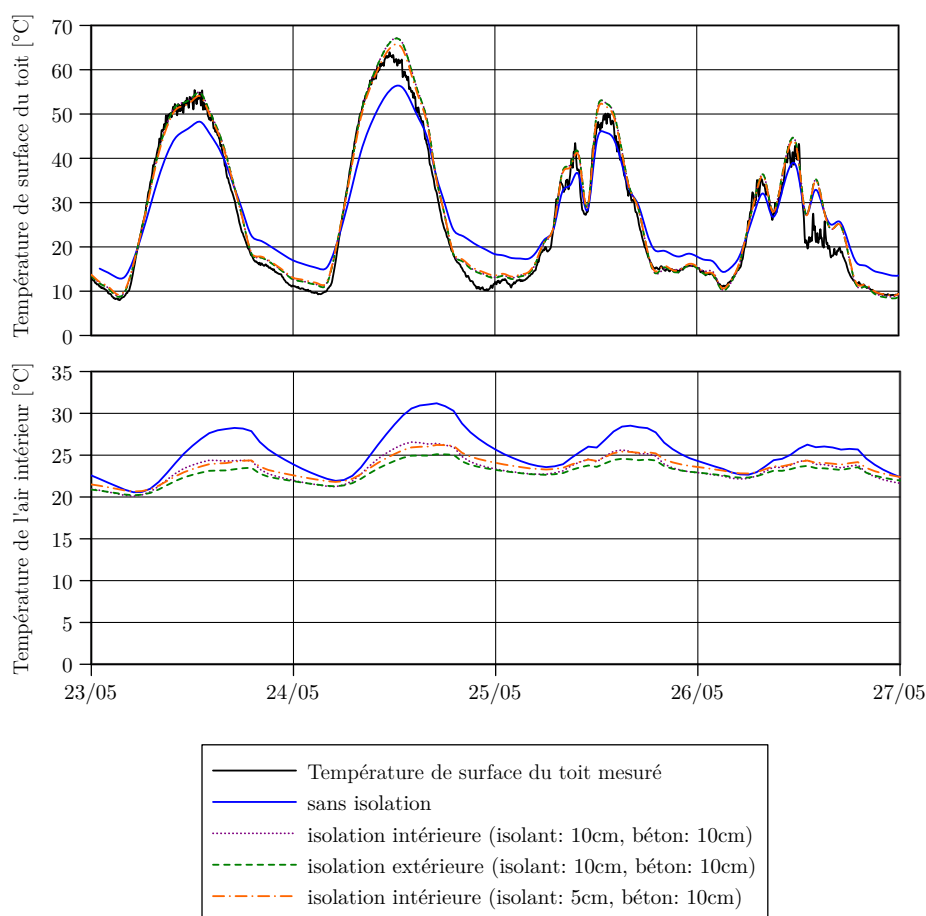


FIGURE 3.12 – Températures de la surface extérieure du toit simulées en fonction de l'isolation thermique du toit

3.4.5 Conclusion

Encore une fois, les corrélations obtenues entre les valeurs simulées et mesurées sont largement satisfaisantes. Nous avons pu représenter fidèlement l'évolution de la température de surface extérieure du toit, ce qui laisse bon espoir quant à la bonne représentation des flux thermiques à travers la paroi. Cela nous a également permis de mieux appréhender le comportement thermique dynamique du toit, qui constitue une surface urbaine dont les interactions directes avec l'environnement urbain sont plus simples à représenter puisqu'elles se limitent en général au flux radiatif grande longueur d'onde avec le ciel.



FIGURE 3.13 – Mesure de la température de surface en façade : (a) façade étudiée – (b) mesure au thermoradiomètre ©IRSTV

3.5 Température de façade

3.5.1 Méthodologie

Des mesures de température de surface ont été effectuées manuellement lors des trois jours de la campagne aéroportée, les 21, 22 et 23 mai 2010, sur cinq surfaces du Pin Sec : deux façades orientées au sud et à l'ouest respectivement, une pelouse, un parking et la surface du stade. Nous avons choisi d'utiliser les relevés de la façade sud (Figure 3.13). Il s'agit d'une façade pignon d'un immeuble de logement collectif. Comme pour la température du toit, le bâtiment correspondant a été modélisé et des simulations ont été menées en régime libre. La seule différence dans les hypothèses de calcul est la représentation des 5 étages par des zones thermiques distinctes au lieu d'une seule zone pour le bâtiment. Les conditions météorologiques relevées sur le toit Dunant ont été utilisées.

Dans le cas des façades, il est indispensable de prendre en compte les interactions avec l'environnement proche, au moins les flux solaires réfléchis par le sol et les flux thermiques infrarouges échangés avec celui-ci. Il aurait également été envisageable d'utiliser les coefficients d'échange convectif issus des simulations aérauliques, c'est-à-dire avec une prise en compte de la direction du vent et de l'influence des bâtiments proches.

3.5.2 Résultats

Les températures de surface mesurées sont comparées aux simulations sur la Figure 3.14. Pour la journée du 23 mai, on peut comparer les mesures

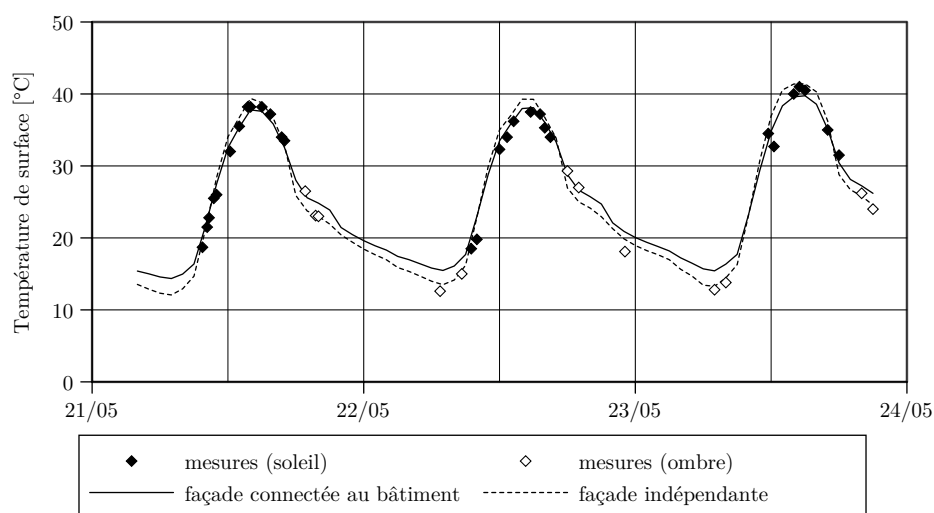


FIGURE 3.14 – Évolution des températures de surface simulées et mesurées en façade

sur la façade avec les résultats présentés précédemment. On peut remarquer que les températures maximales sont moins importantes que pour le toit et montrent une évolution assez proche de celle du sol. La façade se retrouve assez tôt à l'ombre.

Les meilleurs résultats ont été obtenus pour un albédo de 0,45. Deux modèles de façade ont été testés :

- Le modèle de façade connecté au bâtiment correspond à une façade appartenant au bâtiment dont on suit la consommation énergétique et la température intérieure. Le noeud de la face intérieure de cette paroi est donc connecté à une ambiance intérieure qui évolue librement. De plus, il est commun avec les autres façades de la même zone thermique.
- Le modèle de façade indépendant correspond à une surface urbaine avec une température intérieure fixée à 20 [°C].

Pour le premier cas, les résultats montrent qu'il est difficile de bien représenter l'évolution de la température de surface de la façade à partir du moment où celle-ci n'est plus ensoleillée. Ce problème ne se pose pas pour le modèle de façade indépendant. Une hypothèse pour expliquer cela est que nous tombons là sur une des limites de l'utilisation d'un noeud commun pour la température de surface intérieure de tous les murs d'une zone thermique. Il semble en effet qu'une fois à l'ombre, cette façade sud légèrement tournée vers l'est, soit artificiellement chauffée par la façade orientée à l'ouest par l'intermédiaire de leur noeud intérieur commun. Si cette hypothèse du modèle a un impact de quelques degrés sur la température de surface extérieure, il

n'est pas dit qu'il soit significatif sur le flux thermique, qui est ce qui nous intéresse le plus dans le cas du bâtiment dont on suit la consommation énergétique.

Hormis cette anomalie que seule une profonde modification du modèle thermique de bâtiment semble pouvoir résoudre, il a à nouveau été possible de représenter fidèlement l'évolution de la température de surface d'une paroi, cette fois pour une façade orientée au sud.

3.6 Conclusion

Une limite à ces trois études est que nous ne disposions pas de températures intérieures permettant de valider la valeur du flux thermique transmis, en particulier pour la façade et le toit. Il serait réellement intéressant d'obtenir des mesures de température de surface intérieure en plus des températures extérieures, à défaut de la température d'air intérieure dont on sait qu'elle serait très difficile à représenter.

Ces mesures des températures de surface extérieures réalisées durant le mois de mai 2010 nous ont néanmoins permis de valider, en ce qui concerne les températures, les modèles de surface de toit, de sol et de façade. Cela nous a également permis de fixer certains paramètres sensibles comme les albedos de surface et également d'obtenir des ensembles de paramètres cohérents pour chacun des modèles de surface étudiés. Cela nous a également permis de mettre en avant certaines limites du modèle thermique de bâtiment, notamment pour la représentation de la température de surface intérieure.

Si d'autres méthodes de validation sont possibles et même souhaitables, notamment la comparaison avec d'autres codes de calcul ayant fait leurs preuves pour le modèle de bâtiment, ou avec des expériences sur modèle réduit pour le modèle microclimatique, ces résultats sont en mesure de nous rassurer quant à la pertinence des modèles thermiques utilisés. Ils constituent des éléments de validation du modèle *Solene-microclimat*.

Chapitre 4

Modélisation et simulation des enveloppes végétales

Sommaire

4.1	Typologie des façades végétales	86
4.2	État de l’art sur le comportement hydrothermique des façades végétales	92
4.3	Modélisation des façades végétales	109
4.4	Comparaison avec l’expérimentation	124
4.5	Conclusion	145

Le modèle utilisé initialement dans *Solene-microclimat* pour représenter l’effet de l’évapotranspiration sur les sols végétaux a pu être rapidement adapté aux façades et aux toits des bâtiments puisqu’il consistait à prélever directement sur le nœud de surface extérieure le flux latent estimé par la méthode de Penman-Monteith. Cette approche assez efficace en première approximation apparaît néanmoins simpliste quand il s’agit de s’intéresser particulièrement à l’effet de la végétation, non plus seulement sur la température de surface extérieure, mais également sur le flux transmis à travers la paroi et à l’intérieur du bâtiment. En effet, ce modèle ne permettait pas de représenter explicitement certains phénomènes importants que sont les masques solaires et infrarouges ainsi que la limitation du flux convectif échangé avec l’air extérieur.

De nombreux modèles thermiques existent et continuent à être développés pour les toitures végétales, ce qui jusqu’à présent était moins le cas pour les façades. Avec l’apparition du concept de “mur vivant” mis en œuvre depuis seulement quelques années, le besoin d’en modéliser les impacts notamment sur le comportement thermique des bâtiments se fait sentir et les publications sur le sujet se multiplient. Elles concernent souvent des études

appliquées à des dispositifs particuliers.

La végétalisation des façades par des solutions techniques innovantes est une tendance nouvelle qui ne doit cependant pas faire oublier que des dispositifs plus sommaires ont toujours été utilisés et sont loin d'être dénués d'intérêt, à l'image des plantes grimpantes comme la vigne vierge ou le lierre. Comme pour les toitures végétales, le dispositif utilisé, en particulier le type de substrat s'il existe, va avoir une influence sur le choix des espèces, la mise en place du dispositif, le développement et l'entretien des plantes. L'absorption des ondes acoustiques, la captation des polluants, la rétention de l'eau de pluie, la biodiversité, ou les impacts climatiques et thermiques sont autant de bienfaits supposés de ces installations sur l'environnement urbain qui seront également modifiés. À des fins de comparaison ou d'optimisation, il paraît donc nécessaire que le modèle de surface puisse prendre en compte ces facteurs, qu'il s'agisse du type de gestion des plantes ou des caractéristiques du feuillage et du substrat.

La première étape pour déterminer un ou plusieurs modèles d'enveloppe végétale à intégrer dans **Solene-microclimat** a donc été d'étudier les différents dispositifs existants. Ce travail a permis de proposer une typologie des façades végétales en fonction de leur effets climatiques et thermiques supposés. Dans un deuxième temps, un travail d'analyse et de veille de la littérature scientifique sur la modélisation des façades végétales à été menée, en gardant en tête la classification établie précédemment. Un état de l'art sur la modélisation thermique des toitures végétales, dont les modèles de façade sont largement inspirés, est également présenté. À partir de cette connaissance, un modèle a pu être développé, intégré à notre outil de simulation et mis à l'épreuve de résultats expérimentaux.

4.1 Typologie des façades végétales

Les études climatiques des façades végétales mettent en évidence plusieurs effets climatiques directs des façades végétales :

Effets radiatifs : les feuilles jouent le rôle de protection solaire pour le mur la journée mais limitent également le refroidissement nocturne en bloquant le rayonnement GLO. De par leur physiologie, les feuilles absorbent une quantité importante de rayonnement solaire sans élever leur température grâce à la transpiration. Enfin, la présence ou non d'un substrat humide peut également entraîner un refroidissement passif par évaporation.

Effets conductifs : la végétation et son substrat peuvent avoir un effet d'isolation et de stockage thermique.

Effets convectifs : les plantes limitent les transferts convectifs sur la surface extérieure du mur.

La modélisation climatique des façades végétales doit donc prendre en compte les paramètres radiatifs, en particulier le rayonnement solaire, les échanges thermiques infrarouges, le vent et l'humidité de l'air. Ces sollicitations auront un effet différent suivant le type de façade végétale.

4.1.1 Définition d'une typologie

Comme les toitures jardins, il existe différentes techniques pour végétaliser les façades, en fonction de l'existence ou non du substrat et de son type, de la constitution et la situation des éléments d'enveloppe par rapport aux murs et à l'environnement extérieur. La constitution de la façade végétale va avoir une influence importante sur son comportement thermique et climatique. Il convient donc de classer les différents types de murs végétaux par familles. La classification adoptée en distingue trois, en fonction du rôle joué par les éléments de végétalisation :

1. La végétation comme revêtement de façade
2. La végétation comme brise-soleil
3. La végétation comme élément de paroi

4.1.2 La végétation comme revêtement de façade

Pour les façades recouvertes de plantes grimpantes ou qui poussent sur un support proche de la paroi, on peut considérer que la végétation est utilisée comme revêtement extérieur d'éléments de façades opaques. Il s'agit des façades végétales les plus anciennes et les plus étudiées du point de vue climatique. Elles peuvent être constituées de plantes qui s'attachent directement à la paroi (voir les deux exemples de la Figure 4.1) ou bien qui s'enroulent autour d'une grille ou de câbles supports. Elle se différencie de la végétation "brise-soleil" car on peut constater l'existence d'une couche d'air dans la canopée à une température différente de la température extérieure [Hoyano, 1988; Tsoumarakis et al., 2008].

De nombreuses familles de plantes peuvent être utilisées, qu'elles soient à feuillage caduc ou persistant, nécessitant ou non un support pour grimper. On peut en citer quelques unes parmi les plus couramment utilisées :

- le lierre grimpant (*hedera helix*), plante vivace à feuillage persistant,
- la vigne vierge (*parthenocissus*), plante vivace à feuillage caduc,
- les clématites (*clematis*), plantes vivaces, caduques ou persistantes suivant les espèces,
- la glycine (*wisteria*), plante vivace à feuillage caduc,
- ...



FIGURE 4.1 – Exemples de revêtements de lierre grim pant

Il faut noter que l'on retrouve ces plantes aussi bien dans les façades végétales de type "revêtement" que de type "brise-soleil".

D'un point de vue climatique, deux effets principaux peuvent être observés : premièrement, la végétation joue directement le rôle de masque solaire et protège la paroi du rayonnement solaire et infrarouge¹. Cette protection radiative s'applique également la nuit en bloquant les échanges infrarouges entre le mur et le ciel. Deuxièmement, on peut observer la création d'une couche d'air entre les feuilles et la paroi support à une température différente de l'air extérieur, ceci grâce à la protection thermique et aéraulique que constitue le couvert végétal.

Du point de vue radiatif, la couverture végétale d'une façade peut être simplement définie par deux coefficients : la transmittivité et la réflectivité. Il s'agit donc d'adapter le modèle de surface et d'utiliser des caractéristiques radiatives différentes. Ces coefficients peuvent être fonction de plusieurs paramètres qui évoluent dans le temps, comme les angles solaires et la disponibilité en eau.

Du point de vue hygrothermique, un bilan thermique à la surface de la feuille est nécessaire. Il faut donc prendre en compte la capacité thermique et la transpiration des plantes, cette dernière étant également fonction de facteurs externes. On utilisera une couche superposée à celle du mur, laissant passer une certaine quantité de rayonnement infrarouge en fonction du taux de couverture végétale, et à laquelle est attribuée une température équivalente correspondante à celle du feuillage. La production d'humidité de la végétation dépendant principalement de la résistance stomatique et du vent sera prise en compte.

Enfin, la principale différence avec le deuxième type de façade végétale

1. Les plantes sont complètement opaques au rayonnement infrarouge.



FIGURE 4.2 – Protection solaire végétale

est la prise en compte des échanges convectifs, en particulier entre la face intérieure de la surface représentant la couverture végétale et le mur. En effet, l'existence d'une couche d'air de température différente à l'air ambiant entre les feuilles et le mur est due aux échanges convectifs. La question est de savoir si l'on peut éviter l'utilisation d'un nœud d'air entre la couverture végétale et le mur. On peut penser qu'il suffirait d'adapter un coefficient d'échange superficiel prenant en compte à la fois les effets radiatifs GLO et convectifs entre ces deux éléments. Ceux-ci dépendent cependant du type d'écoulement présent dans la lame d'air.

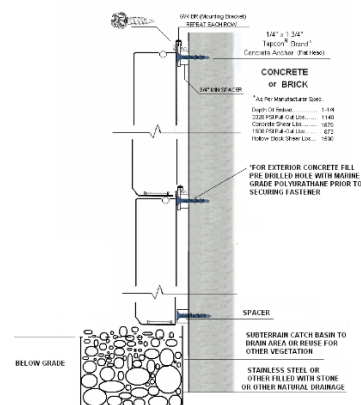
4.1.3 La végétation comme brise-soleil

Pour le deuxième type de façade végétale, que l'on appelle "brise-soleil", vis-à-vis du bâtiment les plantes n'ont plus qu'un rôle radiatif (CLO et GLO). La différence avec le type précédent est que le support est cette fois écarté du mur ou de la fenêtre qu'il protège. Ce type d'enveloppe végétale permet de protéger des ouvertures transparentes comme les fenêtres sans qu'il existe une couche d'air isolante entre les feuilles. Des constructeurs de solutions de végétalisation proposent un large panel de grilles supports pour les plantes grimpantes [Miller et al., 2004]. La végétalisation comme protection solaire a été étudiée expérimentalement par Hoyano [1988] (pergolas, plantes en pots). Deux exemples sont donnés sur la Figure 4.2.

Les phénomènes climatiques d'un brise-soleil végétal sont assez proches de ceux du type précédent : les effets sont les mêmes au niveau du rayonnement, mais différents du côté aéraulique car il n'y a pas de création d'une couche à une température différente, même si la présence de végétation va toujours avoir un effet sur l'écoulement de l'air et donc sur les échanges convectifs. Du point de vue radiatif de courte et de grande longueurs d'onde,



(a) Patrick Blanc – Caixa Forum, Madrid



(b) coupe greenwall

FIGURE 4.3 – Exemples de mur végétaux

la seule différence pourrait être une asymétrie entre les coefficients optiques suivant que le rayonnement traverse la végétation dans un sens ou dans l'autre. Encore une fois, on peut faire un bilan thermique de la végétation pour lui assigner une température, et prendre en compte la production d'humidité dans le modèle aéraulique. On peut également fixer simplement sa température à celle de l'air à proximité, prétextant le rôle prépondérant de ses effets radiatifs, notamment sur l'interception du flux solaire.

4.1.4 La végétation comme élément de paroi

Le troisième type de façade végétale, plus récent, consiste à créer un sol artificiel vertical qui comporte un substrat humide pour la végétation, de la même manière que les toitures végétales. Appelés "murs végétaux" ou "murs vivants" ("living wall"), ils peuvent constituer un élément de paroi à part entière. Pour ces murs, il convient de prendre en compte les effets d'isolation et de stockage thermique. Des travaux de modélisation de ce type de façade ainsi que des simulations microclimatiques ont été effectués [Wong et al., 2010, 2009]. D'autres sont en cours, par exemple à l'Hépià à Genève. Des données expérimentales pour un prototype innovant de façade végétale développé par une équipe de l'Hépià pourront notamment servir à développer et à valider notre modèle.

Depuis l'invention du mur végétal par Patrick Blanc (Figure 4.3(a)), de nombreux fabricants, souvent déjà engagés dans la fabrication de matériel de

toiture végétale, ont mis sur le marché des produits aux caractéristiques très différentes. Celles-ci vont avoir une influence importante sur les effets thermiques des revêtements qui doivent être modélisés. On peut citer plusieurs systèmes constructifs :

- Le procédé “mur végétal” de Patrick Blanc est constitué de plusieurs couches de feutre géotextile (nappe horticole). Elles sont agrafées sur une paroi plastique de quelques millimètres d’épaisseur. Le tout est plus ou moins écarté de la paroi de base, ce qui laisse la possibilité d’intercaler un isolant thermique.
- Le procédé “végétalis” utilise des cages d’acier remplies d’un substrat végétal : la sphaigne du Chili séchée. La structure modulaire permet de monter et éventuellement d’agrandir facilement une façade végétale, d’autant plus que les modules peuvent être végétalisés à l’avance.

A priori, les murs vivants sont des solutions de haute technologie, puisqu’ils doivent incorporer des systèmes d’arrosage automatique, avec une pompe microdoseuse pour réaliser la solution nutritive. Il s’agit ni plus ni moins d’une technique de culture hors sol, à l’image de ce qui est utilisé dans une certaine forme d’agriculture intensive à la différence notable qu’on ne cherche pas un rendement important ici. La solution nutritive est dosée dans des proportions permettant aux plantes de vivre, plutôt que de trop favoriser leur développement. Du point de vue de l’arrosage, on peut distinguer les murs vivants suivant que ceux-ci soient bouclés ou à eau perdue. Le premier type est plus consommateur d’énergie, le deuxième un important consommateur d’eau.

Pour ces murs, les choses se compliquent sensiblement du point de vue climatique puisque le substrat va jouer un rôle thermique important :

- Il va plus ou moins renforcer la résistance thermique de la paroi d’autant plus que sa densité est faible et d’autant moins qu’il est chargé en eau.
- Il va jouer un rôle de stockage thermique important, d’autant plus qu’il est saturé en eau.
- L’évaporation de l’eau du substrat va s’ajouter à la transpiration des plantes.
- L’eau du circuit d’arrosage, qui peut être à une température différente de l’environnement ambiant, va également rafraîchir ou réchauffer le substrat.

Cette fois, il paraît indispensable de prendre en compte l’inertie thermique de la façade par l’intermédiaire d’un ou plusieurs nœuds dans un modèle thermique dynamique. Celui-ci serait superposé à la paroi et dépendrait fortement de nombreux paramètres. La question est de savoir s’il est nécessaire de développer un modèle de sol pour caractériser la répartition et l’effet de l’eau d’arrosage dans le substrat. Dans ce cas, il faut prendre en compte

la gravité dans les écoulements à travers le substrat, ainsi que le cycle d'arrosage.

Pour simplifier le problème, une solution consisterait à intercaler un ou plusieurs nœuds entre un modèle radiatif similaire à celui utilisé pour les deux autres types de façade. Ces nœuds comporteraient un modèle de sol et un modèle thermique dont les résultats seraient couplés avec les caractéristiques radiatives et hydrauliques du feuillage, celles-ci étant fonction des caractéristiques du sol.

4.1.5 Conclusion

Le bilan des actions climatiques supposées de ces différents types de façade est donné dans le Tableau 4.1.

4.2 État de l'art sur le comportement hydrothermique des façades végétales

4.2.1 Étude des dispositifs de façades végétales

Après quelques publications antérieures aux années 90 concernant principalement les façades recouvertes de lierre, qui font figure de pionnières, la communauté scientifique ne s'est réellement appropriée la question du comportement thermique des façades végétales qu'à partir de la fin des années 2000. Les articles publiés depuis traitent d'un nombre important de solutions techniques différentes, dans des contextes climatiques et avec des champs d'études variés.

À titre d'illustration, la répartition mondiale des publications traitées ou de leur terrain d'étude est présentée sur la Figure 4.4. À part Alexandri et Jones [2008] pour lesquels la localisation est une variable et Holm [1989] en Afrique du Sud, la plupart des études se concentrent à l'est et au sud-est de l'Asie, ainsi que dans des pays du sud et du nord de l'Europe.

Sur les 19 études présentées, quinze comportent des résultats expérimentaux quand sept concernent la modélisation. La plupart portent uniquement sur les dispositifs végétaux. Huit traitent de l'impact sur le bâtiment quand seulement deux publications observent également l'impact sur le microclimat.

Dispositifs étudiés

Sur les 19 publications étudiées, onze portent sur des façades recouvertes de plantes grimpantes directement sur la paroi ou sur un support (pour deux d'entre elles). Treize dispositifs avec substrats, tous différents, sont étudiés dans sept publications (dont sept dans un seul article [Wong et al.,

radiatif	thermique	aéraulique
		revêtement
protection fonction de la densité de feuillage	cavité d'air comme couche de protection	transferts convectifs avec la paroi limités
protection des parois opaques uniquement	pas d'inertie thermique	
		brise-soleil
permet de protéger des ouvertures	aucun effet sauf radiatif	
	pas d'effet de cavité	
		élément de paroi
protection totalement opaque	résistance thermique : possibilité d'ajouter une couche d'isolant	plus ou moins d'évaporation
dépend moins des saisons à cause du substrat	inertie thermique du substrat et du support	pas d'effet direct sur les échanges convectifs avec le mur
protection des parois opaques uniquement		

TABEAU 4.1 – Bilan des effets climatiques liés aux différents types de façade végétale

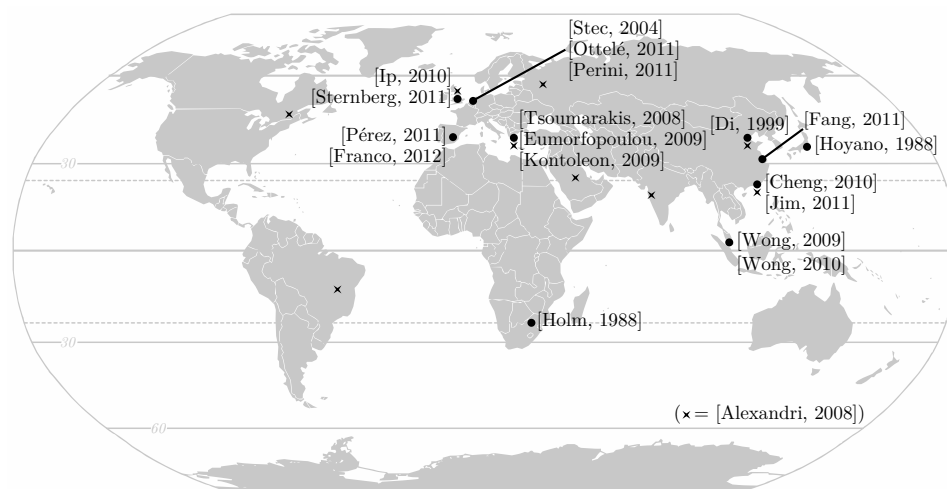


FIGURE 4.4 – Localisation géographique des études effectuées sur les façades végétales

2010]). Deux auteurs traitent du cas de plantes intégrées dans des façades double peau, dont une est vitrée sur un seul côté [Stec et al., 2005] et l'autre entièrement [Fang et al., 2011], cette dernière ayant la particularité d'être constituée de végétation tombante. Parmi les cas particuliers, on peut citer la façade brise-soleil étudiée par Pérez et al. [2011] et un balcon protégé par une vigne vierge [Hoyano, 1988].

Effet sur les températures extérieures

Les températures sont presque toujours étudiées et sont mêmes quelquefois les seules grandeurs physiques citées. En plus de la température d'air extérieure et éventuellement de la température intérieure, les points de mesure ou de simulation qui reviennent le plus souvent sont les suivants :

- température des feuilles,
- température de la surface extérieure du mur, ou de la surface du substrat,
- température du substrat,
- température sur la face arrière, éventuellement à l'intérieur d'un bâtiment,
- température de l'air au sein des feuilles,
- température de l'air dans la cavité d'air proche du mur ou dans la double peau,
- température de l'air à plusieurs distances du mur végétal.

4.2 État de l'art sur le comportement hydrothermique des façades végétales

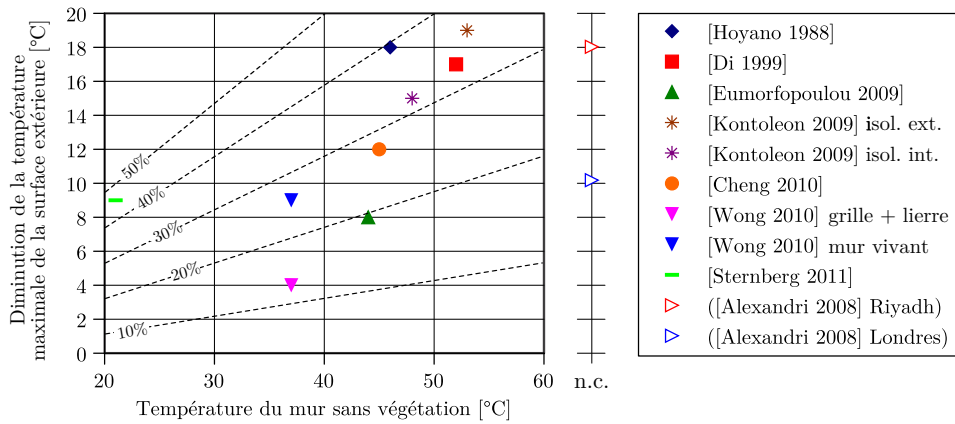


FIGURE 4.5 – Diminution de la température maximale de la surface extérieure due à la couverture végétale, en fonction de la température de surface sans végétation

Température de surface L'observation de l'effet du feuillage sur les températures de surface ou les températures de l'air intérieur est récurrente. La Figure 4.5 montre l'effet des couvertures végétales sur les températures de surface extérieure maximales observées par huit auteurs, avec des types de façade et des contextes différents. Le minimum observé est de $4 [^{\circ}C]$, le maximum de $19 [^{\circ}C]$ pour une moyenne de $13 [^{\circ}C]$, qui constituent des réductions de 8 à 50%. Ces écarts semblent principalement liés à l'intensité du rayonnement solaire. On observe ainsi qu'ils sont plus importants lorsque la température du mur sans feuillage est plus importante. Cette intensité de réduction varie également en fonction de l'orientation. À part les cas de Sternberg et al. [2011] et Alexandri et Jones [2008] au Royaume Uni, tous les autres résultats présentés concernent des climats chauds asiatiques ou méditerranéens. Celui de Wong et al. [2010] à Singapour, est également particulier puisqu'à une latitude de 1° nord, les murs ne reçoivent qu'une petite partie du rayonnement solaire. On peut néanmoins noter dans cette étude la différence due au type de façade végétale. La constitution de la paroi entre également en jeu, comme on peut l'observer sur deux des cas traités par Kontoleon et Eumorfopoulou [2009], avec une isolation extérieure ou intérieure.

Caractéristiques solaires des façades végétales

Le comportement thermique et physiologique des plantes est très fortement lié au rayonnement solaire reçu. De même, la protection au rayonnement de courte longueur d'onde est très certainement l'effet prépondérant de la couverture du feuillage sur le comportement thermique du mur qui la supporte. Ainsi, les caractéristiques radiatives sont des paramètres très sensibles

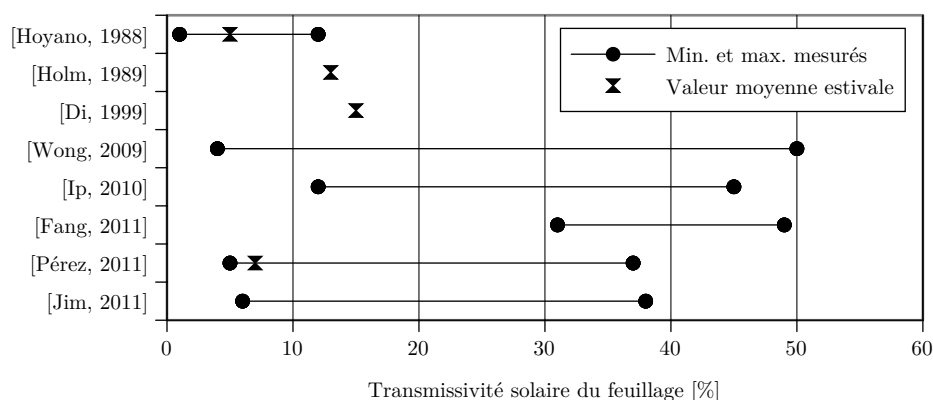


FIGURE 4.6 – Transmissivité solaire des couvertures végétales

dans tous nos calculs thermiques. Les auteurs cités ne s’y sont pas trompés et les études, quand elles ne portent pas uniquement sur le comportement solaire des façades [Ip et al., 2010], abordent souvent cette question notamment du point de vue expérimental [Hoyano, 1988; Fang et al., 2011; Pérez et al., 2011; Jim et He, 2011]. Ils sont également des paramètres sensibles des modèles thermiques [Holm, 1989; Di et Wang, 1999; Wong et al., 2009; Alexandri et Jones, 2008].

Les trois caractéristiques solaires d’une surface ou d’un milieu translucide vont jouer un rôle sur la répartition du flux solaire incident :

- La transmissivité correspond à l’énergie solaire directement transmise à la surface support de la végétation, qui va être déterminante sur le comportement thermique du bâtiment en termes de confort thermique ou de consommation énergétique.
- L’absorptivité correspond au pourcentage de flux de rayonnement absorbé par les feuilles, qui va être en partie consommé par l’évapotranspiration mais également provoquer leur réchauffement. La couverture végétale va alors émettre plus de rayonnement infrarouge ce qui a un effet indirect à la fois sur le bâtiment étudié et sur les constructions proches.
- L’albédo, qui constitue le complément des deux paramètres précédents, détermine quant à lui la part de rayonnement directement réfléchi, éventuellement vers les autres bâtiments.

Transmissivité La Figure 4.6 présente les plages de variation des transmissivités solaires mesurées par les expérimentateurs, et celles utilisées dans les modèles. Pérez et al. [2011] et Ip et al. [2010] montrent tous deux la forte variabilité du taux de flux solaire transmis en fonction des saisons. Pour l’été, pendant lequel l’effet de masque est le plus déterminant, l’intervalle de varia-

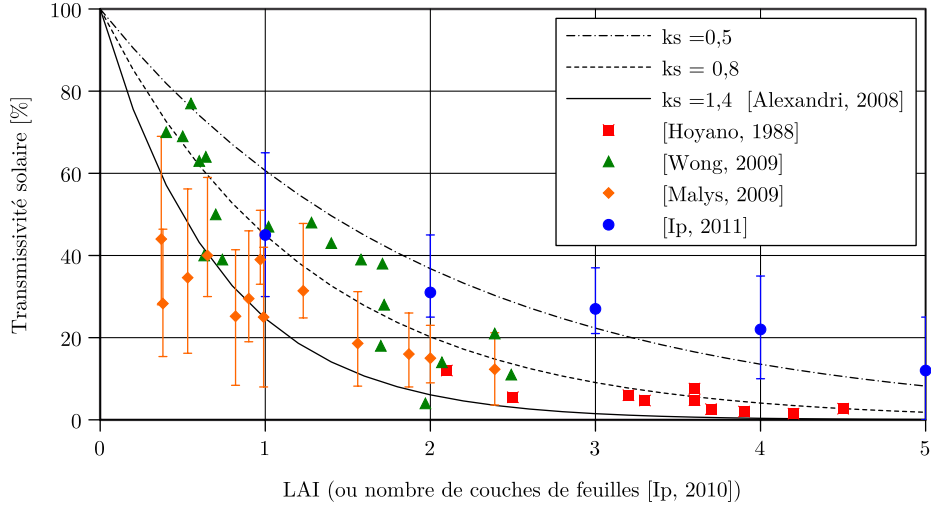


FIGURE 4.7 – Transmissivité solaire d’une couverture végétale en fonction de la densité foliaire

tion est limité entre des valeurs proches de 0 et ne dépasse pas 30% sauf dans des cas particuliers. Le dispositif étudié par Fang et al. [2011], par exemple, est une plante tombante avec une densité foliaire relativement faible.

En effet, c’est bien la densité foliaire qui paraît déterminante, notamment quant à son évolution annuelle liée à la croissance ou à la sénescence des plantes. Ainsi, plusieurs auteurs présentent des corrélations entre le LAI ou des paramètres s’y assimilant, ou bien avec une autre grandeur liée à la répartition des feuilles : le taux de couverture de feuillage [Hoyano, 1988; Wong et al., 2009; Ip et al., 2010; Malys et Musy, 2010]. La Figure 4.7 présente des estimations du taux de transmissivité solaire en fonction de densités foliaires à partir de résultats expérimentaux ou de simulations radiatives, comparées à des résultats théoriques issus de lois d’extinction, pour différents coefficients d’extinction (k_s).

La loi d’extinction correspond à l’atténuation d’un flux de rayonnement dans un milieu turbide. La distance parcourue au sein du milieu est ici remplacée par le LAI . Le coefficient d’extinction est en principe estimé à partir de la répartition statistique de l’orientation des feuilles. C’est l’approche choisie par Alexandri et Jones [2008] qui utilise un coefficient d’extinction de 1,4. Elle est exprimée en pourcentage par la relation :

$$\tau = 100 \cdot e^{-k_s LAI} \quad (4.1)$$

Ip et al. [2010] utilisent une approche particulière puisque ce n’est pas une densité moyenne comme le LAI qui est prise en compte mais bien le

nombre de couches de feuilles en un point donné. Ses résultats montrent les variations journalières qui peuvent être importantes. Ils sont appliqués au calcul de l'évolution annuelle d'un coefficient d'ombrage, le "bioshader coefficient". Malys et Musy [2010] ont utilisé **Solene** pour réaliser des simulations radiatives sur des modèles géométriques explicites de couvertures végétales. Pour une densité foliaire donnée, les résultats obtenus varient en fonction de la hauteur solaire, des caractéristiques radiatives des feuilles et de la répartition du rayonnement entre flux solaires direct et diffus.

La Figure 4.7 montre une bonne adéquation entre l'utilisation de loi d'extinction et les résultats expérimentaux obtenus par Wong et al. [2009] et Hoyano [1988] pour des densités foliaires respectivement faibles et fortes. À l'inverse, le modèle de Malys et Musy [2010] semble montrer ses limites pour les faibles densités foliaires. Les résultats obtenus par Ip et al. [2010] sont mitigés pour les fortes densités, même si nous ne pouvons pas nous assurer de la pertinence de la comparaison.

Albédo L'albédo va déterminer l'effet indirect de la façade sur les bâtiments environnants par l'intermédiaire des inter-réflexions solaires. Ce paramètre des façades végétales est peu étudié dans la littérature. En effet, tant que l'environnement proche n'est pas représenté, sa valeur n'est fixée que pour déterminer celle de l'absorptivité du feuillage. Celles qui sont données sont assez variables : 16% pour Holm [1989], 10% pour Di et Wang [1999] et 30% pour Alexandri et Jones [2008], seule publication dans laquelle l'albédo intervient dans le bilan de rayonnement courte longueur d'onde dans la rue canyon.

Bilan hydrique

Franco et al. [2012] et Cheng et al. [2010] sont les seuls qui discutent de l'évolution de l'état hydrique des substrats.

L'application de Franco et al. [2012] est néanmoins déroutante puisqu'il s'agit de voir l'effet d'un type de substrat sur de l'air qui le traverserait comme un filtre humidifiant, l'objectif étant d'humidifier de l'air pour alimenter un système de ventilation. Il s'agit non seulement de murs vivants, mais aussi de murs actifs d'un point de vue climatique. Certains résultats sont malgré tout intéressants. Ainsi, ils montrent que l'apport de végétation n'augmente la quantité d'eau évaporée par le substrat que de 22% en moyenne.

Les résultats de Cheng et al. [2010] concernent davantage notre cas d'étude. La façade végétale étudiée est composée de cinq panneaux de 50[cm] de haut. Il montre que la saturation du substrat d'un mur végétal est de deux à trois fois plus importante dans la partie inférieure de chaque panneau. L'irrigation est néanmoins bien répartie entre les panneaux puisque seul le plus

4.2 État de l'art sur le comportement hydrothermique des façades végétales

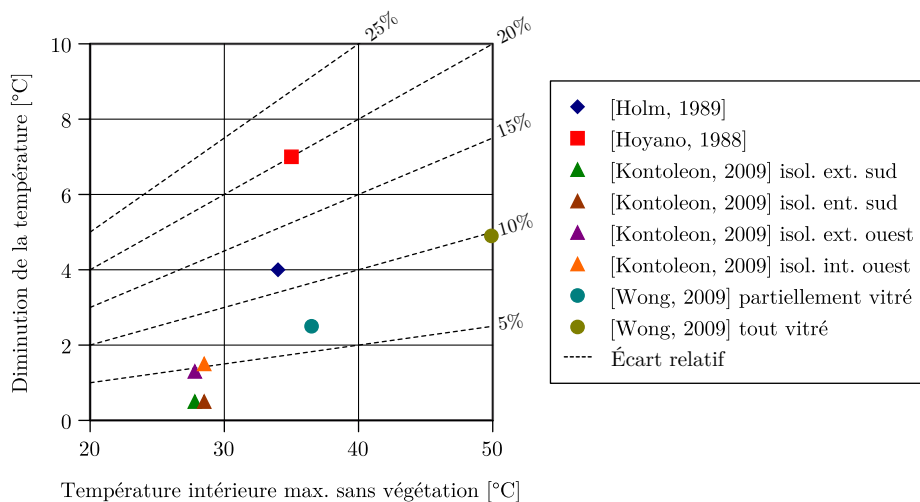


FIGURE 4.8 – Diminution de la température intérieure maximale due à la couverture végétale, en fonction de la température intérieure sans végétation

haut est alimenté, transmettant son excès d'eau aux autres par gravité.

4.2.2 Effet des façades végétales sur le comportement thermique des bâtiments

Parmi les publications présentées, certaines ne se restreignent pas à l'étude des façades à l'extérieur du bâtiment ou sur des dispositifs isolés mais s'intéressent également à leur relation avec l'ambiance intérieure. Les effets étudiés, qu'ils soit mesurés ou simulés, sont :

- la température intérieure,
- la consommation énergétique, principalement pour la climatisation,
- les flux thermiques.

Effet sur la température intérieure

La Figure 4.8 présente les diminutions de la température intérieure maximale dans les bâtiments observées par les auteurs. Tous les résultats sont issus de simulations sauf pour Hoyano [1988]. Les écarts obtenus vont de 0,5 à 7[°C] en valeur absolue, correspondant à des réductions relatives de la température intérieure maximale allant de 1,4% à 20%.

Hoyano [1988] a mesuré une réduction de la température intérieure maximale de 7[°C] dans une pièce dont la façade est protégée par du lierre. Cette valeur doit être corrigée par l'écart entre la température extérieure pour les deux périodes étudiées, qui est de 5[°C]. La diminution relative est donc de

2[° C].

Des simulations menées avec le modèle **DEROB** par Holm [1989] lui permettent d'évaluer le bénéfice de la végétalisation des façades sur la température intérieure en fonction de la masse thermique (faible ou forte), de l'orientation du bâtiment (à l'ouest ou au nord) et du climat (chaud et sec, méditerranéen, chaud et humide) pour un bâtiment typique d'Afrique du Sud. Au maximum, il obtient une réduction de 4[° C] en été, pour une construction avec une faible masse thermique orientée à l'ouest, dans un climat chaud et sec. Le minimum hivernal est également augmenté de 1[° C]. Pour le climat méditerranéen et avec une forte inertie, aucune différence significative n'est observée pour la maison orientée au sud, quand celle orientée à l'ouest voit sa température intérieure diminuer de 2[° C]. Pour cette zone climatique, c'est l'effet hivernal qui paraît le plus intéressant puisque la température minimale peut être augmentée de 5[° C].

Par l'intermédiaire de simulations sur une petite maison sans vitrage, Kontoleon et Eumorfopoulou [2009] obtiennent une réduction maximale de 1,5[° C] en végétalisant la façade ouest d'un bâtiment isolé par l'extérieur, le bénéfice étant légèrement plus faible soit de 1,3[° C] pour l'isolation intérieure.

Wong et al. [2009] utilisent le logiciel **TAS** pour estimer les températures moyennes radiantes dans un bâtiment avec plusieurs scénarios d'enveloppe : enveloppe partiellement vitrée avec et sans couverture végétale, presque totalement vitrée avec 0%, 50% et 100% de couverture végétale. Les résultats des simulations montrent une diminution maximale de 2,5[° C] avec un faible pourcentage de vitrage et de 5[° C] pour le bâtiment fortement vitré. On peut également noter de légères augmentations de la température intérieure durant la nuit dues à la couverture végétale.

Effet sur la consommation énergétique

La Figure 4.9 montre la diminution de la consommation énergétique due à l'apport d'une couverture végétale. Il s'agit de résultats de simulations, avec des cas et des outils très différents. On remarque l'effet réduit de la couverture de la façade sud pour Kontoleon et Eumorfopoulou [2009] et également l'efficacité impressionnante des façades végétales pour Alexandri et Jones [2008] qui ne prennent pourtant en compte que leur effet indirect. Les autres résultats se situent entre 10 et 20% d'économie d'énergie.

Stec et al. [2005] s'intéressent à l'utilisation de plantes grimpantes pour remplacer les stores dans des façades double peau ventilées. Avec un modèle de bâtiment déjà développé pour l'étude des façades double peau classiques,

4.2 État de l'art sur le comportement hydrothermique des façades végétales

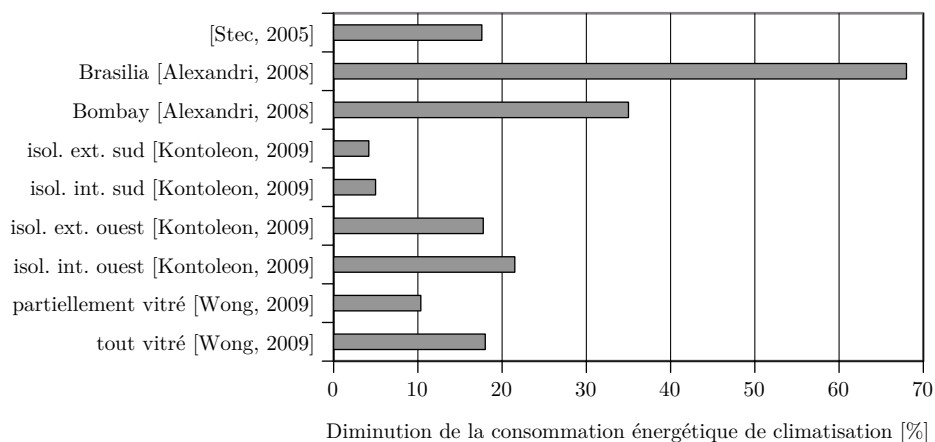


FIGURE 4.9 – Diminution relative de la consommation énergétique pour la climatisation, due à la couverture végétale

ils observent une diminution de 19% de la consommation d'énergie pour la climatisation avec une double peau végétale par rapport à des stores classiques, passant ainsi de 16,2 à 13,35 $[kWh/m^2]$.

En ne considérant que les effets indirects de la végétalisation de l'enveloppe, c'est-à-dire en ne prenant en compte que les effets de la modification de la température d'air extérieur et du bilan radiatif, Alexandri et Jones [2008] arrivent à des résultats bien plus impressionnants avec des diminutions de la consommation énergétique pour la climatisation allant de 35% pour Bombay à 68% pour Brasilia, l'écart étant d'autant plus important que le climat est chaud et sec, d'après les auteurs.

Toujours pour leur bâtiment sans vitrage, Kontoleon et Eumorfopoulou [2009] obtiennent une diminution de la consommation énergétique de 18 à 22% en protégeant la façade ouest d'un bâtiment (pour une isolation extérieure ou intérieure, respectivement).

Les réductions de la consommation énergétique calculées par Wong et al. [2009] sont de 10% pour un bâtiment faiblement vitré et de 18% pour un bâtiment fortement vitré.

Étude des flux thermiques

Flux convectif échangé avec l'air intérieur La Figure 4.10 montre les flux thermiques maximums transmis à l'air intérieur avec et sans façade végétale. Ils sont drastiquement réduits pour Cheng et al. [2010] tandis qu'ils s'annulent pour Hoyano [1988]. Ils sont même inversés pour Eumorfopoulou

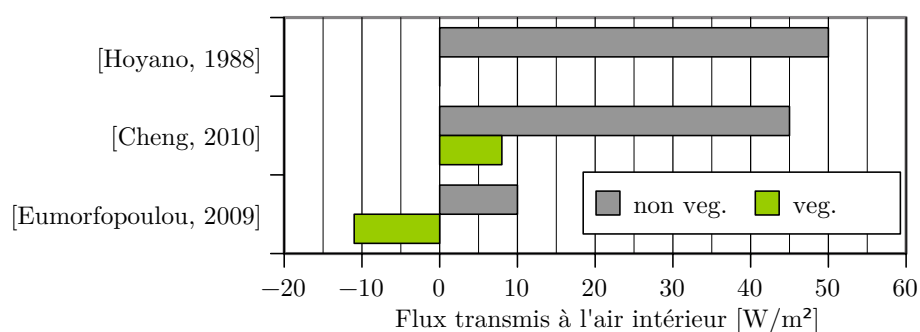


FIGURE 4.10 – Flux convectif échangé avec l’air intérieur

et Kontoleon [2009], la surface du mur étant plus fraîche que l’air intérieur.

Bilan de flux sur la surface du mur extérieur et sur la végétation Certains auteurs présentent des bilans de flux complets. La Figure 4.11 présente une comparaison des flux maximaux simulés pour la végétation et la surface extérieure du mur issus des résultats de Di et Wang [1999] et du bilan thermique de la surface extérieure estimé à partir de mesures pour Hoyano [1988]. Il a fallu retrouver les signes algébriques de certains flux en fonction des températures fournies.

Pour le mur, le flux est compté négativement lorsqu’il est transmis à la paroi de l’extérieur vers l’intérieur. Si les flux échangés sont largement supérieurs par rapport aux autres publications dans le cas de Di et Wang [1999], la répartition des gains thermiques est équivalente entre les deux auteurs avec environ 10% de flux solaire transmis à travers les feuilles, 20% de flux convectif reçu par l’air sous les feuilles et 20% de flux infrarouge en provenance des feuilles. Dans les deux cas, la température de surface est donc plus faible que celles de la canopée végétale et de l’air en son sein. Le flux conduit à travers la paroi est de 20% pour Di et Wang [1999]. On suppose que le reste y est stocké. Cette répartition n’est pas précisée pour Hoyano [1988].

Au niveau du bilan sur le feuillage, la chaleur apportée provient principalement du flux solaire pour plus de 90% et est évacuée à 70% par l’évapotranspiration, à 20% par convection et à 10% sous forme de rayonnement infrarouge vers le mur. Les feuilles ont une température plus élevée que l’air et le mur. Le flux infrarouge échangé avec l’environnement n’est pas précisé. La capacité thermique des feuilles étant supposée négligeable, il est probable que le stockage corresponde au terme de bilan que nous avons calculé.

4.2 État de l'art sur le comportement hydrothermique des façades végétales

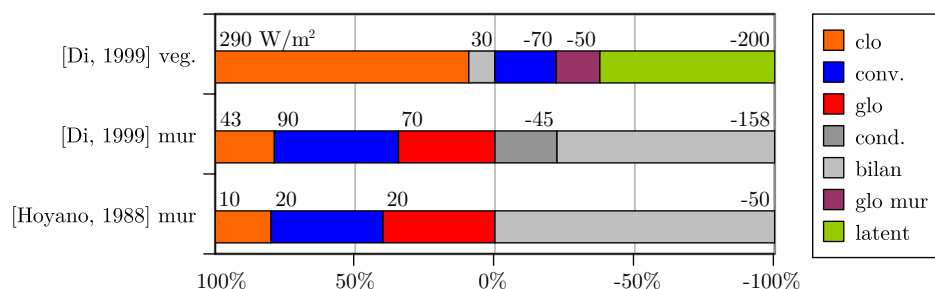


FIGURE 4.11 – Bilan de flux sur la végétation et sur la surface extérieure du mur

4.2.3 Effet sur le microclimat

Rue canyon

Alexandri et Jones [2008] ont mis en œuvre un modèle thermique de rue canyon couplé (Figure 4.12). Les flux solaires incidents et les conditions de vent dans le canyon sont calculés avec les logiciels ECOTECH et Win4Air respectivement. L'objectif est d'évaluer la capacité des toitures et façades végétales à atténuer l'effet d'îlot de chaleur urbain. Les paramètres pris en compte sont :

- la configuration végétale : sans végétation, avec toitures végétales, avec façades végétales, avec toitures végétales et façades végétales,
- le rapport d'aspect de la rue : $\frac{H}{W} = 2$; $\frac{1}{2}$ et $\frac{1}{3}$,
- l'orientation de la rue : est/ouest et nord/sud,
- la direction du vent : perpendiculaire ou parallèle à l'axe de la rue,
- le climat : huit villes de différentes zones climatiques (voir Tableau 4.2 et Figure 4.4).

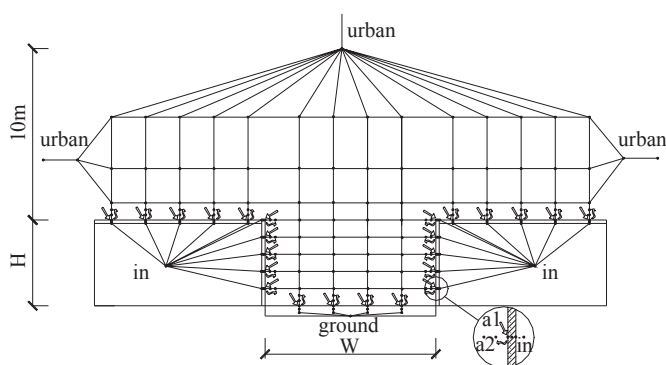


FIGURE 4.12 – Modèle de rue canyon par la méthode des différences finies [Alexandri et Jones, 2008]

Ville, pays	Climat	Latitude
Londres, Royaume-Uni	tempéré	51 ° N
Montréal, Canada	subarctique	45 ° N
Moscou, Russie	continental	55 ° N
Athènes, Grèce	méditerranéen	38 ° N
Pékin, Chine	semi-aride (steppe)	39 ° N
Riyadh, Arabie Saoudite	désertique	24 ° N
Hong Kong, Chine	subtropical humide	22 ° N
Bombay, Inde	tropical humide	19 ° N
Brasilia, Brésil	tropical (savane)	15 ° S

TABLEAU 4.2 – Villes et climats étudiés par Alexandri et Jones [2008]

En plus des températures obtenues, les résultats sont utilisés pour analyser le confort au sein de la rue et l'effet sur la consommation énergétique pour la climatisation.

La Figure 4.13 montre les diminutions de température au sein de la rue pour les cas avec façades végétales et pour les cas entièrement végétalisés. Le canyon est orienté est/ouest avec un rapport d'aspect de 0,5 et un vent parallèle à l'axe de la rue. On peut s'interroger sur le fait que les conditions initiales soient les mêmes pour tous les cas ce qui dénote l'absence de période d'initialisation. Si on peut penser que, sans représentation interne des bâtiments, la dynamique thermique ne soit pas très différente d'un jour sur l'autre, il convient de ne pas prendre en compte les premières heures de simulation.

Pour tous les cas présentés, la diminution de la température est notable : au maximum de 2,6[° C] pour Londres à plus de 5[° C] pour Riyadh avec seulement les façades végétales et de 3[° C] pour Moscou à plus de 11[° C] pour Riyadh dans les cas entièrement végétalisés. Les différences entre les villes sont également importantes. On distingue nettement les trois d'entre elles qui ont un climat plutôt tempéré (Moscou, Londres et Montréal) ou en tout cas aux latitudes élevées, celles au climat chaud et humide (Pékin, Brasilia, Hong Kong, Bombay) et le climat chaud et sec de Riyadh. Si l'effet des façades sur Athènes est un des plus importants, le bénéfice des toitures semble moindre par rapport aux autres villes du sud, ce que l'on peut expliquer par sa latitude relativement élevée. Ces résultats montrent que l'effet de la végétation est d'autant plus important que le climat est chaud et sec.

Les auteurs notent que l'effet de l'orientation et de la direction du vent, s'il est important pour les températures des surfaces ou de l'air de la rue elles-mêmes, reste limité sur la diminution de la température due à la végétation.

À propos de la configuration végétale, l'étude montre que si les façades

4.2 État de l'art sur le comportement hydrothermique des façades végétales

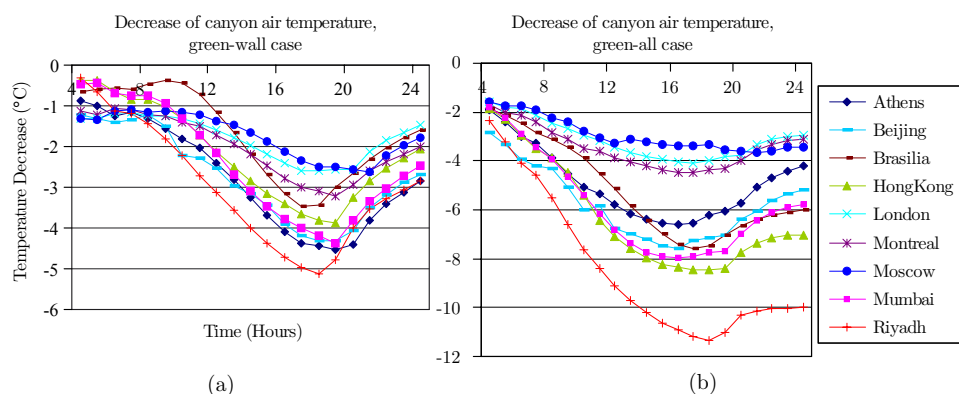


FIGURE 4.13 – Diminution de la température au sein de la rue canyon : (a) cas avec façades végétales – (b) cas avec façades végétales et toitures végétales [Alexandri et Jones, 2008]

végétales ont un impact plus important que les toitures sur le confort des passants dans la rue, seules les toitures végétales permettent de limiter réellement l'îlot de chaleur au niveau des toits, donc au delà de la rue.

Application de scénarios de végétalisation à l'échelle du quartier

Wong et al. [2009] utilisent le modèle STEVE [Jusuf et Wong, 2009; Wong et al., 2011] pour estimer l'impact de plusieurs scénarios de végétalisation sur l'îlot de chaleur urbain à l'échelle d'un quartier. STEVE est un modèle statistique développé à partir de mesures à long terme de champs de températures à Singapour. Plusieurs coefficients sont calculés à partir de données issues d'un système d'information géographique ou de mesures à grande échelle, telles que des caractéristiques de surface (albédo), des données morphologiques (rapport hauteur sur surface des bâtiments, surface totale des façades, facteur de vue du ciel) ainsi que des caractéristiques de la végétation. Des relations linéaires à partir de ces coefficients sont ensuite utilisées pour estimer la température de l'air en un point donné. Les résultats présentés concernent les températures minimales et les températures moyennes, la végétation n'entrant pas en compte dans le calcul de la température maximale.

La méthodologie, qui a déjà été évoquée plus tôt pour les simulations thermiques des bâtiments, consiste à appliquer des scénarios de végétalisation sur l'ensemble des bâtiments d'un quartier. Ceux-ci sont représentés sur la Figure 4.14. Ils correspondent aux hypothèses suivantes :

- 1A : surface totalement opaque en béton,
- 1B : surface totalement opaque recouverte de végétation à 100%,

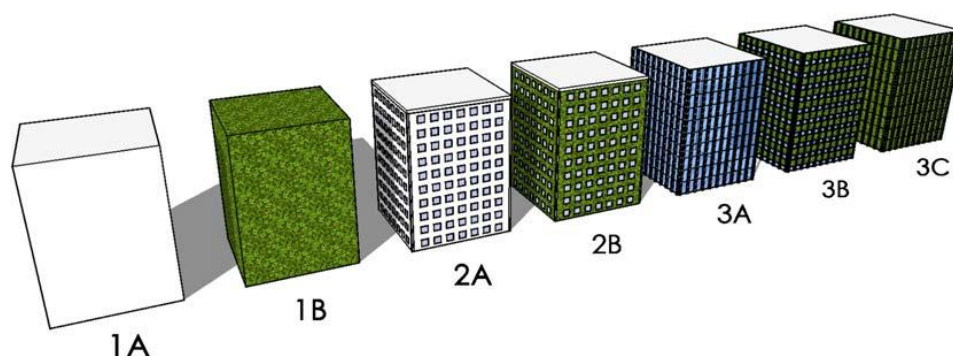


FIGURE 4.14 – Scénarios de végétalisation [Wong et al., 2009]

Scénario	Température minimale		Température moyenne	
	Min.	Max.	Min.	Max.
1A	25,33	26,22	28,03	28,91
1B	24,53	26,22	28,73	28,86
2A	24,84	26,16	28,98	28,88
2B	24,81	26,16	28,91	28,87
2C	24,78	26,16	28,83	28,86
2D	24,73	26,16	28,76	28,84
2E	24,43	26,16	28,68	28,84

TABLEAU 4.3 – Résultats des simulations d’îlot de chaleur urbain, en [$^{\circ}C$] [Wong et al., 2009]

- 2A : bâtiment faiblement vitré en béton,
- 2B : bâtiment faiblement vitré recouvert de végétation sur les surfaces opaques,
- 3A : bâtiment fortement vitré sans végétation,
- 3B : bâtiment fortement vitré recouvert de végétation sur les surfaces opaques,
- 3C : bâtiment fortement vitré recouvert de végétation sur les surfaces opaques et sur une partie des surfaces vitrées.

Seuls les scénarios 1 et 2 sont utilisés pour la simulation de l’îlot de chaleur urbain, avec des variations supplémentaires sur les taux de végétalisation des façades de 25%, 50%, 75% et 100% pour les cas 2B, 2C, 2D et 2E.

Le Tableau 4.3 donne les valeurs minimales et maximales pour les températures minimales et moyennes obtenues sur le quartier. La Figure 4.15 représente les champs des températures minimales pour les scénarios 1A, 1B, 2A et 2E.

Les températures minimales estimées pour l’ensemble de la scène et des cas traités varient entre 24,43[$^{\circ}C$] et 26,22[$^{\circ}C$]. Les résultats montrent une

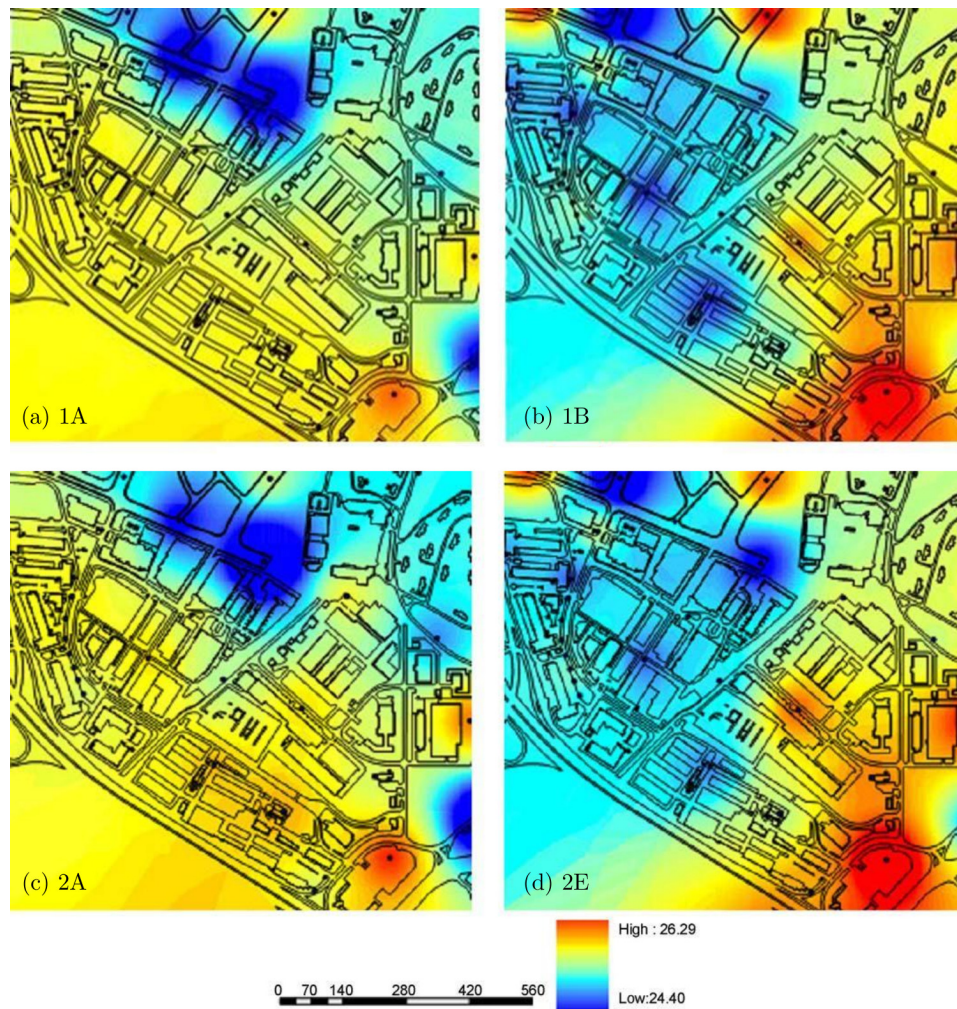


FIGURE 4.15 – Champs de température minimale déterminée par STEVE pour les scénarios : (a) 1A – (b) 1B – (c) 2A – (d) 2E (source : [Wong et al., 2009])

réduction maximale de la température minimale de $0,9[^\circ C]$ entre les scénarios 1A ($25,33[^\circ C]$) et 2E ($24,43[^\circ C]$). L'écart tombe à $0,4[^\circ C]$ si l'on prend en compte un scénario non végétalisé plus réaliste (2A : $24,53[^\circ C]$). La végétalisation des façades n'a aucun impact sur le maximum de température minimale, car il existe des points de simulation qui ne comportent pas de bâtiments. De même, les différences en termes de température moyenne ne semblent pas significatives.

Sur la Figure 4.15, on observe bien un rafraîchissement global sur une grande partie de la scène, dû à la végétalisation. Il est plus difficile d'expliquer certaines augmentations locales entre les cas végétalisés et les autres. De même, certaines zones semblent plus fraîches pour des scénarios sans végétation.

Les résultats montrent bien un effet de la végétation sur le microclimat à l'échelle du quartier. Nos conclusions sur cette étude restent néanmoins mitigées, en particulier quant à la simplicité du modèle de microclimat urbain utilisé, mais également au regard des résultats obtenus dont la cohérence est délicate à attester.

4.2.4 De l'expérimentation à la modélisation

Certains des auteurs cités ont développé des modèles de façade végétale qui n'ont pas encore été présentés en détail. Dans l'ensemble, l'analyse des résultats cités, qu'ils soient issus de mesures ou de simulations, permet de bien situer la problématique de la modélisation thermique des enveloppes végétales par rapport à sa dimension multiphysique et son lien avec les grandeurs et les effets observés. Ainsi, on vérifie que le comportement thermique des façades est très sensible à sa configuration propre et aux caractéristiques de sa couverture végétale mais également au contexte climatique, et ce pour son impact sur l'intérieur des bâtiments et sur son environnement.

Afin de bien représenter les effets respectifs de tous les paramètres qui nous intéressent sur les évolutions des températures et des flux thermiques tels que nous avons pu les observer, les points qu'il nous paraît nécessaire de modéliser avec soin sont les suivants :

- représentation du type de façade,
- bilan radiatif de la couverture végétale,
- estimation du flux latent,
- échanges thermiques avec le mur support,
- interactions de la façade avec son environnement.

4.3 Modélisation des façades végétales

Les questions que l'on peut se poser par rapport à la modélisation des façades végétales sont les suivantes :

- Quelle représentation spatiale utiliser pour les phénomènes radiatifs et aérauliques abordés : couche sans épaisseur, couche avec épaisseur, multicouche ?
- Quelles invariances spatiales : modèle couche 1d, modèle 1d avec discrétisation verticale et horizontale, mais sans interactions transversales, prise en compte des interactions verticales ?
- Quels phénomènes physiques prendre en compte, avec quelle finesse temporelle : variation de la disponibilité en eau, de la quantité de feuillage, de la résistance stomatique..., modèle transitoire, instantané, évolution sur une journée, sur une année ?
- Comment caractériser les différents types de façades : présence d'un substrat, d'une grille support, espèces végétales utilisées ?

Le premier constat est que ceux qui ont développé des modèles de façade végétale ne sont évidemment pas partis de nulle part. Ils se sont en effet largement inspirés des modèles développés pour les toitures végétales, eux-mêmes issus de la littérature sur la modélisation des couverts végétaux sur des sols naturels. C'est la raison pour laquelle nous commençons par présenter ces modèles de toitures végétales, une partie d'entre eux étant souvent cités dans les études sur les façades. Nous aborderons ensuite leur adaptation à des support verticaux et terminerons sur la présentation du modèle tel qu'il a été intégré dans *Solene-microclimat*.

4.3.1 Modélisation des toitures végétales

La littérature sur le comportement thermique des toitures végétales est bien plus abondante que celle portant sur les façades végétales, quels que soient les champs d'étude cités précédemment : expérimentation, modélisation, effet sur le microclimat ou sur le comportement thermique des bâtiments.

Les modèles développés sont également nombreux [Ouldboukhitine et al., 2011; Sailor, 2008; Alexandri et Jones, 2007; Kumar et Kaushik, 2005; Palomo, 1998]. Ils s'accordent globalement dans leur principe qui consiste à réaliser des bilans d'énergie dynamiques sur chacun des éléments constituant une toiture végétale : structure support, sol, canopée végétale et air. Les flux radiatifs, latents et convectifs au sein de ce complexe sont pris en compte à la manière du schéma de Sailor [2008] présenté Figure 4.16. Il s'agit uniquement de modèles unidimensionnels, les transferts horizontaux n'étant généralement pas pris en compte. Des variations liées à la discrétisation géométrique ou à

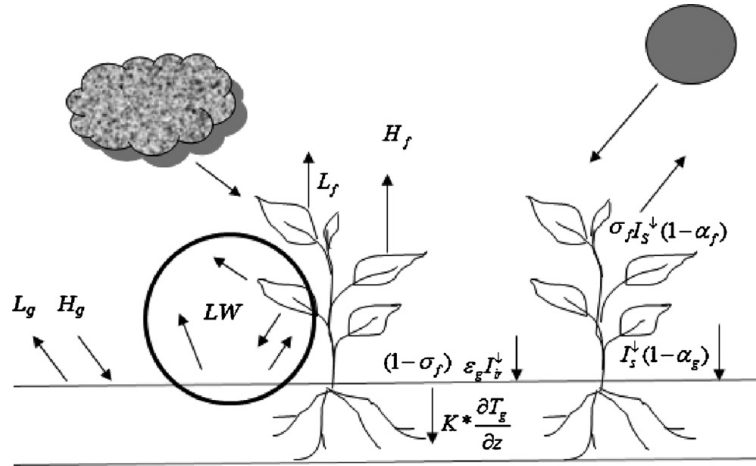


FIGURE 4.16 – Flux thermiques dans une canopée végétale [Sailor, 2008]

la précision de la représentation des transferts de masse et d'énergie peuvent néanmoins être observées.

Représentation de la canopée végétale

En plus de la manière d'estimer le flux latent qui sera abordée par la suite, une différence notable concerne la représentation nodale de la canopée végétale. Quand la plupart des auteurs se contentent d'assimiler la végétation à un matériau uniforme constituant un unique nœud thermique, Alexandri et Jones [2007] en utilisent trois, arguant que cette simplification est excessive pour représenter de façon assez précise les échanges au sein de la couverture végétale (Figure 4.17(a)). Dans ce cas, les caractéristiques radiatives sont donc définies pour chacune des trois couches à partir d'une loi d'extinction. Compte-tenu de l'utilisation que nous comptons faire de notre modèle, ce niveau de détail paraît trop important, d'autant plus que des modèles à une seule couche semblent donner des résultats satisfaisants [Ouldboukhitine et al., 2011; Kumar et Kaushik, 2005].

Modélisation du sol

La problématique est la même pour la représentation de la couche de substrat et du toit support. Alexandri et Jones [2007] utilisent également trois nœuds pour chacun de ces éléments (Figure 4.17(b)). La question de la nécessité d'un tel niveau de détail se pose d'autant plus que la représentation des transferts hydriques dans le substrat est fine. Ceux qui s'intéressent plus particulièrement au bilan en eau et prennent en compte la rétention doivent

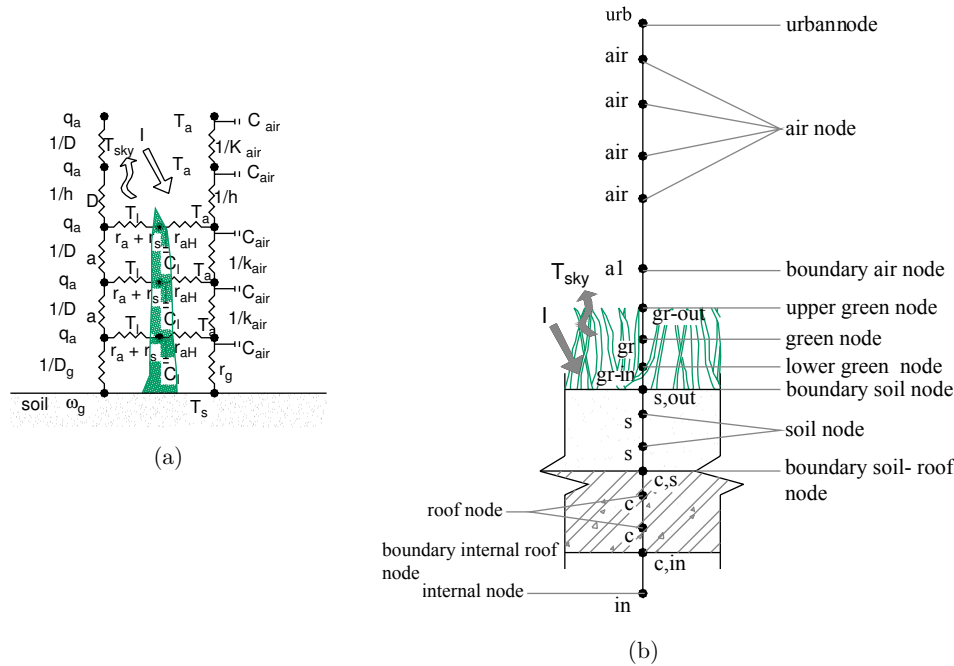


FIGURE 4.17 – (a) Modèle de canopée végétale – (b) Modèle de toiture végétale [Alexandri et Jones, 2007]

prendre en compte les différences de conductivités hydriques des matériaux participant à ce bilan, notamment la couche de drainage quand elle existe. C'est d'ailleurs une des grandes inconnues de la modélisation des façades végétales : peu de résultats expérimentaux sont disponibles. Il n'existe à notre connaissance aucun modèle cherchant à représenter la saturation du substrat, quand bien même il a été montré que les écoulements gravitaires jouent un rôle important [Cheng et al., 2010].

Le sol est un milieu poreux contenant de l'eau liquide et de l'air humide dans lequel ont lieu des transferts de chaleur et de masse qui dépendent de la saturation en eau.

Les modèles diffèrent suivant que le support est considéré comme un solide homogène [Palomo, 1998; Kumar et Kaushik, 2005] ou comme un corps poreux dans lequel on va considérer les échanges hydriques et pour lequel on verra apparaître dans l'équation de la chaleur un terme source lié au changement d'état [Alexandri et Jones, 2007].

Sans rentrer dans le détail des équations utilisées par ces auteurs, il est encore une fois probable que la marge d'erreur liée à la prise en compte de ces phénomènes soit réduite par rapport à celle du calcul des flux latents et radiatifs. Ouldboukhité et al. [2011] montrent qu'il est nécessaire de

prendre en compte le bilan hydrique pour l'estimation de la conductivité du substrat. Une approche intermédiaire avec un bilan hydrique dynamique permettant d'estimer la saturation en eau du substrat à chaque pas de temps doit donc être envisagée.

Modèles de façades végétales : analyse de l'existant

En tout, nous avons relevé huit articles qui présentent des résultats de simulation évaluant l'impact des façades végétales. Les niveaux de représentation sont cependant variables. Si la plupart présentent des modèles nodaux dont les caractéristiques sont détaillées [Alexandri et Jones, 2008; Stec et al., 2005; Di et Wang, 1999; Zaiyi et Niu, 1998; Kontoleon et Eumorfopoulou, 2009], Wong et al. [2009] ne considèrent que l'effet radiatif des enveloppes végétales et Holm [1989] utilise une analogie avec des matériaux courants. Le modèle développé dans TRNSys par Tsoumarakis et al. [2008] n'est pas détaillé. Celui de Stec et al. [2005] est également particulier puisqu'il considère le cas d'une enveloppe double peau. Aucun de ces travaux ne traite le cas d'une façade de type mur vivant.

Bien qu'elles en soient largement inspirées, on pouvait s'attendre à des différences entre les modélisations des façades végétales et celles des toitures végétales. Ainsi, on peut se demander si l'invariance dans le plan des toitures est transposable au cas des façades. Pour les façades, l'hypothèse d'invariance verticale pourrait avoir des conséquences décisives, en particulier en raison de la variabilité de l'ensoleillement, du vent et de l'état hydrique du substrat. L'autre interrogation quant à la prise en compte de la verticalité du dispositif est l'effet de la gravité sur les écoulements d'eau dans le substrat.

Par ailleurs, les échanges radiatifs infrarouges avec l'environnement urbain sont presque inexistants pour les toitures végétales, ce qui n'est pas le cas pour une façade.

Dans les faits, le niveau de détail des modèles précédemment cités n'est pas assez fin pour que ces différences puissent être prises en compte, la principale étant liée au substrat qui n'est jamais représenté.

De la même manière, aucun article ne relève de différence dans la prise en compte des paramètres radiatifs.

Holm [1989] est le premier à proposer un modèle pour des façades recouvertes de lierre. Son approche peut sembler radicale, mais n'en demeure pas moins efficace ce qu'il prouve par une validation expérimentale. Elle consiste à représenter la couche de feuilles par deux couches d'air, "recouvertes" par une couche de 2[mm] d'eau et séparées par une couche de bois de 20[mm] poreuse à 80%. Par cette astuce, il parvient à prendre en compte, certes de manière grossière, la modification du bilan radiatif de surface, l'évapotranspiration et la modification de la convection.

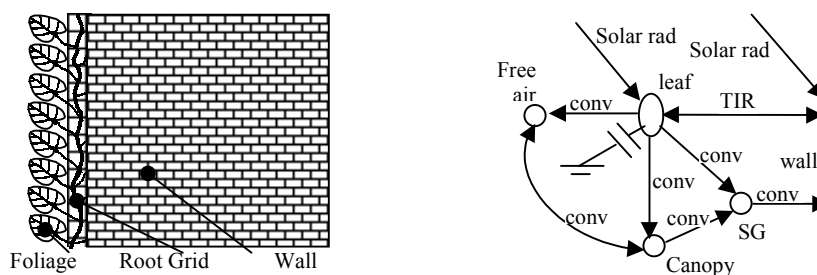


FIGURE 4.18 – Modèle de façade végétale [Zaiyi et Niu, 1998]

Les quatre modèles thermiques de façade végétale (nous excluons le modèle de façade végétale dans une double peau) utilisent chacun un nombre de nœuds d'air différent : aucun pour Di et Wang [1999], qui ne considèrent qu'un nœud de feuillage, deux pour Zaiyi et Niu [1998] qui considèrent l'air au sein des feuilles et celui de la cavité formée sous la grille support, trois pour Alexandri et Jones [2008], comme cela a été présenté précédemment, jusqu'à cinq pour Kontoleon et Eumorfopoulou [2009].

L'analyse des modèles de façades végétales existants ne nous a pas permis d'en savoir beaucoup plus que celle déjà effectuée pour les toitures. Elle montre cependant l'intérêt de la proposition d'un nouveau modèle.

4.3.2 Modèle implémenté dans Solene-microclimat

Contraintes techniques

Lors du développement et de l'implémentation du modèle, une contrainte importante était de conserver l'approche utilisée pour les autres types de surfaces dans *Solene-microclimat*, à la fois pour les surfaces urbaines de la scène et pour celles du bâtiment d'étude. Un autre objectif était de ne pas trop alourdir le code existant qui est déjà difficile à manipuler.

En effet, le programme qui réalise le calcul thermoradiatif est exécuté pour chaque pas de temps, ce qui signifie que toutes les variables dynamiques doivent être transmises entre deux pas de temps par l'intermédiaire de fichiers qui sont autant de paramètres pour la fonction *Solene*. De plus, la paramétrisation telle qu'elle est réalisée ne permet pas beaucoup de flexibilité, le nombre et le type des arguments étant fixés. L'utilisation de commandes avec des options facultatives améliorerait grandement le confort de développement et d'utilisation de ces fonctions thermiques. Plusieurs solutions sont envisageables : conventions de type UNIX pour les lignes de commande, utilisation d'un fichier de configuration en *xml*.

En attendant, l'idée est donc d'ajouter le moins de variables possible, en particulier celles qui sont dynamiques et discrétisées car elle nécessitent

de conserver les données entre chaque pas de temps. Avant l'intégration du modèle, il y avait trois variables de ce type :

- la température de surface extérieure,
- la température de surface intérieure pour les parois de bâtiments, ou du premier nœud thermique pour les sols,
- la température du deuxième nœud pour les sols.

À ces trois variables définies pour chaque facette s'ajoutent les températures nodales du modèle de bâtiment, qui sont au nombre de douze par étage et sont contenues dans un fichier unique. Cette contrainte rend rédhibitoire l'utilisation de plusieurs couches de canopée végétale ou du substrat, autant à cause de la quantité de mémoire nécessaire que pour le temps de calcul, en particulier pour le modèle de bâtiment.

Estimation du flux d'évapotranspiration

Comme cela a déjà été dit à plusieurs reprises, l'estimation du flux latent dû à l'évapotranspiration est une partie critique de la modélisation des couverts végétaux. De nombreuses méthodes de calcul existent [Bouyer, 2009; Allen et al., 1998] qui ne nécessitent pas toutes les mêmes données et ne permettent pas d'obtenir la même précision.

Dans les études citées précédemment, deux visions s'opposent pour calculer l'évapotranspiration. La première consiste à considérer l'air contenu dans les stomates saturé en humidité [Alexandri et Jones, 2007; Palomo, 1998]. Le flux latent est alors estimé à partir d'une différence de potentiel entre l'air saturé des stomates à la pression de vapeur saturante (e_{sat}) et l'air non saturé de la canopée (e_a), en prenant en compte la résistance aéraulique de la canopée r_a et la résistance stomatique r_s :

$$\varphi_{lat,p} = -2LAI \frac{\rho c_p}{\gamma(r_a + r_s)} (e_s - e_a) \quad (4.2)$$

avec

- LAI : densité foliaire,
- γ : constante psychrométrique ($\approx 0,059 [kPa/^\circ C]$),
- ρ, c_p : masse volumique et capacité thermique de l'air.

Cette approche peut aussi être utilisée à la surface du substrat et a donc l'intérêt de séparer les deux termes du flux latent. Par contre, l'humidité de l'air est le seul paramètre climatique qui est pris en compte explicitement. Les autres facteurs déterminants, comme le rayonnement solaire, peuvent être intégrés dans la formulation de la résistance stomatique, mais les références à ce sujet sont rares, et systématiquement appliquées à des cas particuliers comme les plants de tomates [Palomo, 1998].

Nous avons préféré la deuxième approche, qui a également les faveurs de l'organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO)

et s'inscrit dans la continuité des développements réalisés par Bouyer [2009]. Elle consiste à calculer l'évapotranspiration potentielle climatique (ETP_c) avec la formule semi-empirique de Penman-Monteith [Ouldboukhitine et al., 2011; Allen et al., 1998; Bouyer, 2009] :

$$ETP_c = \frac{R_n \Delta + \rho_a c_p \frac{e_s - e_a}{r_a}}{L(\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a}))} \quad (4.3)$$

avec :

- R_n : rayonnement net [W/m^2]
- L : chaleur latente de vaporisation de l'eau [J/kg]
- e_{sat} : pression de vapeur saturante [Pa], calculée en fonction de la température d'air par la formule de Alt [Guyot, 1999] :

$$e_{sat}(T_a) = 610,7 \left[1 + \sqrt{2} \sin\left(\frac{T_a}{3}\right) \right]^{8,827} \quad (4.4)$$

- e_a : pression partielle de vapeur d'eau dans l'air [Pa]
- Δ : pente de la courbe de pression de vapeur saturante ($[Pa/^\circ C]$), dérivée de l'Équation (4.4) :

$$\Delta = 44,352 \cos\left(\frac{T_a}{3}\right) \left[1 + \sqrt{2} \sin\left(\frac{T_a}{3}\right) \right]^{7,827} \quad (4.5)$$

- γ : constante psychrométrique ($\approx 0,059 [kPa/^\circ C]$)
- r_a : résistance aérodynamique du couvert [s/m],
- r_s : résistance stomatique [s/m].

Les résistances aérodynamique et stomatique sont calculées à partir des formules préconisées par la FAO [Allen et al., 1998].

$$r_a = \frac{1}{\kappa^2 v} \ln \left[\frac{z_m - d}{z_o} \right]^2 \quad (4.6)$$

avec :

- κ : constante de Von Karman égale à 0,41
- v : vitesse de vent mesurée [m/s]
- z_m : hauteur référence pour la vitesse [m]
- d : hauteur de déplacement [m]
- z_o : hauteur de rugosité [m]

$$r_s = \frac{r_f}{0,5LAI} \quad (4.7)$$

avec r_f la résistance stomatique d'une feuille isolée, égale à 100 [s/m].

Cette méthode de calcul a été développée pour estimer des besoins d'irrigation pour l'agriculture, mais elle est également employée dans de nombreux autres domaines. Elle a l'inconvénient de ne pas faire la distinction entre l'eau transpirée par les feuilles et celle évaporée à la surface du substrat. Finalement, un ratio correspondant à la part d'évapotranspiration des plantes, noté α_{lat} , a été utilisé pour réaliser cette répartition.

D'autre part, le stress hydrique n'est pas pris en compte dans notre formulation de l' ETP_c qui est estimé pour des conditions d'irrigation idéales. Nous avons donc conservé également l'utilisation du taux d'évapotranspiration f , qui varie entre une valeur nulle pour l'absence totale d'eau et peut dépasser 100% après des épisodes pluvieux. Les méthodes d'évaluation de ce coefficient sont nombreuses et variées [Allen et al., 1998] et celles qui sont présentées se réfèrent encore une fois le plus souvent à des cas particuliers. Il peut dépendre de la saison, du type de plante et de son stade de développement ainsi que de nombreux autres facteurs. Une approche simplifiée du calcul du taux d'évapotranspiration en fonction de la saturation en eau du substrat sera abordée dans la partie sur la validation.

Au final, les flux latents prélevés aux nœuds de végétation et de surface du substrat s'écrivent :

$$\varphi_{lat,f} = \alpha_{lat} f ETP_c \quad (4.8)$$

$$\varphi_{lat,se} = (1 - \alpha_{lat}) f ETP_c \quad (4.9)$$

Le calcul du flux latent dépend donc des variables climatiques suivantes :

- rayonnement solaire et infrarouge,
- température des feuilles, utilisée dans le calcul du rayonnement thermique net,
- température de l'air au sein du feuillage, pour le calcul de la pression de vapeur saturante et de Δ ,
- humidité spécifique de l'air, entrant en jeu dans le calcul de la pression partielle de vapeur d'eau,
- vitesse du vent, pour le calcul des résistances aérauliques et stomatiques.

Présentation du modèle thermique

Le modèle thermique adopté, dont la représentation nodale est donnée Figure 4.19, consiste à considérer deux nœuds thermiques par facette en plus de ceux de la paroi : un pour la végétation et un pour l'air au sein des feuilles.

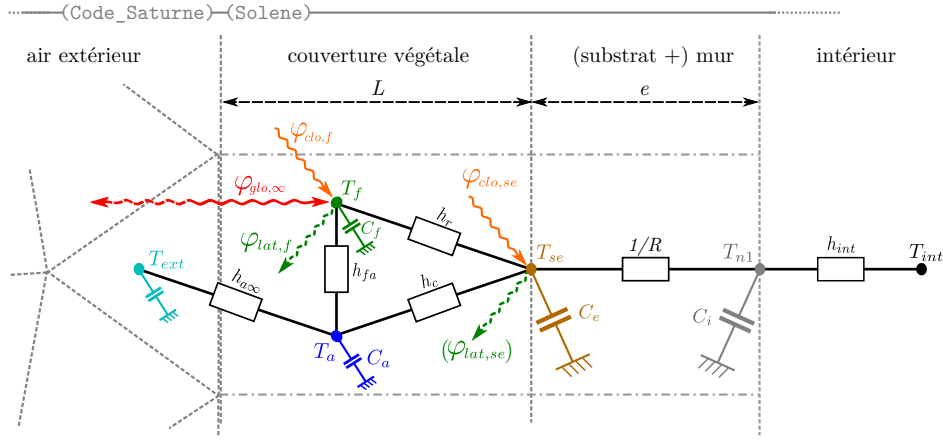


FIGURE 4.19 – Modèle de façade végétale

Le modèle de paroi tel qu'il a été intégré par Bouyer et al. [2011] n'a pas été modifié, mais son interface avec les modèles radiatif et aéroulique a été adaptée. Ainsi, chacun des trois nœuds de surface est en contact avec un composant différent de l'outil de couplage :

- T_{se} : Température de surface extérieure du modèle de bâtiment ou du modèle de surface utilisé pour calculer le flux conduit à travers la paroi.
- T_f : Température de la facette dans le modèle radiatif pour le calcul des échanges infrarouges.
- T_a : Température d'air fixée aux surfaces extérieures du modèle aéroulique, dont le flux advectif avec la cellule du maillage volumique est utilisé comme terme source pour cette maille dans `Code_Saturne`.

Pour une surface non végétalisée, ces interfaces sont réalisées par un seul nœud (T_{se}).

Ce modèle permet aussi bien de représenter les façades de type mur vivant que celles de type revêtement. Pour le second type, il suffit d'annuler le flux latent à la surface du mur.

La mise en place des bilans thermiques à chaque nœud permettra de détailler le calcul des capacités thermiques, coefficients d'échange et flux thermiques représentés sur la Figure 4.19.

Bilan énergétique de la canopée

Bilan des feuilles Le bilan énergétique sur la végétation s'écrit :

$$C_f \frac{dT_f}{dt} = \varphi_{clo,f} + \varphi_{glo,\infty} + \varphi_{glo,se} + \varphi_{conv,f-a} + \varphi_{lat,f} \quad (4.10)$$

Dans l'Équation (4.10), le terme de gauche représente la variation de

l'énergie thermique stockée par les feuilles à la température T_f , dont la masse thermique est exprimée en fonction de celle de la matière végétale (dont les propriétés thermiques sont assimilées à celles de l'eau), d'une épaisseur moyenne d et de l'indice foliaire LAI , qui représente la surface de feuille rapportée à la surface de sol.

$$C_f = (\rho c_p)_{eau} \cdot d \cdot LAI \quad (4.11)$$

Soit, pour une épaisseur des feuilles de $0,5 \cdot 10^{-3} [m]$:

$$C_f = 2400 LAI [J \cdot K^{-1}] \quad (4.12)$$

Le terme de droite représente les flux échangés avec l'extérieur. Il se décompose de la manière suivante :

- $\varphi_{rad,sol}$: Le rayonnement solaire absorbé par les feuilles correspond au rayonnement incident (φ_{clo}) auquel on retire ce qui est réfléchi (ρ_f) et transmis à travers la végétation (τ_f) :

$$\varphi_{clo,f} = (1 - \tau_f - \rho_f) \varphi_{clo} \quad (4.13)$$

Ce terme est le plus important dans le bilan thermique, puisqu'il fait intervenir le rayonnement solaire, qui est la source d'énergie principale de la végétation.

Le taux de transmission du feuillage est estimé en fonction du LAI grâce à une loi d'extinction, avec un coefficient d'extinction k_s :

$$\tau_f = \exp(-k_s LAI) \quad (4.14)$$

- $\varphi_{glo,\infty}$: Le flux radiatif infrarouge est calculé par le bilan radiatif de **Solene** en prenant en compte le flux infrarouge atmosphérique, les émittances des n facettes de la scène urbaine et les différents facteurs de forme :

$$\varphi_{glo,\infty} = F_{sky}(\varphi_{glo,sky} - \sigma \varepsilon T_p^4) + \sigma \sum_i^n F_i(\varepsilon_i T_{s,i}^4 - \varepsilon_p T_p^4) \quad (4.15)$$

- $\varphi_{glo,se}$: le flux radiatif entre les feuilles et le support est calculé en faisant l'hypothèse d'un échange entre deux plans infinis parallèles, le facteur de vue étant égal à 100%. On utilise la formulation linéarisée du bilan radiatif net entre deux surfaces :

$$\varphi_{glo,se} = h_r(T_f - T_{se}) \quad (4.16)$$

avec

$$h_r = 4\sigma T_f^3 \approx 6 [W/m^2/K] \quad (4.17)$$

pour $T_f \approx 300 [K]$

- $\varphi_{conv,f-a}$: Le flux thermique transmis par convection entre les feuilles et l'air est proportionnel à leur différence de température :

$$\varphi_{conv,f-a} = h_{fa}(T_f - T_a) \quad (4.18)$$

Toute la surface des feuilles est prise en compte. Le coefficient d'échange convectif s'exprime en fonction de la résistance aérodynamique r_a (Équation (4.6)) par :

$$h_{fa} = -2LAI \frac{(\rho c_p)_a}{r_a} \quad (4.19)$$

- $\varphi_{lat,f}$: voir Équation (4.8).

Bilan sur l'air de la canopée Les flux convectifs interviennent également dans les bilans énergétiques sur l'air de la canopée qui s'exprime par :

$$Ca \frac{dT_a}{dt} = -\varphi_{conv,f-a} + \varphi_{conv,a-se} + \varphi_{conv,a-\infty} \quad (4.20)$$

La capacité thermique de l'air au sein des feuilles s'écrit simplement en fonction de l'épaisseur de la couche de feuille :

$$Ca = (\rho c_p)_a L \quad (4.21)$$

Les flux thermiques échangés sont les suivants :

- $\varphi_{conv,a-se}$: Le flux échangé par convection entre l'air et le substrat (ou le mur support en l'absence de substrat) est toujours formulé à partir d'un coefficient d'échange superficiel par convection, lui même calculé en fonction de la vitesse du vent :

$$\varphi_{conv,a-se} = h_c(v) (T_{se} - T_a) \quad (4.22)$$

- $\varphi_{conv,a-\infty}$: Le flux thermique transmis à l'extérieur se fait par advection (ou transfert de masse) de l'air au sein du feuillage. Il s'agit du terme utilisé comme source dans la cellule du maillage de `Code_Saturne` en contact avec la facette. Il est proportionnel à l'écart de température entre l'air entrant et sortant de la canopée :

$$\varphi_{conv,a-\infty} = -h_{a\infty}(T_a - T_\infty) \quad (4.23)$$

Pour estimer la valeur du coefficient d'échange, on définit un taux de renouvellement d'air au sein de la canopée (R , en $[s^{-1}]$), qu'on exprimera également en fonction de l'intensité du vent :

$$h_{a\infty} = R(v)L(\rho c_p)_a \quad (4.24)$$

Bilan hydrique de l'air de la canopée Alexandri et Jones [2007]; Palomo [1998] prennent en compte la modification de l'humidité de l'air captif de la canopée végétale due à l'évapotranspiration du substrat et des feuilles. Le flux de masse d'eau avec l'air extérieur est alors calculé avec la même approche que pour le transfert d'enthalpie pour l'air, c'est-à-dire en utilisant le même taux de renouvellement d'air. L'évolution de l'humidité spécifique au sein de la couverture végétale s'écrit ainsi :

$$\rho_a L \frac{d\theta_a}{dt} = \varphi_{vap,a-p} + \varphi_{vap,a-g} + \varphi_{vap,a-\infty} \quad (4.25)$$

Dans notre modèle, le bilan hydrique est réalisé dans la cellule d'air extérieur. Les masses d'eau évaporée sont intégrées comme terme source pour l'humidité dans `Code_Saturne` ce qui provoque également une augmentation locale de l'hygrométrie.

Bilan thermique à la surface extérieure du mur

C'est le bilan thermique de la surface extérieure du mur qui permet de déterminer le flux transmis à l'intérieur du bâtiment. C'est donc sur celui-ci que seront comparées les valeurs de flux avec les cas sans végétation. À part pour le filtrage du flux de rayonnement solaire et le fait qu'il ne soit plus directement en contact avec l'extérieur mais passe par des nœuds "tampons" pour le flux convectif (T_a) et pour le flux infrarouge (T_f) le bilan n'est pas modifié :

$$C_e \frac{dT_{se}}{dt} = \varphi_{clo,se} - \varphi_{glo,se} - \varphi_{conv,a-se} + \varphi_{cond,se-n1} - \varphi_{lat,se} \quad (4.26)$$

C'est également sur ce nœud que peut être représenté le substrat, s'il existe. Pour ce faire, les caractéristiques thermiques utilisées pour calculer C_e peuvent être fonction de la saturation en eau du substrat. Elles seront constantes et adaptées à une paroi "ordinaire" dans le cas inverse.

Les flux thermiques constituant le terme de gauche sont :

- $\varphi_{clo,se}$: seule la partie transmise du flux solaire incident sur la façade atteint la surface extérieure du mur :

$$\varphi_{clo,se} = \tau \varphi_{clo} \quad (4.27)$$

- $\varphi_{glo,se}$: voir Équation (4.16)
- $\varphi_{conv,a-se}$: voir Équation (4.22)
- $\varphi_{cond,se-n1}$: le flux conduit à travers la paroi est soumis à la résistance thermique R , somme des résistances des différentes couches. Celle-ci pourrait le cas échéant être fonction de la saturation en eau du substrat :

$$\varphi_{cond,se-n1} = \frac{1}{R} (T_{n1} - T_{se}) \quad (4.28)$$

	LAI	d	L	r_f	α_{lat}	f	ρ_f	k_s	R	h_c
C_f	x	x								
C_a			x							
$\varphi_{lat,f}$	x			x	x	x				
$\varphi_{lat,se}$	x			x	x	x				
$\varphi_{clo,f}$	x						x	x		
$\varphi_{clo,se}$	x							x		
$\varphi_{glo,se}$										
$\varphi_{conv,a\infty}$			x						x	
$\varphi_{conv,fa}$	x									
$\varphi_{conv,a-se}$										x

TABLEAU 4.4 – Récapitulation des paramètres du modèle et des grandeurs thermiques dans lesquelles ils entrent en jeu

- $\varphi_{lat,se}$: nul dans le cas d’une façade sans substrat, voir Équation (4.9) sinon.

Paramètres du modèle

Un récapitulatif des paramètres utilisés par le modèle d’enveloppe végétale et de leur lien avec les capacités thermiques et les flux calculés est donné dans le Tableau 4.4. Ceux qui entrent en compte dans le calcul des caractéristiques de l’air humide ne sont pas forcément tous cités.

Certains de ces paramètres sont des constantes (d, r_f). D’autres représentent les caractéristiques du feuillage (LAI, L, ρ_f, k_s) ou du substrat (α_{lat}, f). Les derniers sont uniquement liés au calcul des flux convectifs (R, h_c). S’ils sont tous constants sur un pas de temps, certains vont être calculés en fonction des conditions météorologiques, en particulier de la vitesse du vent (R, h_c). Le taux d’évaporation pourra également être évalué en fonction de l’état hydrique du substrat.

4.3.3 Implémentation

Méthode des différences finies

Les facettes de paroi végétale sont représentées par un système thermique à quatre nœuds au lieu de deux précédemment. Les équations de bilan de chacun des nœuds du système sont les suivantes :

$$C_f \frac{dT_f}{dt} = h_{fa}(T_a - T_f) + h_r(T_{se} - T_f) + \varphi_{clo,f} + \varphi_{glo,\infty} - \varphi_{lat,f} \quad (4.29)$$

$$C_a \frac{dT_a}{dt} = h_c(T_{se} - T_a) + h_{pa}(T_f - T_a) + h_{a\infty}(T_{ext} - T_a) \quad (4.30)$$

$$C_e \frac{dT_{se}}{dt} = \frac{1}{R}(T_{n1} - T_{se}) + h_s(T_a - T_{se}) + h_r(T_f - T_{se}) + \varphi_{sol,se} - \varphi_{lat,se} \quad (4.31)$$

$$C_i \frac{dT_{n1}}{dt} = \frac{1}{R}(T_{se} - T_{n1}) + h_{int}(T_{int} - T_{n1}) \quad (4.32)$$

En utilisant la méthode des différences finies entre les pas de temps t et $t - 1$, le système complet s'écrit sous forme matricielle :

$$A \cdot T = B \quad (4.33)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{C_f}{dt} + h_{fa} + h_r & -h_{fa} & -h_r & 0 \\ -h_{fa} & \frac{C_a}{dt} + h_c + h_{fa} + h_{a\infty} & -h_c & 0 \\ -h_r & -h_c & \frac{C_e}{dt} + \frac{1}{R} + h_r + h_c & -\frac{1}{R} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R} & \frac{C_i}{dt} + \frac{1}{R} + h_{int} \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

$$T = \begin{bmatrix} T_{f,t} \\ T_{a,t} \\ T_{se,t} \\ T_{n1,t} \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

$$B = \begin{bmatrix} T_{f,t-1} \frac{C_f}{dt} + \varphi_{clo,f} + \varphi_{glo,\infty} - \varphi_{lat,f} \\ T_{a,t-1} \frac{C_a}{dt} + h_{a\infty} T_{air} \\ T_{se,t-1} \frac{C_e}{dt} + \varphi_{clo,se} - \varphi_{lat,se} \\ T_{n1,t-1} \frac{C_i}{dt} \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

Une nouvelle paramétrisation pour la fonction thermique de Solene

Commençons par aborder la partie technique par un exemple. Pour diminuer la complexité de manipulation des fonctions, un des objectifs était de minimiser leur nombre d'arguments. Ainsi, au lieu de passer séparément les vitesses du vent proche de la paroi et les coefficients d'échange convectif, seules ces dernières valeurs étaient transmises à l'exécutable. Lorsqu'il a fallu utiliser la vitesse de l'air pour le calcul du flux latent, celles-ci étaient alors recalculées par inversion de leur relation avec les coefficients d'échange. Difficile dès lors de changer cette relation sans avoir à modifier son expression

deux fois.

Si la modélisation des surfaces et leur lien avec les différents composants n'ont pas été modifiés, la méthode d'argumentation des fonctions a donc été changée. Au lieu de chercher à minimiser le nombre de paramètres à transmettre à la fonction en lui laissant le soin de calculer les variables de plus bas niveau (comme les capacités thermiques ou les coefficients d'échange) le choix a été fait d'effectuer le plus de calculs possible en dehors de la fonction, tant qu'ils ne sont pas intensifs et que les paramètres en jeu ne sont pas modifiés par le calcul itératif. C'est le cas des paramètres thermiques de bas niveau que sont les capacités thermiques et les coefficients d'échange qui sont fixés pour chaque pas de temps voire pour toute la période de simulation.

Les inconvénients de cette approche existent mais ils sont compensés par de multiples intérêts :

- généralisation du code `C`,
- plus besoin de recompiler la totalité de la fonction pour le moindre changement d'hypothèse,
- paramétrisation aisée et flexible par les scripts orientés objets en `python`,
- simplification de l'accès et de la sauvegarde des grandeurs intermédiaires.

Finalement, ce sont les paramètres thermiques du modèle nodal qui ont été passés en argument à la place des caractéristiques de la végétation permettant de les calculer, que sont l'épaisseur de la couverture végétale, la densité foliaire et la transmissivité du feuillage. La densité foliaire étant également nécessaire pour le calcul du flux latent, elle s'est ajoutée à la liste des nouveaux fichiers utilisés par la fonction `Solene`, ce qui porte leur nombre total à cinq :

- C_f : Capacité thermique du nœud de feuillage.
- C_a : Capacité thermique de l'air au sein du feuillage.
- h_{fa} : Coefficient d'échange convectif entre le feuillage et l'air en son sein.
- $h_{a\infty}$: Coefficient d'échange advectif entre l'air extérieur et l'air du feuillage
- LAI

Le coefficient d'échange radiatif entre les feuilles et la surface extérieure du mur (h_r) est une constante. Le coefficient d'échange superficiel par convection entre la surface du mur (h_c) était déjà défini pour les parois minérales, mais il n'est pas estimé de la même façon pour les enveloppes végétales. De même, la transmissivité du feuillage et sa réflectivité sont renseignées dans le même fichier que celles des parois minérales, du vitrage et des arbres.

Une simplification possible

Au fur et à mesure des simulations, il est apparu que les deux nœuds de la couverture végétale étaient généralement à des températures très proches. Cela s'explique par la valeur importante du flux convectif entre ces deux nœuds, qui est due en particulier à la grande surface d'échange entre ces deux milieux. Deux conclusions peuvent en être tirées : soit la résistance aérodynamique est sous-estimée et il faut revoir sa méthode de calcul, soit l'utilisation de deux nœuds pour la couverture végétale est superflue et il aurait suffi d'en utiliser un seul avec une capacité thermique égale à la somme des deux précédents.

Autres modèles de surface : sols végétaux, murs et toit du bâtiment d'étude

L'approche est strictement la même pour les modèles de sols végétaux, à la différence près qu'ils possèdent deux nœuds thermiques en profondeur et un nœud pour la température de référence constante. La matrice obtenue est donc de dimension 5 au lieu de 4.

L'adaptation fut plus compliquée pour le modèle thermique de bâtiment, puisqu'il a fallu intégrer les nouvelles couches à la matrice qui est déjà complexe. Les toits et les façades sont notamment en relation avec des nœuds de surface intérieure différents. Auparavant, le nombre de températures inconnues (n) s'exprimait de la manière suivante :

$$n = F + 8N + 2 \quad (4.37)$$

avec F le nombre de facettes extérieures et N le nombre d'étages.

Il faut désormais ajouter deux nœuds supplémentaires pour chaque facette végétalisée, soit pour V facettes végétalisées :

$$n = F + 2V + 8N + 2 \quad (4.38)$$

Le nombre d'étages étant faible devant le nombre total de facettes, on se retrouve, suivant la surface de vitrage, avec une matrice presque trois fois plus grande lorsque toutes les autres surfaces sont végétalisées.

4.4 Comparaison avec l'expérimentation

Des modèles physiques du type de celui qui est proposé pour les façades végétales ont été utilisés par plusieurs auteurs [Alexandri et Jones, 2007; Palomo, 1998]. Les utilisations possibles du modèle tel qu'il a été développé peuvent varier suivant les méthodes que l'on choisit pour estimer les paramètres du modèle, en particulier pour la végétation. Il faut aussi rappeler

qu'il existe un grand nombre de solutions techniques que le modèle doit être capable de représenter pour peu que l'on soit capable d'estimer les paramètres appropriés.

Une solution pour vérifier la cohérence des valeurs choisies pour les modèles est de passer par une comparaison des simulations avec les résultats expérimentaux pour différents types de façades végétales. De par la complexité des interactions entre le contexte climatique, le comportement thermique des parois et la physiologie végétale, il était difficile de se limiter à comparer des résultats partiels issus de la littérature. Le climat joue en effet un rôle prépondérant, c'est pourquoi il n'était pas question d'utiliser des valeurs issues de zones tropicales ou méditerranéennes. Nous avons donc cherché à avoir accès à un jeu complet de données expérimentales dans une zone de climat tempéré.

4.4.1 Présentation du dispositif expérimental

À Genève, Reto Camponovo et Peter Gallineli du LEEA² de l'Hépiac³ mènent depuis 2009 une expérience de ce type. En réaction à l'apparition de dispositifs basés sur la technique de l'hydroponie ou bien avec des substrats d'origine végétale importés, l'objectif du projet est de proposer une solution centrée sur le bilan écologique, permettant l'utilisation d'un substrat naturel avec des matériaux issus de ressources locales. Une collaboration entre architectes, ingénieurs et agronomes a permis le développement d'un prototype à base de céramique. L'objet de l'expérience menée est donc de montrer la faisabilité et l'efficacité de ce dispositif, notamment en ce qui concerne le bilan hydrique.

Un prototype breveté

La solution brevetée à l'occasion de ce projet consiste à utiliser une céramique à forte porosité ouverte, perméable aux racines entre la surface extérieure végétalisée et le substrat horticole (voir Figure 4.20). Les intérêts de cette technique sont :

- coût de production limité,
- modularité,
- limitation de l'évaporation à la surface du substrat, qui n'est pas exposé directement à l'air.

2. Laboratoire Énergie, Environnement et Architecture

3. Haute École du Paysage d'Ingénierie et d'Architecture

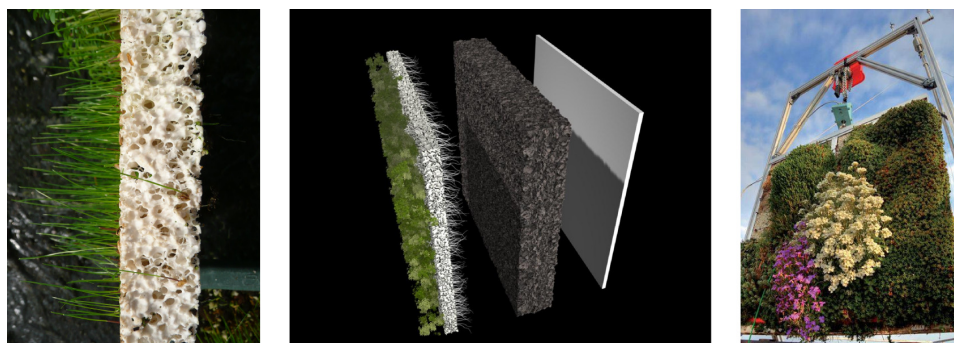


FIGURE 4.20 – Prototype de façade végétale en céramique - ©Hépia

Dispositifs étudiés

L'expérience est menée depuis 2009 sur le toit de l'Hépia à Genève. Trois façades végétales de type paroi ont été instrumentées ainsi qu'un mur témoin.

Échantillon 1 Mur témoin constitué d'une plaque de fibrociment.

Échantillon 2 Prototype en céramique développé par l'Hépia. Il est constitué de 35 [mm] de matrice céramique pour 80 [mm] de substrat et d'une planche en bois de 15 [mm] sur la face arrière (Figure 4.21(a)).

Échantillon 3 Prototype briques modifiées. Il s'agit de briques avec des alvéoles d'environ 50 [mm] de côté qui laissent le substrat apparent. L'épaisseur de la couche de briques modifiées est de 50 [mm] avec 80 [mm] d'épaisseur de substrat et une planche en bois de 15 [mm] en face arrière (Figure 4.21(b)).

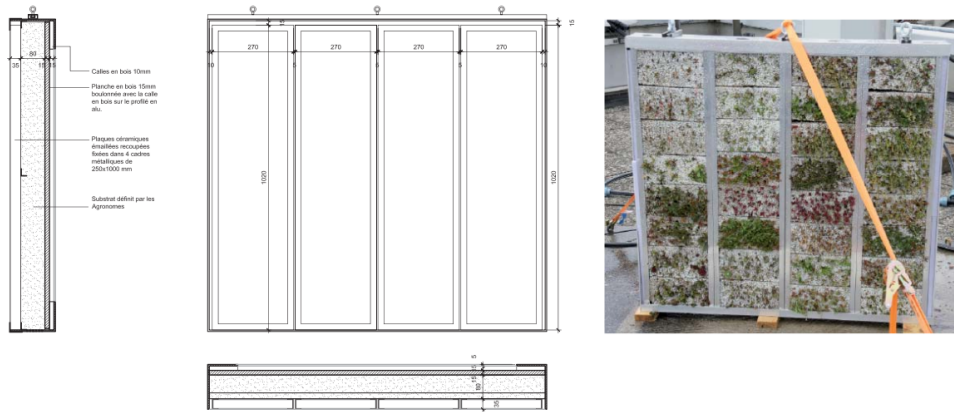
Échantillon 4 Prototype bardeaux acoustiques. Il s'agit de longues briques creuses de 70 [mm] d'épaisseur comportant des trous de quelques centimètres de diamètre sur une de leurs faces (Figure 4.21(c)).

Données disponibles

Une station météorologique est installée sur le toit de l'Hépia, dans le centre ville de Genève, dont les données sont consultables en direct sur le portail www.climacity.org. La Figure 4.22 montre la situation de l'ensemble des dispositifs étudiés. Les mesures météorologiques effectuées sont les suivantes :

- température et humidité relative de l'air,
- vitesse et direction du vent,
- pluviométrie,
- flux solaire horizontal (global et diffus) et flux solaire global vertical dans le plan des échantillons.

4.4 Comparaison avec l'expérimentation



(a) Échantillon 2 - Céramique



(b) Échantillon 3 - Brique



(c) Échantillon 4 - Bardage acoustique

FIGURE 4.21 – Les trois échantillons de murs vivants (source : Hépia)



FIGURE 4.22 – Photographie panoramique du dispositif expérimental sur le toit de l'Hépià, de gauche à droite : bardage acoustique, brique modifiée, céramique, mur témoin

Cette station locale permet d'avoir les conditions météorologiques auxquelles sont effectivement soumis les échantillons, notamment le flux solaire vertical. Le flux infrarouge échangé avec le ciel n'est malheureusement pas mesuré.

Pour chaque échantillon, les mesures effectuées sont les suivantes :

- température de feuillage à l'aide d'un thermo-radiomètre,
- température du substrat à l'aide d'un thermocouple,
- débit d'irrigation,
- débit de drainage.

Un dispositif de pesée par suspension est également installé sur l'échantillon 2.

Données météorologiques

Une période d'étude du 14 au 21 mai 2010 est choisie. La Figure 4.23 montre l'évolution de la température et de l'humidité de l'air, de la vitesse du vent et des flux solaires durant cette période. L'amplitude maximale de la température d'air est de $8 [^{\circ}C]$ avec un maximum de $15 [^{\circ}C]$ et un minimum de $5 [^{\circ}C]$. La semaine est relativement stable au niveau des températures d'air. Il s'agit d'une période assez humide puisque l'on descend rarement en dessous de 50%, avec des valeurs maximales en début de journée proche de 100%. La vitesse du vent est modérée, entre 0 et $4 [m/s]$ en début de semaine avant d'augmenter autour de $5 [m/s]$ en fin de semaine. La couverture nuageuse est variable avec 3 jours ensoleillés et 4 jours plus ou moins couverts. Les précipitations sont nulles durant la période étudiée.

Il s'agit d'une semaine de mi-saison pendant laquelle il n'y a ni précipitation ni stress hydrique.

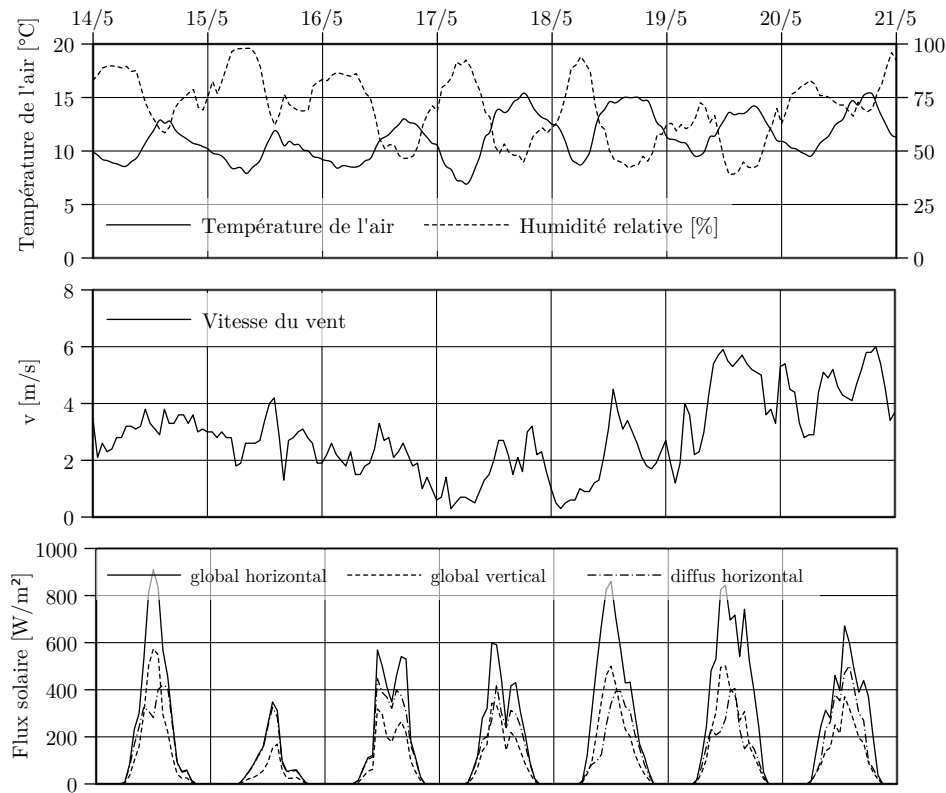


FIGURE 4.23 – Données météorologiques du 14 mai au 21 mai 2010

4.4.2 Exploitation des mesures thermiques et hydriques

Températures du feuillage

Sur le graphique supérieur de la Figure 4.24, on remarque que les températures du feuillage sont largement inférieures à la température de surface du panneau de fibrociment. Les évolutions sont fortement liées au rayonnement solaire incident. L'écart maximum atteint $8 [^{\circ}C]$ pour la journée la plus ensoleillée et reste compris entre 5 et $7 [^{\circ}C]$ pour les jours plus couverts. La température du feuillage est relativement proche de celle de l'air dans la plupart des cas, avec un écart dépassant rarement $5 [^{\circ}C]$ en fin de matinée. La nuit, les températures du feuillage des échantillons 3 et 4 sont légèrement inférieures à la température de l'air ce qui n'est pas le cas pour les échantillons 1 et 2. Les évolutions de la température des feuilles pour les échantillons 3 et 4 sont presque confondues sur la période présentée.

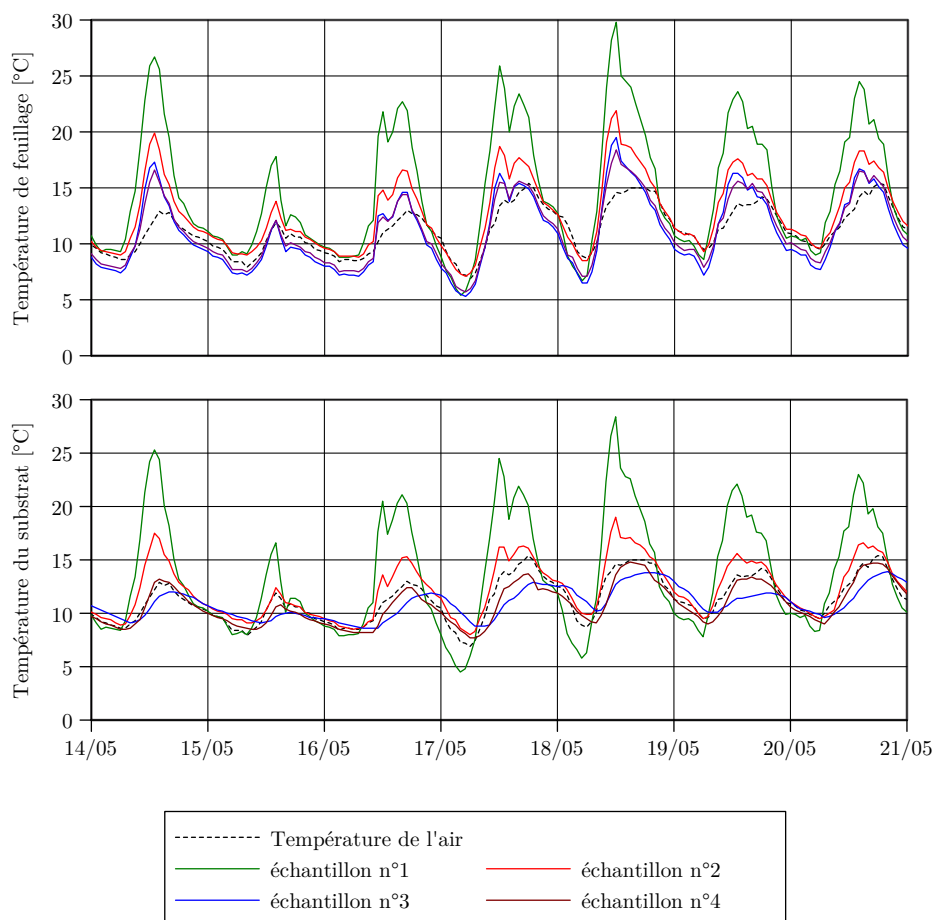


FIGURE 4.24 – Températures du feuillage et du substrat mesurées sur les 4 échantillons [$^{\circ}C$]

Température du substrat

Les températures du substrat présentées sur le graphe inférieur de la Figure 4.24 montrent des différences de comportement plus importantes entre les différents échantillons. Elles sont globalement inférieures à la température de l'air pour les échantillons 3 et 4, ce qui laisse présager de l'influence de l'évapotranspiration en surface. Ce n'est pas le cas pour l'échantillon en céramique, pour lequel on peut penser que l'évapotranspiration de surface est moins importante, sans doute limitée par l'accès réduit du substrat humide à la surface de l'air par rapport aux autres échantillons. On observe nettement l'effet de l'inertie thermique sur le déphasage et l'amplitude entre les échantillons 2, 3 et 4. Ces différences sont dues aux différentes épaisseurs de substrat ainsi qu'au positionnement des thermocouples au sein du substrat.

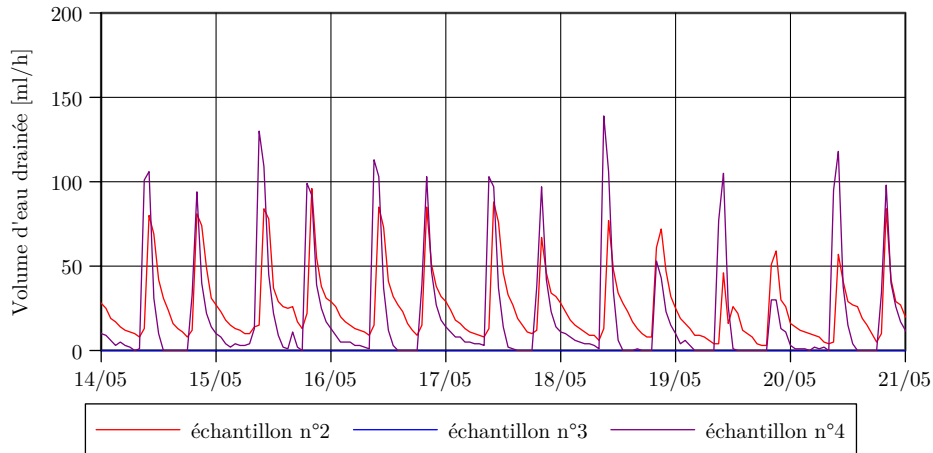


FIGURE 4.25 – Quantité d'eau drainée par les trois façades végétales

Lors des nuits avec un ciel clair, la température du mur témoin est la seule à être inférieure à la température de l'air, ce que l'on peut expliquer par les échanges radiatifs avec la voûte céleste, qui dans les autres cas est limitée par la présence de la couverture végétale.

Drainage

La quantité d'eau drainée par chaque échantillon donne à elle seule des informations pertinentes sur le comportement hydrique des échantillons. Leurs évolutions au pas de temps horaire sont présentées sur la Figure 4.25.

Les pics qui se produisent aux heures d'arrosage (9h et 19h) représentent l'eau qui est directement évacuée par la paroi. Ils ne représentent que de 3% à 5% de l'eau apportée à chaque irrigation qui correspond à un volume total d'environ 3,5 [l]. Ils peuvent être dus à la saturation du substrat lors des périodes d'arrosage. À partir du 18 mai, qui est le début d'une période ensoleillée avec une évapotranspiration importante, on remarque effectivement que le pic de fin d'après-midi commence à diminuer par rapport à celui de la matinée. On peut en déduire que le taux de saturation était plus faible après ces après-midis ensoleillés et qu'il a fallu plus d'arrosage pour retrouver le niveau de saturation et recommencer à drainer.

On peut maintenant appliquer ce raisonnement à chacun des échantillons en commençant par l'échantillon 3. Il ne draine pas d'eau pendant la période présentée. On en déduit que toute l'eau d'apport est effectivement évaporée au cours de la journée. Plusieurs hypothèses sont avancées pour expliquer la différence avec les autres façades :

- une capacité hydrique plus importante avec une plus grande quantité

de substrat,

- une évaporation plus importante due à l'accessibilité du substrat humide à l'air ambiant.

La spécificité de l'échantillon 2 est que la quantité d'eau drainée n'est jamais nulle, même quand commence à apparaître un semblant de stress hydrique. La couche de substrat est effectivement plus faible que celle de l'échantillon 3 et l'accès à l'air du substrat humide est également plus réduit.

Enfin, l'échantillon 4 présente des pics plus importants, ce qui s'explique par une capacité de stockage plus faible avec une couche de substrat plus réduite. L'évapotranspiration est néanmoins plus importante que pour l'échantillon en céramique, car l'eau drainée est ensuite bien plus faible voire nulle dès que l'après-midi est ensoleillé. Les seuls moments où les pics sont inférieurs à ceux de l'échantillon 2 sont effectivement visibles en fin d'après-midi des 18 et 19 mai, ce qui montre que la quantité d'eau évaporée a été bien plus importante dans la journée.

Évapotranspiration journalière

L'évapotranspiration journalière est obtenue à l'aide d'un bilan hydrique réalisé pour chaque échantillon. Le volume d'eau d'apport est constitué par l'irrigation et les précipitations. On considère ensuite que tout ce qui n'est pas drainé est évaporé. Pour évaluer l'eau de pluie absorbée par les façades végétales, on considère qu'il s'agit de l'eau drainée pour l'échantillon 1, qui n'est pas irrigué, en négligeant l'évaporation à sa surface.

$$Etj = Ir + Pr - Dr \quad (4.39)$$

avec :

- Etj : évapotranspiration journalière,
- Ir : quantité d'eau d'irrigation au cours de la journée,
- Pr : précipitation reçue par l'échantillon (égale à l'eau drainée par l'échantillon 1),
- Dr : quantité d'eau drainée au cours de la journée.

Les quantités d'eau d'irrigation étant constantes pour les trois échantillons (et un peu inférieures aux deux autres pour l'échantillon 4), c'est principalement par une variation de l'eau drainée que la variation de la quantité d'eau évaporée se manifeste. Cela laisse présager certaines limites dans l'exploitation des mesures, notamment quant à l'accès des données d'évapotranspiration au pas de temps horaire, qui ne sont accessibles que pour l'échantillon pesé (échantillon 2 - céramique).

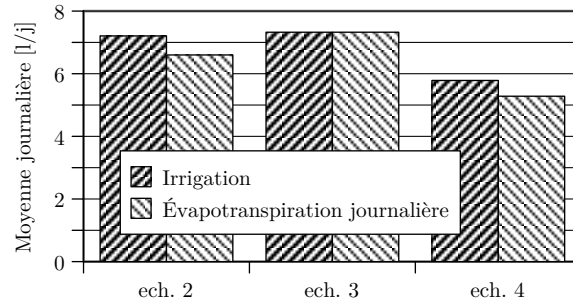


FIGURE 4.26 – Irrigation et évapotranspiration journalière moyennes mesurées du 14 au 21 mai 2010

L'évapotranspiration journalière pour les trois échantillons est représentée sur la Figure 4.26. Sans précipitation ni stress hydrique prononcé, les quantités d'eau évaporées sont relativement stables au cours de la semaine.

- À irrigation égale (environ 7,2 [l/j]), l'échantillon 3 évapore environ 0,7 [l] de plus par jour que l'échantillon 2, ce qui correspond à l'eau drainée par ce dernier.
- La quantité totale d'eau drainée par l'échantillon 4 est à peu près égale à celle de l'échantillon 2. Les effets d'une moindre capacité de stockage de l'eau et d'une évapotranspiration plus importante semblent donc se compenser, malgré une irrigation moins importante.

Une deuxième manière d'évaluer l'évapotranspiration est d'utiliser l'évolution de la masse de l'échantillon 2 :

$$Eth = -\Delta m - Dr - Ir - Pr \quad (4.40)$$

avec :

- Eth : évapotranspiration horaire
- Δm : variation de la masse de l'échantillon

Afin d'éviter une évapotranspiration fortement négative tout en respectant le bilan journalier, un lissage des résultats obtenus au pas de temps horaire est effectué pendant les deux heures qui suivent chaque irrigation. Les résultats après lissage (Figure 4.27) montrent clairement l'apparition d'un pic au moment de chaque arrosage, notamment en fin d'après-midi alors que le rayonnement solaire est presque inexistant.

La Figure 4.28 présente une comparaison entre les deux méthodes en utilisant les données journalières. L'écart entre les deux courbes montre la difficulté de réaliser un bilan hydrique global et d'estimer la quantité d'eau évaporée à partir de mesures. Les 10% d'erreur sont néanmoins rassurants

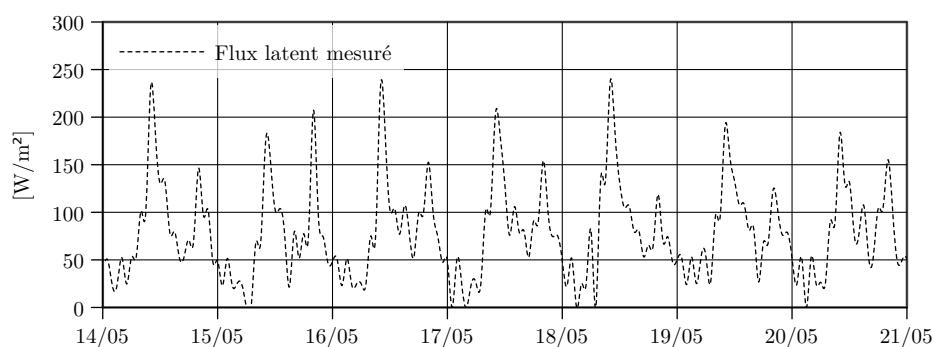


FIGURE 4.27 – Flux latent mesuré au pas de temps horaire - échantillon 2

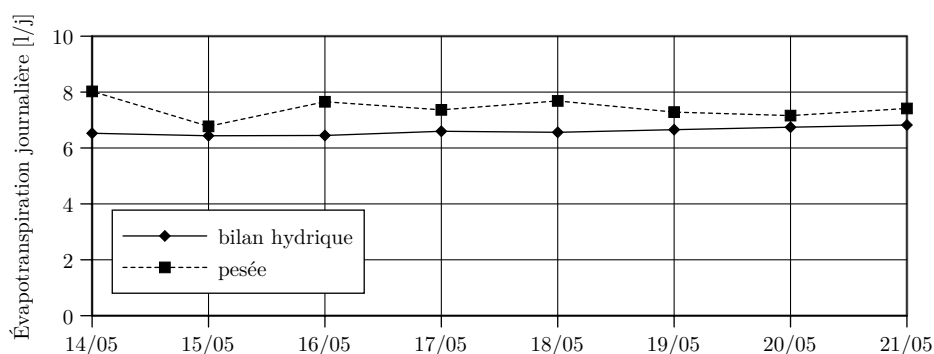


FIGURE 4.28 – Comparaison des méthodes de calcul de l'évapotranspiration pour l'échantillon 2

quant à la cohérence des moyens de mesure, au moins en termes d'ordre de grandeur.

Conclusion de l'exploitation des données

L'exploitation des données brutes conduit déjà à quelques conclusions et permet de mettre en évidence certains points sensibles de la modélisation :

- Une première approche très simplifiée pourrait consister à fixer la température de surface des surfaces végétales à la valeur de la température de l'air. L'erreur de quelques degrés semble effectivement raisonnable par rapport à la différence de température entre une façade végétale et une façade en béton.
- Dans les trois cas, la quantité d'eau d'apport semble adaptée pour qu'elle soit évaporée chaque jour dans sa totalité. Il est donc envisageable de forcer la valeur du flux latent à celle de l'évapotranspiration potentielle, en supposant une irrigation optimisée.
- Les trois échantillons, avec des couvertures végétales qui semblent com-

- parables, ont des comportements thermiques et hydriques propres à chacun qui semblent liés à la fois aux caractéristiques hydrothermiques du substrat et au type d'interface entre le substrat et l'air.
- L'accessibilité du substrat à l'air ambiant semble être un facteur déterminant dans l'estimation de l'évapotranspiration. La répartition du flux latent entre le sol et les feuilles, qui n'est pas explicitée dans la formulation de Penman-Monteith, pose donc question.
 - La capacité de stockage en eau (ou teneur maximale) semble jouer un rôle important dans la quantité d'eau drainée et évaporée. Il va donc être nécessaire d'effectuer des bilans hydriques dynamiques au pas de temps horaire.

4.4.3 Méthodologie de la validation expérimentale

Méthode de calcul du flux latent

L'approche adoptée dans `solene-microclimat` pour calculer le flux latent consiste à pondérer l'évapotranspiration potentielle issue d'une application de la formule de Penman-Monteith par un taux d'évapotranspiration estimé en fonction de la disponibilité de l'eau. Pour les modèles de sols végétaux, on choisissait de se placer ou non dans une période de stress hydrique en considérant le taux d'évapotranspiration constant au cours du temps, sans que sa valeur soit corrélée à un état hydrique simulé (ceci pourrait être possible dans le cas d'un couplage avec un modèle hydrique du sol). Au regard des observations précédentes et afin de représenter l'évolution du flux latent au pas de temps horaire dans la façade végétale, il apparaît dans ce cas nécessaire d'estimer le taux d'évapotranspiration à chaque pas de temps en fonction de la saturation en eau du substrat.

La question de savoir s'il faut représenter ou pas la dynamique du bilan hydrique reste cependant posée. En effet, les murs végétaux comportant un substrat possèdent presque toujours un système d'arrosage automatique. On pourra donc faire l'hypothèse d'une irrigation régulée ou bien de stress hydrique contrôlé par l'arrosage. Qui plus est, les données expérimentales ne nous permettent pas d'avoir accès à l'évapotranspiration horaire pour les échantillons 3 et 4, mais seulement pour l'échantillon 2 qui est pesé.

Un bilan hydrique de la façade végétale à été implémenté dans le module de contrôle en `python` avec les objectifs suivants :

- observer l'apparition du stress hydrique,
- valider le calcul du flux latent à partir des mesures au pas de temps horaire.

Pour prendre en compte le bilan hydrique dans le calcul de l'évapotranspi-

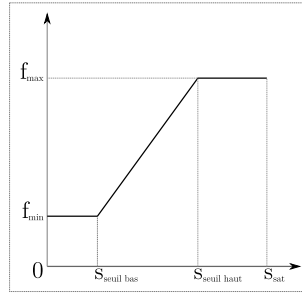


FIGURE 4.29 – Coefficient d'évapotranspiration (f) en fonction du stock d'eau

ration, le coefficient d'évapotranspiration f est calculé en fonction du stock d'eau présent dans le substrat, avec des effets de seuil haut et bas (Figure 4.29). À chaque pas de temps, on calcule le volume d'eau stocké par la paroi :

$$V_t = \min(V_{t-1} + Ir_t - Eth_t, V_{max}) \quad (4.41)$$

Si le substrat est à saturation ($V > V_{max}$), la quantité d'eau correspondante est drainée. On retrouve ainsi certains effets de l'arrosage sur le drainage. En effet, celui-ci est parfois nettement supérieur le matin, la quantité absorbée la veille au soir n'étant pas encore évaporée et le substrat étant toujours saturé au moment d'un nouvel apport d'eau.

Choix des paramètres

Les modèles de surface végétale reposent sur de nombreux paramètres permettant de représenter les comportements physiologiques des plantes, le comportement thermoaéraulique de l'air au sein du couvert végétal et le comportement thermique et hydrique du substrat [Palomo, 1998; Alexandri et Jones, 2007; Ouldboukhitine et al., 2011]. Au plus bas niveau, les paramètres thermiques de base du modèle nodal sont les capacités thermiques et les coefficients d'échange thermique, qui sont estimés pour chaque pas de temps en fonction des caractéristiques physiques du support et de la couverture végétale.

Pour représenter le couvert végétal, nous nous sommes limités à quatre paramètres, la résistance stomatique des feuilles isolées étant constante :

- l'indice foliaire (LAI)
- l'épaisseur du couvert (L)
- le coefficient d'extinction (k_s)
- l'albédo (ρ_f)

Une des variables qui caractérise les échanges de masse et d'énergie entre l'air de la canopée et l'air extérieur est le taux de renouvellement d'air (R , en $[h^{-1}]$) qui peut être estimé en fonction des conditions de vent :

$$R = R_{max} + (R_{max} - R_{min}) \frac{\alpha_R v}{v_{max}} \quad (4.42)$$

avec $R_{min} = 125 [h^{-1}]$, $R_{max} = 1000[h^{-1}]$ et $v_{max} = 10[m/s]$. Le paramètre utilisé pour caractériser la sensibilité du taux de renouvellement d'air au vent est ici :

- le coefficient de pondération de la vitesse du vent α_R

Les caractéristiques de la paroi ont été posées comme paramètres variables afin de voir s'il était possible de les retrouver à l'aide des résultats expérimentaux :

- l'épaisseur (e)
- la conductivité thermique (λ)

Au niveau des paramètres hydriques, il s'agit dans un premier temps d'estimer le coefficient d'évapotranspiration (f) à partir d'un état hydrique moyen sur la période d'étude.

Dans un deuxième temps, la variation de l'état hydrique a été considérée et le coefficient d'évapotranspiration calculé en fonction de la teneur en eau. Le nouveau paramètre hydrique pris en compte est alors :

- le volume d'eau maximum V_{max}

La méthode de calcul de l'évapotranspiration ne faisant pas la différence entre la transpiration des plantes et l'évaporation à la surface extérieure du substrat, nous avons ajouté un facteur de répartition du flux latent entre les feuilles et le substrat, noté :

- le facteur de répartition du flux latent (α_{lat}).

Adaptation du modèle de paroi

Les simulations ont été menées dans un premier temps avec la fonction externe `simulation_Ts`, qui ne comporte pas de modèle thermique de bâtiment. Son modèle de paroi a vite montré une limite importante qui est de ne pas utiliser de nœud à l'intérieur de la paroi, rendant inaccessible la température simulée à la position des thermocouples. Il a donc fallu adapter le modèle de paroi ainsi que l'estimation de certaines variables, ce qui a amené à développer une nouvelle fonction : `simulation_Ts_hepia`. La résistance thermique de la paroi est alors divisée en deux résistances équivalentes, tandis que la capacité thermique totale ($C = C_e + C_i$) est répartie sur les trois

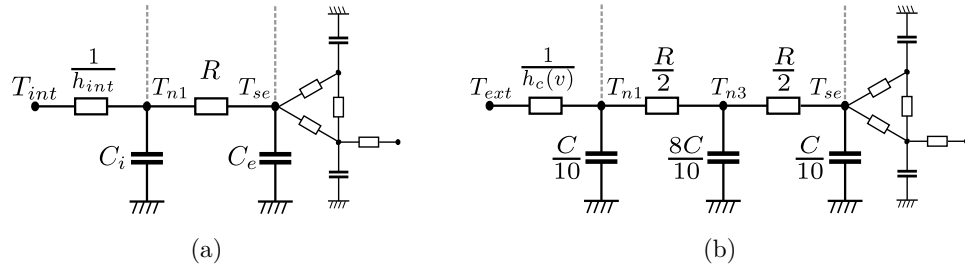


FIGURE 4.30 – Adaptation du modèle de paroi, modèle de paroi végétale dans : (a) `simulation_Ts` — (b) `simulation_ts_hepia`

nœuds (Figure 4.30).

Le modèle initial a été développé pour prendre en compte une température intérieure fixée et n'est pas adapté à un échantillon exposé aux conditions extérieures sur ses deux faces. En plus de quelques modifications à apporter au code de `simulation_Ts`, il a également fallu revoir le contrôle des conditions aux limites pour que la face arrière de la façade soit effectivement soumise aux conditions climatiques extérieures.

Algorithme d'optimisation

Au cours des nombreuses séries de simulation qui ont été effectuées, plusieurs stratégies ont été successivement adoptées pour trouver les valeurs de chacun des paramètres, allant du tâtonnement à des attributions de valeurs par tirage au sort. Si ces méthodes ont montré leurs limites, elles ont aussi permis au fur et à mesure d'améliorer le modèle et sa paramétrisation.

Finalement, un algorithme d'optimisation a été développé. Il adopte la démarche suivante :

- Un pas de variation a été choisi pour chacune des variables (voir Tableau 4.5).
- À partir de valeurs de base pour chacun des paramètres, deux simulations sont effectuées en ne faisant varier qu'un seul paramètre à sa valeur supérieure puis à sa valeur inférieure.
- La qualité des résultats est évaluée en calculant la moyenne des écarts quadratiques pour la température du feuillage et du substrat.
- À chaque nouveau calcul, on repart avec la meilleure combinaison obtenue précédemment en faisant varier le paramètre qui s'est montré le plus influent lors de sa précédente variation.

Si cette stratégie finalement adoptée a également ses biais, c'est elle qui a permis d'obtenir les meilleures corrélations. Les valeurs de base de chacun

unité	LAI [-]	L [m]	k_s [-]	ρ_f [-]	α_{lat} [-]	V_{max} [l]	e [m]	λ [W/m/K]	α_R [-]
<i>pas</i>	0,25	0,05	0,1	0,05	0,1	0,5	0,01	0,1	0,1
base	2,00	0,20	0,6	0,25	0,5	3,5	0,08	1,0	0,5
éch. 2	2,00	0,40	0,6	0,25	0,5	4,0	0,07	1,0	0,1
éch. 3	2,00	0,35	0,8	0,30	0,5	4,0	0,15	0,6	0,5
éch. 4	2,00	0,40	0,6	0,30	0,4	4,0	0,09	1,0	0,5

TABLEAU 4.5 – Paramètres avant et après optimisation pour les échantillons de façade végétale

des paramètres et les pas de variation choisis sont présentés conjointement aux résultats dans le Tableau 4.5.

4.4.4 Résultats

Analyse des combinaisons de paramètres obtenues

Le Tableau 4.5 présente pour chaque paramètre le pas de variation utilisé par l'algorithme d'optimisation, la valeur initiale et les valeurs finales obtenues pour chaque échantillon. On remarque que les valeurs des paramètres qui entrent directement en jeu dans le calcul de l'évapotranspiration sont les mêmes pour les trois échantillons (LAI et V_{max}). L'épaisseur du feuillage (L), qui intervient principalement dans le calcul de l'inertie thermique des feuilles ainsi que dans le volume pris en compte pour le flux advectif est presque doublé pour les trois échantillons par rapport à la valeur initiale que nous lui avons attribuée.

L'albédo des feuilles, qui est sensible pour le calcul de la température du feuillage mais intervient également dans le calcul du flux latent par l'intermédiaire de la modification du bilan radiatif, est plus faible pour l'échantillon 2 dont les températures sont globalement plus élevées que celles des autres échantillons (Figure 4.24). La particularité la plus notable de l'échantillon 2 est la faible valeur du coefficient de pondération de la vitesse de l'air pour le calcul du taux de renouvellement d'air. La limitation du flux advectif au sein des feuilles permet de rapprocher la température des feuilles de celle du substrat par l'intermédiaire du nœud de température d'air au sein des feuilles. Ces différences sont effectivement relativement faibles pour ce prototype.

Pour l'échantillon 3, ce sont des variations des paramètres thermiques du substrat, épaisseur et conductivité, qui se sont avérées nécessaires. On retrouve ainsi une forte inertie thermique qui apparaît dans l'évolution de la température du substrat (Figure 4.24). La diminution de la conductivité thermique peut être due à un substrat plus sec puisqu'on a remarqué que le

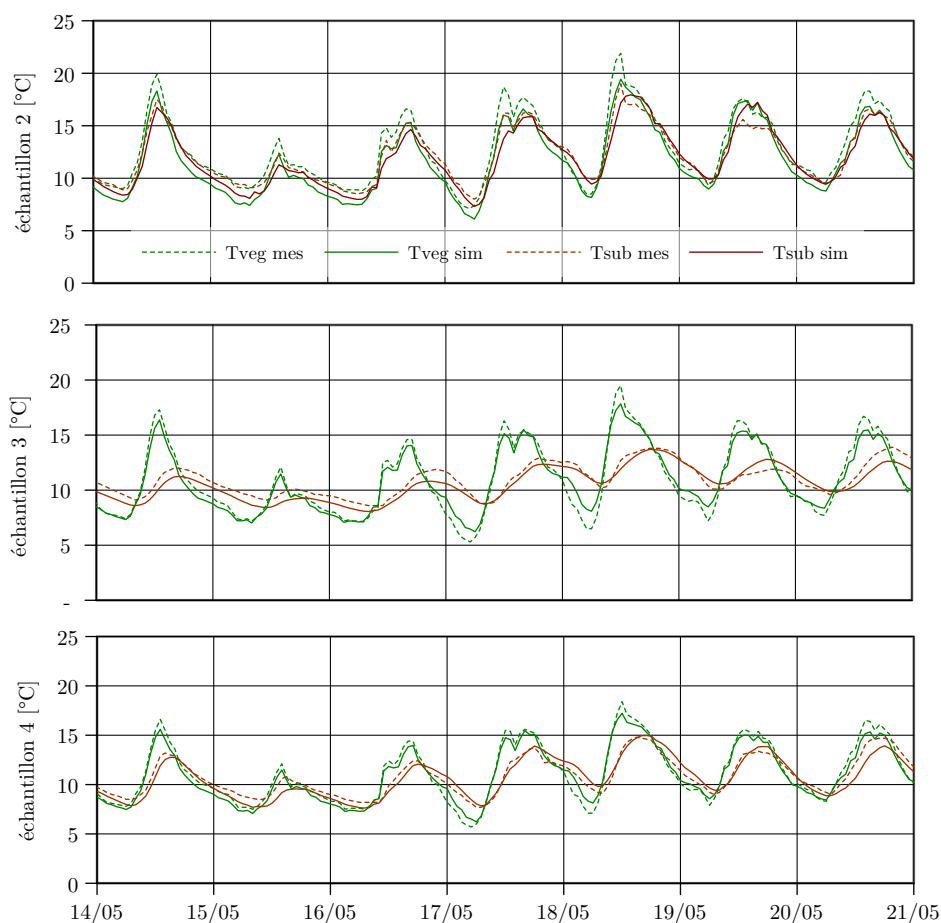


FIGURE 4.31 – Variation temporelle des températures de substrat (T_{sub}) et de feuillage (T_{veg}) mesurées et simulées après optimisation des paramètres

drainage était le plus souvent nul pour cet échantillon (Figure 4.25).

Pour l'échantillon 4, l'optimisation n'apporte pas de modification significative aux valeurs des paramètres. Il semble que ce soit en effet celui pour lequel le modèle thermique est le plus adapté. Hormis une augmentation de l'épaisseur de 1[cm], que l'on peut expliquer par le fait que les caractéristiques thermiques du bardage en terre sèche n'étaient pas représentées, on remarque un léger déséquilibre entre l'évaporation à la surface du substrat et l'évapotranspiration des feuilles (α_{lat} de 0,5 à 0,4) à la défaveur de cette dernière.

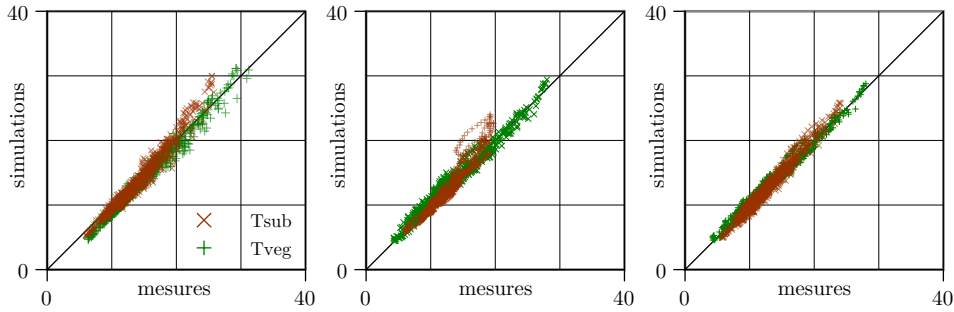


FIGURE 4.32 – Comparaison entre les températures de substrat (T_{sub}) et de feuillage (T_{veg}) mesurées et simulées durant le mois de mai 2010

Température du feuillage et température de substrat

La Figure 4.31 représente les valeurs mesurées et simulées après optimisation des températures de substrat et de feuillage. La période d'observation est toujours limitée à une semaine plutôt tempérée. Avant d'analyser les résultats plus en détail, on peut noter un accord globalement bon entre les températures mesurées et simulées, avec un écart qui dépasse rarement $2[^\circ C]$.

Pour l'échantillon 2, hormis la sous-estimation d'un pic pour la température des feuilles le 18 après-midi, que l'on retrouvera de façon moins prononcée pour les autres échantillons, les principaux écarts apparaissent lors de l'épisode nuageux du 15 mai. On peut sans doute l'expliquer par la sous-estimation du flux infrarouge atmosphérique qui est toujours calculé pour un ciel clair. Les températures obtenues sont donc logiquement inférieures de quelques degrés à celles qui sont observées. Un écart qui demeure inexpliqué pour la température du substrat apparaît l'après-midi du 19 mai.

Pour l'échantillon 3, le rafraîchissement la nuit est en général sous-estimé par le modèle, tant pour la température du support que pour celle des feuilles. La seule période qui fait exception pour le substrat s'observe encore le 19 mai. Il semble qu'un phénomène ne soit pas bien reproduit pour expliquer cette diminution de température.

L'échantillon 4 montre les résultats les plus fidèles avec un écart la plupart du temps inférieur à $0,5 [^\circ C]$ et qui ne dépasse pas $1 [^\circ C]$ sur la période considérée.

La Figure 4.32 montre une comparaison entre les températures mesurées et simulées sur l'ensemble du mois de mai 2010. On retrouve pour chaque échantillon des conclusions similaires aux précédentes. Pour l'échantillon 2, les résultats correspondent plutôt bien, même si les températures les plus élevées sont généralement surestimées pour le substrat et sous-estimées pour le feuillage. Les résultats des températures de feuillage sont également cor-

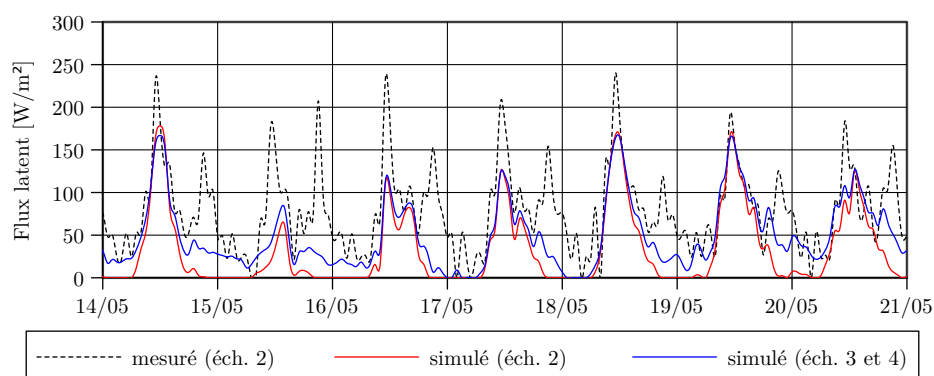


FIGURE 4.33 – Comparaison entre les flux latents simulés et mesurés

rects pour l'échantillon 2, avec une dispersion légèrement plus importante pour les faibles températures. À l'inverse, la corrélation pour la température du substrat montre de réelles anomalies pour certains après-midi ensoleillés pendant lesquels la température issue du modèle est nettement supérieure aux températures mesurées. L'échantillon 4 montre encore les meilleurs résultats, à la fois pour les faibles et pour les hautes températures.

Flux latent

Les mêmes simulations ont permis de représenter des effets de chargement et de déchargement du substrat en eau et son effet sur l'évapotranspiration. La Figure 4.33 représente le flux latent mesuré pour l'échantillon 2 avec la méthode de la pesée, confronté aux flux latents simulés pour les trois échantillons. Les courbes sont confondues pour les échantillons 3 et 4 pour lesquels seule la répartition de l'évaporation entre le substrat et le feuillage change.

Trois différences principales peuvent être observées :

- un phénomène que le modèle a bien du mal à reproduire est l'apparition du deuxième pic après l'arrosage de 19h. On ne le voit apparaître que très discrètement les deux premiers jours pour l'échantillon 2, un peu plus régulièrement mais tout aussi discrètement pour les autres échantillons,
- l'amplitude des pics, lorsqu'ils existent, est le plus souvent largement sous-estimée par le modèle,
- le flux d'évaporation semble largement sous-estimé pour la journée fortement couverte du 15 mai. Plus généralement, le flux d'évapotranspiration mesuré semble peu affecté par l'intensité du flux solaire alors que c'est le facteur principal dans le calcul théorique de l'évapotranspiration.

Il semble donc que notre modèle soit trop dépendant du flux solaire. Peut-être qu'il faudrait utiliser un autre modèle pour l'évaporation du substrat qui semble moins dépendre de l'activité physiologique des plantes que de sa propre saturation en eau. On serait également tenté de remettre en question la fiabilité des mesures pour le flux hydrique notamment au moment de l'arrosage, tant l'intensité des pics paraît difficile à reproduire. Il y a peut-être également un effet gravitaire jouant sur la répartition de l'eau au sein du support que nous ne sommes en mesure ni d'observer ni de reproduire. Enfin on peut regretter l'absence de mesures hydriques plus précises pour les échantillons 3 et 4.

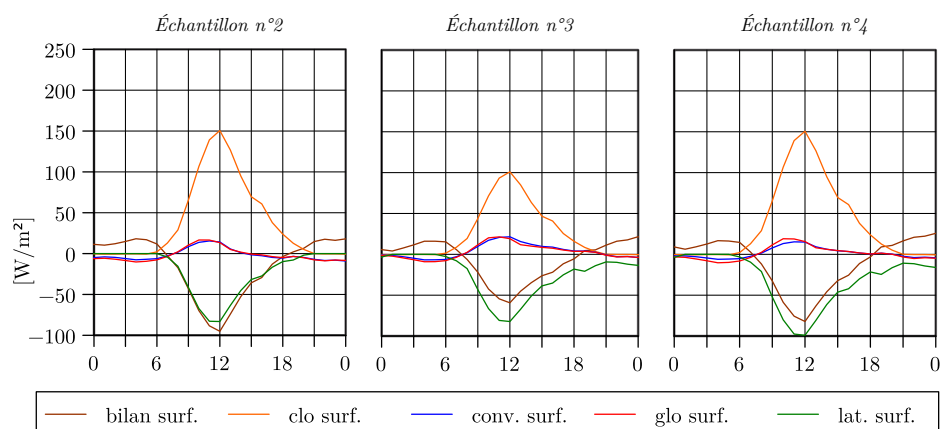
Au niveau des satisfactions, on peut noter une bonne représentation des évolutions du flux latent en dehors des pics en particulier pour les jours ensoleillés. Compte-tenu de la simplification du modèle, notamment de l'absence de résistance hydrique au sein du substrat, les résultats paraissent effectivement satisfaisants au moins pour bien reproduire l'évolution des températures. Il est possible que l'estimation de la consommation d'eau pour les simulations sur les scénarios soit sous-évaluée.

Analyse des flux thermiques

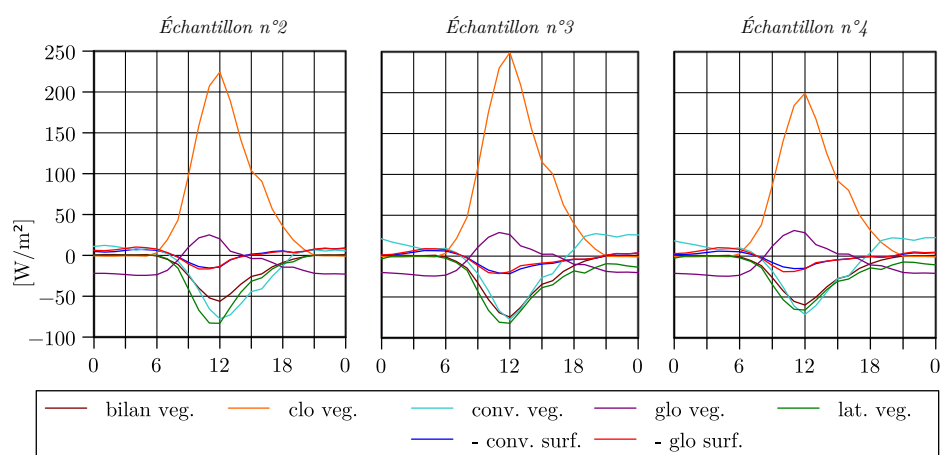
Bilan de flux à la surface du substrat La Figure 4.34(a) présente les évolutions des flux thermiques à la surface extérieure du substrat. Les flux latents, convectifs et radiatifs sont estimés directement à partir des résultats obtenus tandis que le terme de bilan constitue le complément pour arriver à l'équilibre, représentant ainsi la somme du flux transmis au nœud intérieur et stocké à la surface extérieure de la paroi. Il faut noter que le comportement étudié correspond au cas de prototypes de paroi avec des conditions climatiques extérieures sur les deux faces. On peut penser que la répartition des flux serait différente avec une ambiance intérieure plus stable sur la face arrière de la façade.

On rappelle que dans le modèle, le nœud situé à la surface extérieure du substrat, s'il reçoit du flux solaire à travers les feuilles, n'échange pas directement avec l'air extérieur ou avec la scène urbaine. Ce sont les nœuds de feuillage et d'air au sein du feuillage, dont les flux sont représentés sur la Figure 4.34(b), pour lesquels les échanges thermiques radiatifs et convectifs se font avec l'extérieur. Le flux convectif à la surface du substrat est échangé avec l'air au sein des feuilles, il est donc compté négativement dans le bilan de la couverture végétale tout comme le flux infrarouge échangé entre le substrat et les feuilles.

Pour les trois prototypes testés, le flux solaire incident sur le substrat se répartit à peu près pour moitié entre l'évaporation à la surface d'une part, et le flux stocké au nœud et transmis à la paroi d'autre part. Les flux



(a) surface extérieure du substrat



(b) couverture végétale

FIGURE 4.34 – Évolutions des flux thermiques simulés pour les trois échantillons, le 19 mai 2010 : (a) à la surface du substrat — (b) dans la couverture végétale

thermiques échangés avec la couverture végétale sont plutôt limités, surtout si on les compare avec le flux convectif entre la couverture végétale et l'air extérieur (Figure 4.34(b)). Ainsi, la couverture joue bien son rôle d'isolation vis-à-vis des flux convectifs et infrarouges, ce qui est plutôt défavorable dans le cas présent puisque le rafraîchissement de la paroi s'en trouve limité. Cet effet est cependant largement compensé par celui de masque solaire et par celui de l'évaporation à la surface.

Si l'on compare les trois prototypes, on remarque que les flux échangés entre le substrat et les feuilles restent quasiment inchangés. On a vu que les paramètres liés aux coefficients d'échange radiatif entre le substrat et le feuillage restaient effectivement similaires pour les trois cas, tout comme la température du feuillage. Les principales différences concernent donc le flux latent, le flux solaire et le flux transmis à la paroi, que l'on peut mettre en lien avec les paramètres thermiques obtenus et les températures observées.

- Le flux transmis à la paroi est plus important pour l'échantillon 2 pour lequel la température du substrat est effectivement plus proche de celle des feuilles.
- Il est limité pour l'échantillon 3, ce que l'on peut expliquer par l'augmentation de l'épaisseur et de la résistance thermique et par la diminution du flux solaire transmis.
- Pour l'échantillon 4, dont le flux solaire incident est comparable au deuxième prototype, c'est l'augmentation du flux latent qui permet de limiter l'augmentation de la température du substrat.

Bilan de flux de la couverture végétale Le bilan de flux de la canopée végétale fait apparaître clairement l'influence de l'environnement extérieur par l'intermédiaire du flux convectif dû au renouvellement de l'air de la canopée végétale et du flux de rayonnement grande longueur d'onde échangé avec le ciel et avec la scène urbaine. Leurs effets sont généralement opposés : l'apport d'air extérieur dans la canopée végétale compense le moindre refroidissement radiatif nocturne, tandis qu'il est un des principaux vecteurs de modération de l'augmentation de la température des feuilles en journée.

4.5 Conclusion

Un des objectifs de cette thèse, qui consistait à intégrer un modèle thermique de façade végétale dans *Solene-microclimat*, a été atteint. La typologie développée a permis de mettre en évidence la grande variété des dispositifs existants et les implications de ces différences sur les phénomènes physiques mis en jeu.

L'analyse de la littérature scientifique et notamment des résultats expérimentaux présentés a confirmé la sensibilité du comportement thermique des couverts végétaux et du substrat à certains paramètres du couvert végétal,

comme la densité foliaire et les paramètres radiatifs, ainsi que leur impact sur le comportement thermique des bâtiments et sur le microclimat. Elle a également permis de constater l'absence de modèle thermo-hydrique d'enveloppe végétale comportant un substrat humide.

À partir d'un état de l'art sur la modélisation des toitures végétales, un modèle thermique permettant de représenter les différents types de systèmes de végétalisation de façade a pu être implémenté, testé et validé à partir de résultats expérimentaux.

L'analyse des mesures effectuées à l'Hépià par le LEEA a permis d'en savoir beaucoup plus sur le comportement des murs vivants, notamment en ce qui concerne le bilan hydrique. Les comparaisons avec les résultats de simulation ont permis de mieux appréhender la sensibilité de notre nouveau modèle de surface végétale. Elles ont également montré les limites du modèle, puisque le comportement thermique d'un des échantillons traités n'a pas pu être fidèlement reproduit, en particulier au niveau du substrat.

Si des incertitudes subsistent quant au calcul de l'évapotranspiration et à la prise en compte du bilan hydrique, ceci étant dû à l'absence de certaines données, les résultats sur les deux autres échantillons sont néanmoins très satisfaisants compte tenu de la simplicité du modèle. Les paramètres pris en compte se sont effectivement montrés efficaces et suffisants pour caractériser les comportements différents de ces deux prototypes.

En termes de modélisation, l'ajout d'un nœud pour la couverture végétale et d'un nœud pour l'air en son sein s'est avéré suffisant pour représenter l'effet tampon joué par les feuilles pour le flux radiatif et par l'air captif pour le flux convectif. Étant donnée la valeur élevée du coefficient d'échange convectif entre ces deux nœuds, nous pouvons même penser qu'une seule capacité thermique pour la couverture végétale aurait pu être suffisante.

S'il a fallu prendre en compte un bilan hydrique dynamique pour la comparaison expérimentale, cela ne sera pas forcément nécessaire dans les prochaines études pour les dispositifs de façades irriguées. En effet, on pourra faire l'hypothèse d'une irrigation idéale. La quantité d'eau évaporée ne sera alors plus une variable de validation, mais une sortie du modèle pour évaluer la consommation d'eau effective et la mettre en rapport avec l'efficacité des façades végétales pour modérer les températures intérieures et extérieures en été.

Troisième partie

Couplage

Chapitre 5

Étude du couplage entre le modèle thermo-radiatif et le modèle aéraulique

Sommaire

5.1	Calcul des coefficients d'échange superficiel par convection	150
5.2	Importance relative des flux convectifs et radiatifs	154
5.3	Sensibilité du modèle thermique de bâtiment au mode couplage	164
5.4	Résultats	170
5.5	Conclusion et discussion	178

Initialement, le modèle de couplage utilisé dans cette thèse a été développé pour simuler les conditions de confort thermique dans les espaces urbains [Vinet, 2000; Robitu, 2005]. Dans ce contexte, il lui a été donné comme principal objectif de rendre accessible la température de l'air autour des passants ainsi que la vitesse de l'air à leur niveau, variables qui interviennent directement dans le calcul des indices de confort. Dans le cadre de la simulation thermique d'un bâtiment, il n'est pas forcément nécessaire de connaître ces paramètres en tous points de l'espace urbain. On peut dès lors se poser la question du niveau de détail des variables physiques de l'environnement nécessaires pour estimer précisément l'impact de l'aménagement sur la consommation énergétique des bâtiments.

La problématique du couplage est abordée dans la première partie de ce chapitre par l'étude des différentes méthodes d'estimation des coefficients d'échange superficiels par convection. Ces coefficients constituent en effet une interface importante entre le modèle aéraulique et le modèle thermique

de bâtiment.

La deuxième partie présente des simulations réalisées sans couplage thermique avec la partie aéraulique, c'est-à-dire sans prendre en compte la modification locale de la température de l'air extérieur. Celles-ci sont effectuées afin d'estimer et de comparer les influences relatives des flux convectifs et du bilan radiatif GLO extérieurs sur le bilan thermique du bâtiment. Pour cela, ces flux sont calculés de différentes manières, ou négligés selon les simulations.

La troisième partie de ce chapitre s'intéresse plus particulièrement aux flux convectifs en proposant de tester différents modes de couplage entre le modèle thermique de bâtiment et des modèles aérauliques impliquant des représentations plus ou moins fines des paramètres climatiques de la zone étudiée. Les flux convectifs, par l'intermédiaire desquels le couplage se fait, sont ainsi calculés avec différents niveaux de représentation des mouvements de l'air et de sa température.

5.1 Choix de la méthode de calcul des coefficients d'échange superficiel par convection

Le coefficient d'échange superficiel par convection ou CHTC¹, noté h_c , est le rapport entre le flux conducto-convectif à l'interface d'un solide et d'un fluide (Φ_{conv}) et la différence entre la température de surface du solide (T_{se}) et la température du fluide à un point de référence hors de la couche limite (T_∞) :

$$h_c = \frac{\Phi_{conv}}{T_{se} - T_\infty} \quad (5.1)$$

Dans le cas d'une discrétisation spatiale détaillée de l'enveloppe extérieure du bâtiment et du volume d'air de son environnement proche, on peut attribuer au modèle de thermique du bâtiment des conditions aux limites également discrétisées. Les flux convectifs peuvent alors être calculés en fonction de la vitesse de l'air et de la température simulées localement à proximité de la surface considérée.

La méthode de calcul des coefficients d'échange superficiel convectif doit alors être adaptée à ce cas particulier. Il existe en effet un très grand nombre de lois, pour la plupart empiriques, qui donnent des valeurs de coefficients d'échange convectif en fonction d'une vitesse de vent. Palyvos [2008]; Defraeye et al. [2011] passent en revue une partie d'entre elles. Nous aborderons ces différentes classifications avant de voir comment utiliser ces études dans

1. Pour *Convection Heat Transfer Coefficient*, coefficient d'échange superficiel par convection.

notre cas particulier.

Il faut en effet noter que les corrélations présentées dans la littérature peuvent donner des résultats très différents les uns des autres. Elles sont le plus souvent liées à une configuration géométrique ou à un protocole expérimental particulier.

5.1.1 Expressions générales des corrélations existantes

Palyvos [2008] classe les corrélations d'après leur formulation.

La plus simple et la plus utilisée est une relation linéaire de la forme :

$$h_c = a + bV \quad (5.2)$$

C'est notamment le cas de la corrélation préconisée par ASHRAE [1993] :

$$h_c = 5,7 + 3,8V \quad (5.3)$$

L'auteur donne une quarantaine de combinaison pour les coefficients a et b qui varient respectivement de 0 à 12,2 et de 0,48 à 10,21. Ces écarts illustrent bien la variété des corrélations existantes. On remarque néanmoins une certaine cohérence, notamment entre les relations obtenues avec des mesures sur des façades pour lesquelles a est proche de 5 et b est compris entre 1,5 et 2.

La deuxième formulation est une loi de type puissance :

$$h_c = a + bV^n \quad (5.4)$$

avec un paramètre a le plus souvent nul ou très proche de 0, b compris entre 2,38 et 18,65 et n compris entre 0,5 et 0,89.

Enfin, il existe les corrélations permettant dans un premier temps de calculer le nombre de Nusselt, de la forme :

$$Nu = aRe^bPr^c + d \quad (5.5)$$

Celui-ci est défini comme le rapport entre le flux convectif et le flux conductif à une interface entre deux milieux. Son expression permet donc de retrouver la valeur de h_c à partir de la conductivité thermique du fluide λ et d'une longueur caractéristique L_c :

$$Nu = \frac{hL_c}{\lambda} \quad (5.6)$$

Hagishima et Tanimoto [2003] rappellent néanmoins que ces lois d'estimation du nombre de Nusselt, utilisées généralement en ingénierie industrielle,

ont été obtenues dans des conditions assez éloignées de celles du milieu urbain et qu'elles ne s'y appliquent donc généralement pas. Étant donné que nous faisons face à une modélisation à plusieurs échelles, la longueur caractéristique à utiliser pose également question.

5.1.2 Vitesses de référence

Les vitesses de vent utilisées comme référence pour établir les corrélations précédentes peuvent être mesurées ou estimées en différents points relativement à la surface pour laquelle le coefficient est calculé. Les références utilisées sont les suivantes :

V_{10} Vitesse mesurée en dehors de la zone perturbée par la couche limite urbaine à 10[m] de hauteur. Elle est donc indépendante de la morphologie urbaine.

V_{toit} Vitesse mesurée sur le toit du bâtiment étudié

V_{local} Vitesse mesurée proche de la paroi étudiée

Plus les vitesses de vent de référence sont dépendantes de la configuration particulière qui est étudiée, moins les résultats obtenus auront un champ d'application étendu. À l'inverse, plus la vitesse mesurée est proche du point où les mesures de température sont effectuées, plus l'estimation du coefficient sera précise. Le rapport entre la vitesse mesurée sur le toit ou en façade peut varier d'un facteur un à dix, comme le montrent Loveday et Taki [1996]. Ainsi, les corrélations de Loveday et Taki [1996], par exemple, sont différentes pour la vitesse mesurée sur le toit ou pour la vitesse proche de la façade.

5.1.3 Méthode d'obtention de la loi

Defraeye et al. [2011] classent les corrélations de la littérature d'après la méthode utilisée pour les obtenir.

Méthodes expérimentales

Les mesures peuvent être réalisées sur des plaques chauffées asservies en température. Le flux thermique apporté étant égal à la somme du flux convectif et du flux radiatif, il reste à évaluer ce dernier pour isoler le flux convectif.

Les méthodes n'utilisant pas de plaque chaude mais des parois classiques doivent également prendre en compte le stockage et le flux conductif dans la paroi étudiée. Pour isoler le flux convectif et le mettre en relation avec la vitesse du vent mesurée, il faut mesurer les autres paramètres climatiques, notamment le rayonnement et la température de l'air. Une dernière méthode consiste à mesurer une masse de naphthalène sublimée [Shao et al., 2009].

Ces expériences sont menées en soufflerie ou en conditions réelles. Une difficulté est d'isoler l'effet des flux convectifs par rapport au rayonnement CLO et infrarouge. La généralisation des résultats obtenus est limitée par le fait que le coefficient d'échange ne peut être estimé qu'en un point particulier. La vitesse de référence utilisée est également spécifique au cas étudié.

Méthodes numériques

Les simulations sont réalisées avec des veines numériques maillées très finement autour du bâtiment étudié. Des modèles de turbulence à bas Reynolds sont utilisés à proximité des parois. Zhai et Chen [2004] rappellent que la taille des mailles doit être réduite pour que les lois de paroi puissent être employées. Les tailles de cellules préconisées (1[*cm*] pour la convection forcée et 5[*mm*] pour la convection naturelle) conduiraient à un nombre de facettes beaucoup trop important pour que le temps de calcul reste raisonnable avec notre outil de simulation. Il n'est donc pas possible pour nous d'utiliser les lois de paroi intégrées aux outils CFD.

Les méthodes numériques sont intéressantes car elles permettent d'avoir accès à toutes les données en tous points. Emmel et al. [2007]; Blocken et al. [2009]; Defraeye et al. [2011] utilisent cette méthode avec des résultats assez similaires pour des configurations différentes. Cependant, leurs études sont limitées à des cas de bâtiments cubiques ou parallélépipédiques.

5.1.4 Corrélations utilisées dans le cas de Solene-microclimat

Après avoir énuméré certaines des corrélations évoquées plus tôt ainsi que celles utilisées dans le cas de la convection naturelle, Vinet [2000] a fait le choix d'utiliser les coefficients d'échange issus de `N3S`, le code de calcul de mécanique des fluides utilisé pour le couplage, dans lequel les flux convectifs étaient estimés à partir d'une loi de paroi. Bouyer [2009] revient sur ce choix en considérant que les lois de paroi ne sont pas adaptées au contexte microclimatique urbain et reprend une formulation évoquée par Vinet [2000] qui est une adaptation d'une loi de Jayamaha et al. [1996] :

$$h_c = 5,85 + 1,7V_{toit} \quad (5.7)$$

On retrouve des coefficients de l'ordre de ceux obtenus pour des méthodes semblables, c'est-à-dire pour des coefficients en façade de bâtiment. Cependant, la vitesse de référence utilisée est bien celle du toit or nous disposons a priori de données plus précises.

Hénon [2008] utilise également `Solene` pour la simulation des flux sensibles d'une scène urbaine mais sans couplage aéraulique. La méthode utilisée

est adaptée de celle de Guilloteau [1998] à des surfaces verticales en utilisant des vitesses proches des parois estimées à partir d'un profil de vent urbain. En les comparant avec des valeurs expérimentales recalculées grâce à un recouplement entre des données issues de **Solene** et des températures de brillance issues d'images de mesures infrarouges aéroportées, il montre que les résultats obtenus sont meilleurs qu'en utilisant la corrélation préconisée par l'ASHRAE (Équation (5.3)).

5.1.5 Conclusion

L'analyse des méthodes utilisées pour estimer les coefficients d'échange superficiel par convection montre qu'il est important de choisir des corrélations appropriées au cas traité et à la vitesse de référence utilisée. La suite de ce chapitre mettra en évidence l'impact du choix de cette méthode sur la consommation énergétique des bâtiments et sur la température intérieure.

5.2 Importance relative des flux convectifs et radiatifs échangés entre le bâtiment et son environnement

Le flux thermique échangé entre un bâtiment et son environnement se décompose de la manière suivante :

- flux net de rayonnement courte longueur d'onde : rayonnement solaire et réflexions sur la scène urbaine,
- flux net de rayonnement grande longueur d'onde : rayonnement atmosphérique et échanges avec la scène urbaine,
- flux convectif,
- flux de renouvellement d'air,
- flux conductif transmis à travers l'enveloppe.

Parmi ces composantes, ce sont les variations des flux solaires CLO, notamment de l'ensoleillement direct, qui sont prépondérants dans les bilans thermiques de surface. Ce sont d'ailleurs les seuls pour lesquels l'environnement proche est parfois pris en compte de manière explicite dans les codes de simulation thermique dynamique de bâtiment utilisés à l'heure actuelle.

Par ailleurs, les flux convectifs et par renouvellement d'air sont les seuls à être directement influencés par les variations de la température de l'air et de la vitesse du vent et qui nécessitent éventuellement un couplage avec un modèle aéraulique (en pression pour le cas du renouvellement d'air). Dans le modèle de couplage tel qu'il est utilisé actuellement, le flux thermique dû au renouvellement d'air dépend de la température à l'endroit où l'air neuf est prélevé, mais la vitesse du vent n'est pas prise en compte dans le calcul du débit qui est supposé contrôlé. Les transferts d'énergie par convection sur la

surface extérieure de l'enveloppe sont donc les seuls qui justifient le couplage avec un modèle aéraulique complet.

Enfin, la modélisation complète des échanges infrarouges avec la scène urbaine et avec l'atmosphère est une plus-value importante de notre modèle de thermique du bâtiment.

Des simulations préliminaires ont été réalisées sans couplage thermique avec la partie aéraulique mais en prenant en compte les masques solaires, les inter-réflexions solaires et un bilan de rayonnement grande longueur d'onde. Dans ce cas, les coefficients d'échange convectif sont indépendants des températures et vitesses d'air locales et considérés constants. La connaissance des vitesses d'air n'est pas nécessaire et la température extérieure est prise égale à la température météo.

La méthodologie a ensuite consisté à choisir un cas de base puis à faire varier les conditions de couplage avec l'environnement concernant le rayonnement thermique et le mode de calcul des flux convectifs.

5.2.1 Cas de référence

Les données du cas de référence sont les suivantes :

- bâtiment non isolé, double vitrage,
- température de consigne : $19 [^{\circ}C]$,
- transmittivité des arbres : 0,7
- 20% de vitrage, transmittivité : 0,7
- débit de ventilation : $0,3 [vol.h^{-1}]$
- apports internes : environ $30 [kW]$, soit occupation permanente de 300 personnes,
- CHTC extérieur : $h_{c,ref} = 9 [W.m^{-2}.K^{-1}]$
- température de l'air extérieur issue d'un fichier météorologique.

Le bâtiment étudié est le seul dont on peut distinguer les étages sur la Figure 5.1. Il comporte quatre étages en plus du rez-de-chaussée. Construit au début des années 60 avec les autres bâtiments dits du "nouveau Pin Sec", il s'agit d'une barre de $99,2 [m]$ de long et $9,6 [m]$ de large pour $15 [m]$ de hauteur, soit $4767 [m^2]$ de plancher chauffé.

La consommation énergétique surfacique pour le chauffage, pour une saison de chauffage complète (du 15 septembre au 15 avril) est de $106 [kWh.m^{-2}]$. Ce résultat dénote une consommation faible pour un bâtiment non isolé, cependant, certains paramètres choisis permettent d'expliquer ce résultat :

- taux de vitrage important,
- pas de prise en compte des ponts thermiques,
- faible albédo des façades,

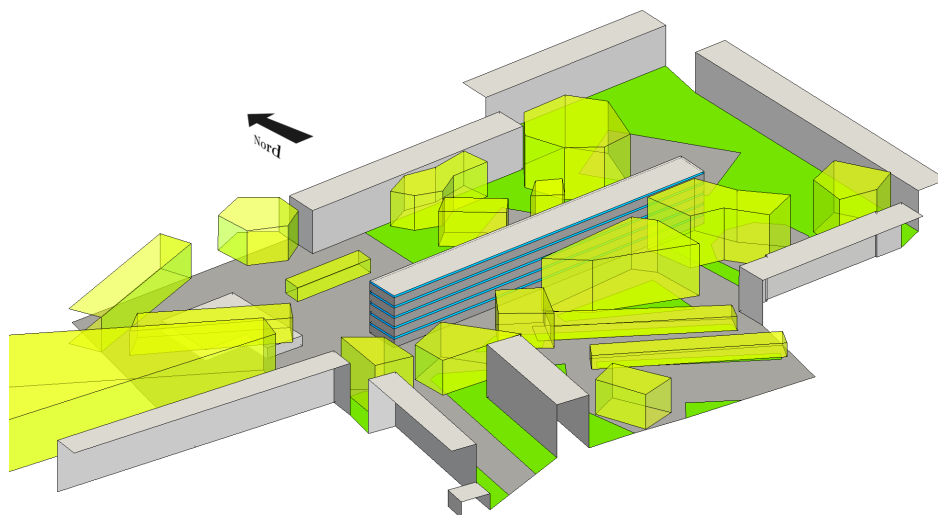


FIGURE 5.1 – Maquette numérique du fragment simulé du Pin sec (le bâtiment d'étude est le seul dont le vitrage est représenté)

- charges internes importantes et constantes,
- taux de ventilation faible.

À partir du cas de référence, les variations qui ont été testées sont les suivantes :

cas ref_{meteo} et ref_{profil} mêmes hypothèses que le cas de référence en utilisant un coefficient h_c correspondant à la moyenne spatiale et temporelle des h_c calculés dans les cas $v(météo)$ et $v(profil)$, respectivement.

cas $v(météo)$ CHTC variable en fonction de la vitesse du vent d'après Bouyer [2009] :

$$h_c = 5,85 + 1,7v_{meteo} \quad (5.8)$$

cas $v(profil)$ CHTC variable en fonction de la vitesse du vent et de la hauteur, avec un profil de type puissance :

$$v_{profil}(z) = v_{meteo} \left(\frac{z}{z_0} \right)^{0.3} \quad (5.9)$$

En gardant la même loi pour le calcul des flux convectifs [Bouyer, 2009], on obtient pour les coefficients d'échange convectif la relation suivante :

$$h(z) = 5,85 + 1,7v_{profil}(z) \quad (5.10)$$

5.2 Importance relative des flux convectifs et radiatifs

cas	h_c	GLO ciel	GLO scène	cas de comparaison
<i>ref</i>	$h_{c,ref}$	mesuré	oui	aucun
<i>ref_{meteo}</i>	$h_{eq,meteo}$	mesuré	oui	aucun
<i>ref_{profil}</i>	$h_{eq,profil}$	mesuré	oui	aucun
<i>v(météo)</i>	$h_c(t)$	mesuré	oui	<i>ref_{meteo}</i>
<i>v(profil)</i>	$h_c(z, t)$	mesuré	oui	<i>ref_{profil}</i>
<i>Tciel(T)</i>	$h_{c,ref}$	eq. (5.11)	oui	<i>ref</i>
<i>no GLO</i>	$h_{c,ref}$	mesuré	non	<i>ref</i>

TABLEAU 5.1 – Description des cas simulés

cas *Tciel(T)* : Utilisation du flux atmosphérique infrarouge calculé à partir d'une loi empirique [Monteith et Unsworth, 1990] pour un ciel clair au lieu des flux atmosphériques mesurés :

$$\varphi_{GLO,ciel} = 5,5T_{air} + 213 \quad (5.11)$$

Le flux infrarouge émis par le ciel est pris en compte dans le bilan radiatif de la surface extérieure.

cas *no GLO* Pas de prise en compte des échanges radiatifs GLO avec la scène urbaine : toutes les parois (bâtiments et sols) en vis-à-vis de chacune des facettes du bâtiment d'étude sont supposées à la même température que la facette en question. Le bilan radiatif infrarouge est donc uniquement réalisé avec le ciel.

Les choix de modélisation sont récapitulés dans le Tableau 5.1.

Pour une saison de chauffe complète, les consommations énergétiques moyennes du bâtiment étudié sont présentées dans le Tableau 5.2. Avant que les résultats pour chaque cas soient commentés en détails, on peut observer l'écart important entre les consommations énergétiques obtenues pour le dernier étage (RdC+4) qui varie entre 218,6 et 281,3 [kWh/m^2] et pour les autres étages, qui sont comprises entre 65,7 et 106,6 [kWh/m^2]. On peut l'expliquer par la grande surface en contact avec l'air extérieur que constitue le toit qui n'est pas isolé.

5.2.2 Impact du coefficient d'échange superficiel par convection

Dans la plupart des simulations thermiques, et notamment dans la réglementation thermique, les coefficients d'échange superficiel par convection sont définis d'une manière forfaitaire en fonction de l'orientation du flux thermique, c'est-à-dire en faisant la distinction entre les toits et les murs. Il intègre également un coefficient d'échange radiatif.

cas	moy	RdC	RdC+1	RdC+2	RdC+3	RdC+4
<i>ref</i>	106,4	75,3	72,5	74,0	87,5	222,5
<i>ref_{meteo}</i>	107,7	76,3	73,7	75,3	88,9	224,4
<i>ref_{profil}</i>	103,3	72,0	69,7	71,4	84,9	218,6
<i>v(météo)</i>	108,3	76,4	73,9	75,5	89,4	226,1
<i>v(profil)</i>	103,0	65,7	67,2	71,2	86,7	224,5
<i>Tciel(T)</i>	128,7	85,1	83,4	87,0	106,6	281,3
<i>no GLO</i>	114,0	84,4	80,5	81,1	94,2	230,0

 TABLEAU 5.2 – Consommation de chauffage annuelle surfacique (en $[kWh/m^2]$)

En réalité, les échanges convectifs dépendent fortement de la vitesse du vent et également de sa turbulence.

cas $v(météo)$

Pour le cas $v(météo)$, il s'agit d'étudier l'impact de la prise en compte de la vitesse du vent mesurée sur le site. Afin de comparer les résultats, la simulation de référence a été de nouveau effectuée avec un coefficient d'échange convectif correspondant à la moyenne temporelle des coefficients d'échange convectif calculés en fonction de la vitesse du vent. On compare donc :

- le cas $v(météo)$: une simulation avec un coefficient d'échange surfacique par convection constant sur tout le bâtiment mais variable au cours du temps en fonction de la vitesse du vent météorologique,
- avec le cas ref_{meteo} : une simulation avec un coefficient d'échange convectif constant sur le bâtiment et dans le temps, égal à la moyenne temporelle des coefficients d'échange convectif calculés précédemment :

$$h_{eq,meteo} = \frac{1}{\Delta t} \sum_t h(t) \quad (5.12)$$

Pour chaque comparaison, la Figure 5.2 représente la consommation totale du cas étudié par rapport à la consommation de son cas de référence (Tableau 5.1), pour chaque étage (barres colorées) et en moyenne sur les cinq niveaux (barre hachurée), exprimé en [%] :

$$C_{rel} = 100 \frac{C_{cas}}{C_{ref}} \quad (5.13)$$

On peut voir sur la Figure 5.2 que la différence de consommation énergétique entre les deux cas est très faible (inférieure à 0,5%), autant pour la valeur moyenne du bâtiment que pour celle de chaque étage. L'effet de

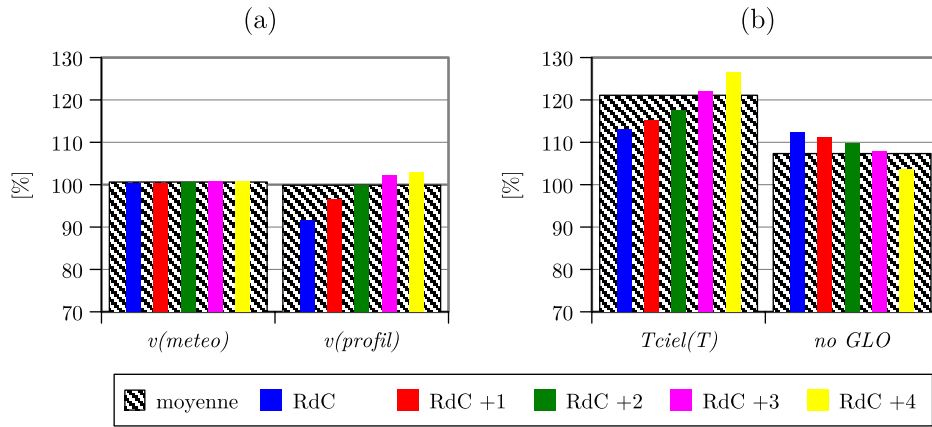


FIGURE 5.2 – Consommation de chauffage surfacique moyenne et par étage, par rapport au cas de référence : (a) impact des flux convectifs – (b) impact des flux radiatifs

la variation temporelle de la valeur du coefficient d'échange convectif sur la consommation énergétique du bâtiment est donc négligeable, en tout cas pour le cas considéré.

cas $v(\text{profil})$

L'autre facteur de variabilité des CHTC est spatial et concerne la variation de la vitesse du vent selon un profil vertical. Il est plus compliqué à prendre en compte puisqu'il est nécessaire que les conditions aux limites soient discrétisées, ce qui est rare même dans les codes de calcul de thermique du bâtiment les plus détaillés. On compare maintenant :

- le cas $v(\text{profil})$: une simulation avec un coefficient d'échange surfacique par convection variable sur le bâtiment et fonction de l'altitude et variable dans le temps,
- avec le cas ref_{profil} : la simulation correspondante du cas de référence avec un coefficient d'échange convectif correspondant à la moyenne spatiale et temporelle du cas $v(\text{profil})$:

$$h_{eq,profil} = \frac{1}{\Delta t} \sum_t \left(\frac{1}{S} \sum_i S_i h_i(t) \right) \quad (5.14)$$

Sur la Figure 5.2, on constate que la différence de consommation énergétique entre ces deux cas est encore une fois très faible en valeur moyenne. Par contre, la répartition par étage a changé : ceux situés plus bas ont logiquement moins de déperdition par convection et une consommation énergétique plus faible. On peut l'observer également sur la Figure 5.3(b) où la température de surface extérieure est plus élevée par rapport au cas de référence où

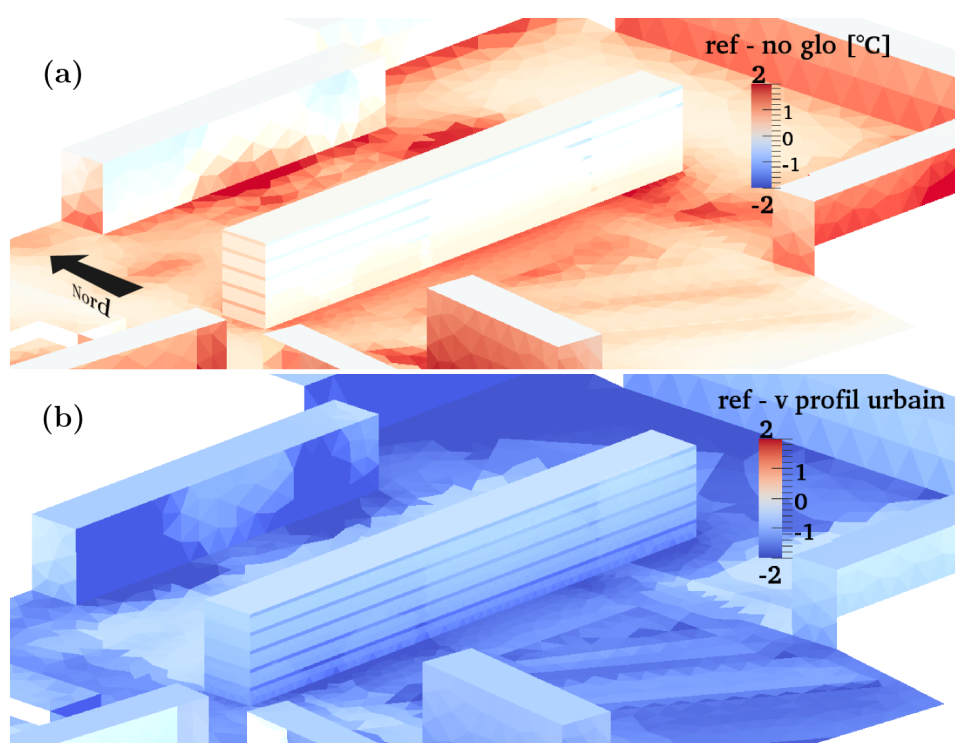


FIGURE 5.3 – Différence de température de surface extérieure entre le cas de référence et : (a) le cas *no GLO* – (b) le cas *v(profil)*, façade sud

la vitesse d'air est plus faible, c'est-à-dire au niveau des étages inférieurs et sur le sol.

Cette faible sensibilité apparente masque cependant une différence importante sur les consommations énergétiques de chaque étage et également sur les différences de température des surfaces extérieures. On en déduit, tout au moins pour notre cas, que pour bien représenter les températures des surfaces extérieures, une exigence minimale est de prendre en compte le profil de vent urbain dans le calcul des coefficients d'échange superficiel par convection.

5.2.3 Impact du bilan de rayonnement grande longueur d'onde

Le deuxième phénomène extérieur au bâtiment que notre outil de simulation a la particularité de détailler est le bilan de rayonnement infrarouge sur la totalité de la scène extérieure. Si certains modèles peuvent prendre en compte un facteur de vue du ciel pour calculer le flux échangé avec l'atmosphère, les échanges avec l'environnement proche et en particulier les

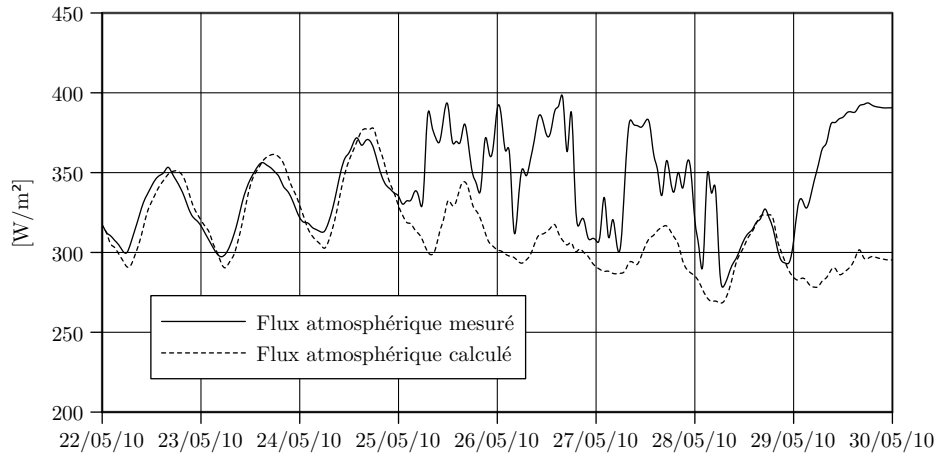


FIGURE 5.4 – Comparaison entre les flux atmosphériques mesurés et estimés à partir de la température de l'air

bâtiments en vis-à-vis ne peuvent être considérés que si l'on connaît leur température de surface extérieure et que la géométrie est assez bien décrite pour qu'on puisse estimer les facteurs de vue entre chacune des surfaces.

Ces conditions étant rarement réunies, dans la plupart des modèles de bâtiments, les échanges de rayonnement grande longueur d'onde sont calculés en ajoutant un coefficient d'échange radiatif au coefficient d'échange superficiel par convection.

La surface extérieure du bâtiment échange par rayonnement à la fois avec le ciel et avec la scène urbaine. Les deux cas présentés ici consistent à changer la représentation de l'un ou l'autre terme du bilan radiatif.

Flux atmosphériques infrarouges : cas $T_{ciel}(T)$

La première approche a consisté à ne plus utiliser les flux atmosphériques infrarouges mesurés mais des valeurs obtenues à partir d'une relation empirique, en fonction de la température de l'air extérieur (Équation (5.11)). En comparant uniquement les flux en provenance du ciel, on remarque que les flux calculés sont en général inférieurs aux flux mesurés (voir l'exemple sur une semaine de mai sur la Figure 5.4). Cela s'explique simplement par le fait que la formule empirique est valable pour un ciel clair, pour lequel la température de ciel est plus faible que la température de l'air.

Sur la Figure 5.2 (cas *no GLO*), on remarque que cette sous-estimation de la température du ciel a un impact important puisqu'elle engendre une augmentation de la consommation énergétique de 20%. La différence est d'autant plus importante que le facteur de vue avec le ciel est élevé, comme

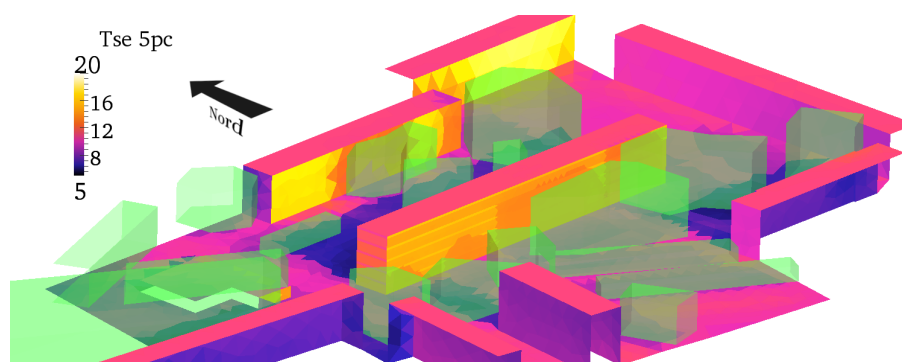


FIGURE 5.5 – Températures de surface simulées, le 25/01/2010 à 12h00 ($T_{ext} = 4^{\circ}C$)

on peut le constater sur la répartition des consommations énergétiques par étage.

Flux infrarouge échangé avec la scène urbaine : cas *no GLO*

La deuxième approche a consisté à négliger le bilan infrarouge avec la scène urbaine, tout en conservant les flux atmosphériques mesurés tels qu'ils sont pris en compte dans le cas de référence. Cela revient à faire l'hypothèse que chaque facette du bâtiment d'étude n'a en regard que des surfaces à la même température, les échanges radiatifs nets avec les autres parois de la scène étant donc nuls. Ainsi, le flux infrarouge net pour chaque facette i ($\varphi_{GLO,net,i}$) s'écrit :

$$\varphi_{GLO,net,i} = F_{i \rightarrow ciel}(\varphi_{GLO,ciel} - \sigma \varepsilon_i T_{se,i}^4) \quad (5.15)$$

avec :

- $F_{i \rightarrow ciel}$ le facteur de vue du ciel à la facette i ,
- $\varphi_{GLO,ciel}$ le flux infrarouge mesuré en provenance du ciel,
- σ la constante de Stefan-Boltzmann,
- ε_i l'émissivité de la facette i ,
- $T_{se,i}$ la température de surface extérieure de la facette i ,

On remarque encore une fois l'effet positif de la prise en compte de ces échanges de flux thermiques infrarouges sur la consommation énergétique du bâtiment (Figure 5.2(b)). On peut en déduire que les surfaces urbaines en vis-à-vis sont plus chaudes. On peut effectivement l'observer sur la Figure 5.5, en particulier entre la façade nord du bâtiment étudié et les façades sud des autres bâtiments. Sur la Figure 5.6 on peut observer que les façades reçoivent du rayonnement dans le cas de référence (le flux net étant négatif), contrairement au cas sans bilan GLO. Le déficit est d'autant plus important

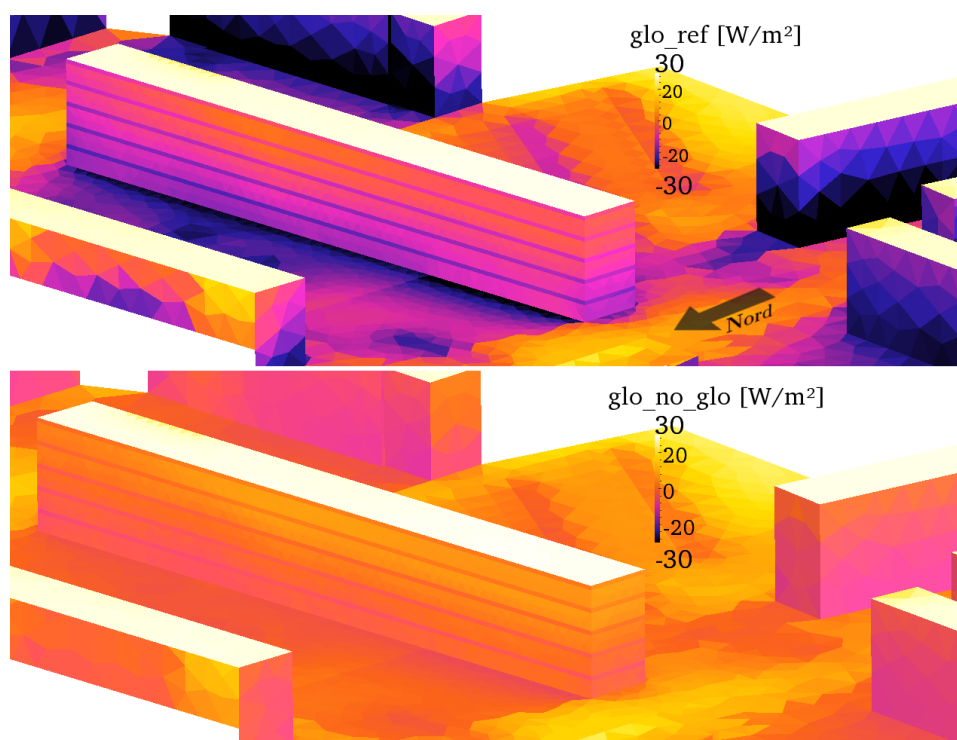


FIGURE 5.6 – Flux thermiques infrarouges nets pour le cas de référence (*ref*) et le cas sans échange avec la scène (*no GLO*)

que le facteur de vue avec la scène est grand, c'est-à-dire lorsqu'on se rapproche du sol (voir la consommation énergétique par étage sur la Figure 5.2). La prise en compte du rayonnement GLO est donc d'autant plus nécessaire que le bâtiment est implanté dans une zone dense.

5.2.4 Conclusion

Le comportement thermique du bâtiment est plus sensible aux variations des flux de rayonnement thermique, qu'ils soient échangés avec le ciel ou avec la scène urbaine, qu'aux flux convectifs. Par rapport au bilan GLO, la représentation géométrique explicite du bâtiment et de son environnement se trouve donc pleinement justifiée.

À l'inverse, la faible sensibilité du bâtiment à la prise en compte des variations temporelles et des hétérogénéités spatiales de la température et de la vitesse de l'air autour du bâtiment permet de légitimement remettre en cause la nécessité du couplage entre le modèle thermique de bâtiment et le modèle aéraulique, dans le cas de la simulation thermique des bâtiments.

5.3 Analyse de sensibilité du modèle thermique de bâtiment au mode de couplage

Nous allons à présent étudier plus précisément l'impact de différents niveaux de représentation des interactions entre le bâtiment et l'air extérieur, notamment :

- la variabilité temporelle de la vitesse de l'air (et donc du coefficient d'échange convectif),
- la variabilité spatiale de la vitesse de l'air,
- la modification globale de la température de l'air autour du bâtiment,
- la modification localisée de la température de l'air autour du bâtiment.

5.3.1 Couplage avec la vitesse de l'air

La connaissance de la vitesse du vent autour du bâtiment permet d'estimer la valeur des coefficients d'échange superficiel par convection. La relation utilisée pour calculer ce coefficient dépendra de la vitesse de l'air choisie comme référence : vitesse de l'air météorologique, c'est-à-dire mesurée en dehors de la couche limite urbaine, vitesse mesurée sur le toit, au sein de la rue, ou proche de la surface considérée.

Les niveaux de représentation de la vitesse du vent sont les suivants :

v(météo) La vitesse du vent utilisée est mesurée sur le toit de l'immeuble Dunant, échantillonnée avec un pas de temps d'une heure. La direction du vent et l'impact de l'environnement sur l'écoulement du vent ne sont pas pris en compte.

v(profil) La vitesse du vent est calculée en fonction de l'altitude, à partir de la vitesse météorologique et d'une loi de profil vertical de vent (Équation 5.9). La direction du vent n'est pas prise en compte ici, mais elle pourrait l'être si le profil utilisé était différent selon les directions de vent en raison de sa provenance de quartiers de densités différentes.

v(cfd) La vitesse du vent est estimée en chaque point à partir d'un calcul de mécanique des fluides numérique réalisé avec le logiciel `Code_Saturne`. Pratiquement, une simulation avec `Code_Saturne` est réalisée pour un certain nombre de combinaisons de vitesses de vent et de directions. Dans ce cas, la vitesse de l'air à proximité de chaque facette où un bilan thermique est réalisé dépendra de la vitesse du vent et de sa direction, ainsi que de la forme urbaine de l'environnement proche.

La Figure 5.7 montre une comparaison entre la vitesse de vent mesurée sur le toit et les moyennes des vitesses de vent proches de la paroi estimées avec les deux méthodes citées. On remarque que les vitesses de vent proches des parois issues de `Code_Saturne` sont en moyenne inférieures de 60% à la vitesse de vent mesurée sur le toit alors que celles calculées à partir des profils en sont proches, légèrement inférieures, ce qui était attendu puisque

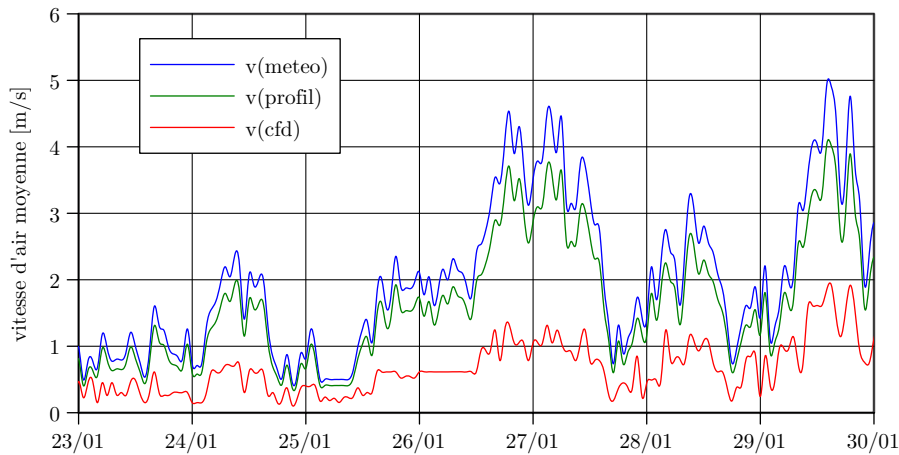


FIGURE 5.7 – Comparaison des différentes méthodes de calcul de la vitesse de l'air autour du bâtiment

tous les points de la surface sont à une altitude inférieure au point de mesure.

Techniquement, seul le dernier niveau de représentation nécessite l'utilisation de `Code_Saturne`. Si l'on se place en convection forcée, la méthode utilisée pour ne pas avoir à faire un calcul de mécanique des fluides numérique à chaque pas de temps consiste à simuler à l'avance un grand nombre de combinaisons de conditions de vent. Ensuite, à chaque pas de temps, on utilise la vitesse de l'air calculée près des parois pour la combinaison des conditions de vent correspondantes. Ainsi, 240 simulations ont été réalisées avec :

- dix vitesses d'air : 0,25 - 0,5 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 7 - 10 - 15 [$m.s^{-1}$],
- 24 directions d'incidence pour chaque vitesse de vent avec un pas de 15° .

Les vitesses moyennes sur l'ensemble de la surface extérieure du bâtiment d'étude sont présentées sur la Figure 5.8. On remarque que l'angle d'incidence du vent a effectivement un impact non négligeable sur la vitesse moyenne à la surface du bâtiment puisqu'elle peut varier de 30% entre deux directions données. Il paraît donc intéressant de prendre en compte ce facteur dans le calcul des flux convectifs.

5.3.2 Couplage avec la température de l'air

Comme pour le vent, la modification de la température de l'air à proximité des parois peut être prise en compte de manière plus ou moins détaillée. Dans la plupart des cas, la température d'air considérée est celle mesurée à proximité du bâtiment ou à la station météorologique la plus proche. Or, dans nos travaux, nous cherchons à observer l'effet de l'environnement proche,

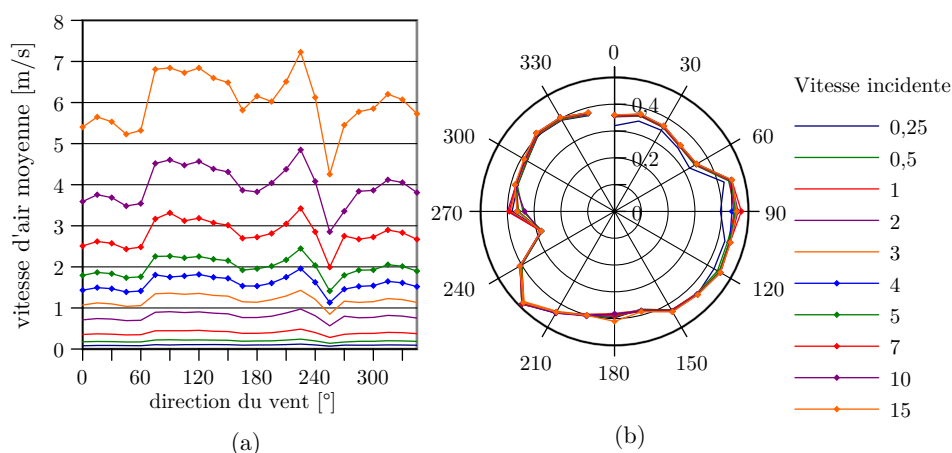


FIGURE 5.8 – Vitesse moyenne sur la surface extérieure du bâtiment d'étude pour les 240 cas simulés : (a) vitesse absolue – (b) vitesse normalisée par rapport à la vitesse incidente

notamment par l'intermédiaire de la modification de la température d'air à l'échelle locale.

Les trois niveaux de représentation étudiés sont les suivants :

T(météo) La température de l'air utilisée est celle relevée par la station météorologique la plus proche. Dans notre cas, il s'agit de la station météorologique de l'ONEVU installée sur le toit de l'immeuble Dunant, qui inclut donc l'effet du quartier sur la température d'air.

T(bilan) La température d'air utilisée est calculée en faisant l'hypothèse d'une température homogène dans un volume de contrôle englobant la zone sur laquelle le calcul radiatif est effectué. Celle-ci dépendra du volume de contrôle choisi, de la vitesse du vent et du flux convectif échangé avec les surfaces urbaines.

T(cfd) La température d'air extérieure utilisée est issue du calcul de mécanique des fluides numérique.

La Figure 5.9 schématise les trois niveaux de représentation des deux paramètres climatiques que sont la vitesse du vent et la température de l'air.

5.3.3 Calcul d'une température d'air équivalente sur une zone de contrôle

La méthode du bilan sur une zone de contrôle a été développée afin d'avoir une représentation intermédiaire de la modification locale de la température de l'air ne nécessitant pas un calcul de mécanique des fluides numérique.

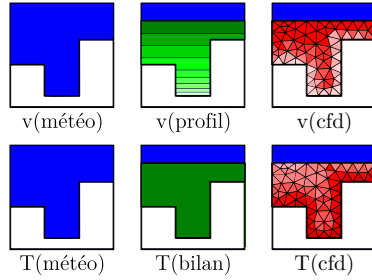


FIGURE 5.9 – Niveaux de représentation des paramètres climatiques extérieurs

Elle consiste à considérer un volume de contrôle dans lequel l'air a une température homogène. Il s'agit ensuite de réaliser un bilan thermique sur la masse d'air de ce volume. L'air entre dans le volume à la température d'air météorologique et ressort à la température équivalente du volume de contrôle. Le bilan thermique sur la masse d'air du volume de contrôle s'écrit :

$$c_a \rho_a V_a \frac{T_{eq,t} - T_{eq,t-1}}{\Delta t} = F_{conv}(T_{eq,t}) + c_a Q_m (T_{meteo} - T_{eq,t}) \quad (5.16)$$

avec

- c_a, ρ_a : capacité thermique ($[J/K/kg]$) et masse volumique de l'air ($[kg/m^3]$),
- V_a : volume d'air de la zone de contrôle ($[m^3]$),
- $T_{eq,t}$: température de l'air dans la zone de contrôle au pas de temps t ($[^\circ C]$),
- F_{conv} : somme des flux convectifs ($[W]$). Elle s'exprime en fonction des températures de surface et de la température d'air équivalente :

$$F_{conv} = \sum_i S_i h_i (T_{se,i} - T_{eq,t}) \quad (5.17)$$

- Q_m : débit massique de l'air dans la zone de contrôle, calculé à partir du profil de vent $v(z)$, de la hauteur (H) et de la largeur (L) de la zone :

$$Q_m = \rho L \int_{z=0}^{z=H} v(z) dz \quad (5.18)$$

Dans ce bilan, le terme prépondérant est le débit massique, qui dépend principalement de la vitesse du vent ainsi que de la section de la zone choisie. Le choix de cette section et notamment de sa hauteur est déterminant et dépend a priori de la stabilité de la couche limite. Elle devrait donc varier au cours d'une journée et en fonction de la vitesse du vent, ce qui n'est pas le cas dans notre modèle.

Dans les simulations réalisées, la hauteur de la veine a été fixée à $16[m]$, soit un mètre au dessus des bâtiments les plus hauts. Cette valeur a été obtenue après plusieurs essais.

5.3.4 Méthodologie de l'analyse de sensibilité

Cas à simuler

On dispose de trois niveaux de représentation de la vitesse du vent et de trois niveaux de représentation de la température d'air, ce qui fait neuf types de couplages possibles. Cependant, dans le cas de l'utilisation de `Code_Saturne` pour les températures d'air extérieur, il ne serait pas cohérent d'utiliser d'autres vitesses de vent que celles utilisées dans le transport de l'air, ce qui explique qu'on peut annuler deux cas : $\{v(\text{météo}); T(\text{cf})\}$ et $\{v(\text{profil}); T(\text{cf})\}$. Il reste sept cas de couplage qui sont indentifiés dans le Tableau 5.3.

	T(météo)	T(bilan)	T(cf)
v(météo)	x	x	-
v(profil)	x	x	-
v(cf)	x	x	x

TABLEAU 5.3 – Modes de couplage traités : un croisement des niveaux de représentation de la vitesse et de la température de l'air

Compte tenu de l'importance du rôle joué par les flux solaires sur les températures de surface et donc la modification de la température d'air locale, le couplage n'aura pas le même impact en hiver et en été, les deux saisons seront donc traitées séparément. De plus, l'isolation du bâtiment peut réduire la sensibilité du bâtiment à la prise en compte des paramètres extérieurs. On traitera donc les cas d'un bâtiment non isolé et d'un bâtiment isolé. Ce qui aboutit à $7 \times 2 \times 2 = 28$ cas à simuler.

Les simulations effectuées permettent d'analyser les résultats en suivant au moins deux axes différents :

- impact de l'estimation des coefficients d'échange convectif sur le couplage,
- impact du mode de couplage avec la température de l'air extérieur.

Il n'est pas forcément pertinent de comparer entre eux des résultats obtenus avec différentes estimations des coefficients d'échange convectif car on ne pourra pas distinguer parmi d'autres effets celui du couplage sur la consommation énergétique. Bien qu'on ait pu constater que la variabilité temporelle et spatiale des CHTC ne jouait pas un rôle important sur les différences

5.3 Sensibilité du modèle thermique de bâtiment au mode couplage

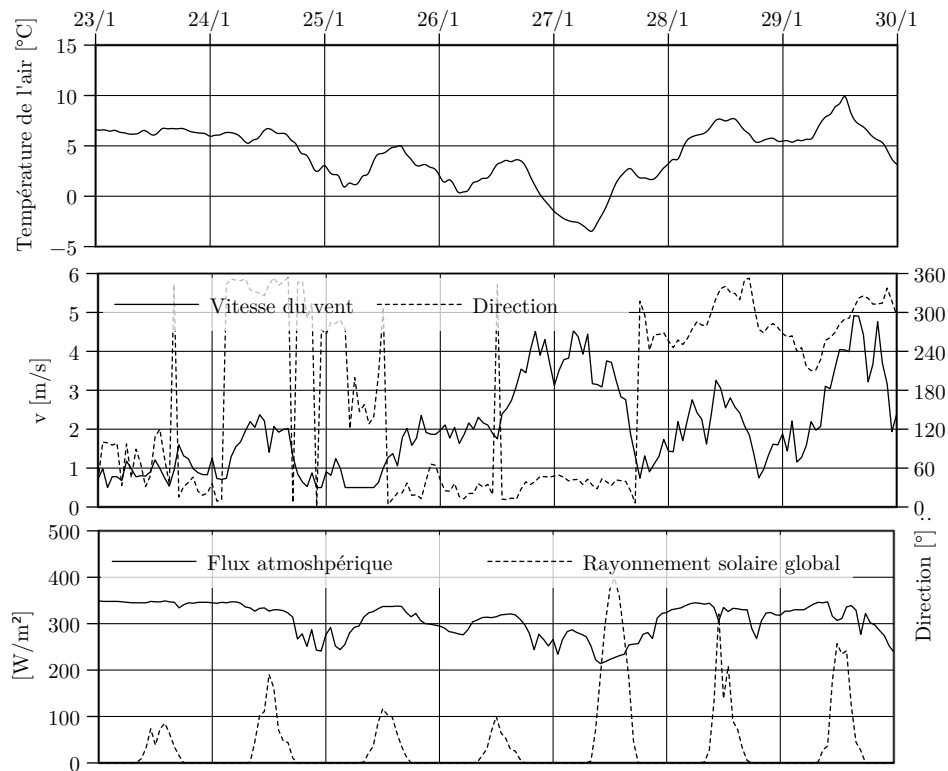


FIGURE 5.10 – Conditions météorologiques du 23 au 30 janvier 2010

dues au mode de couplage, leur valeur moyenne reste cependant déterminante dans le bilan thermique d'un bâtiment.

Périodes de simulation

Les périodes pendant lesquelles les analyses ont été réalisées sont les semaines du 23 au 30 janvier 2010 pour l'hiver et du 23 au 30 août 2010 pour l'été. Elles sont précédées de trois semaines d'initialisation. Les conditions météorologiques pour ces deux périodes sont données sur les Figures 5.10 et 5.11.

Pour la semaine hivernale, l'amplitude thermique journalière est d'environ $5 [^{\circ}C]$. L'amplitude maximale pour la semaine est de $14 [^{\circ}C]$. Les conditions de vent sont très diverses en vitesse et en direction. Pour le besoin des simulations qui ne peuvent pas converger avec une vitesse de vent très faible ou nulle, la vitesse de vent minimale est fixée à $0,5 [m/s]$. Elle atteint $5 [m/s]$ le 30 janvier. La couverture nuageuse est également variable, ce qui apparaît tant sur le flux atmosphérique que sur le rayonnement solaire global.

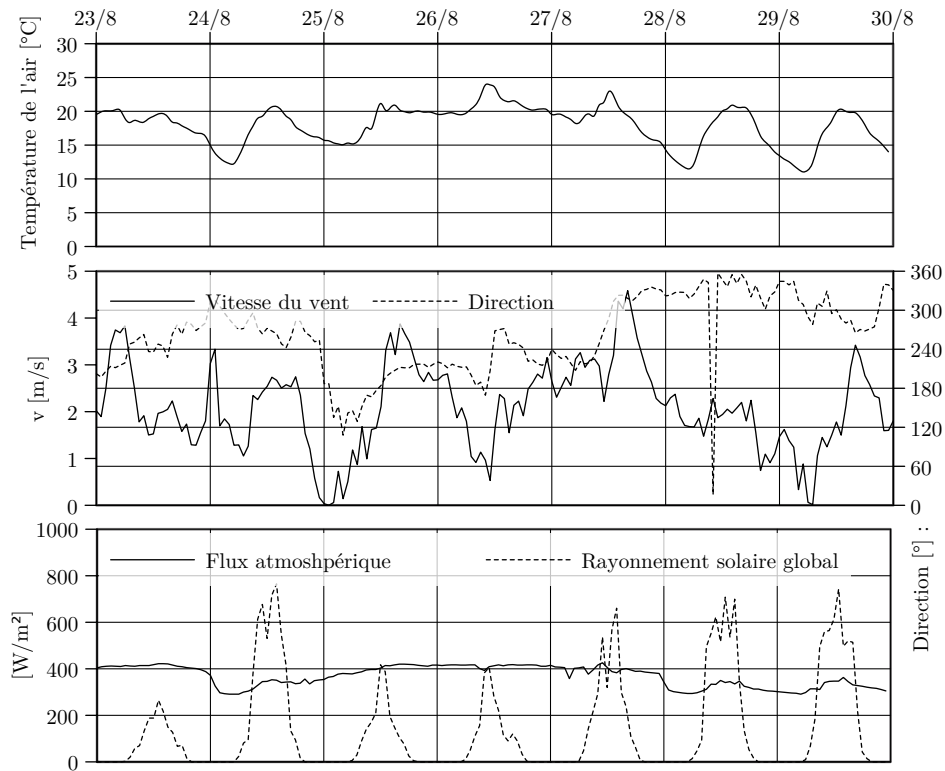


FIGURE 5.11 – Conditions météorologiques du 23 au 30 août 2010

Pour la semaine estivale, l'amplitude thermique journalière est au maximum de $7 [^{\circ}C]$ et l'écart entre la température minimale et la température maximale sur la semaine ne dépasse pas $10 [^{\circ}C]$. Il y a globalement plus de vent et celui-ci est toujours variable en vitesse mais moins en direction. La semaine commence avec une alternance de journées couvertes et ensoleillées et s'achève avec trois jours ensoleillés.

5.4 Résultats

Dans un premier temps, seul un aperçu brut des résultats est donné. Il s'agit des données intégrées sur la dernière semaine de chaque période étudiée. Dans un deuxième temps, les résultats seront présentés de manière à répondre à deux axes d'analyse :

- l'impact du couplage avec T(bilan) en fonction du choix de la méthode de calcul de la vitesse de l'air,
- l'impact de la méthode de couplage avec la même méthode de calcul de la vitesse de l'air : $v(cfd)$.

5.4.1 Résultats bruts

Consommation énergétique en hiver

Les résultats obtenus pour la consommation énergétique du bâtiment durant les deux dernières semaines sont donnés à la Figure 5.12. Les sept modes de couplage sont représentés pour les cas isolés et non isolés. Les puissances instantanées uniquement pour la dernière semaine sont présentées à la Figure 5.13.

Les consommations énergétiques obtenues pour cette période hivernale sont de l'ordre de $10 [kWh/m^2]$ pour le bâtiment non isolé et de $4 [kWh/m^2]$ pour le bâtiment isolé (Figure 5.12). Globalement, la prise en compte du flux convectif dans le calcul de la température d'air autour du bâtiment provoque une augmentation de celle-ci, ce qui se manifeste par une diminution de la consommation énergétique. Elle est faible sans être négligeable dans le cas du bâtiment non isolé, et presque imperceptible dans le cas du bâtiment isolé.

La Figure 5.13 représente l'évolution de la puissance de chauffage pour la dernière semaine de janvier. Les courbes discontinues représentent les cas non couplés, tandis que les couleurs représentent les différents modes de calcul du coefficient d'échange convectif. Les puissances de chauffage varient de $90 [kW]$ à $275 [kW]$ dans le cas non isolé et de $30 [kW]$ à $110 [kW]$ dans le cas isolé. Les écarts les plus importants entre les différents cas de couplage sont de $50 [kW]$ pour le cas isolé et de moins de $10 [kW]$ pour le cas non isolé, ce qui montre également la faible sensibilité du bâtiment isolé aux différents couplages testés. On remarque que l'impact du couplage est le plus faible lorsque les puissances sont les plus importantes, comme la fin de la nuit du 28 janvier où les cas couplés et non couplés sont presque confondus pour une même méthode de calcul des coefficients d'échange convectif. D'une manière plus générale, on peut dire que les consommations instantanées sont plus sensibles à la méthode de calcul des CHTC qu'au mode de couplage.

Température intérieure en été

Pour analyser les résultats sur la période estivale, le choix a été fait d'utiliser la température intérieure calculée en moyenne sur les cinq étages et sur la période étudiée. Les tendances sont en effet les mêmes que pour la température intérieure maximale. Ces grandeurs ont été préférées à des indicateurs de confort, qui ont été utilisés dans un premier temps. En effet, ces derniers rendaient les analyses trop sensibles à certains paramètres non liés aux hypothèses de simulation.

La Figure 5.14 présente la température intérieure moyenne pour les quatorze cas simulés en été. Les résultats sont compris entre $24,8 [^{\circ}C]$ et $26,7 [^{\circ}C]$ dans le cas du bâtiment non isolé soit une différence de $1,9 [^{\circ}C]$. Pour une même méthode de calcul des flux convectifs, l'écart n'est que de $0,7 [^{\circ}C]$ en faisant varier le mode de couplage. Ces amplitudes passent respectivement

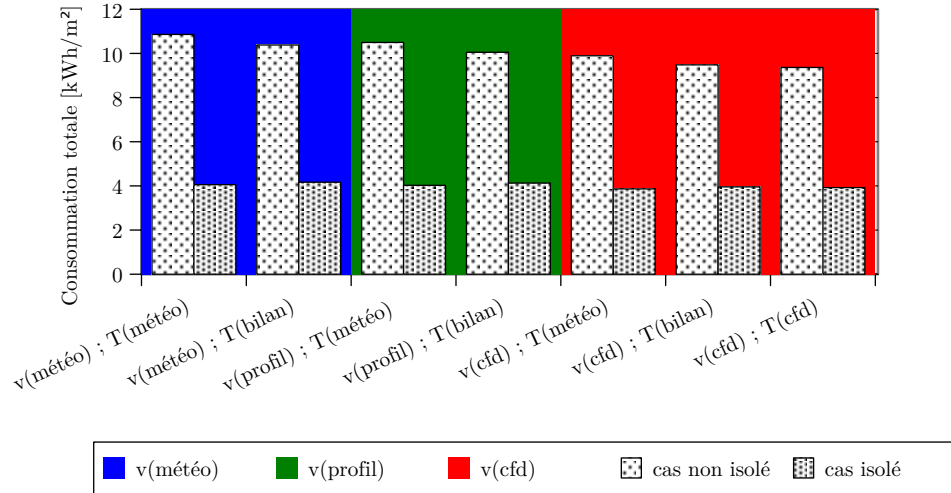


FIGURE 5.12 – Consommations énergétiques surfaciques pour les deux dernières semaines de janvier

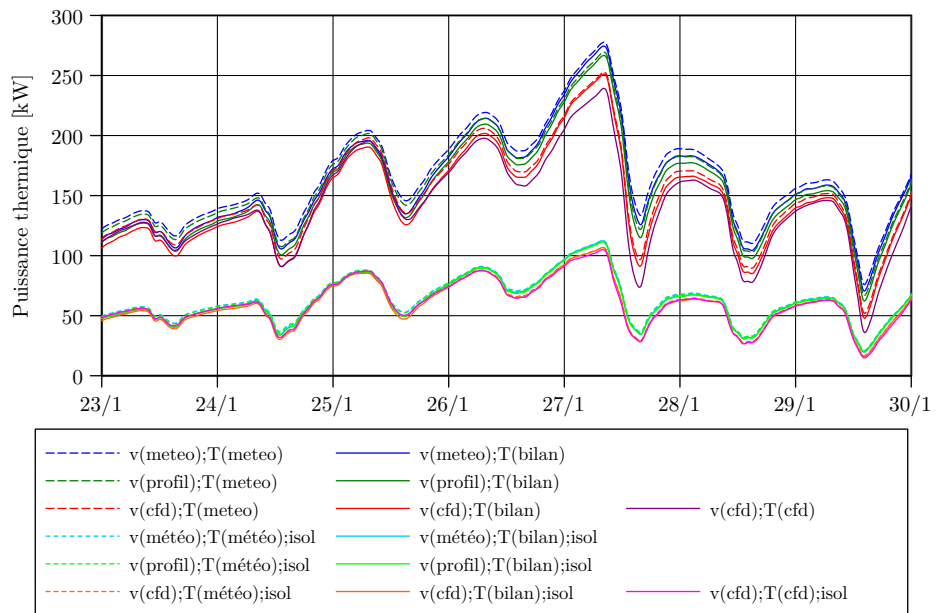


FIGURE 5.13 – Puissance thermique pour les quatorze cas simulés en hiver

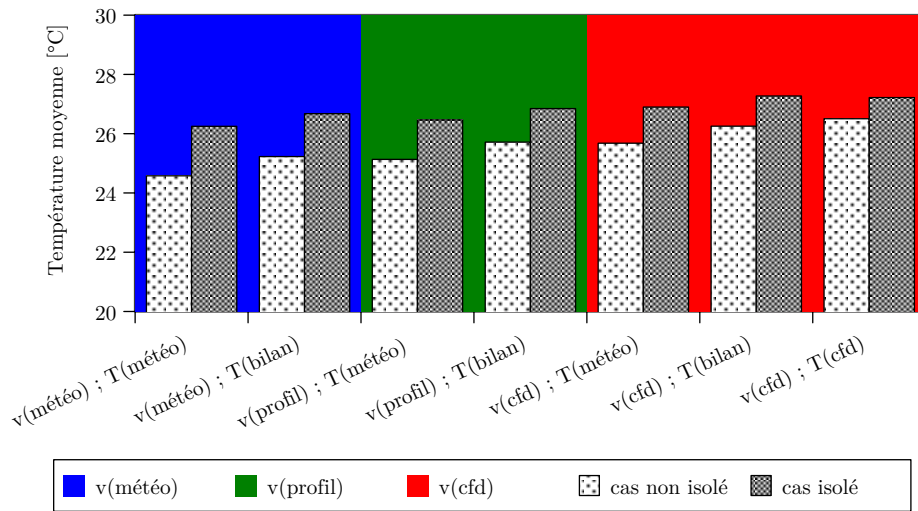


FIGURE 5.14 – Température intérieure moyenne pendant la dernière semaine d’août

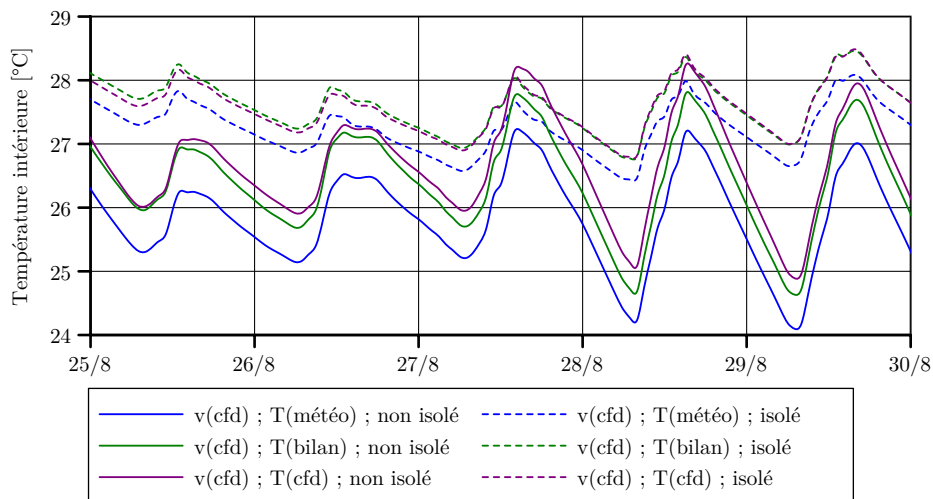


FIGURE 5.15 – Évolution de la température intérieure pour les cas $v(cfd)$

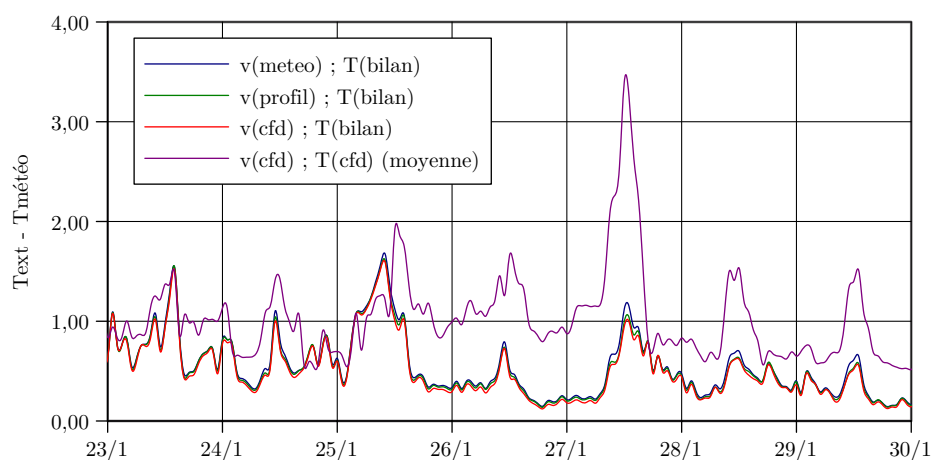


FIGURE 5.16 – Écart entre les températures extérieures utilisées dans le bilan thermique du bâtiment (T_{ext}) et la température météorologique (T_{meteo})

à $0,9 [^{\circ}C]$ et $0,3 [^{\circ}C]$ dans le cas du bâtiment isolé. Comme attendu, le couplage entraîne une augmentation de la température de l'air intérieur en été. La variation est faible dans le cas du bâtiment isolé mais plus perceptible dans le cas du bâtiment non isolé.

La Figure 5.15 présente l'évolution des températures intérieures du 23 au 30 août pour les cas $v(cfd)$. On peut noter que les températures sont plutôt élevées par rapport à la température de l'air extérieur, qui dépasse rarement $20 [^{\circ}C]$ sur cette période. Pour le cas isolé, la température intérieure est systématiquement supérieure à $26 [^{\circ}C]$. Cela est dû à la fois au taux de vitrage important et au faible renouvellement d'air.

5.4.2 Impact de l'utilisation d'une zone de bilan

Dans cette partie, on ne s'intéresse qu'aux cas de couplage avec une zone de bilan, c'est à dire ceux de la deuxième colonne du Tableau 5.3 ainsi qu'à une comparaison de ces cas avec les cas sans couplage (première colonne du Tableau 5.3).

Analyse des températures dans la zone de bilan

Avant même de voir les résultats en termes de consommation énergétique et de température intérieure, l'analyse des températures de bilan obtenues dans la zone de contrôle permet déjà quelques remarques. Les écarts entre la température de bilan et la température météorologique pour les cas $T(bilan)$ et entre la moyenne spatiale des températures extérieures et la température météorologique pour le cas $T(cfd)$ sont représentés sur la Figure 5.16.

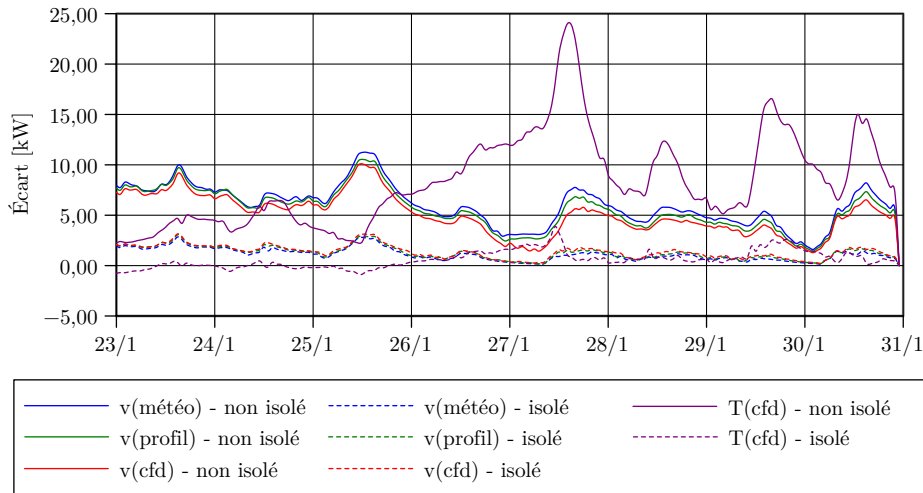


FIGURE 5.17 – Comparaison avec les cas non-couplés : écart entre les puissances obtenues avec et sans prise en compte d'une température de bilan

Les températures de la zone de bilan obtenues sont très proches dans les trois cas $T(bilan)$, alors que les flux convectifs entrant dans la zone de bilan ne sont pas les mêmes. Cela confirme la prédominance du renouvellement de l'air dans le bilan par rapport au terme convectif. Si l'on se réfère aux conditions météorologiques de la période concernée (Figure 5.10), il semble que l'écart entre les températures de bilan et la moyenne des températures extérieures obtenues avec `Code_Saturne` est d'autant plus important que la vitesse du vent est grande.

Consommation énergétique en hiver

Sur la Figure 5.17, il apparaît que la prise en compte de la température de bilan peut avoir un effet important à un instant donné : jusqu'à 10 [kW] soit environ 10% de la puissance totale. Si l'on regarde le bilan sur une semaine (Figure 5.18(a)), l'impact est plus limité puisqu'il ne dépasse pas 3,7% de la consommation énergétique totale dans le cas non isolé et 2% dans le cas isolé. L'impact du choix de la méthode de calcul des flux convectifs sur l'effet de la prise en compte de la modification de la température locale apparaît par contre négligeable : il ne dépasse pas 0,25% (Figure 5.18(a)). Cela confirme les observations précédentes sur les faibles écarts obtenus sur les températures d'air extérieur.

Le choix de la méthode de calcul des flux d'échange convectif a un impact direct important, mais son impact par l'intermédiaire de la modification de la température d'air extérieure est négligeable.

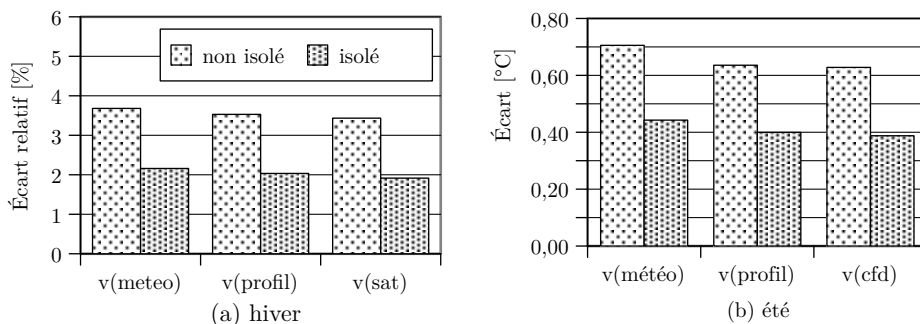


FIGURE 5.18 – Effet de la prise en compte d’une température de bilan : (a) écart relatif entre les consommations énergétiques obtenues avec et sans couplage (cas hiver) — (b) écart entre les températures intérieures moyennes avec ou sans couplage (cas été)

Température intérieure en été

En été, la prise en compte de la température de bilan entraîne une variation de la température intérieure moyenne de $0,7[^\circ C]$ au maximum (Figure 5.15), ce qui n’est pas négligeable sur le confort thermique intérieur, surtout lorsque les températures intérieures sont proches voire dépassent la température d’inconfort, comme c’est le cas pendant cette semaine d’août.

L’impact indirect du choix de la méthode de calcul des flux convectifs sur la température intérieure en été, s’il est légèrement plus sensible dans le cas non isolé, reste négligeable dans les deux cas.

5.4.3 Impact du choix du mode de couplage

Dans cette partie, on ne s’intéresse qu’aux cas utilisant les vitesses de l’air obtenues avec `Code_Saturne` (troisième ligne du Tableau 5.3), l’idée étant de comparer entre eux les résultats obtenus avec les deux différentes méthodes de couplage avec la température de l’air ($T(bilan)$ et $T(cfd)$), notamment par rapport au cas sans couplage ($T(météo)$).

Consommation énergétique en hiver

L’impact de la prise en compte de l’augmentation locale de la température de l’air sur la consommation énergétique atteint 5% dans le cas du couplage avec `Code_Saturne` et un bâtiment non isolé (Figure 5.19). Il ne dépasse pas 2% dans le cas du bâtiment isolé. L’intérêt de l’utilisation de la zone de bilan est discutable : elle semble assez bien reproduire les résultats du couplage complet sur une période d’une semaine, mais ce n’est pas le cas à l’échelle

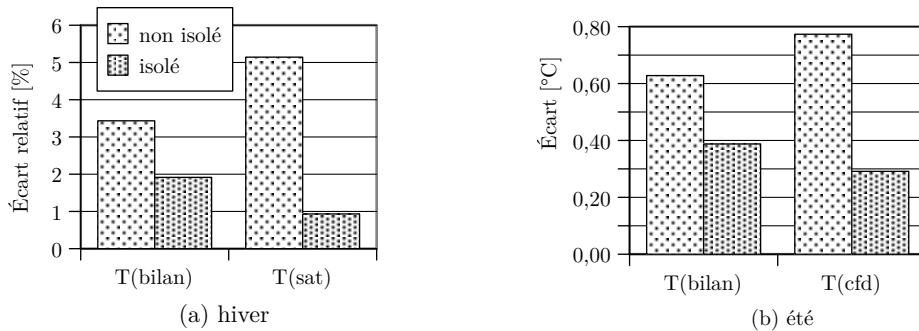


FIGURE 5.19 – Impact du couplage : (a) écart relatif entre les consommations énergétiques obtenues avec et sans couplage (cas hiver) — (b) écart entre les températures intérieures moyennes avec et sans couplage (cas été)

horaire où les écarts peuvent atteindre 30%, notamment dans les périodes fortement ensoleillées (Figure 5.17). L’impact du couplage est bien observable pour le cas non isolé quelle que soit la méthode de couplage. Il reste cependant limité compte tenu des marges d’erreur sur certains paramètres d’entrée dont l’impact sur la consommation énergétique est bien plus importante. Pour le cas du bâtiment isolé, l’écart est presque inexistant que ce soit en valeur moyenne (Figure 5.19) ou instantanée (Figure 5.17).

Température intérieure en été

En été, on remarque sur la Figure 5.15 que la méthode de la température de bilan arrive cette fois à reproduire assez fidèlement le couplage complet avec `Code_Saturne`. L’écart est de 0,6% pour le bâtiment non isolé, soit 0,15[°C] et 0,35% pour le bâtiment isolé (0,1[°C]).

Pour les deux méthodes de couplage considérées, les écarts qui leur sont dus ne dépassent pas 3% en valeur relative, ce qui peut paraître faible. En valeur absolue cependant, les écarts atteignent régulièrement 1 [°C], précisément lorsque la température intérieure est la plus élevée (Figure 5.15). C’est la différence principale avec le cas hivernal : alors qu’en hiver, l’influence du couplage est la plus forte lorsque la consommation énergétique instantanée est la plus faible, en été, elle est importante quand le risque d’inconfort est le plus grand. Par ailleurs, l’écart entre la température intérieure obtenue avec ou sans couplage ne varie pas fortement au cours du temps.

Limites du couplage thermique avec `Code_Saturne`

Qu’il s’agisse du couplage avec zone de bilan ou avec `Code_Saturne`, nous ne disposons pas de données expérimentales permettant la comparaison sur

des variations locales de la température d'air à l'échelle du fragment urbain.

Si les résultats obtenus à l'échelle du bâtiment sont cohérents, dans l'analyse détaillée des simulations réalisées avec `Code_Saturne`, certaines augmentations locales de la température extérieure semblent beaucoup trop importantes pour être réalistes. Cela peut s'expliquer par des effets de confinement dues à des recirculations importantes à proximité de parois ensoleillées. Il nous a semblé possible d'éviter ces phénomènes en prenant en compte l'impact de la convection naturelle sur les mouvements d'air, mais après quelques essais de simulation prenant en compte la variation locale de la densité de l'air, il s'est avéré que les effets dynamiques restaient prédominants et que la convection naturelle n'était pas en mesure de remettre en cause ces effets de confinement. Il s'agit clairement d'une limite du modèle aéraulique dans la prise en compte du réchauffement local de l'air extérieur. Si ces incohérences localisées semblent être compensées à plus grande échelle, on peut néanmoins se poser la question de maintenir un tel niveau de finesse qui fait manifestement apparaître des erreurs locales.

5.5 Conclusion et discussion

Pour les cas traités, certaines hypothèses de calcul favorisent fortement l'influence du microclimat dans le bilan énergétique du bâtiment :

- faible albédo du sol et donc température de surface très élevée,
- pas de prise en compte de l'effet de l'évapotranspiration des arbres sur la température d'air.

Malgré cela, le mode de couplage avec la température extérieure n'a pas un impact important, en particulier en hiver. C'est d'autant moins le cas si on le compare avec l'effet du mode de calcul des flux convectifs ou avec celui du bilan radiatif (voir paragraphe 5.2). Il est également faible par rapport aux marges d'erreur généralement admises pour ces types de simulation.

Le couplage n'est donc pas nécessaire en hiver, même si des simulations sans couplage devront être effectuées pour estimer quantitativement les effets a priori négatifs de l'apport de la végétation sur la consommation énergétique.

En été, le couplage peut être nécessaire dans le cas d'un bâtiment non isolé, qu'il s'agisse d'utiliser la zone de bilan ou bien le couplage complet. Si on utilise les vitesses de l'air calculées avec `Code_Saturne` pour le calcul de la température de bilan, les deux méthodes nécessitent un temps de calcul à peu près équivalent.

Chapitre 6

Application au quartier Pin Sec : étude de l'impact de la densification et de la végétalisation du quartier sur le confort thermique intérieur

Sommaire

6.1	Présentation du cas d'application	180
6.2	Méthodologie	188
6.3	Résultats	195
6.4	Conclusion et discussion	209

L'étude présentée dans ce chapitre ne prétend pas à la généralisation de ses résultats dans un autre cadre que celui traité. Au delà d'éventuelles recommandations à des aménageurs ou à des collectivités locales qu'elle pourrait permettre de formuler, son but est bien de montrer l'intérêt d'utiliser des simulations couplées pour la prise en compte de la végétation en ville et de ses effets directs et indirects sur la consommation énergétique des bâtiments. Il s'agit de vérifier la possibilité d'utiliser le modèle dans une étude à l'échelle du quartier, de continuer à développer des connaissances sur son fonctionnement et de proposer une méthodologie d'application à un cas d'étude particulier.

Les impacts du microclimat sur le comportement thermique des bâtiments sont fortement multifactoriels. Parmi les nombreux facteurs en jeu, ceux qui sont les plus sensibles ne sont pas forcément liés à la végétalisa-

tion du bâtiment, comme par exemple la morphologie urbaine et le contexte climatique. Ils doivent tout de même être pris en compte dans la méthodologie et dans les analyses permettant d’expliciter ces impacts car ils peuvent interagir avec les effets de la végétalisation. De plus, le comportement thermique du bâtiment, qui constitue le “capteur” énergétique de l’ambiance urbaine, est également extrêmement sensible à certains de ses paramètres intrinsèques, comme le taux de vitrage ou l’isolation thermique. Il a donc fallu faire le choix d’un cas d’étude particulier afin d’isoler le paramètre dont nous souhaitons évaluer l’influence : la végétalisation des surfaces.

Le cas d’étude du Pin Sec, son environnement urbain et végétal ainsi que le scénario de densification proposé sont présentés dans la première partie de ce chapitre. La seconde partie détaille la méthode utilisée pour évaluer le confort thermique à l’intérieur du bâtiment d’étude et les différents scénarios de végétalisation des surfaces qui ont été pris en compte. La troisième partie est une étude des effets directs et indirects de la végétation à travers une analyse des résultats de simulation obtenus concernant l’évolution des températures et de la qualité du confort thermique à l’intérieur du bâtiment et des bilans thermiques à la surface extérieure des parois.

6.1 Présentation du cas d’application

6.1.1 Le quartier Pin Sec

Histoire du quartier Pin Sec

Jusque dans les années 50, le site du quartier Pin Sec est une zone de maraîchage et de grands domaines accolée au quartier résidentiel de la Pilotière. Les premières barres du “Vieux Pin Sec” sortent de terre à partir de 1954. Il est alors constitué de huit immeubles de trois à quatre étages ainsi que de sept maisons mitoyennes. Des nouveaux bâtiments seront construits jusqu’au début des années 60 formant le “Nouveau Pin Sec”, parmi

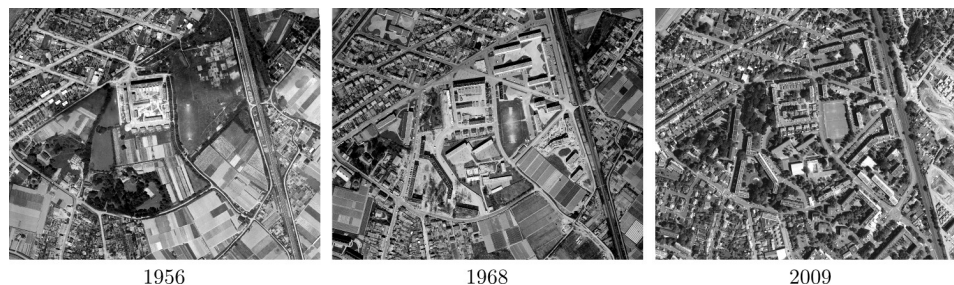


FIGURE 6.1 – Orthophotographies du Pin Sec en 1956, 1968 et 2009 (sources : ©IGN/Géoportail)

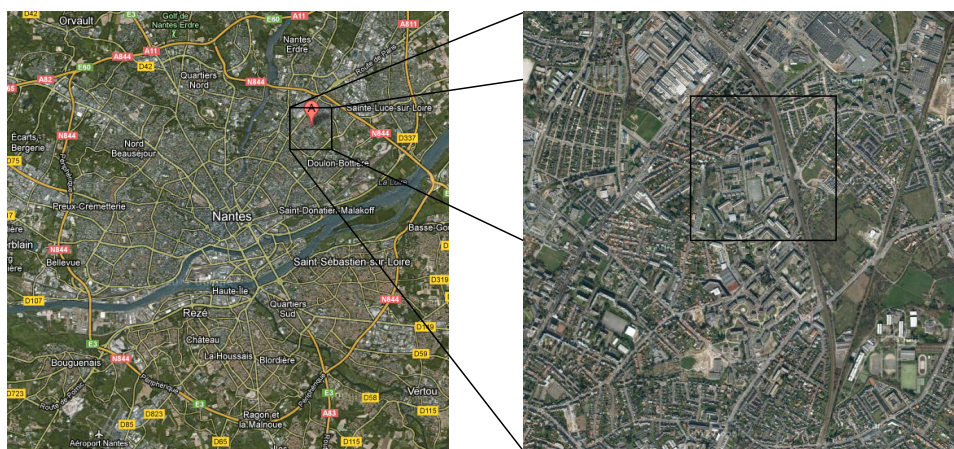


FIGURE 6.2 – Situation géographique du quartier Pin Sec (images ©CNES/SPOT cartographie ©Google)

lesquels notre bâtiment d'étude. D'autres programmes interviendront ensuite au début des années 70. Ces évolutions apparaissent dans les photos aériennes effectuées en 1956, 1968 et 2009 présentées à la Figure 6.1.

À l'image de nombreux projets équivalents de cette époque d'après guerre, l'objectif de ce nouveau quartier était le relogement des habitants de l'ancien quartier du Marchix, déjà jugé insalubre avant la guerre et durement touché par les bombardements, dont l'emplacement en centre ville a été choisi pour accueillir notamment un pôle administratif autour de l'actuelle place Viarme. Les modes constructifs pour ces bâtiments sont donc proches des standards des Trente glorieuses, avant l'apparition de la première réglementation thermique.

Situation actuelle

Le Pin Sec est situé dans le quartier "Doulon Bottière", au nord-est de l'agglomération nantaise (Figure 6.2). Il se trouve à proximité du périphérique et de la route de Paris. Il est desservi par l'arrêt de tramway "Pin Sec" et se trouve proche du pôle d'échange multimodal de la Haluchère, où vont se trouver la future jonction des lignes 1 et 2 du tramway et un arrêt du tram-train Nantes-Chateaubriant.

S'il n'est pas directement touché par le renouvellement urbain, le quartier du Pin Sec est dans une zone en forte mutation où se côtoient plusieurs grands projets, parmi lesquels la réhabilitation du quartier de la Bottière et la création de nouvelles extensions urbaines : la Zac Bottière-Chenaie actuellement en construction et la Zac des Gohards, en projet (Figure 6.3).

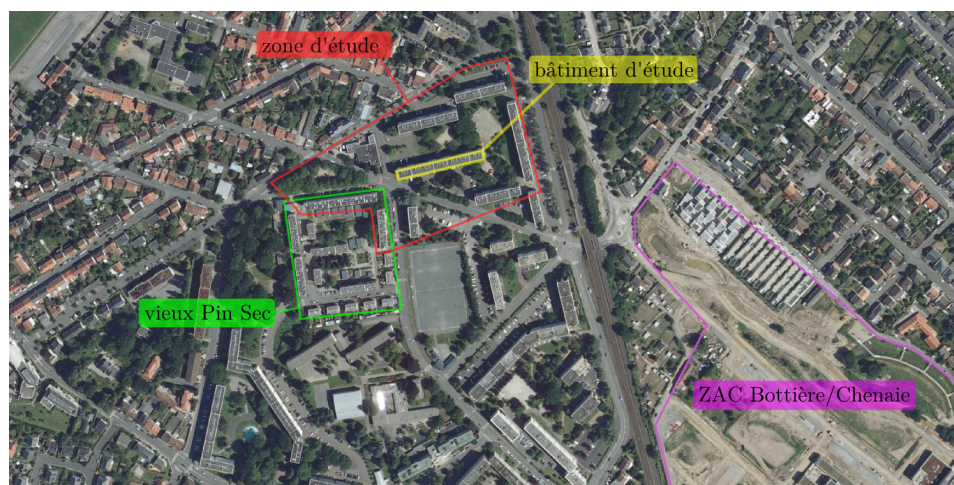


FIGURE 6.3 – Orthophotographie du quartier Pin Sec (images Géoportail ©IGN)

Le projet de la Zac Bottière-Chenaie mérite qu'on s'y arrête. Il s'agit d'un écoquartier dont l'un des objectifs est d'atteindre une densité bâtie relativement importante, ainsi que la mise en œuvre de techniques alternatives pour la gestion des eaux pluviales (Figure 6.4). Il est à ce titre le lieu de plusieurs expérimentations par l'atelier pluridisciplinaire de l'IRSTV.

De par sa situation péri-urbaine en bordure de l'agglomération nantaise et de celle de Sainte-Luce-Sur-Loire, le quartier Doulon-Bottière est l'un des rares quartiers à comporter encore quelques zones agricoles, notamment en contact direct avec le quartier du Pin Sec, de l'autre côté de la ligne de tramway.

Un environnement très végétal

Le quartier du Pin Sec bénéficie d'un environnement très végétal pour sa situation urbaine. Il comporte une parcelle densément arborée avec des spécimens assez hauts à l'ouest du Vieux Pin Sec. Il y a quelques mois, il était encore bordé de parcelles agricoles ou maraîchères, où se développe aujourd'hui le quartier Bottière/Chenaie et son mail. Il compte également un certain nombre d'arbres remarquables qui lui ont valu la création d'un circuit "nature" par le SEVE (Figure 6.5). Outre la parcelle arborée, la végétation est omniprésente au cœur de l'îlot du Vieux Pin Sec, ainsi que dans le parc entourant l'immeuble Dunant.

6.1 Présentation du cas d'application



FIGURE 6.4 – Logements individuels groupés dans le quartier Bottière/Chénaie

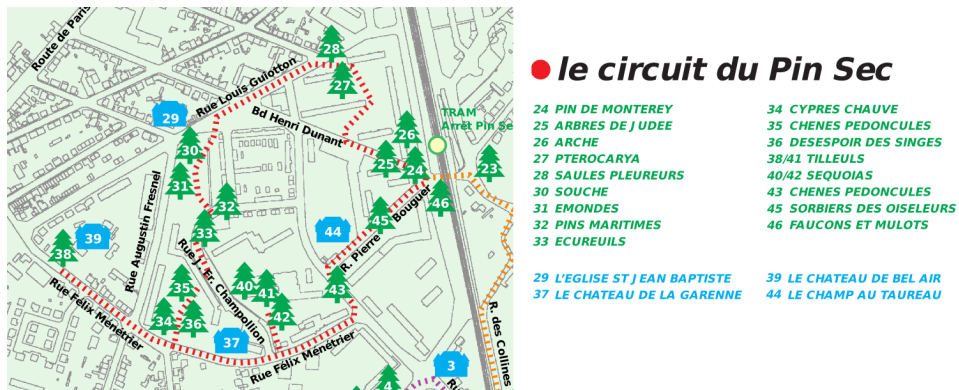


FIGURE 6.5 – Circuit vert du Pin Sec (source : SEVE)



FIGURE 6.6 – Bâtiment Dunant : (a) façade sud – (b) façade nord

6.1.2 Bâtiment d'étude

Le bâtiment d'étude est l'immeuble Dunant sur lequel sont effectuées les mesures climatiques en continu (Figure 6.6). C'est donc le même que celui utilisé pour la validation du modèle de toit et il est du même type que celui utilisé pour la validation du modèle de mur (chapitre 3). C'est également sur ce bâtiment qu'a été réalisée l'analyse du couplage présentée dans le chapitre 5.

Il est orienté nord-sud, avec la façade sud légèrement tournée vers l'est. Ses dimensions sont imposantes puisqu'il fait à peu près 100 [m] de long sur 10 [m] de large, pour une hauteur de 15 [m]. Il comprend environ 120 logements à raison de quatre par étage et par palier, répartis sur six paliers. Ses façades pignons ont été isolées par l'extérieur lors d'une réhabilitation, ce qui n'est pas le cas des autres façades. Les fenêtres sont en double-vitrage à menuiseries en PVC. Nous avons estimé le taux de vitrage du bâtiment à 17% de la surface des façades.

Il est dans un environnement particulièrement dégagé puisqu'il est entouré de parkings et d'un parc. La végétation est omniprésente, qu'il s'agisse de la pelouse du parc, de certains arbres remarquables de ce parc et du boulevard Dunant, ainsi que des arbres d'alignement aux dimensions plus modestes.

6.1.3 Scénario de densification

Le cas du quartier Pin Sec a été choisi en premier lieu pour les coopérations et les comparaisons rendues possibles par son statut de site expérimental de l'ONEVU. Il constitue également un cas représentatif d'un tissu péri-urbain résidentiel, mêlant maisons individuelles et grands immeubles de logements collectifs. Généralement peu denses, ces quartiers sont aussi des réserves foncières potentielles. Afin de limiter l'étalement urbain, il peut être appelé à se densifier, comme c'est le cas d'autres quartiers de Nantes dont la localisation est pour l'instant plus privilégiée.

À ce propos, il convient de noter que pour le moment, aucun projet n'est prévu pour ce quartier. Les scénarios envisagés ne s'appuient donc sur aucun programme défini par des autorités compétentes mais uniquement sur les compétences urbanistiques modestes de ses auteurs. Ils sont néanmoins inspirés des tendances actuelles en matière d'urbanisation et de densification, à l'image du Grand Projet de Ville (GPV) du quartier de Malakoff Centre (Figure 6.7). Dans ce programme, la volonté des aménageurs se définit de la manière suivante [NMA, 2011] :

- désenclaver géographiquement et socialement le quartier,
- valoriser les potentialités foncières du site avec un projet global de renouvellement urbain.

6.1 Présentation du cas d'application



FIGURE 6.7 – Plan directeur du GPV Malakoff Centre (date : 07/2012, source : Nantes Métropole Aménagement)

Pour ce faire, il s'appuie sur la construction de nouveaux bâtiments, parmi lesquels :

- la création d'un pôle commercial et de services de $3500[m^2]$ SHON,
- la création de près de $14000[m^2]$ SHON de bureaux,
- la construction de près de 150 logements, soit $11500[m^2]$ SHON,
- la création de plusieurs équipements publics, dont une maison de quartier et une mairie annexe.

Densification intensive : création d'îlots urbains

Le scénario de densification choisi correspond à une urbanisation assez importante puisque la proportion de surface bâtie par rapport à la surface totale de la scène passe de 20% à 35%. Cette nouvelle densité correspond à une valeur couramment rencontrée dans les projets urbains actuels. Le nouveau plan masse consiste en îlots de quatre étages alignés sur les rues entourant le bâtiment d'étude (au nord et à l'ouest) et ainsi qu'en une nouvelle barre au

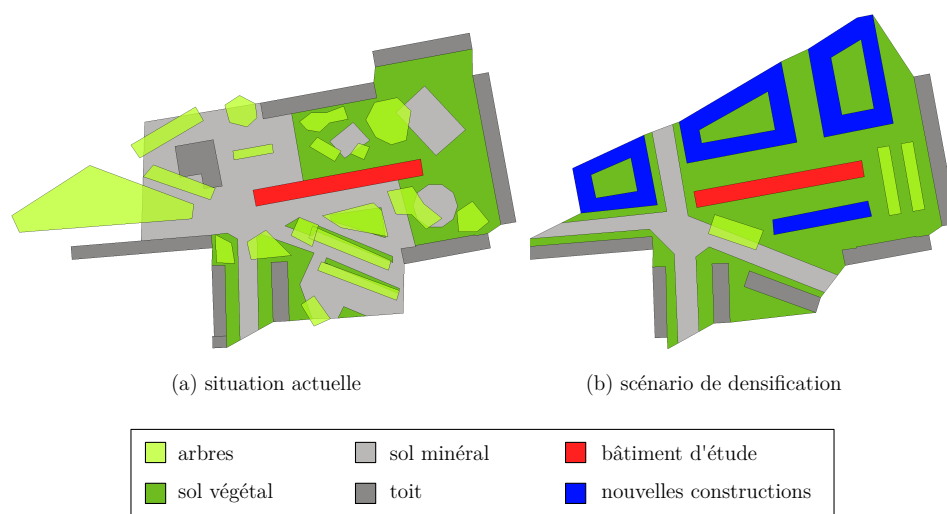


FIGURE 6.8 – Plans masses du quartier Pin Sec : (a) situation actuelle – (b) scénario de densification

sud (Figure 6.8). Les îlots alignés sur la rue, souvent ouverts, sont une tendance largement observable dans les nouveaux quartiers de l'agglomération nantaise.

6.1.4 Scénario de végétalisation

Dans le cadre du projet VegDUD, des réflexions ont été menées sur le choix des scénarios de végétalisation à appliquer ainsi que sur les paramètres à étudier [Anquetil, 2011]. Elles ont conduit à la définition de cinq familles de dispositifs végétaux :

- végétalisation enveloppant les bâtiments : toitures et façades végétales,
- techniques alternatives de gestion des eaux pluviales utilisant le végétal,
- surfaces enherbées contre surfaces sans couvert végétal,
- végétation de pleine terre contre végétation hors sol,
- arbres.

Ces dispositifs doivent être étudiés par rapport à deux familles de paramètres :

- les modes de gestion du couvert végétal : extensive, intensive, superposition de strates,
- les paramètres morphologiques : relation entre la forme urbaine et la forme végétale, taille et répartition des espaces verts.

Dans VegDUD, l'objectif est d'évaluer l'impact de ces dispositifs et de ces paramètres sur cinq des fonctions de la végétation :

- climat urbain,
- bilan carbone,
- hydrologie,
- énergétique,
- ambiances.

Dispositifs

À l'échelle du bâtiment ou du fragment urbain, **Solene-microclimat** est à même de traiter quatre des familles de dispositifs, avec des applications plus ou moins pertinentes au climat urbain et à l'énergétique du bâtiment.

Grâce aux derniers développements présentés dans le chapitre 4, les enveloppes végétales sont représentées. Les sols végétaux avaient déjà été intégrés par Bouyer [2009], mais le modèle de sol végétal a également été mis au niveau de celui des enveloppes de bâtiment. Ces modèles de surface offrent la possibilité de comparer des configurations avec des surfaces enherbées ou pas. On peut choisir de les connecter ou non à un modèle thermique de sol. Si le bilan hydrique de sol n'est pas réalisé a priori, on peut prendre en compte différents comportements hydriques par l'intermédiaire du taux d'évapotranspiration et d'un bilan hydrique simplifié. Il est donc possible de traiter le cas de la végétation de pleine-terre ou hors sol.

Les arbres sont également pris en compte dans le modèle, notamment leurs effets radiatifs, hydriques et aérauliques. Ainsi, le cas des arbres d'alignement peut également être traité.

Paramètres

De par la paramétrisation choisie pour la végétation, nous sommes en mesure de prendre en compte les paramètres de gestion de la végétation, notamment par l'intermédiaire du comportement hydrique du substrat ainsi que de la densité foliaire.

Les paramètres morphologiques sont de plusieurs ordres. Il peut s'agir du lien entre le type de végétation et la forme urbaine mais également de la répartition de la végétation en ville et le fait qu'elle soit diffuse (trames vertes, enveloppes végétales...) ou concentrée (parc).

Grâce à une représentation explicite de la géométrie urbaine, les paramètres morphologiques à petite échelle peuvent être étudiés en détails, en particulier les effets respectifs des toitures et des façades végétales en fonction de leur répartition sur les façades d'une scène urbaine ou dans une rue

canyon. Concernant les effets à plus grande échelle, *Solene-microclimat* n'est sans doute pas le modèle le plus adapté, bien qu'il puisse donner des informations d'entrée intéressantes pour les modèles à plus grande échelle.

Choix des dispositifs et des paramètres

Bien que de nombreux scénarios en lien avec les objectifs de VegDUD peuvent être représentés, seules des comparaisons entre les effets des différents types d'enveloppes végétales et du sol sont considérées dans cette application. La présence des arbres est bien prise en compte mais elle ne change pas entre les scénarios étudiés.

Un des objectifs initiaux qui était de comparer l'impact de différents types de façades en fonction de leur type de gestion (intensif ou extensif) n'a pu être réalisé faute de temps. Toutes les façades utilisées sont donc des murs vivants comportant un substrat irrigué, qui sont a priori les plus efficaces concernant le climat urbain. L'effet d'un éventuel stress hydrique n'est pas pris en compte. Les résultats seront néanmoins analysés du point de vue de la consommation d'eau d'irrigation.

Les hypothèses sur la végétation sont les suivantes :

- densité foliaire : $LAI = 2$,
- épaisseur : $L = 0,2 [m]$
- coefficient d'extinction : $k_s = 0.8$
- transmittivité : $\tau_f = 0,2$
- irrigation égale à l' ETP_c .

Le but étant d'isoler l'effet de la végétation, on ne considère pas les effets d'isolation ou d'inertie thermique du substrat. Seuls les effets de masque solaire et d'évapotranspiration des plantes ne peuvent pas être remplacés par un changement de matériaux pour les parois. Cela signifie que l'on compare des bâtiments avec une façade végétale comportant un substrat avec des bâtiments dont les parois ont des caractéristiques thermiques équivalentes.

De même pour l'albédo, dont les valeurs ont été fixées à 0,2 pour les façades et à 0,3 pour les toits, on considère que les surfaces minérales sont recouvertes d'une peinture ayant la même réflectivité que la végétation. Le spectre de valeurs envisageable est effectivement plus large pour les peintures que pour la végétation.

6.2 Méthodologie

L'idée de départ de ce cas d'application était de croiser trois analyses :

- observer dans un premier temps l'impact de la densification sur le microclimat,

- tester différentes configurations végétales, éventuellement différents dispositifs, permettant d’atténuer l’effet de cette densification,
- appliquer à différents types de bâtiments : impact sur un immeuble de logements existant, non isolé et non climatisé et sur un immeuble de bureaux neuf, climatisé et bien isolé.

Par contrainte de temps et de moyens de calcul, il a fallu se limiter à l’axe en lien avec le cœur de notre problématique : l’étude de l’impact de la configuration végétale. Des simulations ont bien été réalisées sur la morphologie actuelle et sur le cas densifié, mais des changements dans la maquette numérique ainsi que dans des hypothèses de calcul n’ont pas permis de réaliser une comparaison sérieuse. Au niveau du type de bâtiment, le cas de l’isolation thermique a bien été pris en compte, mais il s’agit du même bâtiment d’habitation, sans climatisation.

Si la priorité a finalement été donnée à l’étude du mode de couplage et à la validation du modèle, les objectifs d’application, qui n’ont tous pas pu être réalisés, ont largement influencé la démarche adoptée pour la modélisation.

Ils seront par ailleurs traités dans VegDUD, l’objectif de la thèse étant essentiellement de fournir les outils et méthodes le permettant. Nous allons donc au bout de la démarche en vérifiant que cela est possible.

L’objectif de départ était également de concentrer l’étude de l’impact de la végétation sur les consommations énergétiques. Par souci de cohérence avec le cas présenté et toujours en raison de contraintes de temps, nous avons finalement choisi comme indicateur la qualité du confort thermique intérieur en période estivale.

6.2.1 Prise en compte du confort adaptatif

La température de l’air et la température radiante moyenne ne permettent pas à elles seules d’estimer la qualité du confort thermique. D’autres critères d’ambiance interviennent comme la vitesse et l’humidité de l’air, mais également des aspects physiologiques et psychologiques. Les limites de confort pour les températures doivent notamment être adaptées à la saison et donc aux évolutions de la température extérieure auxquelles le corps a été soumis. Le confort adaptatif suppose que le bâtiment est non climatisé en été.

L’approche du confort adaptatif consiste à prendre en compte la température extérieure et son historique pour définir des critères de confort sur la température intérieure. Une méthode d’application est présentée dans la norme NF-EN 15251 [AFNOR, 2007]. Celle-ci définit quatre classes de confort :

I Niveau élevé attendu qui est recommandé pour les espaces occupés par des personnes très sensibles et fragiles avec des exigences spécifiques

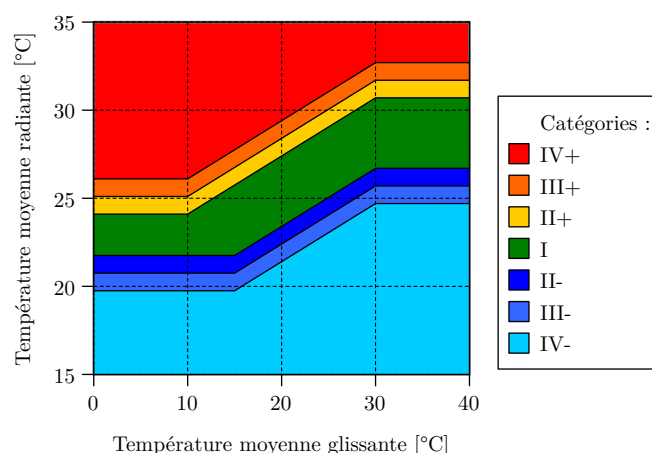


FIGURE 6.9 – Limites des catégories de confort en fonction de la température extérieure en moyenne glissante journalière

comme des personnes handicapées, malades, de très jeunes enfants et des personnes âgées.

- II** Niveau normal attendu qu'il convient d'utiliser pour les bâtiments neufs et les rénovations.
- III** Niveau modéré acceptable attendu qui peut être utilisé dans les bâtiments existants.
- IV** Valeurs en dehors des critères des catégories ci-dessus. Il convient que cette catégorie soit acceptée seulement pour une partie restreinte de l'année.

En faisant l'hypothèse d'une humidité relative de 50% et d'une faible vitesse de l'air, ces classes ne sont définies qu'à partir de limites hautes et basses de températures intérieures. Ces limites sont cependant calculées en fonction d'une valeur de température prenant en compte l'évolution de la température extérieure au cours des jours précédents : la température extérieure en moyenne glissante journalière pondérée exponentiellement, notée $\theta_{m,i}$. Celle-ci est exprimée en fonction de celle de la veille ($\theta_{m,i-1}$), de la température extérieure moyenne de la veille ($\theta_{e,i-1}$) et d'un coefficient α , dont la valeur recommandée par la norme est de 0,8 :

$$\theta_{m,i} = (1 - \alpha)\theta_{e,i-1} + \alpha\theta_{m,i-1} \quad (6.1)$$

Les limites des différentes catégories de confort recommandées par la norme pour un bâtiment d'habitation sont exprimées dans les équations (6.2) à (6.7) et représentées à la Figure 6.9 en fonction de la température extérieure en moyenne glissante.

$$\theta_{I,max} = 0,33\theta_m + 18,8 + 2 \quad (6.2)$$

$$\theta_{I,min} = 0,33\theta_m + 18,8 - 2 \quad (6.3)$$

$$\theta_{II,max} = 0,33\theta_m + 18,8 + 3 \quad (6.4)$$

$$\theta_{II,min} = 0,33\theta_m + 18,8 - 3 \quad (6.5)$$

$$\theta_{III,max} = 0,33\theta_m + 18,8 + 4 \quad (6.6)$$

$$\theta_{III,min} = 0,33\theta_m + 18,8 - 4 \quad (6.7)$$

6.2.2 Période de simulation

Nous avons décidé de nous intéresser à la semaine la plus chaude dont nous disposons. Parmi les données météorologiques acquises dans le quartier Pin Sec, il s'agit de la semaine du 25 juin au 2 juillet 2010. Les conditions météorologiques mesurées sur le toit de l'immeuble Dunant durant cette période sont données à la Figure 6.10. La température d'air extérieure atteint 30 [$^{\circ}C$] avec un minimum de 15 [$^{\circ}C$]. La vitesse du vent est assez variable mais reste modérée puisqu'elle ne dépasse pas 3 [m/s]. Quelques jours après le solstice d'été, les flux solaires horizontaux sont proches du maximum annuel avec presque 1000 [W/m^2] l'après-midi du 26 juin. On remarque le passage d'épisodes nuageux les 27 et 28 juin ainsi que le 1er juillet, qui se manifestent notamment par une augmentation du flux thermique infrarouge en provenance de la voûte céleste. En dehors de ces épisodes, le flux infrarouge varie entre 320 et 400 [W/m^2].

La semaine en question n'est pas aussi chaude qu'on aurait pu le souhaiter pour estimer la qualité du confort thermique estival, en particulier en se fixant comme objectif d'anticiper le réchauffement climatique. Différentes estimations prévoient en effet que des étés qui sont aujourd'hui exceptionnels, comme celui de la canicule de 2003, devraient devenir la norme d'ici à 2050. Afin de préparer la nécessaire adaptation des villes au réchauffement climatique, il est ainsi conseillé d'utiliser les données météorologiques de cet épisode particulier. Les applications des volets d'évaluation du projet ANR VegDUD devraient quant à elles se placer dans ce cadre.

La période traitée est néanmoins propice à l'apparition de stress thermique à l'intérieur du bâtiment car en plus d'être la semaine la plus chaude de l'année, elle succède à une période assez fraîche pour la saison. Ainsi, en vertu de l'application du principe du confort adaptatif, les températures en moyenne glissante journalière vont être relativement faibles. C'est ce qui est représenté sur la Figure 6.11 où l'on voit que les températures utilisées pour estimer le confort intérieur sont jusqu'à 6 [$^{\circ}C$] inférieures à la moyenne journalière pour la journée du 26 juin.

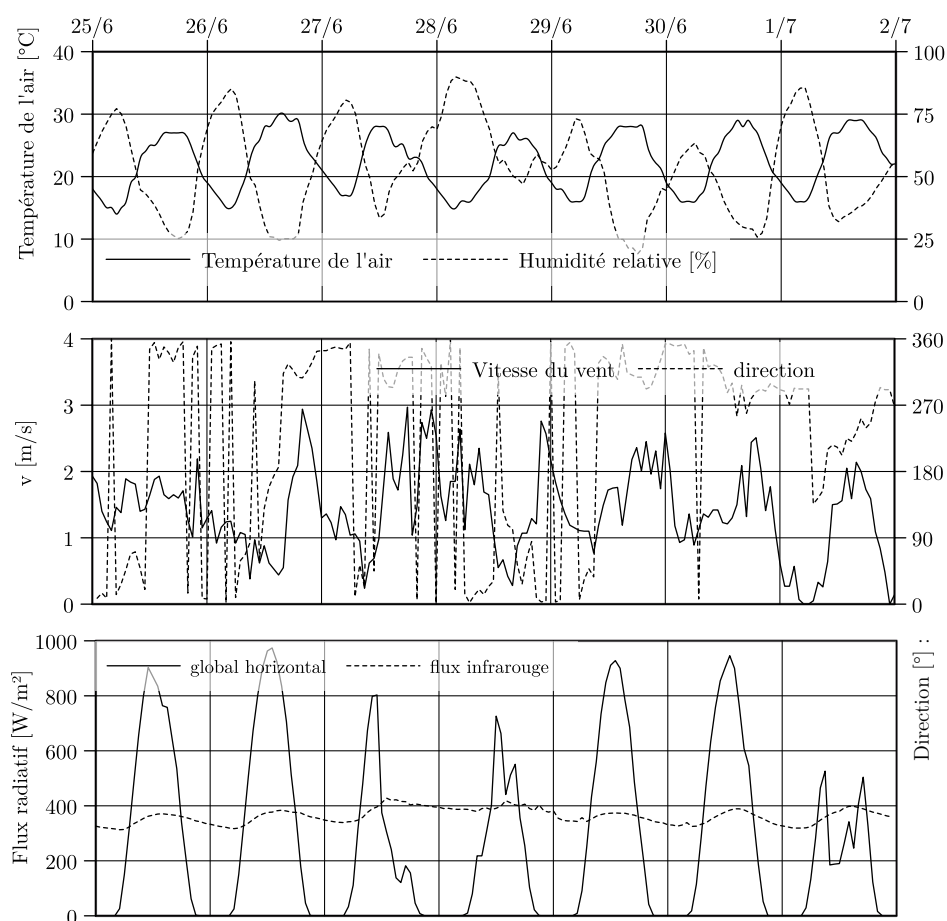


FIGURE 6.10 – Conditions météorologiques mesurées sur le toit de l'immeuble Dunant du 25 mai au 2 juillet 2010

6.2.3 Choix des configurations végétales

Le choix des configurations végétales se confronte à deux objectifs :

- séparer l'effet direct et indirect des enveloppes végétales,
- comparer les intérêts respectifs des façades et des toitures, notamment par rapport à un sol végétal.

Il y a donc cinq types de surface qui peuvent être végétalisées :

- les façades du bâtiment d'étude,
- le toit du bâtiment d'étude,
- les façades de la scène urbaine,
- les toits de la scène urbaine,
- le sol de la scène urbaine.

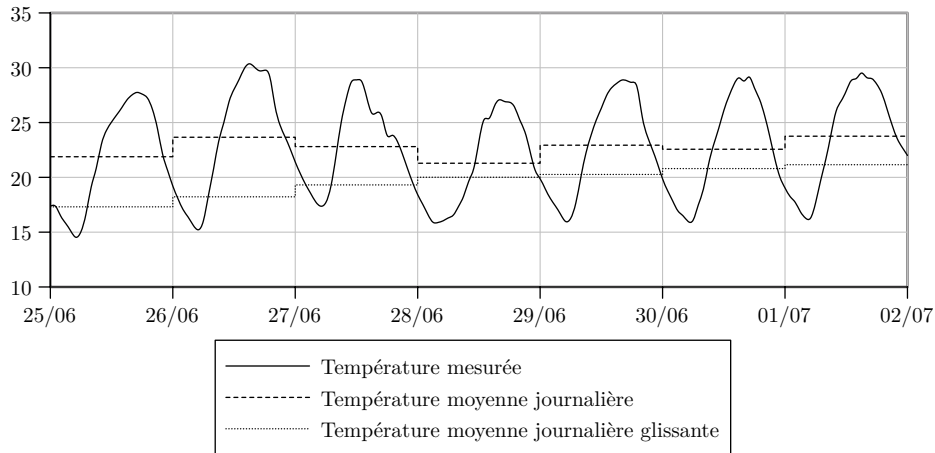


FIGURE 6.11 – Évolutions de la température mesurée, de la température moyenne journalière et de la température moyenne journalière en moyenne glissante

À elles seules, la totalité des combinaisons possibles pour un seul niveau de végétalisation s'élève à $2^5 = 32$ configurations végétales à traiter, ce qui n'est pas envisageable.

Les différents types de surface dont on peut faire varier les paramètres thermiques et la classe (végétalisée ou non végétalisée) sont représentés à la Figure 6.12 et les cas extrêmes sont représentés sur la Figure 6.13. Le Tableau 6.1 présente les cas qui ont été traités. Ils sont finalement au nombre de treize que l'on peut classer de la manière suivante :

- le cas de référence (0), sans végétation,
- les cas (1) (2) et (3) mettant en jeu uniquement les effets directs, c'est-

numéro effet :	0 0 ⁺ ref	1 2 3 3 ⁺ direct	4 4 ⁺ 5 6 7 indirect	8 8 ⁺ direct+indirect
<i>végétalisation du bâtiment</i>				
façades		x x x		x x
toiture		x x x		x x
<i>végétalisation de la scène</i>				
façades			x x x	x x
toitures			x	
sols			x x	
<i>(+ avec isolation thermique)</i>				
	x	x	x	x

TABLEAU 6.1 – Liste des cas traités

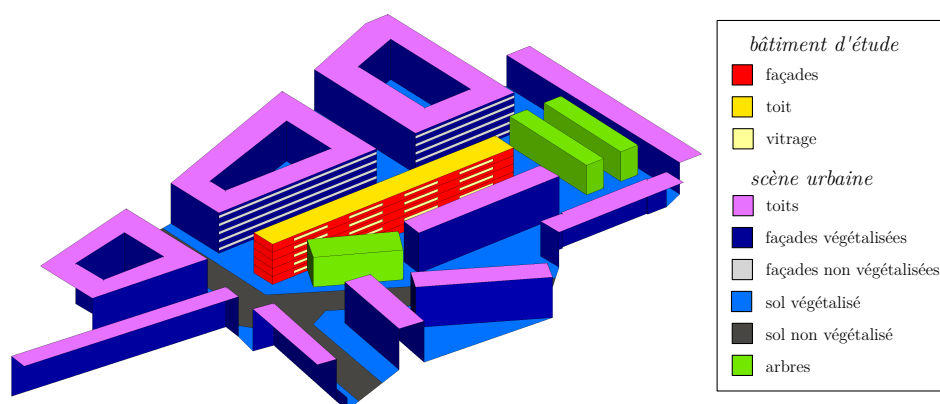


FIGURE 6.12 – Quartier Pin Sec densifié : repérage des classes de surface

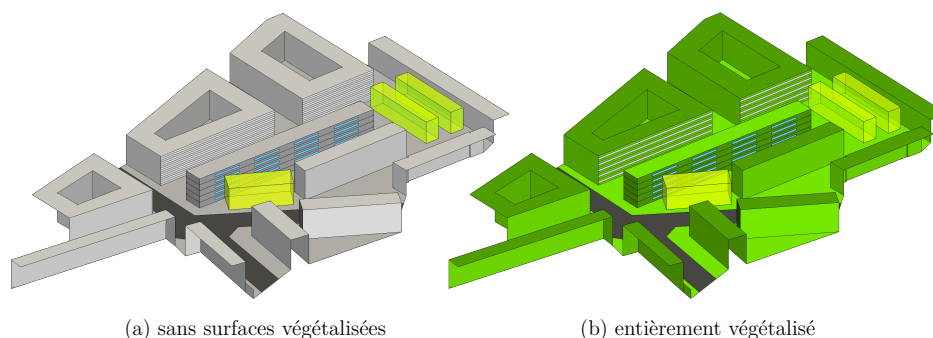


FIGURE 6.13 – Scène urbaine simulée pour les deux cas de végétalisation extrêmes : (a) sans surface végétalisée – (b) entièrement végétalisé

- à-dire que seul le bâtiment d'étude est végétalisé sur les façades (1), sur le toit (2) ou sur toutes ses surfaces opaques (3),
- les cas de (4) à (7) ne considèrent que les effets indirects des façades, des toits, des sols pour les cas (4), (5) et (6) respectivement, tandis que les façades et les sols sont végétalisés simultanément pour le cas (7),
 - le cas (8) pour lequel toute l'enveloppe du bâtiment d'étude est végétalisée ainsi que les façades de la scène urbaine,
 - les cas (0⁺), (3⁺), (4⁺) et (8⁺) sont réalisés avec un bâtiment d'étude isolé thermiquement.

6.2.4 Quatre axes d'analyse

Les résultats seront analysés à travers quatre axes, qui consistent chacun en une comparaison de plusieurs cas de simulation :

- Axe 1** Effets de la végétalisation des surfaces en fonction du niveau d'isolation thermique : cas (0), (3), (4) et (8) avec le bâtiment isolé et (0⁺), (3⁺), (4⁺) et (8⁺) avec le bâtiment non isolé.
- Axe 2** Comparaison des effets directs et indirects des façades végétales : cas (0), (3), (4) et (8).
- Axe 3** Étude des effets directs des enveloppes végétales : cas (0), (1), (2) et (3).
- Axe 4** Étude des effets indirects de la végétalisation des surfaces urbaines : cas (4) (5), (6) et (7).

Les résultats obtenus portent à la fois sur l'intérieur du bâtiment et sur son comportement thermique, sur la modification du microclimat et sur les échanges d'énergie entre le bâtiment et son environnement. La quantité importante de données disponibles permet donc des exploitations très riches et variées. Pour chaque axe d'analyse, les comparaisons porteront dans un premier temps sur les températures intérieures et éventuellement sur les indices de confort thermique. On portera ensuite notre intérêt sur les échanges entre le bâtiment et son environnement à travers l'étude des bilans thermiques à la surface extérieure des parois. Afin de mettre l'accent sur l'effet des façades végétales, dont la représentation fine est une originalité du modèle et la principale contribution de cette thèse à *Solene-microclimat*, les investigations seront principalement menées sur le deuxième étage, situé à mi-hauteur du bâtiment.

Enfin, la consommation d'eau pour l'irrigation des enveloppes végétales sera également abordée. C'est en effet une des principales réserves souvent émises à juste titre quant à leur utilisation massive en ville.

6.3 Résultats

6.3.1 Axe 1 : effets de la végétalisation des surfaces en fonction du niveau d'isolation thermique

D'après les résultats présentés dans le chapitre 5, il y a peu de chances pour qu'un bâtiment isolé soit sensible à la végétalisation des enveloppes du bâtiment. Nous cherchons ici à confirmer ces résultats sur le cas d'application du Pin Sec densifié, en prenant en compte cette fois-ci la végétation. Les résultats obtenus dans le cas d'un bâtiment isolé et non isolé sont présentés à la Figure 6.14. Les cas représentés permettent de voir à la fois la sensibilité du modèle de bâtiment aux effets directs (végétalisation du bâtiment), indirect (végétalisation de la scène urbaine) ainsi qu'une combinaison des deux. On peut déjà remarquer les différences importantes entre les cas pour lesquels le bâtiment est isolé, à la fois pour l'amplitude et les valeurs moyennes de

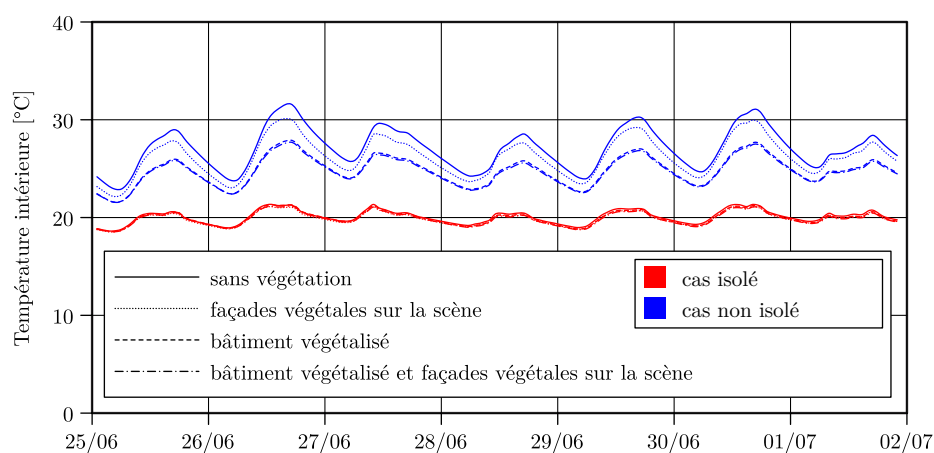


FIGURE 6.14 – Évolution de la température de l'air intérieur en moyenne sur les cinq étages dans les cas isolés et non isolés

température intérieure. Ainsi, pour le cas isolé, l'amplitude journalière n'atteint pas $3[^\circ C]$ alors qu'elle peut dépasser $6[^\circ C]$ dans le cas non isolé sans végétation. La température intérieure peut largement dépasser $30[^\circ C]$ dans le cas des bâtiments sans isolation. Dans le cas du bâtiment avec isolation, la température intérieure varie peu autour de $20[^\circ C]$ ce qui peut paraître plutôt faible à cette période de l'année.

La différence que l'on cherche à mettre en évidence concerne l'effet de la végétation. Les écarts maximaux atteignent ainsi $2[^\circ C]$ à $7[^\circ C]$ suivant les scénarios de végétalisation pour les cas non isolés, tandis que les différences ne sont même pas visibles pour le cas isolé. Cela confirme de nombreuses observations faites dans la littérature qui consistent à dire qu'à partir d'un seuil d'isolation thermique, les effets des conditions climatiques sur le comportement thermique du bâtiment sont limités.

C'est sur la base de ces résultats qu'il a été décidé de se concentrer sur le cas d'un bâtiment non isolé.

6.3.2 Axe 2 : comparaison des effets directs et indirects des façades végétales

On s'intéresse ici au cas d'un bâtiment sans isolation thermique soumis à plusieurs scénarios de végétalisation sur son enveloppe ou sur les façades des bâtiments environnants. La Figure 6.15 représente l'évolution des températures intérieures d'un étage courant pour quatre scénarios :

- cas de référence sans végétation,

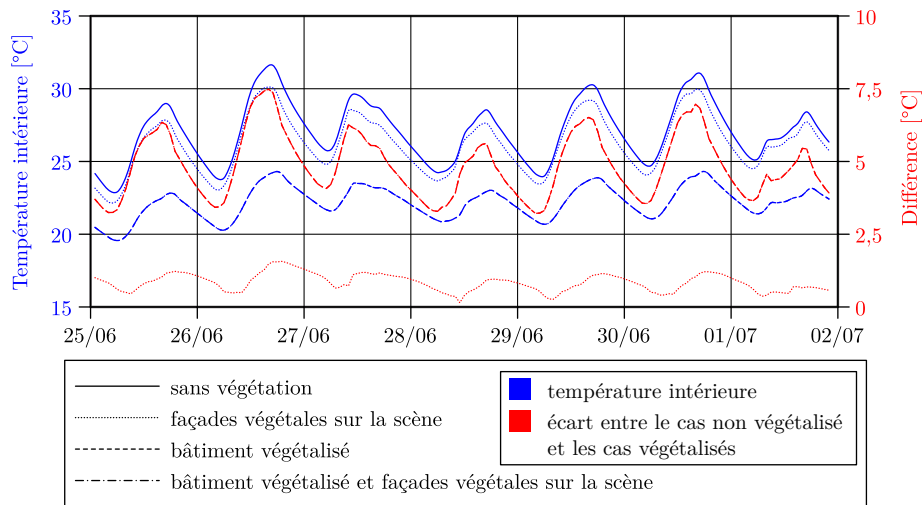


FIGURE 6.15 – Évolution de la température intérieure du deuxième étage (en bleu) et écart par rapport au cas sans végétation (en rouge) - les cas "bâtiment végétalisé" et "bâtiment végétalisé et façades végétales sur la scène" sont confondus

- scène végétalisée : végétation sur les façades végétales de la scène urbaine,
- bâtiment végétalisé : végétation sur le toit et sur les façades du bâtiment d'étude,
- scène et bâtiment végétalisés.

Température de l'air intérieur

La végétalisation des façades de la scène urbaine a un impact assez faible sur les températures intérieures du bâtiment (qui lui n'est pas végétalisé) puisque la réduction maximale observée est de $1,7[^\circ C]$. L'effet est généralement plus important en fin d'après-midi mais ne change pas fondamentalement le comportement thermique du bâtiment. On retrouve ainsi une amplitude journalière similaire, de 5 à $7[^\circ C]$. On rappelle que les albédos des surfaces de la scène ne sont pas modifiés par l'apport de couvertures végétales. L'effet indirect est donc uniquement dû au rayonnement infrarouge et à la diminution de la température de l'air extérieur.

La végétalisation du bâtiment d'étude entraîne un rafraîchissement de l'air intérieur beaucoup plus important, notamment en journée. La différence maximale observée est de $7,5[^\circ C]$ et pour une valeur minimale de $3[^\circ C]$. La température maximale est toujours inférieure à $25[^\circ C]$ alors que le seuil de $30[^\circ C]$ est régulièrement dépassé dans le cas sans végétation. Les variations

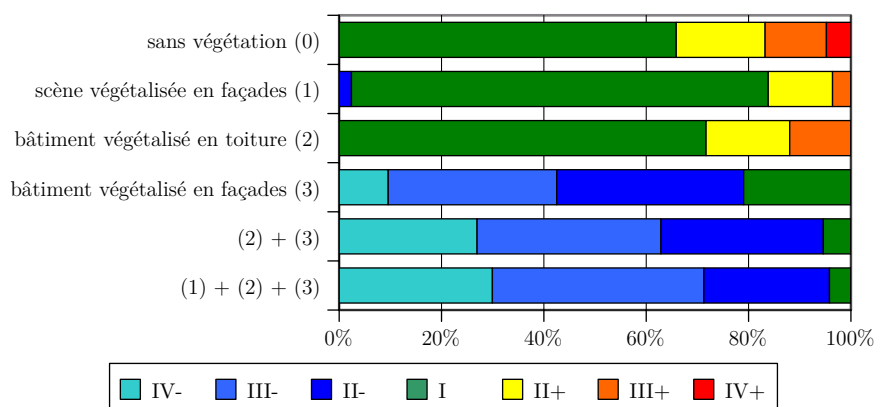


FIGURE 6.16 – Répartition en catégories de confort pour le deuxième étage

journalières sont également fortement atténuées puisqu'elles ne dépassent plus $4[^\circ C]$. Le fait que l'impact soit largement plus important en journée laisse penser que l'effet de masque solaire joue cette fois un rôle prépondérant.

Enfin, l'effet indirect de la végétalisation des façades de la scène est quasiment nul dans le cas d'un bâtiment déjà végétalisé. Les courbes qui correspondent aux deux derniers cas sont en effet confondues. L'utilisation d'enveloppes végétales sur un bâtiment le rend donc globalement beaucoup moins sensible aux conditions climatiques extérieures, notamment au rayonnement thermique infrarouge.

Confort thermique intérieur

La Figure 6.16 représente les répartitions en catégories de confort pour le deuxième étage. Dans le cas sans végétation, les catégories d'inconfort thermique chaud présentent plus de 30% d'occurrence et surtout, la catégorie IV+ qui est la plus préoccupante, présente 5% d'occurrence. Cette catégorie a tendance à disparaître quel que soit le scénario de végétalisation appliqué, ce qui est plutôt positif.

Les cas de l'utilisation d'une toiture végétale seule et de façades végétales seules sur le bâtiment d'étude sont donnés, en plus des quatre cas présentés précédemment (Figure 6.16, cas (2) et (3)).

Concernant l'effet indirect, on remarque que malgré les faibles écarts observés en température absolue, il est suffisant pour qu'il n'y ait plus aucune occurrence de la catégorie IV+. Sur le deuxième étage, l'effet indirect des murs végétaux est plus intéressant que l'effet direct des toitures végétales, ce qui n'était pas forcément attendu.

C'est l'utilisation des murs végétaux sur le bâtiment d'étude qui est de loin la plus déterminante. Les catégories chaudes disparaissent au profit d'une

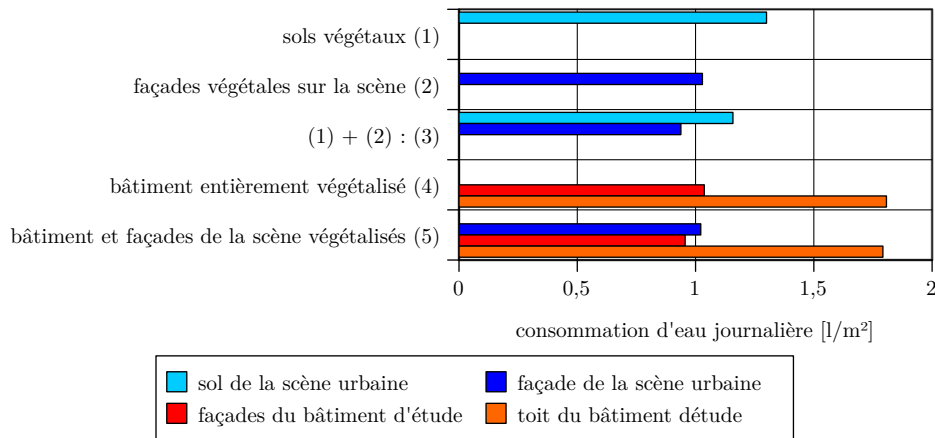


FIGURE 6.17 – Moyenne surfacique de la consommation d'eau journalière des différents types de surface

forte augmentation de la proportion des catégories d'inconfort dites "froides". Si celle-ci peut d'ailleurs paraître pénalisante, il convient néanmoins de la relativiser. En effet, les températures minimales descendent à peine en dessous de $20[^\circ C]$ et uniquement la nuit (Figure 6.15) alors que la température extérieure est inférieure à $17[^\circ C]$. Certaines solutions permettraient simplement de faire remonter la température intérieure si cela s'avérait nécessaire : diminuer la protection solaire sur les vitrages, augmenter légèrement la ventilation en journée quand la température extérieure est importante. L'effet de la présence d'une fine couche d'isolation thermique ou d'une cavité d'air, qui n'est par représentée dans les cas traités, limiterait également le rafraîchissement des parois et de l'air à l'intérieur du bâtiment.

L'effet indirect de la végétalisation des façades de la scène sur le bâtiment végétalisé est cette fois visible, même s'il reste très faible.

Bilans hydriques

La végétalisation des enveloppes étant une technique de rafraîchissement exempte de systèmes thermodynamiques, il s'agit bien d'une solution passive, qui n'en demeure pas moins une grande consommatrice d'eau surtout si le substrat est irrigué. Si l'on rapporte le débit d'arrosage de $6 [l/j/m^2]$ utilisé pour les échantillons de façade végétale du chapitre 4 à la totalité de l'enveloppe du bâtiment Dunant ainsi qu'à son nombre d'habitants, on obtient une consommation journalière de $53 [l/j/hab]$, ce qui correspond à plus du tiers de la consommation française moyenne par habitant. Ce ne sont heureusement pas les consommations observées lors des simulations qui sont plutôt de l'ordre d' $1 [l/j/m^2]$.

Les consommations surfaciques moyennes pour les différents types de surface sont données à la Figure 6.17. Il s'agit de la végétalisation de la scène dans les trois premiers cas, de la végétalisation du bâtiment d'étude avec et sans façades végétales sur la scène pour les deux derniers cas. La forte différence avec la quantité d'eau évapotranspirée par les échantillons de l'Hépiea s'explique par l'importance du flux solaire incident dans le calcul du flux latent. Il est simplement dû aux différentes orientations des façades de la scène et du bâtiment, qui font évaporer moins d'eau que les échantillons orientés plein sud. L'importance du flux solaire est également visible à la Figure 6.17 où les surfaces les plus consommatrices sont les toits, car les plus exposées. On retrouve ensuite les sols, dont le flux de rayonnement CLO reçu est atténué par les effets d'ombrage, et enfin les façades.

On peut également observer l'effet indirect de la végétalisation des surfaces sur la quantité d'eau évaporée. La quantité totale des cas (1) et (2) de la Figure 6.17 est ainsi supérieure de 10% à celle du cas (3) qui est la superposition des deux premiers. La présence de surface végétale va effectivement provoquer une augmentation locale de l'hygrométrie et une diminution de la température de l'air, diminuant d'autant le pouvoir évaporant de l'air de la scène. La diminution du flux de rayonnement GLO est également en jeu. Cet effet est également légèrement visible pour les façades dans les cas (4) et (5). Il l'est moins pour les toits qui sont globalement moins exposés à l'ambiance hygrothermique de la scène.

Afin de mettre ces données en perspective, on peut les comparer aux normales saisonnières de précipitations. Le Tableau 6.2 présente à cet effet les quantités totales d'eau évaporée au cours d'une journée par rapport à l'emprise au sol des surfaces concernées. Pour les façades, il s'agit de la surface du toit du bâtiment support. Le ratio de précipitation est défini comme le rapport entre la quantité d'eau évaporée et la quantité d'eau disponible grâce aux précipitations, exprimé en pourcentage. Les précipitations moyennes au mois de juin sur la région nantaise sont de l'ordre de 46 [mm], ce qui donne environ 1,5 [mm] par jour.

La consommation d'eau pour l'irrigation des surfaces végétales du bâtiment d'étude correspond ainsi à presque deux fois les précipitations moyennes potentiellement reçues par le toit, les façades en consommant à elles seules près des deux tiers. Pour que les précipitations suffisent à alimenter ses enveloppes végétales, il faudrait que le bâtiment dispose d'une surface d'interception de deux fois la surface de son emprise au sol. Sur la scène, les autres bâtiments ont besoin d'1,5 fois leur emprise au sol. Les sols végétaux consomment quant à eux moins que l'eau apportée par la pluie. Cela permet de compenser une grande partie des quantités nécessaires aux bâtiments. Le ratio d'évaporation n'est ainsi que de 107% au total.

type	quantité totale [l]	emprise au sol [m ²]	[mm] d'eau par [m ²] de sol	ratio évaporation
façade du bâtiment	2 594	954	2,72	177%
toit du bâtiment	1 723	954	1,80	118%
total bâtiment	4 317	954	4,53	195%
façades de la scène	18 527	8 012	2,31	151%
sol	15 568	13 444	1,16	75%
total	38 412	23 350	1,65	107%

TABLEAU 6.2 – Quantité d'eau évaporée par les différents types de surface rapportée à leur emprise au sol et aux précipitations

Cette démarche est trop simplifiée pour permettre d'attester ou non de l'apparition de stress hydrique pendant une période donnée. Il faudrait pour cela réaliser un bilan hydrique dynamique en prenant en compte les précipitations au pas de temps horaire et le drainage dans la couche de sol ou de substrat. Elle permet toutefois de mettre en évidence une nouvelle fois que le refroidissement adiabatique de l'air est d'autant plus efficace que la quantité d'eau évaporée est importante. On pourrait notamment se poser la question du bénéfice de la végétalisation des façades en fonction de leur orientation et donc de leur exposition au rayonnement solaire. La recherche d'un optimum entre la consommation hydrique et l'effet de refroidissement adiabatique par rapport à l'effet de masque solaire justifie ainsi l'étude des bilans de flux thermiques de surface, qui permet d'évaluer l'efficacité respective de chacun de ces processus.

6.3.3 Axe 3 : effets directs des enveloppes végétales

Évolution des températures à l'intérieur du bâtiment

Le modèle thermique permet d'avoir accès à l'évolution des températures des surfaces intérieures des parois ainsi qu'à la température d'air et à la température radiante moyenne. Il comporte cinq nœuds thermiques par étage. La température intérieure des murs et des vitrages permet d'estimer le flux thermique transmis par les parois à l'air intérieur et donc de quantifier l'effet du flux thermique transmis par conduction à travers les parois. La connaissance des températures du plafond, du plancher et des cloisons permet d'estimer l'effet des flux thermiques entre les étages et de prendre en compte l'inertie thermique de ces éléments constructifs.

L'évolution des températures intérieures des vitrages et des murs, ainsi que la température radiante et la température de l'air sont données à la Figure 6.18 pour trois cas de simulation :

- bâtiment sans végétation,

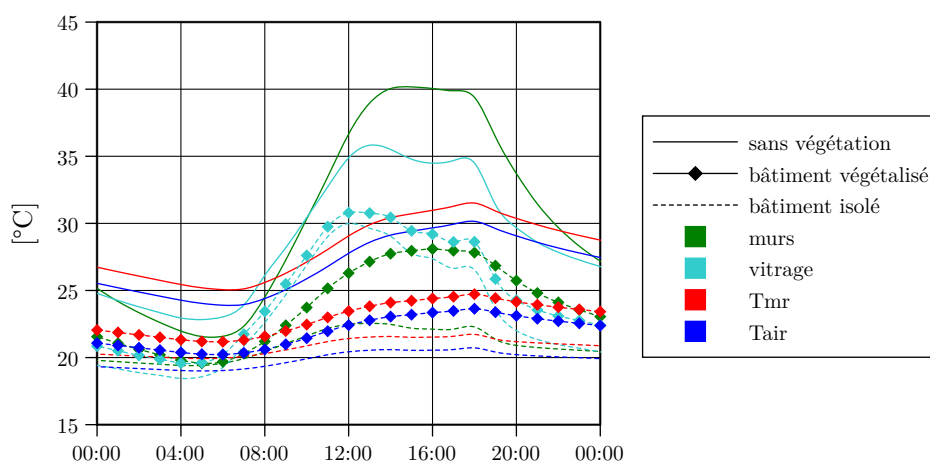


FIGURE 6.18 – Évolution de la température de surface intérieure des murs et des vitrages, de la température de l'air (T_{air}) et de la température radiante moyenne (T_{mr}) à l'intérieur du deuxième étage, le 26 juin 2010

- entièrement végétalisé
- avec isolation thermique, sans végétation.

On remarque que la température intérieure des murs est très élevée pour le cas non végétalisé sans isolation thermique puisqu'elle atteint $40[^\circ C]$. Cela donne une idée de l'importance de la contribution des flux transmis par les parois au réchauffement de l'air intérieur. On peut l'expliquer par la valeur relativement faible de l'albédo (0,25) et la faible résistance thermique des parois. La température maximale du vitrage est moins élevée car elle n'absorbe qu'une moindre partie du rayonnement solaire incident. L'amplitude de variation des températures d'ambiance (T_{mr} et T_{air}) à l'intérieur du bâtiment est nettement plus faible. L'écart entre les valeurs de T_{mr} et de T_{air} obtenues pour les trois cas est assez constant, de l'ordre d' $1[^\circ C]$.

L'effet de la végétalisation des façades est particulièrement important sur la température de surface intérieure des murs, entraînant une diminution du maximum d'environ $12[^\circ C]$. Il est toutefois encore plus important dans le cas du bâtiment isolé. La diminution est de plus de $25[^\circ C]$ dans ce cas avec une amplitude réduite de $18[^\circ C]$ à environ $3[^\circ C]$. L'impact est plus faible sur les vitrages, ceux-ci n'étant pas affectés directement par les modifications apportées au mur mais principalement pas l'intermédiaire de la diminution de la température intérieure et de la température radiante moyenne.

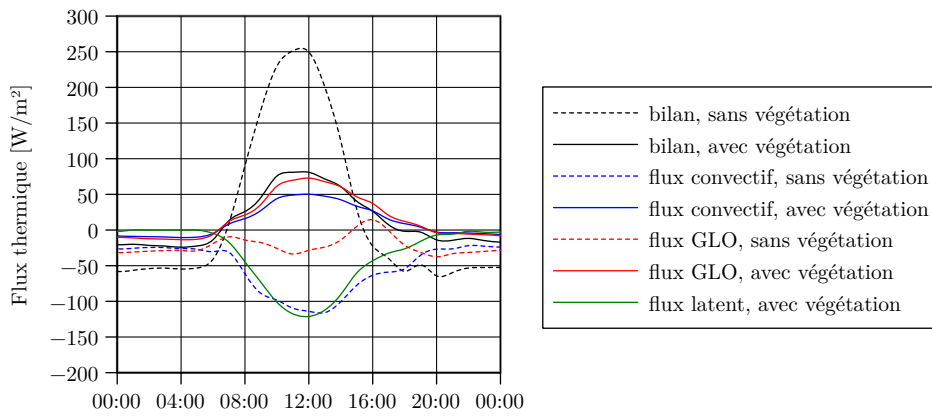


FIGURE 6.19 – Densité de flux à la surface extérieure de la façade sud du deuxième étage, au cours de la journée du 26 juin 2010

Bilan thermique sur la surface extérieure du mur

La Figure 6.19 représente l'évolution des flux thermiques instantanés à la surface extérieure du mur du deuxième étage pour une facette de la façade orientée au sud. Les flux sont comptés positivement s'ils sont entrants dans le local. Le flux solaire n'est pas représenté car il est très important comparé aux autres flux thermiques. Il atteint un maximum de $400 [W/m^2]$ pour la façade directement exposée au rayonnement solaire. Il est réduit du facteur $\tau = 0,2$ pour la façade couverte par la végétation, atteignant ainsi $80 [W/m^2]$. Il est cependant pris en compte dans les courbes de bilan qui représentent ainsi le flux d'énergie qui est soit transmis à la surface intérieure du mur, soit stocké à l'intérieur du mur :

$$\text{bilan} = \text{flux CLO} - \text{flux convectif} - \text{flux GLO} - \text{flux latent} \quad (6.8)$$

La comparaison est délicate car les flux thermiques ne sont pas estimés de la même manière suivant la présence ou non du mur végétal, celui-ci constituant l'interface entre la surface extérieure du mur et l'environnement extérieur. Pour les cas non végétalisés, on considère les flux convectifs échangés avec l'air libre extérieur et des flux GLO échangés avec la scène urbaine et avec le ciel. Pour le cas végétalisé, on considère le flux convectif échangé avec l'air au sein du feuillage et le flux GLO échangé avec la couverture végétale. Dans ce cas, seul le flux latent prélevé sur le mur est considéré, ainsi que le flux solaire transmis à travers le feuillage.

On constate que le comportement thermique du nœud de mur extérieur est sensiblement différent. Sans végétation, les flux convectif et GLO participent principalement à son refroidissement. Dans le cas du mur végétal,

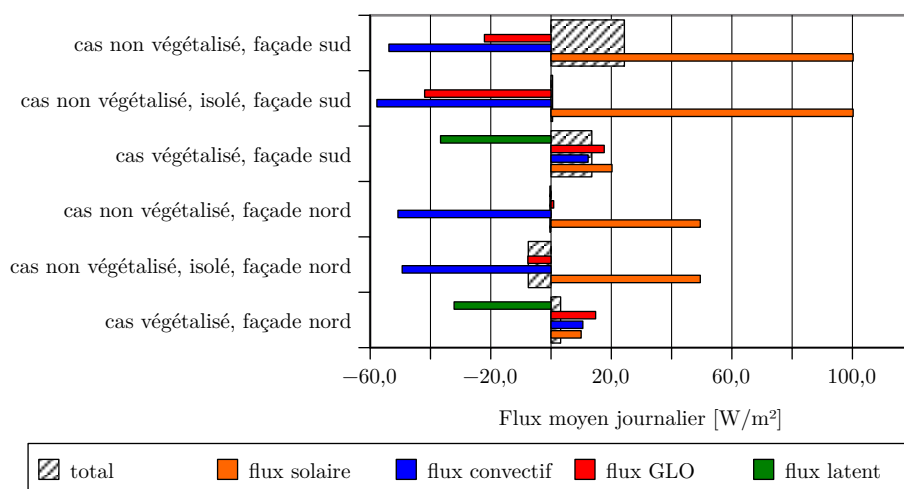


FIGURE 6.20 – Flux thermiques moyens sur la surface extérieure du deuxième étage au cours de la journée du 26 juin 2010

la couche d'air au sein des feuilles et la végétation ont une température supérieure à celle de la paroi pendant la journée, ce qui fait que les échanges radiatifs et convectifs sont plutôt positifs. Le rafraîchissement durant la nuit est quant à lui réduit. Le flux thermique infrarouge est dépendant de l'ensoleillement des surfaces en vis-à-vis pour la paroi sans couverture végétale, ce qui explique son allure irrégulière. Pour le cas de la paroi végétalisée, l'évolution du flux GLO semble principalement lié au flux solaire incident, de même que le flux convectif. La Figure 6.19 fait ainsi clairement apparaître l'importance de l'effet de masque solaire ainsi que le rafraîchissement dû au flux évaporatif à la surface du substrat.

Au final, le maximum de flux stocké ou transmis à travers la paroi est réduit de deux tiers dans le cas de la façade végétalisée.

La Figure 6.20 montre la répartition des flux thermiques moyens journaliers au nœud de température de la surface extérieure pour deux facettes orientées respectivement au sud et au nord, dans les cas où celles-ci sont végétalisées ou pas. À titre de comparaison, les flux pour le cas isolé non végétalisé sont également représentés.

En moyenne journalière, le flux thermique transmis à travers la paroi ou stocké en surface est ainsi réduit de moitié pour la façade orientée au sud, du fait de la façade végétalisée. L'effet est inversé pour la façade nord : sans végétation, le bilan thermique est négatif, c'est-à-dire que la facette participe au refroidissement du bâtiment, alors qu'il est légèrement positif dans le cas végétalisé. On retrouve les tendances observées précédemment,

c'est-à-dire que c'est la réduction importante du flux solaire incident et le flux d'évaporation qui vont permettre de limiter la contribution de la surface au réchauffement de l'ambiance intérieure.

Dans le cas du bâtiment isolé, la forte résistance thermique des murs va provoquer une augmentation de la température de surface extérieure et donc des flux convectifs et GLO. Cela signifie qu'ils participeront d'autant plus au réchauffement du microclimat au sein de la scène urbaine. L'effet indirect sur les bâtiments environnants risque donc d'être négatif. On ne peut pas tirer de conclusions du même ordre pour le cas des façades végétales car les flux à la surface extérieure ne sont pas directement échangés avec l'ambiance urbaine mais avec la couverture végétale. Ce sera l'objet de l'axe 4 sur l'analyse des effets indirects.

6.3.4 Axe 4 : effets indirects de la végétalisation des surfaces urbaines

Les toitures végétales sont de plus en plus utilisées. Elles ne sont pourtant pas beaucoup plus présentes dans l'environnement urbain, pour une raison simple : leur visibilité depuis l'espace public est presque nulle. On peut donc imaginer que l'effet de la végétalisation du toit d'un bâtiment sera limité sur le confort thermique extérieur dans son environnement proche, tout comme son impact sur le comportement thermique des constructions voisines. Il est toutefois admis que les toitures végétales peuvent avoir un impact important sur le comportement thermique des bâtiments et sur le climat des villes. Compte-tenu du fort ensoleillement des toitures en été, l'impact direct est évident. Pour cette même raison, à laquelle s'ajoute la surface importante des toits dans un tissu urbain dense, on peut s'attendre à ce que l'effet indirect des toitures végétales utilisées de façon massive à l'échelle de la ville, le soit tout autant. Cependant, à l'échelle du fragment urbain ou de la rue pour laquelle la végétalisation des façades et des sols est a priori plus efficace, il y a peu d'études sur les effets obtenus. L'étude de l'effet indirect de la végétalisation des surfaces urbaines doit permettre de répondre aux questions suivantes :

- Quel est l'effet des toitures végétales sur les caractéristiques de l'air au sein de la rue et sur le comportement thermique des constructions proches ?
- Quels sont les effets respectifs des sols et des façades végétales sur le comportement thermique des constructions proches ?
- Quels sont les parts relatives de l'effet de la diminution de la température de l'air et de l'effet de la diminution des températures de surface ? Autrement dit, de l'effet convectif ou de l'effet radiatif lequel est prépondérant ?

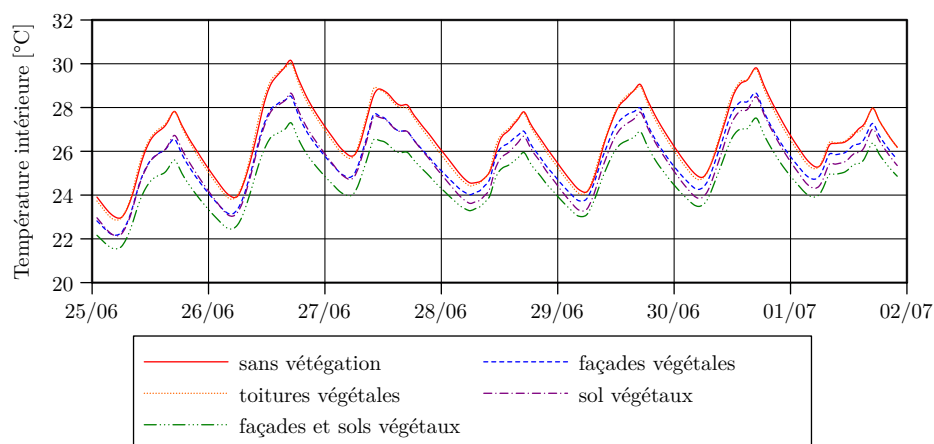


FIGURE 6.21 – Évolution de la température intérieure pour le deuxième étage en fonction de la végétalisation de la scène urbaine

Pour y répondre, les configurations qui sont comparées sont les suivantes :

- cas sans végétation,
- cas avec façades végétales sur la totalité de la scène,
- cas avec toitures végétalisées,
- cas avec sols végétaux,
- cas avec sols végétaux et façades végétales.

Les résultats de simulation issus de ces configurations seront analysés suivant deux angles :

- effet sur la température et le confort thermique à l'intérieur des bâtiments,
- effet relatif de la modification des flux radiatifs et convectifs.

Température et confort intérieur

Les évolutions des températures de l'air intérieur simulées au deuxième étage du bâtiment d'étude sont représentées à la Figure 6.21. On peut distinguer trois niveaux de réduction des températures intérieures :

- L'effet de la végétalisation des toitures est négligeable sur l'évolution de la température intérieure.
- La végétalisation des sols ou des façades conduit à une diminution allant de $1[^\circ C]$ à $2[^\circ C]$. Cet écart évolue lentement au cours de la semaine mais les variations entre la nuit et la journée restent faibles. Des différences apparaissent durant la nuit entre ces deux configurations à partir du 28 juin.
- La réduction maximale est obtenue en végétalisant simultanément les façades et les sols. Elle atteint alors $3[^\circ C]$ l'après-midi du 26 juin.

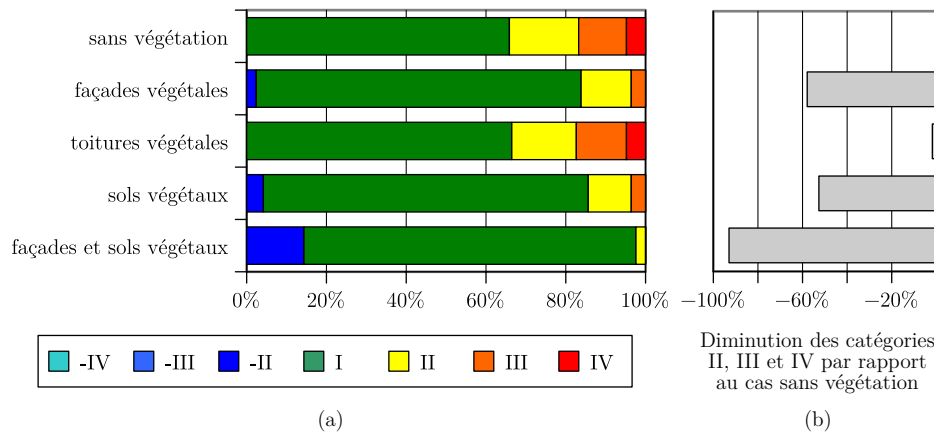


FIGURE 6.22 – (a) Répartition des catégories de confort thermique pour le deuxième étage – (b) Diminution relative des catégories de confort chaudes par rapport au cas sans végétation

On retrouve ces trois niveaux d'amélioration de l'ambiance thermique sur la répartition des catégories de confort (Figure 6.22). L'effet de la végétalisation des toits n'est toujours pas perceptible. La végétalisation des sols ou des façades permet de diminuer de plus de 50% le nombre d'heures d'inconfort et de réduire à néant le nombre d'occurrence de la catégorie IV, la plus problématique. On note l'apparition d'un possible inconfort thermique froid, correspondant aux périodes de nuit. On retrouve ainsi l'écart sur les températures de nuit entre ces deux cas.

Le fait de couvrir de végétation la totalité des surfaces urbaines en contact visuel avec les façades du bâtiment d'étude permet de supprimer presque entièrement les heures d'inconfort.

Flux convectifs et radiatifs à la surface extérieure du mur

L'analyse des bilans thermiques à la surface extérieure de l'enveloppe du bâtiment d'étude permet d'en savoir plus sur les effets respectifs de la modification de la température d'air et des températures de surface. Pour la journée du 26 juin, les évolutions des valeurs instantanées calculées en moyenne sur la totalité de la surface extérieure du deuxième étage sont données à la Figure 6.23. La Figure 6.24 représente la moyenne surfacique et temporelle des flux pour chacun des cas traités. Les flux sont comptés positivement lorsqu'ils contribuent au réchauffement de l'intérieur. La composante du flux GLO total net échangé avec la scène urbaine est représenté en plus afin de mieux cerner la contribution des surfaces. L'écart entre le flux GLO total et le flux GLO échangé avec la scène correspond aux échanges infrarouges avec la voûte céleste.

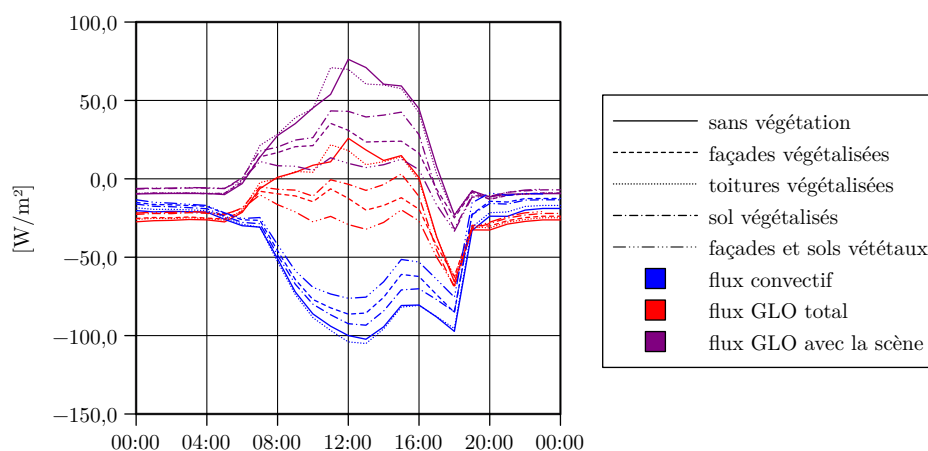


FIGURE 6.23 – Évolution des flux convectifs et radiatifs GLO à la surface extérieure du deuxième étage, en fonction de la végétalisation de la scène urbaine

Quel que soit le cas traité, on remarque une rupture dans l'évolution des flux qui se produit tous les jours vers 17h : le flux GLO devient soudainement négatif et le flux convectif se remet à augmenter en valeur absolue (Figure 6.23). Il semble que cela soit dû à l'éclairement soudain de la façade nord.

Le flux convectif est le principal vecteur de rafraîchissement des surfaces, particulièrement en journée mais aussi la nuit. Si les échanges radiatifs avec la scène participent légèrement au rafraîchissement durant la nuit, leur effet est globalement négatif par rapport au confort thermique intérieur à cause de leur importante contribution en journée. Celle-ci étant limitée par le rayonnement échangé avec le ciel, le bilan total net en flux GLO reste néanmoins favorable sur l'ensemble de la journée (Figure 6.24).

En dehors du cas des toitures, les effets de la végétalisation de la scène sur les flux thermiques sont significatifs. Le bilan positif des flux GLO est ainsi accentué, passant de 17 à 25 $[W/m^2]$. Des seuils symboliques sont franchis : à partir de la végétalisation d'une des classes de surface, le flux GLO total ne prend presque plus, voire plus du tout de valeur positive (Figure 6.23). En végétalisant la totalité de la scène, c'est le flux GLO net avec la scène urbaine à lui seul qui devient négatif (Figure 6.24). L'effet de la végétalisation des sols est nettement plus important pour le bilan GLO que la végétalisation des façades. Deux raisons peuvent l'expliquer :

- la visibilité plus importante entre les sols et les façades du bâtiment d'étude, par rapport à celle des façades du bâtiment d'étude.

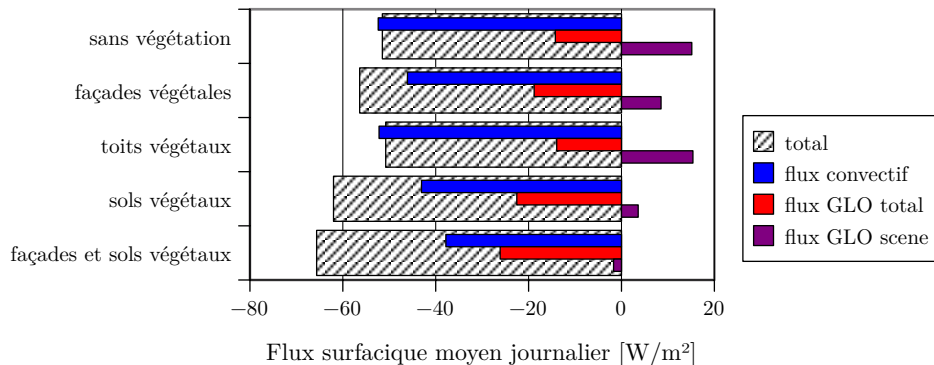


FIGURE 6.24 – Bilan journalier des flux convectifs et radiatifs GLO à la surface extérieure du deuxième étage

- l'exposition plus forte des sols horizontaux au rayonnement solaire par rapport aux façades.

La végétalisation des surfaces entraîne globalement une diminution du flux convectif. Cela s'explique par la diminution de la température de surface et donc de l'écart avec la température de l'air extérieur. Il ne faut pourtant pas en conclure que l'effet indirect par modification de la température de l'air est négatif ou négligeable car celle-ci est effectivement plus faible. La diminution des flux convectifs serait en effet plus importante si le couplage thermo-aéraulique n'était pas pris en compte.

Si l'on compare les flux de rafraîchissement totaux, la diminution de l'énergie sensible échangée avec l'air est cependant compensée par l'augmentation des flux radiatifs GLO. Par le biais des températures de surface, les flux convectifs et radiatifs sont complètement couplés et il n'est pas vraiment possible de les considérer séparément. On pourrait pour cela forcer la température d'air dans un cas et celle des surfaces dans l'autre, mais on ne pourra pas plus faire la distinction entre les effets respectifs des flux et du modèle. Finalement, ces observations ne permettent pas d'évaluer l'effet de la modification de la température d'air, alors que celle des surfaces est, elle, avérée. En outre, elle est efficace puisqu'on a vu que la végétalisation complète de la scène permet de supprimer presque totalement l'inconfort thermique à l'intérieur du bâtiment.

6.4 Conclusion et discussion

L'étude des différents scénarios de végétalisation des surfaces a permis de montrer l'intérêt des enveloppes végétales dans le cas d'un bâtiment non

isolé du quartier Pin Sec densifié. Si les modifications apportées à ce fragment urbain ne doivent pas être prises comme une évolution probable du quartier, elles nous ont néanmoins permis de traiter la situation particulière d'un quartier péri-urbain relativement dense et fortement minéralisé.

Les résultats observés sur le bâtiment très peu isolé dont le comportement thermique a été suivi doivent également être relativisés du fait justement de sa faible isolation thermique, mais aussi de l'application massive de dispositifs non soumis à un éventuel stress hydrique et donc consommant une quantité importante d'eau. Beaucoup d'études complémentaires peuvent être menées, mettant en jeu différents niveaux d'isolation et surtout différents types de dispositifs végétaux, en particulier ceux utilisant des plantes grimpantes qui ne comportent pas de substrat humide. Enfin, la semaine étudiée et le climat nantais sont loin d'être les plus défavorables. On peut penser que des applications durant des épisodes caniculaires ou des contextes climatiques plus problématiques pourraient enrichir les résultats présentés dans cette thèse.

Malgré une période d'étude que l'on aurait pu souhaiter plus chaude en prévision du réchauffement climatique annoncé, ce cas d'étude a permis de mettre en évidence l'intérêt de la végétalisation des façades sur le confort thermique estival à l'intérieur du bâtiment, en particulier pour son effet direct. Sans prendre en compte un surplus d'isolation ou d'inertie thermique, les murs végétaux permettent ainsi de réduire drastiquement le flux solaire direct transmis à la paroi, et également le réchauffement de la surface des feuilles ou du substrat grâce au phénomène d'évapotranspiration.

Il a aussi permis de relativiser l'impact des toitures végétales, à la fois pour son effet direct, qui est apparu limité sur les étages inférieurs, et pour son effet indirect à l'échelle du fragment urbain, qui n'a quant à lui pas pu être observé.

On a également pu constater que l'effet indirect des façades et des sols permettaient d'améliorer de façon non négligeable le confort thermique des bâtiments qui n'étaient ni isolés ni végétalisés. Pour le deuxième étage, l'effet indirect de la végétalisation des façades s'est ainsi montré plus efficace que l'effet direct de l'utilisation d'une toiture végétalisée. On a pu montrer que l'effet de la végétalisation des surfaces était en grande partie dû à une modification du bilan radiatif GLO sur la scène urbaine, ce qui laisse présager des effets d'autant plus remarquables sur le confort thermique extérieur, dont on sait qu'il est fortement affecté par la température radiante.

L'intérêt de la prise en compte du couplage aéraulique et thermo-radiatif pour modéliser l'effet de la végétation sur le comportement thermique estival d'un bâtiment non isolé a été clairement démontré, ce qui n'a pas été le cas pour les bâtiments isolés ni pour le bâtiment végétalisé, du moins pour le scénario climatique utilisé. L'intérêt à long terme des façades végétales pour ces cas d'application peut ainsi paraître réduit. En effet, il est souhaitable

que des bâtiments aussi mal isolés deviennent exceptionnels.

Une des raisons pour lesquelles la végétalisation de la ville ne risque toutefois pas de perdre son intérêt est l'amélioration du confort thermique extérieur. *Solene-microclimat*, même sans modèle de bâtiment, paraît être un outil particulièrement bien adapté pour cette problématique et c'est dans ce cadre qu'il devrait être utilisé dans le volet d'évaluation du projet ANR VegDUD.

Conclusion

Synthèse

Trois axes de travail ont été menés de front tout au long de la durée de cette thèse. Le premier a concerné la mise en place d'un nouvel outil de simulation pour réaliser le couplage entre le modèle de thermique du bâtiment, le modèle thermo-radiatif et le modèle thermoaéraulique, que constitue **Solene-microclimat**. Le second a été dédié au développement et à la validation du modèle de façade végétale, et le troisième à l'application au cas d'étude du quartier Pin Sec de Nantes afin d'évaluer l'impact des dispositifs végétaux sur le comportement thermique des bâtiments. Cette application a également permis de vérifier l'applicabilité des outils à l'échelle du quartier.

Les contributions de la thèse au modèle **Solene-microclimat** sont les suivantes :

- développement d'un outil de couplage modulaire et d'un nouvel algorithme de couplage,
- validation des modèles thermiques de surface pour le sol, les façades et le toit,
- développement et validation d'un modèle d'enveloppe végétale,
- analyse de sensibilité du comportement thermique du bâtiment au mode de couplage.

Un modèle hydrothermique de façade végétale de type mur vivant a été développé et validé avec succès à partir de données thermiques et hydriques issues d'expérimentations sur des échantillons réels. Il est constitué d'une interface entre la surface extérieure du mur et du substrat et l'environnement extérieur du bâtiment. Cette interface est réalisée par l'intermédiaire d'un nœud thermique supplémentaire pour le feuillage, qui fait le lien avec le modèle thermo-radiatif, et d'un nœud thermique supplémentaire pour l'air au sein des feuilles en relation avec le modèle thermo-aéraulique.

L'analyse de sensibilité du modèle thermique de bâtiment au mode de couplage a montré que celui-ci était peu sensible aux modifications de la température de l'air extérieur en hiver. Cela nous a incité à concentrer nos efforts

sur les périodes estivales car c'est pour cette saison que la complexité du modèle utilisé montre tout son intérêt. Il conviendrait néanmoins de réaliser les mêmes études sans couplage thermique avec l'air extérieur pour la saison hivernale. Pour les applications concernant l'été, la sortie observée concerne le confort thermique intérieur via la température opérative intérieure pour une semaine estivale.

L'intégration du nouveau modèle de surface à *Solene-microclimat* a permis de montrer que l'impact positif de la végétalisation des façades sur le comportement thermique des bâtiments se limite aux bâtiments peu isolés. L'apposition de végétation sur les surfaces urbaines montre néanmoins une très bonne capacité à limiter l'inconfort thermique en période estivale dans ce cas, à la fois par son effet direct sur le bâtiment végétalisé et par son effet indirect sur les constructions environnantes non végétalisées. L'effet direct est principalement dû à la réduction du rayonnement solaire incident ainsi qu'à l'évaporation de l'eau du substrat. La présence de la couverture végétale provoque cependant une diminution du rafraîchissement par convection et par rayonnement GLO dont il conviendrait d'estimer l'efficacité en hiver.

L'évapotranspiration entraîne une importante diminution de la température rayonnante des surfaces exposées au soleil. L'effet indirect passe ainsi principalement par une modification du bilan de rayonnement GLO sur la scène, et dans une moindre mesure par la diminution de la température de l'air extérieur.

Perspectives

Étant donné la richesse et la diversité des outils mis en œuvre, les perspectives envisagées sont nombreuses aussi bien en termes de modélisation, de validation, d'implémentation ou d'utilisation de l'outil de simulation couplé. Un certain nombre d'entre elles ont déjà été citées par Bouyer [2009] tandis que d'autres ont été abordées dans ce mémoire.

Modélisation

Au niveau du couplage, il semble que le modèle aéraulique présente certaines limites comme de fortes augmentations des températures d'air au niveau des recirculations aérauliques qui sont préoccupantes. Elles peuvent être liées au modèle de turbulence utilisé ou à la méthode de couplage et mériteraient de plus amples investigations.

Les modèles de surface végétale ont certes été améliorés, mais le lien avec le comportement hydrique du sol n'a toujours pas été réalisé alors qu'il avait été envisagé au début de la thèse. Ce lien est également nécessaire pour mieux représenter le comportement hydrique des arbres.

Enfin, le modèle de bâtiment pourrait être plus précis. Il a ainsi été montré que le temps de calcul nécessaire au bilan thermique était relativement faible par rapport aux calculs aérauliques et surtout radiatifs. Les améliorations peuvent être de plusieurs ordres :

- simulation simultanée de plusieurs bâtiments d'étude sur une même scène urbaine,
- discrétisation plus fine de la surface intérieure des parois, notamment en fonction de l'orientation des façades,
- prise en compte de la ventilation naturelle en fonction des forces naturelles (tirage thermique et vent).

Une autre idée liée à la modélisation thermique des bâtiments serait de fournir des méthodes et des outils pour améliorer la paramétrisation thermique de celui-ci, notamment par rapport à la représentation du comportement des usagers ou des systèmes et leur évolution au cours de la journée.

Validation

Les limites du code de thermique du bâtiment, en ce qui concerne la modélisation ne sont cependant pas les plus préoccupantes. Les modèles mis en œuvre ont fait leurs preuves tant en termes d'efficacité que de précision. Cela ne nous met pas à l'abri d'erreurs d'implémentation ou numériques. Encore une fois, il est nécessaire de valider le modèle de bâtiment indépendamment de ses interactions avec le milieu extérieur. Une solution est de comparer les résultats obtenus sur une géométrie simple avec des modèles thermiques de bâtiment largement validés comme **EnergyPlus**, **ESP-r** ou **TRNSys**. Ces comparaisons permettraient à la fois de vérifier la précision des variables de sortie (consommation énergétique, température intérieure) mais également le poids respectif de chacun des flux thermiques (renouvellement d'air, flux transmis par conduction à travers les parois, rayonnement solaire...) et ainsi de préciser les parties du modèle sur lesquelles il serait le plus important de focaliser les développements.

Il s'agissait ici de rappeler la démarche de validation qui serait la plus bénéfique à court terme. De nombreuses autres pistes de validation ont été abordées dans le chapitre 3.

Utilisation du modèle Solene-microclimat

L'augmentation incessante des capacités de calcul des ordinateurs, l'utilisation d'un grand nombre de processeurs et la perspective de l'utilisation de l'architecture massivement parallèle des processeurs graphiques permet d'envisager de représenter de plus en plus de phénomènes physiques et de façon de plus en plus précise. Les questions qui demeurent sur les interactions entre le comportement thermique des bâtiments, l'atmosphère, la végétation

et les sols pourraient ainsi être mieux appréhendées.

Dans certains cas, le perfectionnement des modèles peut donc être souhaitable. Il ne peut être réalisé qu'au risque de rendre inutilisables les outils en raison d'un trop grand nombre de données d'entrée ou d'un fonctionnement trop complexe.

Il conviendrait de mieux distinguer les utilisations que l'on peut faire du modèle **Solene-microclimat** en fonction de l'objectif recherché.

Solene-microclimat, modèle de connaissance

En tant que modèle de connaissance, **Solene-microclimat** devrait être utilisé en premier lieu sur des géométries simples telles que des rues canyon ou des morphologies de type plot. Dans ce type d'études, il serait plus aisé d'analyser les résultats et de les comparer éventuellement avec ceux obtenus à l'aide d'outils dont les modèles géométriques sont également plus simplifiés, ou avec des résultats expérimentaux. Après ces validations sur des géométries simples, une seconde phase de validation pourrait être effectuée sur des cas d'étude réalistes.

En tant que modèle de connaissance, **Solene-microclimat** doit permettre de développer les connaissances sur les transferts de masse et d'énergie au sein de la canopée urbaine afin d'améliorer la représentation de ces processus dans les modèles à plus grande échelle, ou dans les modèles dont la géométrie n'est pas explicitement représentée. Pour cela, il peut être utilisé pour étudier différentes géométries urbaines et modes d'occupation des sols afin de faire ressortir les paramétrisations nécessaires aux modèles à plus grande échelle comme **ARPS-canopée**

Dans le même ordre d'idée, mais à une autre échelle, le modèle **Solene-microclimat** doit également permettre d'améliorer la représentation de l'effet de l'aménagement sur le comportement thermique des bâtiments, afin qu'il soit mieux pris en compte dans les modèles de thermique du bâtiment. L'environnement pourrait ainsi être considéré de manière simplifiée, forfaitaire ou paramétrique.

Solene-microclimat, outil d'aide à la conception

Utiliser **Solene-microclimat** en tant qu'outil d'aide à la conception permet de profiter pleinement de son principal intérêt par rapport aux modèles paramétriques, à savoir la représentation explicite de la géométrie, même complexe. En permettant de calculer de façon très précise les apports solaires et le bilan de rayonnement infrarouge dans la scène urbaine, le modèle **Solene-microclimat** permet déjà, sans couplage avec un modèle aéraulique,

de prendre en compte les principaux effets de l'environnement construit sur le comportement thermique d'un bâtiment, ce que la plupart des modèles de thermique du bâtiment ne peut pas faire.

Étude des effets de la végétation sur le microclimat urbain et sur le comportement thermique des bâtiments

Tous les outils sont en place pour continuer l'étude de l'effet de la végétation sur le comportement thermique des bâtiments. De nombreux aspects n'ont pas été abordés faute de temps, parmi lesquels :

- l'effet d'autres dispositifs végétaux comme les plantes grimpantes, directement sur la paroi ou sur un support,
- l'effet du stress hydrique sur l'efficacité des dispositifs végétaux,
- l'effet de différentes configurations végétales en fonction de la quantité de façades recouvertes et de leur orientation.

Enfin, même si ce type d'exploitation ne faisait pas explicitement partie de notre travail de thèse, les différents résultats obtenus, et notamment l'étude des bilans thermiques de surface, laissent penser que l'effet des façades végétales serait particulièrement intéressant sur le confort thermique extérieur. Cette partie sera traitée dans la suite du projet ANR/Villes Durables VegDUD.

Annexes

Annexe A : Liste des logiciels utilisés

Simulation

`Code_Saturne` version 2.0

- licence : GNU GPL
- site internet : <http://code-saturne.org>
- éditeur : EDF

`Solene` version 2.0beta

- licence : propriétaire
- site internet : <http://solene.cerma.archi.fr>
- éditeur : CERMA

`python` version 2.6.5

- licence : PSF Licence
- site internet : <http://www.python.org/>
- éditeur : Python Software Foundation
- utilisé avec le terminal `ipython` version 0.10

`python-numpy` version 1.3.0

- licence : BSD
- site internet : <http://numpy.scipy.org>
- éditeur : projet communautaire

Modélisation géométrique

`Salome` version 5.1.3

- licence : GNU LGPL
- site internet : <http://www.salome-platform.org>
- éditeur : OPEN CASCAD S.A.S.
- remarque : utilisation du module géométrique avec des scripts python

`Gmsh` version 2.4.2

- licence : GNU GPL

- site internet : <http://geuz.org/gmsh/>
- éditeur : Christophe Geuzaine et Jean-Francois Remacle

Traîtement des données

`Paraview` version 3.8.0

- licence : BSD
- site internet : <http://www.paraview.org>
- éditeur : Sandia National Laboratory, Kitware Inc, Los Alamos National Laboratory

`gnnumeric` version 1.10.17

- licence : GNU GPL
- site internet : <http://projects.gnome.org/gnumeric>
- éditeur : GNOME Office project

`python-matplotlib` version 1.1.1

- licence : PSF Licence
- site internet : <http://www.matplotlib.org>
- éditeur : projet communautaire

Développement, gestion de version

`emacs` version 23.1 et 23.3

- licence : GNU GPL
- site internet : <http://www.gnu.org/software/emacs>
- éditeur : Free Software Foundation, Inc.
- remarque : utilisé pour le développement `fortran`, `C`, `python` et `LATEX`

`spyder` version 1.1beta

- licence : GNU GPL
- site internet : <http://packages.python.org/spyder>
- éditeur : Pierre Ribaud

`subversion` version 1.6.6

- licence : Apache/BSD
- site internet : <http://subversion.apache.org>
- éditeur : CollabNet, Inc.
- remarque : projet `solenetb` hébergé sur le service <https://sourcesup.renater.fr>

`git` version 1.7.9.6

- licence : GNU GPL
- site internet : <http://git-scm.com>
- éditeur : projet communautaire

- remarque : utilisé pour la rédaction du mémoire, projet `gwmicroclim` hébergé sur <http://www.gitorious.org>

Édition, graphisme

L^AT_EX version 2 ϵ

- licence : LPPL
- site internet : <http://www.latex-project.org>
- éditeur : projet communautaire

the **Gimp** version 2.6 à 2.8.2














- licence : GNU GPL
- site internet : <http://www.gimp.org>
- éditeur : The Gimp team

Inkscape version 0.47 et 0.48

- licence : GNU GPL
- site internet : <http://www.inkscape.org/>
- éditeur : projet communautaire

Annexe B : Résultats détaillés du chapitre 6

Les résultats du chapitre 6 concernant les conditions de confort à l'intérieur du bâtiment à partir de la méthode du confort adaptatif sont détaillés ci-après pour chacun des treize cas simulés. Le premier graphique représente la répartition en catégories de confort durant la semaine d'étude, pour les cinq étages et cumulé sur l'ensemble du bâtiment. Les deux graphiques suivants représentent les températures intérieures simulées (T_{int}) en fonction de la température extérieure en moyenne glissante (Θ_m) et de la température extérieure brute (T_{meteo}). La légende commune à ces trois graphes est la suivante :

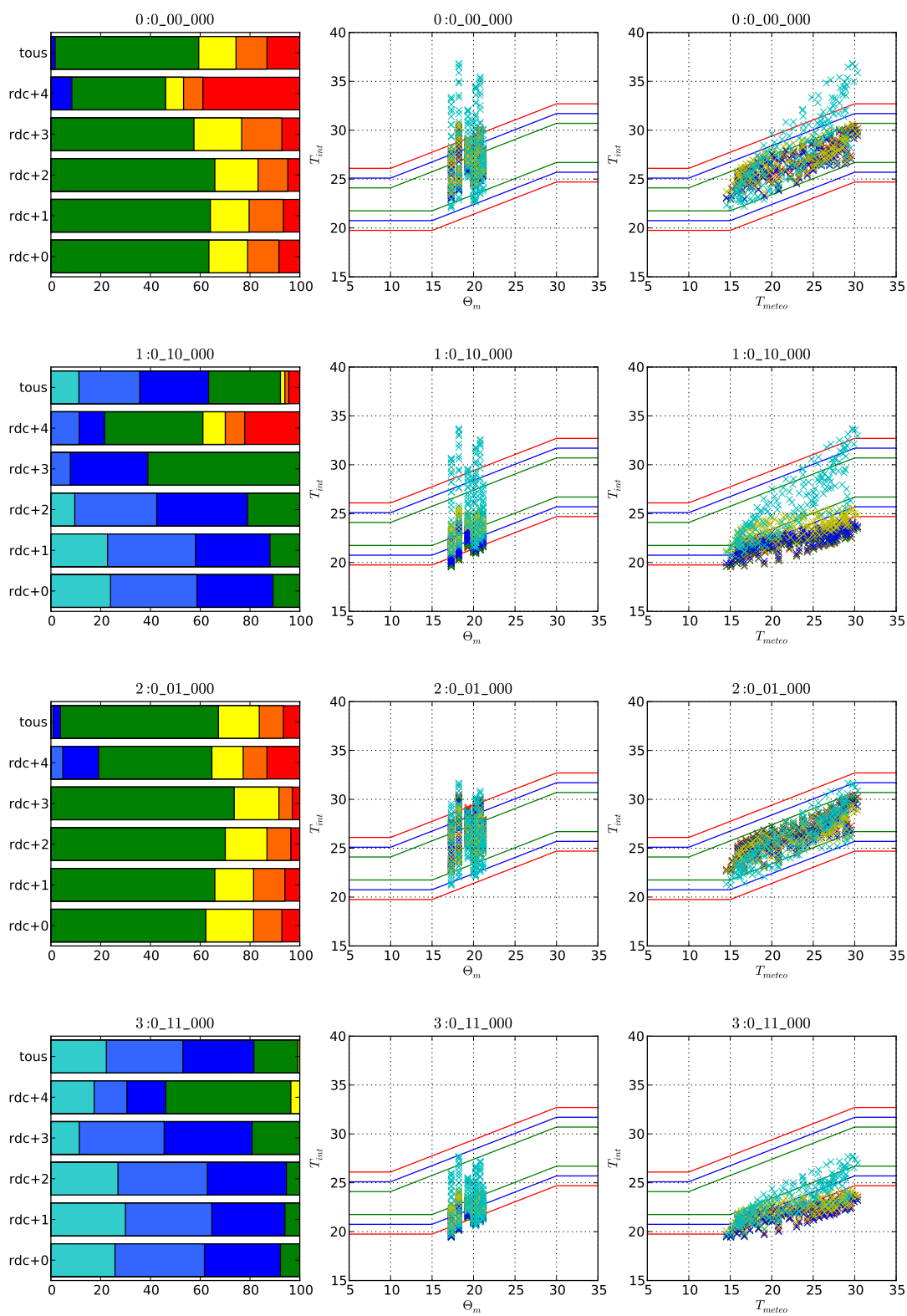
Catégories de confort thermique			RdC	Limites des zones de confort thermique	
	I		RdC+1		I - II
	II+		II-		RdC +2
	III+		III-		RdC +3
	IV+		IV-		RdC +4
					III - IV

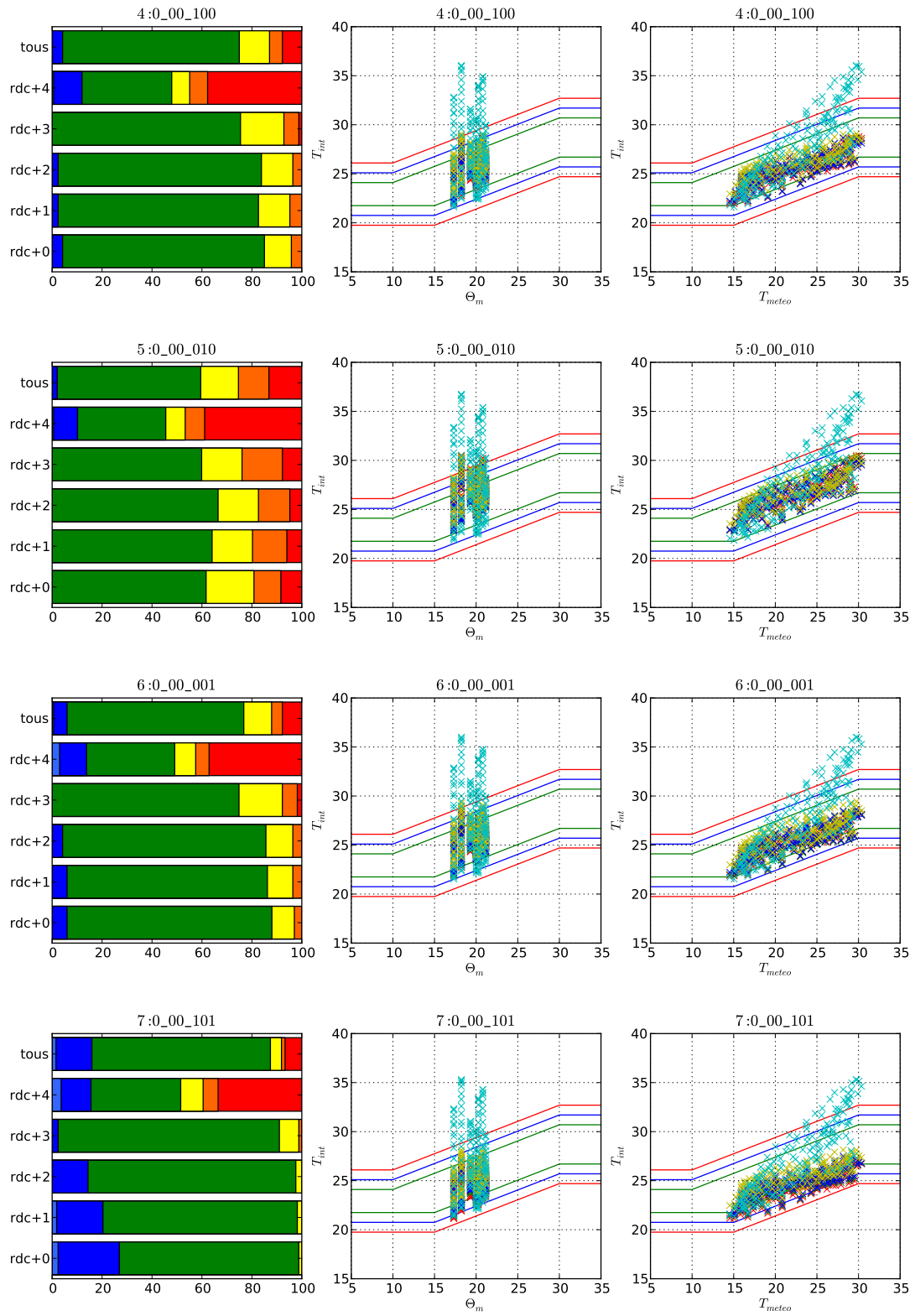
En plus de leur référence donnée dans le Tableau 6.1, les configurations sont repérées grâce à un code composé de six chiffres binaires séparés en trois groupes (**a** : isolation thermique du bâtiment d'étude, **bc** : végétalisation du bâtiment d'étude, **def** : végétalisation de la scène urbaine) : **a_bc_def**

Chaque chiffre correspond à l'une des variables de la configuration thermique ou végétale :

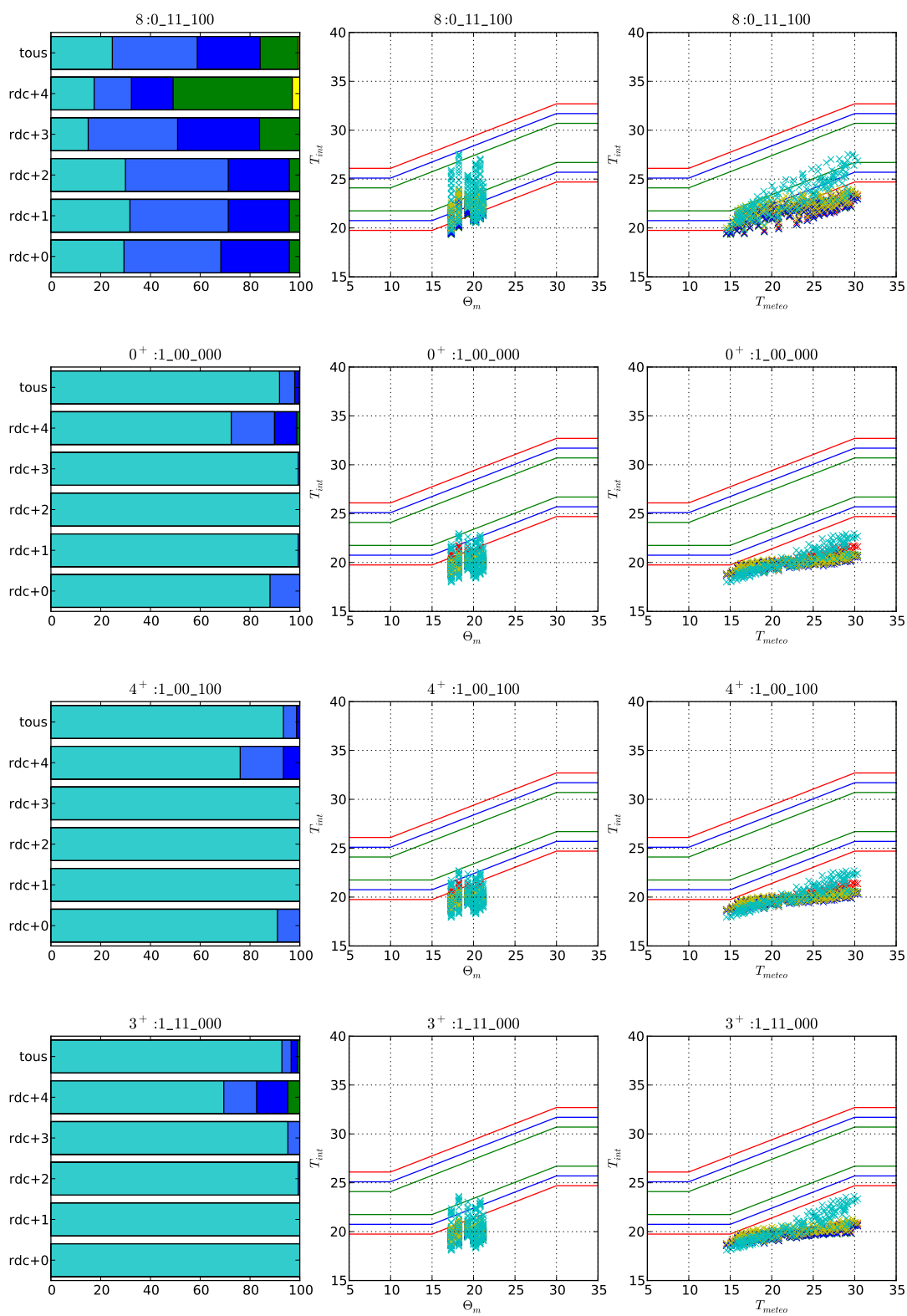
- a présence ou non de l'isolation thermique du bâtiment d'étude,
- b végétalisation des façades du bâtiment d'étude,
- c végétalisation de la toiture du bâtiment d'étude,
- d végétalisation des façades de la scène urbaine,
- e végétalisation des toitures de la scène urbaine,
- f végétalisation du sol de la scène urbaine.

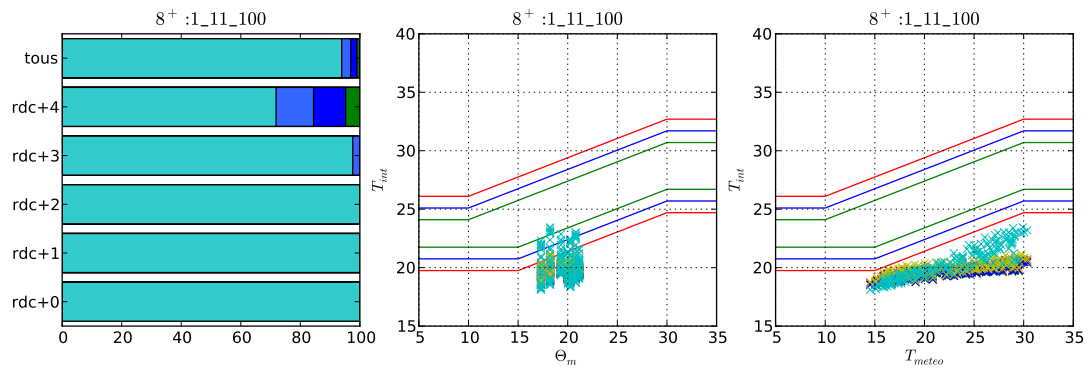
Annexe B





Annexe B





Références bibliographiques

- AFNOR. *NF EN 15251 : Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieure, la thermique, l'éclairage et l'acoustique*. 2007.
- H. Akbari. *Cooling our communities : A guidebook on tree planting and light-colored surfacing*. Heat island group / LBL, 1992.
- H. Akbari et S. Konopacki. Calculating energy-saving potentials of heat-island reduction strategies. *Energy Policy*, 33(6) :721–756, 2005.
- H. Akbari, M. Pomerantz, et H. Taha. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3) :295–310, 2001.
- E. Alexandri et P. Jones. 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, 2007.
- E. Alexandri et P. Jones. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment*, 43(4) :480–493, 2008.
- F. Ali-Toudert et H. Mayer. Effects of asymmetry, galleries, overhanging facades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. *Solar Energy*, 81(6) :742–754, 2007.
- R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, et M. Smith. *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- V. Anquetil. Typo 5 : La végétation des scénarios alternatifs. Rapport technique, ANR VegDUD / Plantes & cité, 2011.
- ASHRAE. *Handbook of Fundamental*. 1993.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- A. Belot. *Simulation des échanges d'énergie et de masse d'un couvert végétal : Développement et validation d'un modèle quasi 3D, DART-EB*. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 2007.
- C. A. Biltoft. Customer report for mock urban setting test. Rapport technique, U.S. Army Dugway Proving Ground, 2001.
- B. Blocken, T. Defraeye, D. Derome, et J. Carmeliet. High-resolution CFD simulations for forced convective heat transfer coefficients at the facade of a low-rise building. *Building and Environment*, 44(12) :2396–2412, 2009.
- J. Bouyer. *Modélisation et simulation des microclimats urbains : Impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments*. Thèse de Doctorat, Université de Nantes, École polytechnique de l'Université de Nantes, 2009.
- J. Bouyer, C. Inard, et M. Musy. Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context. *Energy and Buildings*, 43(7) :1549–1559, 2011.
- E. Bozonnet. *Impact des microclimats urbains sur la consommation énergétique des bâtiments : cas de la rue canyon*. Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle, 2005.
- E. Bozonnet, R. Belarbi, et F. Allard. Modelling solar effects on the heat and mass transfer in a street canyon, a simplified approach. *Solar Energy*, 79(1) :10 – 24, 2005.
- M. Bruse et H. Flerer. On the simulation of surface-plant-air interactions inside urban environments. *Environmental Modelling & Software*, 13 : 373–384, 1998.
- C. Cheng, K. K. Cheung, et L. Chu. Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls. *Building and Environment*, 45(8) :1779–1787, 2010.
- C. de Munck. Green roofs for cities : modelling with teb-veg and validation at building scale. In *8th International Conference on Urban Climate, Dublin*, 2012.
- C. de Munck, G. Pigeon, V. Masson, F. Meunier, P. Bousquet, B. Tréméac, M. Merchat, P. Poeuf, et C. Marchandier. How much can air conditioning increase air temperature for a city like paris, france ? *International journal of climatology*, 2012. (sous presse).
- T. Defraeye, B. Blocken, et J. Carmeliet. Convective heat transfer coefficients for exterior building surfaces : Existing correlations and CFD modelling. *Energy Conversion and Management*, 52(1) :512–522, 2011.

- H. F. Di et D. N. Wang. Cooling effect of ivy on a wall. *Experimental heat transfer*, 12 :235–245, 1999.
- M. Doya, E. Bozonnet, et F. Allard. Experimental measurement of cool facades performance in a dense urban environment. *Energy and Buildings*, 2012. sous presse.
- EEA. Urban adaptation to climate change in europe. Rapport technique, Agence Européenne de l’Environnement, 2012.
- M. G. Emmel, M. O. Abadie, et N. Mendes. New external convective heat transfer coefficient correlations for isolated low-rise buildings. *Energy and Buildings*, 39(3) :335–342, 2007.
- E. Eumorfopoulou et K. Kontoleon. Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes. *Building and Environment*, 44 :1024–1038, 2009.
- M. Fahmy et S. Sharples. On the development of an urban passive thermal comfort system in cairo, egypt. *Building and Environment*, 44(9) :1907 – 1916, 2009.
- W. Fang, Z. Xiaosong, T. Junjie, et L. Xiuwei. The thermal performance of double skin façade with tillandsia usneoides plant curtain. *Energy and Buildings*, 43(9) :2127–2133, 2011.
- A. Franco, L. Fernández-Cañero, L. Pérez-Urrestarazu, et D. L. Valera. Wind tunnel analysis of artificial substrates used in active living walls for indoor environment conditioning in mediterranean buildings. *Building and Environment*, 51(0) :370–378, 2012.
- J. Franke, A. Hellsten, H. Schlünzen, et B. Carissimo. Quality assurance and improvement of microscale meteorological models : Best practice guideline for the cfd simulation of flows in the urban environment. Rapport technique, COST Action 732, 2007.
- J. Gastellu-Etchegorry, V. Demarez, V. Pinel, et F. Zagolski. Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-d vegetation canopies. *Remote Sensing of Environment*, 58(2) :131 – 156, 1996.
- C. S. Grimmond, M. Blackett, M. Best, J. Barlow, J. Baik, S. Belcher, S. Bohnenstengel, I. Calumet, et F. Chen. The international urban energy balance models comparison project : First results from phase 1. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(6) :1268–1292, 2010.
- C. S. B. Grimmond, M. Blackett, M. J. Best, J.-J. Baik, S. E. Belcher, J. Beringer, S. I. Bohnenstengel, I. Calmet, F. Chen, A. Coutts, A. Dandou, K. Fortuniak, M. L. Gouvea, R. Hamdi, M. Hendry, M. Kanda,

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- T. Kawai, Y. Kawamoto, H. Kondo, E. S. Krayenhoff, S.-H. Lee, T. Lordin, A. Martilli, V. Masson, S. Miao, K. Oleson, R. Ooka, G. Pigeon, A. Porson, Y.-H. Ryu, F. Salamanca, G. Steeneveld, M. Tombrou, J. A. Voogt, D. T. Young, et N. Zhang. Initial results from phase 2 of the international urban energy balance model comparison. *International Journal of Climatology*, 31(2) :244–272, 2011.
- E. Guilloteau. Optimized computation of transfer coefficients in surface layer with different momentum and heat roughness lengths. *Boundary-Layer Meteorology*, 87 :147–160, 1998. 10.1023/A :1000834710811.
- G. Guyot. *Climatologie de l'environnement : Cours et exercices corrigés*. Dunod, 2 edition, 1999.
- A. Hagishima et J. Tanimoto. Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surfaces. *Building and Environment*, 38(7) :873–881, 2003.
- D. Holm. Thermal improvement by means of leaf cover on external walls - a simulation model. *Energy and Buildings*, 14 :19–30, 1989.
- A. Hoyano. Climatological uses of plants for solar control and the effects on the thermal environment of a building. *Energy and Buildings*, 11 :181–199, 1988.
- A. Hénon. *Température mesurées, modélisées, et observées par télédétection infrarouge, dans la canopée urbaine : modélisation aéro-thermo-radiative des flux de chaleur urbains*. Thèse de Doctorat, École Centrale de Nantes, 2008.
- A. Hénon, P. G. Mestayer, D. Groleau, et J. Voogt. High resolution thermo-radiative modeling of an urban fragment in marseilles city center during the UBL-ESCOMPTE campaign. *Building and Environment*, 46(9) :1747–1764, 2011.
- K. Ip, M. Lam, et A. Miller. Shading performance of a vertical deciduous climbing plant canopy. *Building and Environment*, 45 :81–88, 2010.
- S. E. G. Jayamaha, N. E. Wijesundera, et S. K. Chou. Measurement of the heat transfer coefficient for walls. *Building and Environment*, 31(5) : 399–407, 1996.
- C. Jim et H. He. Estimating heat flux transmission of vertical greenery ecosystem. *Ecological Engineering*, 37 :1112–1122, 2011.
- S. K. Jusuf et N. H. Wong. Development of empirical models for an estate level air temperature prediction in singapore. In *Second International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands, Barkley, California, USA*, 2009.

- K. Kontoleon et E. Eumorfopoulou. The effect of the orientation and proportion of a plant-covered wall layer on the thermal performance of a building zone. *Building and Environment*, 45 :1287–1303, 2009.
- E. S. Krayenhoff et J. A. Voegt. A microscale three-dimensional urban energy balance model for studying surface temperatures. *Boundary-Layer Meteorology*, 123(3) :433–461, 2007.
- R. Kumar et S. Kaushik. Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings. *Building and Environment*, 40 :1505–1511, 2005.
- J. H. Kämpf et D. Robinson. A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows. *Energy and Buildings*, 39(4) :445 – 453, 2007.
- E. Lahme et M. Bruse. Microclimatic effects of a small urban park in a densely build up area : measurements and model simulations. In *ICUC5 Fifth International Conference on Urban Climate, 1-5 September 2003, Lodz, Poland*, 2003.
- A. Lemonsu, V. Masson, L. Shashua-Bar, E. Erel, et D. Pearlmutter. Inclusion of vegetation in the town energy balance model for modeling urban green areas. *Geoscientific Model Development Discussions*, 5 :1295–1340, 2012.
- F. Lindberg et C. Grimmond. Nature of vegetation and building morphology characteristics across a city : Influence on shadow patterns and mean radiant temperatures in london. *Urban Ecosystems*, 14 :617–634, 2011.
- D. Loveday et A. Taki. Convective heat transfer coefficients at a plane surface on a full-scale building facade. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39(8) :1729–1742, 1996.
- L. Malys et M. Musy. Caractéristiques radiatives des couvertures végétales de façade. In *IBPSA France 2010, Moret-sur-Loing*, 2010.
- V. Masson. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, 94 :1377–1397, 2000.
- F. Miguet. *Paramètres physiques des ambiances architecturales : Un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans le projet urbain*. Thèse de Doctorat, Université de Nantes, École polytechnique de l’Université de Nantes, 2000.
- F. Miguet et D. Groleau. A daylight simulation tool for urban and architectural spaces—application to transmitted direct and diffuse light through glazing. *Building and Environment*, 37(8–9) :833 – 843, 2002.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- A. Miller, K. Ip, K. Shaw, et M. Lam. Case study report - vegetation on building facades "bioshader". Rapport technique, Durabuild, 2004.
- M. Milliez. *Modélisation micro-météorologique en milieu urbain : dispersion des polluants et prise en compte des effets radiatifs*. Thèse de Doctorat, ENPC/Paritech, 2006.
- J. L. Monteith et M. H. Unsworth. *Principles of Environmental Physics*. Academic Press, 2^e édition, 1990.
- L. Mora. *Prédiction des performances thermo-aéraulique des bâtiments par association de modèles de différents niveaux de finesse au sein d'un environnement orienté objet*. Thèse de Doctorat, Université de la Rochelle, 2003.
- M. Musy. Vegdud project : Role of vegetation in sustainable urban development. In *8th International Conference on Urban Climate, Dublin*, 2012.
- NMA. Dossier de réalisation de la zac malakoff centre. Rapport technique, Nantes Métropole Aménagement, 2011.
- T. R. Oke. *Boundary layer climates*. Routledge, 1987.
- S. Ouldboukhitine, R. Belarbi, I. Jaffal, et A. Trabelsi. Assessment of green roof thermal behavior : A coupled heat and mass transfer model. *Building and Environment*, 46(12) :2624–2631, 2011.
- J. Page, D. Robinson, N. Morel, et J.-L. Scartezzini. A generalised stochastic model for the simulation of occupant presence. *Energy and Buildings*, 40(2) :83 – 98, 2008.
- E. Palomo. Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings*, 27(2) :179–193, 1998.
- J. Palyvos. A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems' modeling. *Applied Thermal Engineering*, 28(8-9) :801–808, 2008.
- R. Perez, R. Seals, P. Ineichen, R. Stewart, et D. Menicucci. A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Solar Energy*, 39(3) :221 – 231, 1987.
- G. Pigeon. Development and evaluation of a building energy model in teb. In *8th International Conference on Urban Climate, Dublin*, 2012.
- G. Pérez, L. Rincón, A. Vila, J. González, et L. Cabeza. Behaviour of green facades in mediterranean continental climate. *Energy Conversion and Management*, 52(4) :1861–1867, 2011.

- Y. Qu. *Three-dimensional modeling of radiative and convective exchanges in the urban atmosphere*. Thèse de Doctorat, ENPC/Paritech, 2011.
- Y. Qu, M. Milliez, L. Musson-Genon, et B. Carissimo. Numerical study of the thermal effects of buildings on low-speed airflow taking into account 3D atmospheric radiation in urban canopy. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 104106(0) :474–483, 2012.
- D. Robinson, N. Campbell, W. Gaiser, K. Kabel, A. Le-Mouel, N. Morel, J. Page, S. Stankovic, et A. Stone. Suntool - a new modelling paradigm for simulating and optimising urban sustainability. *Solar Energy*, 81(9) : 1196–1211, 2007.
- D. Robinson, F. Haldi, J. Kämpf, P. Leroux, D. Perez, A. Rasheed, et U. Wilke. Citysim : comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning. In *Eleventh International IBPSA Conference*, 2009.
- M. Robitu. *étude de l'interaction entre le bâtiment et son environnement urbain : influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs*. Thèse de Doctorat, Université de Nantes, École polytechnique de l'Université de Nantes, 2005.
- A. H. Rosenfeld, H. Akbari, S. Bretz, B. L. Fishman, D. M. Kurn, D. Sailor, et H. Taha. Mitigation of urban heat islands : materials, utility programs, updates. *Energy and Buildings*, 22(3) :255–265, 1995.
- J. J. Roux. *Proposition de modèles simplifiés pour l'étude du comportement thermique des bâtiments*. Thèse de Doctorat, INSA Lyon, 1984.
- D. Sailor. A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings*, 40(8) :1466 – 1478, 2008.
- M. Santamouris, D. N. Asimakopoulos, V. D. Assimakopoulos, N. Chrisomallidou, N. Klitsikas, D. Mangold, P. Michel, et A. Tsangrassoulis. *Energy and climate in the urban built environment*. James and James, 2001.
- J. Shao, J. Liu, J. Zhao, W. Zhang, D. Sun, et Z. Fu. A novel method for full-scale measurement of the external convective heat transfer coefficient for building horizontal roof. *Energy and Buildings*, 41(8) :840–847, 2009.
- J.-F. Sini, S. Anquetin, et P. G. Mestayer. Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons. *Atmospheric Environment*, 30(15) :2659 – 2677, 1996.
- W. Stec, A. van Paassen, et A. Maziarz. Modelling the double skin façade with plants. *Energy and Buildings*, 37 :419–427, 2005.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- T. Sternberg, H. Viles, et A. Cathersides. Evaluating the role of ivy (*Hedera helix*) in moderating wall surface microclimates and contributing to the bioprotection of historic buildings. *Building and Environment*, 46(2) :293–297, 2011.
- Y. Tominaga, A. Mochida, R. Yoshie, H. Kataoka, T. Nozu, et M. Y. and-Taichi Shirasawa. Aij guidelines for practical applications of cfd to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96 :1749–1761, 2008.
- C. Tzoumarakis, V. D. Assimakopoulos, I. Tsiros, M. Hoffman, et A. Chronopoulou. Thermal performance of a vegetated wall during hot and cold weather conditions. In *PLEA 2008, 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin*, 2008.
- J. Vinet. *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*. Thèse de Doctorat, Université de Nantes, École polytechnique de l'Université de Nantes, 2000.
- N. H. Wong et S. K. Jusuf. Gis-based greenery evaluation on campus master plan. *Landscape and Urban Planning*, 84(2) :166 – 182, 2008.
- N. H. Wong, A. Y. K. Tan, P. Y. Tan, et N. C. Wong. Energy simulation of vertical greenery systems. *Energy and Buildings*, 41 :1401–1408, 2009.
- N. H. Wong, A. Y. K. Tan, Y. Chen, K. Sekar, P. Y. Tan, D. Chan, K. Chiang, et N. C. Wong. Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment*, 45 :663–672, 2010.
- N. H. Wong, S. K. Jusuf, N. I. Syafii, Y. Chen, N. Hajadi, H. Sathyanarayanan, et Y. V. Manickavasagam. Evaluation of the impact of the surrounding urban morphology on building energy consumption. *Solar Energy*, 85 :57 – 71, 2011.
- L. Zaiyi et J. Niu. Study on thermal function of ivy-covered walls. In *Conference on architecture and technology for sub-tropical climates*, 1998.
- Z. Zhai et Q. Y. Chen. Numerical determination and treatment of convective heat transfer coefficient in the coupled building energy and CFD simulation. *Building and Environment*, 39(8) :1001–1009, 2004.