



HAL
open science

Prise en compte cumulée du réchauffement climatique et des surchauffes urbaines en phase amont de conception frugale des bâtiments centrée sur le confort des occupants : des propositions méthodologiques

Nicolas Lauzet

► To cite this version:

Nicolas Lauzet. Prise en compte cumulée du réchauffement climatique et des surchauffes urbaines en phase amont de conception frugale des bâtiments centrée sur le confort des occupants : des propositions méthodologiques. Thermique [physics.class-ph]. Université de Bretagne Sud, 2019. Français. NNT : 2019LORIS551 . tel-02943220

HAL Id: tel-02943220

<https://theses.hal.science/tel-02943220>

Submitted on 18 Sep 2020

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

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

THESE DE DOCTORAT

UNIVERSITE BRETAGNE SUD
COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

ECOLE DOCTORALE N° 602
Sciences pour l'Ingénieur
Spécialité : Energétique-Thermique-Combustion

Par

Nicolas LAUZET

Prise en compte cumulée du CHANGEMENT CLIMATIQUE et des SURCHAUFFES URBAINES en phase amont de CONCEPTION FRUGALE DES BÂTIMENTS centrée sur le CONFORT DES OCCUPANTS. Des propositions méthodologiques

Thèse présentée et soutenue à Nantes, le 13 décembre 2019
Unité de recherche : IRDL UMR CNRS 6027
Thèse N° : 551

Rapporteurs avant soutenance :

Etienne WURTZ Directeur de Recherche, CEA LOCIE
Thierry DUFORESTEL Ingénieur sénior, HDR, EDF R&D

Composition du Jury :

Président :	Etienne WURTZ	Directeur de Recherche, CEA LOCIE
Rapporteurs :	Etienne WURTZ Thierry DUFORESTEL	Directeur de Recherche, CEA LOCIE Ingénieur sénior, HDR, EDF R&D
Examineurs :	Nadia HOYET Emmanuel BOZONNET	Professeur Emérite, ENSAV Maitre de Conférence, HDR, Université de La Rochelle
Dir. de thèse :	Marjorie MUSY	Directrice de Recherche, CEREMA Ouest
Co-dir. de thèse :	Thibaut COLINART	Maitre de conférences, Université de Bretagne Sud

Invité(s)

Karine LAPRAY Ingénieur sénior, co-gérante de la société TRIBU

Prise en compte cumulée du CHANGEMENT CLIMATIQUE et des SURCHAUFFES
URBAINES en phase amont de CONCEPTION FRUGALE DES BÂTIMENTS centrée
sur le CONFORT DES OCCUPANTS. Des propositions méthodologiques.

Nicolas Lauzet

13 décembre 2019

à Inès, Françoise, et Patrick

Remerciements

A mes encadrants qui ont été essentiels dans l'accomplissement de cette thèse. Karine, merci d'avoir partagé ta riche expérience de la construction urbaine et merci pour tes nombreuses attentions et ton soutien. Marjorie, merci de ta confiance et de ta clairvoyance sur ce sujet, merci pour ton positif et ton courage. Thibaut, merci d'avoir relevé le défi, nos échanges ont donné de la cohérence à ce travail, merci de ton intégration pour avoir formé un trio d'encadrants de rêve.

Je remercie Etienne Wurtz et Thierry Duforestel d'avoir rapporté mon mémoire de thèse. Merci à Nadia Hoyet et Emmanuel Bozonnet d'avoir été examinateurs. Merci aussi à Lou Chesné et Patrick Glouannec d'avoir accepté de faire partie de mon comité de suivi individuel.

Merci à Dasaraden de l'EPFL d'avoir grandement participé à ce projet avec les simulations CIM. Merci également à Auline, Marie-Hélène, et Sihem.

Merci merci merci au bureau d'études TRIBU qui m'a offert cette expérience. Grosse pensée aux personnes des agences de Nantes et Paris, et une énorme pensée aux lyonnais !!!...avec qui j'ai partagé 3 ans de vie 😊. Justine, Jade, Olivier, Karine, Marie, Héloïse, Elodie, Pierre-Alain, Matthieu, Sarah, Sylvaine, Vinciane, Mathilde, Maxime, Morgan, Margot, Laura, Blandine, Océane, Gwendal, Lucas.

Merci aussi aux voisins de VAD 😊.

Plus personnellement, merci mes amis !!! Les frères Edmond et Rémi (mes bichons), papa Clemtar, la paire Fifi & Nico, Marie-Lou, Tatoush, Lulu, Gautier, Nono, Camille (Limace), Liesbeth. Merci aussi à ma famille de danse, de Forro ! Marilia, Amaya, Laura, Yorky, Edouardo, Adrienn, Enna, Alfredo, Christophe, Gaël, Gefirson, Cindy, Thiago, Jayane, Didier, Martine, Hélène et tous les autres...je vous adore.

Merci à mes amis bretons ! à l'aise Breizh ! Lydie, Diem, JB, Gus, Sarah, Lulu, Momo, Nono, Manon, papi Jerem, Sylvain, Guigui, Thom, Sarah, Mel, Prisc, Léo, Chloé, Benjamin et Jérémy. Merci d'être toujours là malgré la distance 😊.

Enfin je remercie ma famille, ceux qui sont là depuis le début et qui seront là tant qu'ils pourront. Inès, je suis sincèrement et profondément heureux de notre relation frère et sœur, j'adore notre complicité. Françoise, je t'aime maman. Merci de faire tout ton possible pour les autres #Respect. Patrick, t'es mon pops, mon coach, mon partenaire de foot, de pingpong, de vélo, de tennis...merci de ta gentillesse pure, tu n'attends rien de moi, ce n'est qu'amour, et je te remercie pour l'exemple.

Merci aux tontons, tatas, papis, mamie, cousins, cousines, avec une mention spéciale à Sophie, merci pour ton soutien Sophie.

Si tu lis ces remerciements et que tu ne vois pas ton prénom, tu es ICI et je te remercie aussi !!!

La fin d'un cycle, le début d'un nouveau...merci à tous et à bientôt.

Nicolas, Nico, Nick, Nicky, Nini

Mes âmes et mes d... euh, mesdames et messieurs, que connaissez-vous du pacha-sait ? Qu'est-ce que le pacha-sait ? Le pacha-sait c'est un sot(saut) -pas un bon(d), j'insiste- qui lorsqu'on est pacha, d'un pas chaloupé consiste à éjecter hors de sa piste les sista et les bro qui sur la patate en ont gros des pas chassés que les pachas font dans leurs jardins et qui, affamé.e.s, affrontent à pas lents le dédain des pachas qui pâlisent à l'idée que l'autre ne salisse leurs palais. Le pacha-sait, c'est du sport, le pacha-sait c'est courir comme un porc, lorsque la réalité te colle aux trousses, faire brûler des forêts dans la brousse pour épaissir -non sans une certaine tendresse- les murs de sa conforteresse, le pacha-sait c'est une farce de folles et de fous pissant dans leurs propres poumons en rêvant d'aller vivre sur mars. Le pacha sait, alors le pacha flippe, mais le pacha siège, alors il pro-tège. Il crache depuis son palace sur le bitume qu'il salit. Chaussée lointaine que rien pourtant n'efface. Pas même la folie, pas même le faste des banquets. Parfois, comme projectile du haut des remparts, habiles, les pachas jettent les os de leurs poulets. Et lorsqu'ils ont trop chaud, que le soleil les brûle, c'est en funambules qu'ils escaladent les cimes du baromètre du climat, euh, de la clim' ('xcusez moi) et ferment les portes de leurs froides maisons. Le voilà l'apport de la peur, porte vers l'enfers, envers du profit : Frontières précieuses, xénophobie. Le pacha sait, mais toujours nie. Pacha scie la branche sur laquelle il est assis. Et si encore il était seul... Mais nous sommes des milliards, lié.e.s -même lorsqu'il se fait corbillard- à ce seul sol, et ce seul ciel, et cet océan. Pacha, tu es grand. Mais jamais on a vu un humain, une liasse de bif' à la main, soudoyer un tsunami. Face à une vague de vingt mètres de haut, on ne prend plus le monde pour son arène : la reine, c'est l'eau. ... Dont nous risquons de manquer dans les années à venir. Peut-être pas toi pacha ni moi d'ailleurs... Car bien que je t'accuse toi et moi sommes de la même cuvée. Et dans les verres incurvés de mes lunettes de myope se reflètent plus souvent les produits de la Biocoop que les mains tendues de ceux et celles dont on n'entend pas assez la voix. Pacha loupée peut-être, mais pacha quand même. Alors quoi ?

Slam écrit par LLIMACE (Camille Martin)

Encadrement	<p>Karine Lapray, TRIBU, Responsable scientifique</p> <p>Marjorie Musy, CEREMA Ouest, Co-directrice</p> <p>Thibaut Colinart, IRDL, Université de Bretagne Sud, Co-directeur</p>	
Comité de suivi individuel	<p>Lou Chesné, EDF R&D</p> <p>Patrick Glouannec, IRDL, Université de Bretagne Sud</p>	
Entreprise	<p>TRIBU, accueil à l'agence de Lyon (69)</p>	
Laboratoire	<p>Institut de recherche Dupuy de Lôme, à Lorient (56)</p>	
Financement	<p>Thèse CIFRE,</p> <p>Les Cifre sont intégralement financées par le ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation qui en a confié la mise en œuvre à l'ANRT.</p>	 

Résumé

Alors que les prévisions climatiques du GIEC sont de plus en plus avancées et que les phénomènes relatifs à l'îlot de Chaleur Urbain (ICU) sont de mieux en mieux cernés, les uns et les autres ne sont toujours pas pris en compte dans la conception actuelle des bâtiments.

- Comment prendre en compte le changement climatique à l'échelle globale et les surchauffes urbaines en phase de conception des bâtiments ?

- Quels sont les impacts sur la thermique des bâtiments ? Quels critères de confort pour orienter les choix des concepteurs motivés par la frugalité ?

La première partie de ce mémoire présente comment la thermique du bâtiment « voit » le climat. Actuellement, les bureaux d'études utilisent des météo moyennées sur 10 ou 30 ans de mesures qui donnent un fichier météo représentatif du climat d'une zone, mais qui suppriment les conditions extrêmes comme les vagues de chaleur. Ces dernières constituent et constitueront pourtant de plus en plus des risques sanitaires pour les personnes vulnérables. Une méthodologie est proposée pour choisir une année météorologique réelle en la repositionnant par rapport aux prévisions climatiques du GIEC.

En deuxième partie du manuscrit, l'influence du type de fichier météo utilisé sur les résultats de simulation thermique dynamique (STD) est étudiée sur un bâtiment de logements collectifs situé dans le quartier Confluence à Lyon. Cette étude est centrée sur l'analyse du confort d'été qui est l'enjeu majeur pour l'adaptation aux aléas climatiques. Cette partie contient également des propositions méthodologiques pour l'analyse des risques sanitaires en ambiances intérieures lors des événements extrêmes de canicules.

Enfin en troisième et dernière partie, nous étudions la possibilité d'utiliser les résultats des outils de microclimatologie urbaine en entrée météo des modèles STD. Une expérimentation de chainage entre les outils CitySim et CIM, développés à l'EPFL de Lausanne, est menée sur le même quartier Confluence à Lyon.

Abstract

While the IPCC's climate forecasts are more and more advanced and the phenomena related to the Urban Heat Island (UHI) are well understood, both are still not taken into account in the design of current buildings.

- How to take into account the global warming and urban overheating in buildings' design?
- What are the impacts on the thermal behavior of buildings? What comfort criteria can be proposed to guide the choices of designers motivated by frugality?

The first part of this manuscript presents how the building "sees" the climate. Currently, consulting agencies use averages over 10 or 30 years of measurements that give a weather file representative of the climate of an area, but which remove extreme conditions such as heat waves. However, these are and will increasingly constitute health risks for vulnerable people. A methodology is proposed to choose a real weather year by repositioning it in relation to the IPCC climate forecast.

In the second, the influence of the type of weather file used for buildings simulation on the comfort results is studied for a residential building located in the Confluence district in Lyon. This study focuses on the analysis of summer comfort, which is the major issue for adaptation to current and future climates. This part also contains methodological proposals for the analysis of health risks in indoor environments during extreme heatwave events.

Finally, in the third and last part, we study the possibility of using the results of a urban microclimate tool to produce weather input for the building energy models. A chaining experiment between the CitySim and CIM tools, developed at EPFL Lausanne, is conducted on the same Confluence district in Lyon.

Sommaire

INTRODUCTION	17
PREMIERE PARTIE	
I CHAPITRE 1 DU CLIMAT AUX FICHIERS METEOROLOGIQUES.....	27
I.1 LES DIFFERENTES ECHELLES DU CLIMAT	29
I.1.1 Les climats globaux à l'échelle macroscopique.....	30
I.1.2 Les climats régionaux à l'échelle mésoscopique.....	31
I.1.3 Les climats locaux.....	32
I.1.4 Les microclimats	32
I.2 RECHAUFFEMENT : SYNERGIE DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN ET DU CHANGEMENT CLIMATIQUE GLOBAL.....	33
I.2.1 L'îlot de chaleur urbain.....	33
I.2.2 Le changement climatique global.....	37
I.3 FICHIERS CLIMATIQUES	44
I.4 ÉTAT DE L'ART SUR LA CONSTITUTION DE FICHIERS METEOROLOGIQUES 44	
I.4.1 Les types de fichiers météo utilisés en STD	44
I.4.2 Les fournisseurs de fichiers météo.....	46
I.5 METHODOLOGIE DE COMPARAISON DES DONNEES CLIMATIQUES	48
I.5.1 Quelques notions sur les statistiques et la climatologie	48
I.5.2 Post-traitement : Programmation Python	49
I.6 COMPARAISON DE DONNEES CLIMATIQUES LYONNAISES	50
I.6.1 Comparaison des données annuelles de température.....	51
I.6.2 Comparaison des évolutions horaires de température.....	54
I.6.3 Comparaison des autres sollicitations météorologiques	55
I.6.4 Synthèse	57

I.7	CONCLUSIONS DU CHAPITRE 1.....	57
II	CHAPITRE 2 CHOIX DES FICHIERS METEOS : CHANGEMENT CLIMATIQUE & SURCHAUFFE URBAINE	59
II.1	CAS D'ETUDES, SURCHAUFFE URBAINE DE LYON CONFLUENCE.....	60
II.2	ANALYSE DE SITE	60
II.2.1	Étude initiale de la surchauffe urbaine à Lyon Confluence	62
II.3	CONFIRMATION DES MESURES METEOROLOGIQUES URBAINES ET PERI-URBAINES.....	66
II.3.1	Les ressources de données météo libres.....	66
II.3.2	Caractéristiques des stations météorologiques lyonnaises retenues	67
II.3.3	Validation des mesures météorologiques de CONFLUENCE	70
II.4	CHOIX DES METEO	72
II.4.1	Analyse préliminaire : comparaison d'une année réelle avec les normales climatiques.....	73
II.4.2	Sélection des fichiers représentatifs du changement climatique et de la surchauffe urbaine	73
II.4.3	Distribution statistique des grandeurs météorologiques des fichiers sélectionnés	78
II.5	CONCLUSIONS DU CHAPITRE 2.....	81

DEUXIEME PARTIE

III	CHAPITRE 3 MODELES STD, INCERTITUDE & SENSIBILITE : UN BREF ETAT DE L'ART	85
III.1	MODELES STD	86
III.1.1	Les outils STD étudiés	86
III.1.2	Transferts thermiques par conduction.....	88
III.1.3	Rayonnement Solaire.....	89
III.1.4	Rayonnement Infrarouge	91
III.1.5	Aéraulique.....	93

III.1.6	Hygrométrie	94
III.1.7	Discussions sur les outils STD	95
III.2	SENSIBILITE ET INCERTITUDES EN STD	96
III.2.1	La validation des outils STD.....	96
III.2.2	Incertitudes et analyses de sensibilité STD.....	99
III.3	CONCLUSION DU CHAPITRE 3.....	101
IV	CHAPITRE 4 INFLUENCE DU FICHER METEO SUR LA STD – CONFORT D’ETE & RISQUES SANITAIRES.....	103
IV.1	PRESENTATION DU CAS D’ETUDE	105
IV.1.1	Présentation du bâtiment de logements collectifs « J1a ».....	105
IV.1.2	Scénarii d’usage.....	107
IV.1.3	Modes constructifs et macrocomposants	108
IV.1.4	Niveaux de conception.....	111
IV.1.5	Les météo étudiées.....	111
IV.1.6	Synthèse	112
IV.2	CONFORT THERMIQUE D’ETE ET RISQUES SANITAIRES	113
IV.2.1	L’humain au centre des enjeux de confort thermique.....	113
IV.2.2	Les critères de confort thermique en conception de bâtiments	115
IV.2.3	La quantification des risques sanitaires	123
IV.3	CADRAGE DE L’ANALYSE DE SENSIBILITE.....	124
IV.3.1	Questionnements et axes d’analyses.....	125
IV.3.2	Locaux analysés : Chambre & Séjour	126
IV.4	EXPLOITATION DES RESULTATS.....	127
IV.4.1	Analyse préliminaire : Fichiers météo moyens fictifs vs fichiers météo années réelles....	127
IV.4.2	Axe 1 : Impact du changement climatique	129
IV.4.3	Axe 2 : Impact de la surchauffe urbaine.....	134
IV.4.4	Axe 3 : Aléas climatiques & Niveaux de conception.....	138

IV.4.5	Axe 4 : Aléas climatiques & Modes constructifs	140
IV.5	CONCLUSION DU CHAPITRE 4	143

TROISIEME PARTIE

V CHAPITRE 5 CHAINAGES ET COUPLAGES DE MODELES CLIMATIQUES URBAINS ET D'OUTILS DE STD : ETAT DE L'ART..... 147

V.1	REVIEW - HOW BUILDING ENERGY MODELS TAKE THE LOCAL CLIMATE INTO ACCOUNT IN AN URBAN CONTEXT	148
-----	---	-----

V.2	CONCLUSIONS DU CHAPITRE 5.....	168
-----	--------------------------------	-----

VI CHAPITRE 6 CONSTRUCTION D'UN FICHER MICROCLIMATIQUE URBAIN UTILISABLE EN STD

VI.1	ETUDES NUMERIQUES : PROPOSITION D'UN CHAINAGE LOGICIELS	173
------	---	-----

VI.2	CREATION D'UNE MAQUETTE 3D DE LA SCENE URBAINE	174
------	--	-----

VI.2.1	A partir d'une maquette 3D graphique	174
--------	--	-----

VI.2.2	A partir de bases de données ouvertes de type SIG	176
--------	---	-----

VI.3	MODELISATION DES TEMPERATURES DES SURFACES URBAINES A L'AIDE DE CITYSIM	178
------	---	-----

VI.3.1	Description de l'outil CitySim.....	178
--------	-------------------------------------	-----

VI.3.2	Application au quartier de Lyon Confluence.....	179
--------	---	-----

VI.3.3	Évaluation du modèle détaillé de thermique des bâtiments de CitySim	182
--------	---	-----

VI.3.4	Export des résultats CitySim vers CIM.....	187
--------	--	-----

VI.4	MODELISATION DES TEMPERATURES D'AIR ET DES VITESSES ET DIRECTIONS DE VENT A L'AIDE DE CIM.....	188
------	--	-----

VI.4.1	Description de l'outil CIM	188
--------	----------------------------------	-----

VI.4.2	Application au quartier de Lyon Confluence.....	189
--------	---	-----

VI.4.3	Comparaison des données simulées par le chainage CitySim +CIM aux mesures.....	191
--------	--	-----

VI.5	CONCLUSIONS DU CHAPITRE 6.....	195
------	--------------------------------	-----

CONCLUSIONS GENERALES	197
PERSPECTIVES	199
ANNEXES.....	201
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	213

LISTE DES FIGURES

Introduction

Figure a - Croisement des enjeux de la construction vus par TRIBU (Dessin Héloïse Marie, Source TRIBU).....	17
Figure b - Les phases d'un projet de construction de bâtiment (Lapray et al., 2018).	18
Figure c - Priorités des réflexions d'un projet bâtiment (Dessin Héloïse Marie, source TRIBU).	18
Figure d - Réemploi et recyclage des matériaux de construction (Dessin Héloïse Marie, source TRIBU).	19
Figure e - Positionnement du travail de thèse dans un projet de bâtiment.	20
Figure f - Paramètres influant les résultats d'une STD – La donnée d'entrée météorologique.	21
Figure g - Les 8 zones climatiques selon la RT2012.	22
Figure h - Confort d'été et risques sanitaires des citoyens lors de fortes chaleurs (Source TADAA).	23

Chapitre 1

Figure I. 1 - Échelles climatiques (Sources : a- fr.123rf.com, b- OpenStreetMap, c- auvergnerhonealpes.fr, d- OpenStreetMap , e- Dessin de Vincent Brunot, f- Agence Claudine Colin Communication).	29
Figure I. 2 - Représentation des grandes catégories de climats globaux à l'échelle mondiale (Source Météo France).	30
Figure I. 3 - Représentation des climats français à l'échelle macroscopique (Source http://cybergeog.revues.org/23155).	31
Figure I. 4 - Réseau métropolitain des stations de Météo France, et celles de l'association Infoclimat.	32
Figure I. 5 - Îlot de chaleur nocturne mesuré à Paris lors de la canicule 2003 (moyenne de 15 nuits consécutives, Source : Météo France).	33
Figure I. 6 - Changement d'occupation des sols entre 2006 et 2015 (Source : Agreste – Teruti-Lucas).	35
Figure I. 7 - Schéma théorique des couches atmosphériques au-dessus d'une ville (a) la journée et (b) la nuit (Oke, et al., 2017).	36
Figure I. 8 - Ecart à la normale 1981-2010 des températures moyennes (à l'échelle de la France métropolitaine) de 1900 à 2018 (Source : Météo France).	38
Figure I. 9 - Comparaison des scénarios RCP (traits pleins, 5 ^{ème} Rapport du GIEC 2014) et SRES (tirets, 5 ^{ème} Rapport du GIEC 2007) sur le forçage radiatif.	39
Figure I. 10 - Seuils des indicateurs du « Système d'alerte canicule et santé », actualisés en 2016. Avec Sn la température minimum moyennée sur trois jours et Sx la température maximum moyennée sur trois jours (Wagner, 2018).	41
Figure I. 11 - Caractérisation d'une canicule à l'échelle de la France (Soubeyroux, Schneider, et Ouzeau, 2015), données du 1 ^{er} juillet au 31 août 2006.	41
Figure I. 12 - Estimation des canicules (à l'échelle de la France) sous Aladin-Climat et pour le scénario RCP8.5. La taille des bulles est proportionnelle à la sévérité ou l'intensité globale (°C) des vagues. (Source : METEO FRANCE).	42
Figure I. 13 - Notions d'adaptation et d'atténuation des changements climatiques, enjeux et risques sanitaires (Source : TRIBU).	43

Figure I. 14 - Schéma explicatif de la construction des fichiers climatiques selon les méthodes TRY et TMY.....	45
Figure I. 15 - Distribution des températures horaires de Lyon Bron pour l'année 2013, Météo France.....	49
Figure I. 16 - Comparaison des distributions statistiques des températures des différents fichiers climatiques lyonnais.	51
Figure I. 17 - Cumul de nombre d'heures où la température est inférieure à 0°C des différents fichiers climatiques lyonnais.	52
Figure I. 18 - Cumul de nombre d'heures où la température est inférieure à 14°C des différents fichiers climatiques lyonnais.	53
Figure I. 19 - Degrés Jours Unifiés (DJU) des différents fichiers climatiques lyonnais.	53
Figure I. 20 - Cumul de nombre d'heures où la température est supérieure à 28°C des différents fichiers climatiques lyonnais.	54
Figure I. 21 - Évolutions horaires de températures METEONORM et IWEK sur une semaine de juin.	54
Figure I. 22 - Comparaison des distributions statistiques des humidités relatives, des vitesses de vent et du rayonnement solaire des différents fichiers climatiques lyonnais.....	56

Chapitre 2

Figure II. 1 - Vue aérienne du quartier Confluence de Lyon (image Géoportail).....	61
Figure II. 2 - Diagramme solaire et ligne d'horizon avec le logiciel Carnaval V0.8.	61
Figure II. 3 - Localisation des stations météorologiques pour l'étude sur la surchauffe urbaine du quartier Lyon Confluence.	62
Figure II. 4 - Localisation des stations météo pour l'étude sur le confort extérieur de Lyon Confluence.	63
Figure II. 5 - Constat expérimental de la surchauffe urbaine	64
Figure II. 6 - Diagramme tapis des écarts de mesures de températures entre Lyon CONFLUENCE et METEO FRANCE pour l'année 2013.....	65
Figure II. 7 - Évolution des températures d'air mesurées à CONFLUENCE et BRON du 20 au 28 juillet 2013.....	66
Figure II. 8 - Réseau lyonnais des stations météo du projet « Météo & Climat, un tremplin pour l'enseignement des sciences ».	66
Figure II. 9 - Localisation des stations météorologiques situées en zones urbaines et péri-urbaines de Lyon (avec une précision sur la station de Saint Exupéry utilisée plus loin dans le PCAET du Grand Lyon).	67
Figure II. 10 - Vues aériennes et locales des stations lyonnaises retenues – (Sources : Géoportail, Google Street View, Infoclimat, Station IDMP Vaulx-en-Vellin)	69
Figure II. 11 - Comparaison des températures d'air mesurées à ENS, ENTPE, CONFLUENCE et METEO FRANCE du 20 au 28 juillet 2015.	71
Figure II. 12 - Comparaison des températures d'air mesurées à ENS, ENTPE, CONFLUENCE et METEO FRANCE du 21 au 29 novembre 2015.	71
Figure II. 13 - Distributions statistiques des températures d'air mesurées à ENS, ENTPE, CONFLUENCE et METEO FRANCE sur la période du 21 juin au 31 décembre 2015.	72
Figure II. 14 - Évolution des températures de Lyon (station ENTPE) 2018 et de la normale 1981-2010.	73

Figure II. 15 - Cumul de nombre d'heures où la température est supérieure à 28°C dans les différents fichiers météo ENTPE, METEO FRANCE, ENS, METEONORM.....	75
Figure II. 16 - Tracé bubble chart des périodes de canicule pour les données mesurées des stations ENS & ENTPE et générées par METEONORM.	76
Figure II. 17 - Évolution de température durant la canicule de 2018 à Lyon, mise en évidence de la surchauffe urbaine.	77
Figure II. 18 - Distribution statistique des températures estivales (de début mai à fin septembre) des météo retenues.	78
Figure II. 19 - Température moyenne estivale en Rhône-Alpes : écart à la référence 1976-2005. Observations et simulations climatiques futures sous Aladin-Climat pour les scénarios d'évolution RCP 2.6, 4.5, et 8.5. (Source : Météo France)	79
Figure II. 20 - Distribution statistique sur la période estivale (de début mai à fin septembre) du rayonnement solaire des fichiers sélectionnés.	80
Figure II. 21 - Distribution statistique sur la période estivale (de début mai à fin septembre) de l'humidité relative des fichiers sélectionnés.	80
Figure II. 22 - Distribution statistique sur la période estivale (de début mai à fin septembre) de la vitesse de vent des fichiers sélectionnés.	81
Figure II. 23 - Illustration de la surchauffe urbaine à Lyon Confluence (Source : TRIBU, dessin d'Héloïse Marie).	81

Chapitre 3

Figure III. 1 - Illustration des rayonnements directs, diffus, et inter-réflexions solaires (Bouyer, 2009).	89
Figure III. 2 - Cas d'études BESTEST a) cas 600/900, b) cas 610/910 c) cas 620/920, d) cas 630/930 (Buonomano, 2016) la désignation 600 caractérisant un mode constructif léger en bois, 900 traduisant un mode constructif lourd et inertiel en béton.	97
Figure III. 3 - Plateforme expérimentale BESTLab, site des Renardières d'EDF R&D (Bontemps, 2016).....	97
Figure III. 4 - Plateforme expérimentale INCAS, sur le site INES	97
Figure III. 5 - Evolution de la température intérieure du RDC de la maison INCAS les 15, 16 juin et comparaison du nombre d'heures d'inconfort (Brun et al., 2009).	98
Figure III. 6 - Représentation de l'incertitude potentielle dans les prédictions de performance en STD en fonction de la complexité du modèle (Marja, Michael, et Jan, 2007).	99
Figure III. 7 - Résultats de l'étude de sensibilité pour le confort d'été au rez-de-chaussée de la maison I-BB de la plateforme INCAS (Spitz, 2012).	101

Chapitre 4

Figure IV. 1 - Photo du bâtiment J1a et localisation sur le site de Lyon Confluence.	106
Figure IV. 2 - Modélisation 3D du projet de logements collectifs J1A.	106
Figure IV. 3 - Macrocomposant V1 ITE Béton, inertie lourde, non-biosourcé	109
Figure IV. 4 - Macrocomposant V2 ITR Structure Bois, inertie légère, biosourcé	110
Figure IV. 5 - Niveaux de conception et de performance de l'enveloppe et du bâtiment.	111
Figure IV. 6 - Fichiers représentants les météo d'Aujourd'hui, de Demain, et d'Après-demain retenus pour les STD.	111

<i>Figure IV. 7 - Caractérisation des fichiers météo suivant les cumuls des nombres d'heures où la température est supérieure à 26, 27, 28, 29, 30, 31, et 32°C.</i>	112
<i>Figure IV. 8 - Les variables de l'analyse de sensibilité STD à la donnée météo.</i>	113
<i>Figure IV. 9 - Equilibre thermique entre une personne et son environnement (Dessin Héloïse Marie).</i>	114
<i>Figure IV. 10 - Les causes des coups de chaleur chez l'être humain (Parsons, 2009).</i>	115
<i>Figure IV. 11 - Le pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD - Predicted Percentage Dissatisfied) en fonction de l'indice PMV (Norme EN 7730).</i>	117
<i>Figure IV. 12 - Indices PMV prédits avec le modèle de Fanger du 4 au 18 aout 2018 (station météo ENTPE), pour le séjour du T4 (A43) et le mode constructif bois (V2).</i>	118
<i>Figure IV. 13 - Zone de confort selon GIVONI sur le diagramme psychrométrique des conditions ambiantes (Outil de Kevin Maiques, TRIBU).</i>	118
<i>Figure IV. 14 - Catégories de confort de la norme européenne EN15251.</i>	120
<i>Figure IV. 15 - Evolution chronologique des méthodes d'analyses du confort dans les bâtiments, et des normes et réglementations mises en place.</i>	121
<i>Figure IV. 16 - Comparaison des zones de confort suivant les normes ISO 7730 et EN 15251 (source : guide sur le confort d'été de l'ICEB (Bornarel et al., 2014)).</i>	121
<i>Figure IV. 17 - Des climatiseurs sur les murs d'un immeuble à Fuzhou, dans la province de Fujian, en Chine, le 25 mai 2016 (Source franceinfo).</i>	122
<i>Figure IV. 18 - Présentation du chainage EN 15251 + GIVONI pour l'analyse du confort, résultats issus du séjour du T4 pour la météo d'Après-demain (2003).</i>	123
<i>Figure IV. 19 - Heat Index pour l'évaluation des risques de coup de chaleur selon INRS.</i>	124
<i>Figure IV. 20 - Adaptation aux aléas climatiques, conception frugale et critères de confort d'été (Source TRIBU, dessins : Héloïse Marie et Marie Leroy).</i>	125
<i>Figure IV. 21 - Localisation des locaux étudiés pour le confort d'été.</i>	126
<i>Figure IV. 22 - Cumul annuel de dépassement de seuils sur le séjour du T4 (A43) pour les météo d'après-demain pour le mode constructif V1.</i>	128
<i>Figure IV. 23 - Diagramme radar des différents indicateurs de confort pour la variante bois V2, comparaison des météo de demain et d'après-demain.</i>	129
<i>Figure IV. 24 - Cumul annuel de dépassement de seuils sur le séjour du T4 (A43) pour les météo d'Aujourd'hui, Demain, et Après-demain, pour les modes constructifs V1 et V2.</i>	130
<i>Figure IV. 25 - Graphique de GIVONI sur le séjour du T4 (A43), pour le mode V2, pour les météo d'Aujourd'hui, Demain et Après-demain.</i>	131
<i>Figure IV. 26 - Risques sanitaires sur le séjour du T4 (A43), pour le mode constructif V2, pour la canicule de 2003, selon le Heat index de l'INRS.</i>	131
<i>Figure IV. 27 - Confort adaptatif selon la norme EN 15251 sur le séjour du T4 (A43), le mode constructif V2 pour les météo aujourd'hui, demain et après-demain.</i>	132
<i>Figure IV. 28 - Confort selon GIVONI sur la chambre du T2 (A42), le mode constructif bois V2, pour les météo ENTPE aujourd'hui, demain et après-demain.</i>	133

Figure IV. 29 - Confort selon EN15251 + GIVONI sur la chambre du T2 (A42), le mode constructif bois V2, pour les météo Aujourd'hui, Demain et Après-demain.....	133
Figure IV. 30 - Taux d'inconfort généré par la surchauffe urbaine, en se basant sur le nombre d'heures supérieures à 28°C en occupation (météo de l'année 2018) (Sources des photographies : Picasa, et Mapio).	135
Figure IV. 31 - Cumul annuel de dépassement de seuils sur le séjour du T4 (A43) pour la météo péri-urbaine ENTPE 2018 et urbaine ENS 2018, pour les modes constructifs V1 et V2.	136
Figure IV. 32 - Evolutions des températures opératives de la chambre du T2 (A42) pour la météo péri-urbaine ENTPE 2018 et urbaine ENS 2018, pour les modes constructifs V1 et V2, en période caniculaire.	137
Figure IV. 33 - Evolutions des températures opératives de la chambre du T2 (A42) pour la météo péri-urbaine ENTPE 2018 et urbaine ENS 2018, pour les modes constructifs V1 et V2, en période estivale.	137
Figure IV. 34 - Vague d'inconfort nocturne de la chambre du T2 (A42) pour la météo péri-urbaine ENTPE 2018 et urbaine ENS 2018, pour les modes constructifs V1 et V2.	138
Figure IV. 35 - Saisie Design Builder, caractéristiques de stockage de l'humidité pour la brique.....	141
Figure IV. 36 - Confort selon GIVONI sur le séjour du T4 (A43), pour la météo urbaine ENS 2018, le mode constructif bois V2 avec du cloisonnement léger et lourd, et pour les modèles standard et EMPD.	142
Figure IV. 37 - Vagues d'inconfort nocturne de la chambre du T2 (A42) pour toutes les météo (Aujourd'hui, Demain, et Après-demain), pour le mode V2	143

Chapitre 6

Figure VI. 1 - Démarche de construction d'un fichier microclimatique horaire pour l'année.	173
Figure VI. 2 - Délimitations du cas d'étude de Confluence et localisation de la station météo urbaine.	174
Figure VI. 3 - Principe de la reconstruction des données météorologiques de METEO France (zone péri-urbaine) vers celles de Lyon CONFLUENCE (zone urbaine).....	174
Figure VI. 4 - Maquette SketchUp graphique de Lyon Confluence fournie par l'aménageur SPL Lyon Confluence.	175
Figure VI. 5 - Première version de la maquette 3D nommée Confluence3D_V1.	175
Figure VI. 6 - Échelles de projets et Level Of Detail (LOD) du CityGML, et exemple de bâtiments de Lyon Confluence.....	176
Figure VI. 7 - Extrait du fichier Shapefile SHP des empreintes au sol des bâtiments de Lyon Confluence.	177
Figure VI. 8 - Seconde version de la maquette 3D nommée Confluence3D_V1.	177
Figure VI. 9 - Schéma électrique équivalent du modèle de thermique du bâtiment de CitySim, le nœud de calcul du toit n'est pas représenté (équivalent au nœud de paroi) (Walter et Kämpf, 2015).	179
Figure VI. 10 - Maquette CitySim du quartier de Confluence à Lyon.	180
Figure VI. 11 - Cartographie des températures de surfaces simulées sous CitySim avec la maquette Confluence3D_V2 au 2 juillet 2013 à midi à Lyon Confluence.....	181
Figure VI. 12 - Modèle détaillé 2RC par couche composant la paroi (Kämpf, 2009).	182
Figure VI. 13 - Cas test de 3 bâtiments à Confluence pour l'évaluation du modèle détaillé (MD) de thermique de bâtiment de CitySim.	183

<i>Figure VI. 14 - Comparaison des températures de surfaces simulées pour le cas test sous CitySim au 20 juin 2013 à midi avec les modèles simple (MS) et détaillé (MD) de thermique du bâtiment.</i>	183
<i>Figure VI. 15 - Comparaison des évolutions des températures de surfaces orientées sud de bâtiments ITI et ITE simulées sous CitySim sur la première semaine de juillet 2013 avec les modèles simple (MS) et détaillé (MD) de thermique du bâtiment.</i>	184
<i>Figure VI. 16 - Comparaison des distributions statistiques annuelles des températures de surfaces orientées sud de bâtiments ITI et ITE simulées sous CitySim sur la première semaine de juillet 2013 avec les modèles simple (MS) et détaillé (MD) de thermique du bâtiment.</i>	185
<i>Figure VI. 17 Modèle de sol et de paroi R2C utilisé dans SOLENE-Microclimat (Malys, 2012).</i>	185
<i>Figure VI. 18 - Cartographie des températures de surfaces simulées sous CitySim avec la maquette Confluence3D_V2 au 2 juillet 2013 à midi à Lyon Confluence avec le modèle détaillé de thermique du bâtiment.</i>	186
<i>Figure VI. 19 - Comparaison des évolutions des températures de surfaces, orientées sud et de toiture, simulées sous CitySim sur la première semaine de juillet 2013 avec les modèles simple (MS) et détaillé (MD) de thermique du bâtiment.</i>	187
<i>Figure VI. 20 - Classification des orientations de façades pour l'export vers CIM.</i>	187
<i>Figure VI. 21 - Evolutions des températures de surfaces par orientation entre le 19 et 21 juin 2013 avant export vers CIM.</i>	188
<i>Figure VI. 22 - Principe de modélisation de CIM (Mauree, Blond, et al., 2017).</i>	188
<i>Figure VI. 23 - Hauteurs des capteurs de mesures météorologiques et du nœud de calcul choisi dans CIM.</i>	192
<i>Figure VI. 24 - Distributions statistiques des températures d'air mesurées et simulées avec les variantes V1, V2 et V3 pour le mois de juillet 2013.</i>	193
<i>Figure VI. 25 - Distributions statistiques des températures d'air mesurées et simulées avec les variantes V1, V2, V3 et V4 pour la première semaine du mois de juillet 2013.</i>	193
<i>Figure VI. 26 - Évolution des températures d'air simulées et mesurées pour la première semaine du mois de juillet 2013.</i>	194
<i>Figure VI. 27 - Distributions statistiques des vitesses de vent mesurées et simulées avec la variante V3 pour le mois de juillet 2013.</i>	194
<i>Figure VI. 28 - Évolution des températures d'air extérieur, intérieur, et de surface de toit, mesures et simulation, réalisées avec SOLENE-Microclimat dans la thèse de Laurent Malys (Malys, 2012).</i>	196

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1

Tableau I. 1 - Les causes de l'ICU (Illustrations, Héroïse Marie, TRIBU).....	34
Tableau I. 2 - Classification des couches atmosphériques urbaines (Oke, et al., 2017).....	36
Tableau I. 3 - Détail des scénarii prospectifs RCP.....	39
Tableau I. 4 - Ecart de température, en été, par rapport à la référence 1976-2005 calculées par quatre modèles climatiques européens, pour les périodes 2021-2050 et 2071-2100 (à l'échelle de la France) (Jouzel, 2014).	40
Tableau I. 5 - Facteur de correction des températures moyennes mensuelles (Meteonorm, 2018).	47
Tableau I. 6 - Facteur de correction des vitesses de vent moyennes mensuelles (Meteonorm, 2018).	47
Tableau I. 7 – Classement des fichiers climatiques lyonnais étudiés.	50

Chapitre 2

Tableau II. 1 - Informations techniques sur les capteurs de mesures météorologiques.	63
Tableau II. 2 - Analyse des mesures de l'îlot de chaleur urbain de Lyon Confluence sur l'année 2013.	64
Tableau II. 3 - Données disponibles pour les stations lyonnaises retenues.....	70
Tableau II. 4 - Axes d'analyse pour le choix de la donnée météo à destination des outils STD.	72
Tableau II. 5 - Synthèse PCAET Grand Lyon (GrandLyon, 2019).	76
Tableau II. 6 – Sélection météo pour caractériser le changement climatique et la surchauffe urbaine.	78

Chapitre 3

Tableau III. 1 - Aperçu des principales caractéristiques des outils étudiés.....	87
Tableau III. 2 - Méthodes de résolution des transferts thermiques par conduction.....	88
Tableau III. 3 - Comment les outils STD considèrent le rayonnement solaire CLO.	90
Tableau III. 4 - Comment les outils STD considèrent le rayonnement infrarouge GLO.	92
Tableau III. 5 - Comment les outils STD déterminent les coefficients de transfert par convection.	93
Tableau III. 6 - Comment les outils STD gèrent le renouvellement d'air par ventilation et infiltration.	94
Tableau III. 7 - Comment les outils STD gèrent l'humidité relative de l'air intérieur.....	95
Tableau III. 8 - Simulation 1 - Coefficients de transfert par convection standard proposés par les outils $[W/(m^2K)]$ (Brun et al., 2009).....	98
Tableau III. 9 - Simulation 2 - Coefficients de transfert par convection standard proposés par les outils $[W/(m^2K)]$ (Brun et al., 2009).....	99

Chapitre 4

Tableau IV. 1 - Principaux indicateurs de description du bâtiment J1a.....	106
Tableau IV. 2 - Échelles de sensation de confort thermique PMV (ASHRAE).....	117
Tableau IV. 3 - Nombre d'heures d'inconfort pour le séjour et la chambre, et les variantes V1 et V2 : comparaison des résultats pour les météo fictives METEONORM et réelles ENTPE.....	129
Tableau IV. 4 - Indicateurs d'inconfort pour le séjour et la chambre, selon les variantes V1 et V2, comparaison des résultats pour les météo ENTPE Aujourd'hui, Demain, et Après-demain.....	134
Tableau IV. 5 - Indicateurs d'inconfort pour le séjour et la chambre, et les variantes V1 et V2, comparaison des résultats pour la météo péri-urbaine de l'ENTPE et urbaine de l'ENS.....	135
Tableau IV. 6 - Confort d'été pour le mode constructif V1 et 3 niveaux de conception, ainsi que pour une variante RT2012 en ITI, pour la météo extrême d'Après-demain.....	139
Tableau IV. 7 - Estimation des besoins de chauffage en hiver pour le mode constructif V1.....	140
Tableau IV. 8 - Indicateur de confort d'été pour le mode constructif V2 incluant des cloisons légères (en verte) ou lourdes (en marron) pour la météo urbaine de 2018.....	141
Tableau IV. 9 - Indicateur de confort d'été pour le mode constructif V2 incluant des cloisons légères (en verte) ou lourdes (en marron) pour la météo urbaine de 2018, le modèle EMPD.....	142

Chapitre 5

Tableau V. 1 - Synthèse des caractéristiques des outils de climatologie urbaine.....	168
--	-----

Chapitre 6

Tableau VI. 1 - Albédos et émissivité des surfaces extérieures de la scène urbaine.....	180
Tableau VI. 2 - Niveaux et mode d'isolation des bâtiments selon l'année de construction.....	181
Tableau VI. 3 - Variantes testées pour le chaînage CitySim + CIM.....	190

NOMENCLATURES

AMO	<i>Assistant à la maîtrise d'ouvrage</i>
AMY	<i>Annual meteorological year</i>
ANR	<i>Agence nationale de la recherche</i>
ANRT	<i>Agence nationale de la recherche technologique</i>
APD	<i>Avant-projet détaillé</i>
APS	<i>Avant-projet simplifié</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers</i>
AVP	<i>Avant-projet</i>
BE	<i>Bureau d'études</i>
BREEAM	<i>Building Research Establishment Environmental Assessment Method</i>
BSO	<i>Brise soleil orientable</i>
CCTP	<i>Cahier des clauses techniques particulières</i>
CEN	<i>Comité européen de normalisation</i>
CEREMA	<i>Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement</i>
CFC	<i>Abréviation de chlorofluorocarbure ou de chlorofluorocarbone</i>
CFD	<i>Computational fluid dynamics</i>
CIBSE	<i>Chartered Institute of Building Services Engineers</i>
CityGML	<i>Graph Modelling Language</i>
COP 21	<i>Le terme « COP » signifie « Conférence des Parties » à la Convention de l'Onu sur le climat</i>
CPE	<i>Contrat de performance énergétique</i>
DBF	<i>Fichier qui contient les données attributaires relatives aux objets contenus dans le shapefile</i>
DCE	<i>Dossier consultation des entreprises</i>
DD	<i>Développement durable</i>
DIES	<i>Durée d'Inconfort d'Eté Statistique</i>
DSY	<i>Design summer year</i>
DXF	<i>Drawing eXchange Format</i>
EMPD	<i>Effective Moisture Penetration Depth (EMPD) Model</i>
ENS	<i>École normale supérieure</i>
ENTPE	<i>École nationale des travaux publics de l'État</i>
EPFL	<i>Ecole polytechnique fédérale de Lausanne</i>
GES	<i>Gaz à effet de serre</i>
GIEC	<i>Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC en anglais)</i>
HAMT	<i>Combined Heat and Moisture Transfer (HAMT) Model</i>
HQE	<i>Haute qualité environnementale</i>
HR	<i>Humidité relative</i>
IBPSA	<i>International Building Performance Simulation Association</i>
ICEB	<i>Institut pour la conception environnementale du bâti</i>
ICU	<i>Ilot de chaleur urbain</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INRS	<i>Institut National de la Recherche et de la Sécurité</i>
IR	<i>Infrarouges</i>
IRD	<i>Institut de recherche Dupuy de Lôme</i>
ISL	<i>Inertial sublayer</i>
ITE	<i>Isolation thermique extérieure</i>

ITI	<i>Isolation thermique intérieure</i>
LESO-PB	<i>Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Bâtiment</i>
LOD	<i>Level of detail</i>
MCU	<i>Microclimat urbain</i>
ML	<i>Mixed layer</i>
MOA	<i>Maitrise d'ouvrage</i>
MOE	<i>Maitrise d'œuvre</i>
PMV	<i>Predicted mean vote</i>
PPD	<i>Percentage of persons dissatisfied</i>
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i>
QE	<i>Qualité environnementale</i>
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i>
RE	<i>Réglementation environnementale</i>
RSER	<i>Renewable and sustainable energy review</i>
RSL	<i>Roughness sublayer</i>
RT	<i>Réglementation thermique</i>
SACS	<i>Système d'alerte canicule et santé</i>
SDO	<i>Surface dans l'œuvre</i>
SDP	<i>Surface de plancher</i>
SHP	<i>Shapefile</i>
SPL	<i>Société publique locale</i>
STD	<i>Simulation thermique dynamique</i>
SVF	<i>Sky view factor</i>
TIC	<i>Température Intérieure Conventionnelle</i>
TMY	<i>Typical meteorological year</i>
TRIBU	<i>Techniques de recherche pour le bâtiment et l'urbain</i>
TRY	<i>Test reference year</i>
UCL	<i>Urban canopy layer</i>
UV	<i>Ultraviolets</i>
VNM	<i>Veille Météorologique Mondiale</i>
ZAC	<i>Zone d'aménagement concertée</i>

INTRODUCTION

Contextualisation de la thèse

Comment s'adapter...au changement climatique? ...aux surchauffes urbaines ? ...à la croissance démographique? ...à la densification des villes?

Le climat change à l'échelle mondiale et se dérègle (cf. dernier rapport du GIEC), on remarque que des épisodes de stress thermique apparaissent de façon de plus en plus violente et fréquente (d'après Météo France). Si le climat évolue par cycle, l'impact de l'activité humaine, responsable de l'explosion des émissions de gaz à effet de serre (GES), est la principale explication du changement climatique. De plus, la population mondiale augmente et se dirige de plus en plus vers les villes qui se densifient pour accueillir ces nouveaux citoyens. Plus de deux tiers des personnes seront installées en villes d'ici 2050 selon l'ONU. Cette densification, couplée à la minéralisation du paysage urbain a fait apparaître des modifications météorologiques locales qui caractérisent un climat urbain apparaissant comme plus chaud en centre-ville qu'en zone péri-urbaine ou rurale ; ce phénomène est appelé « îlot de chaleur urbain » (ICU). L'îlot de chaleur urbain à l'échelle locale de la ville et le changement climatique à l'échelle globale de la planète, sont deux composantes qui altèrent les conditions microclimatiques en ville, donc le milieu dans lequel nous vivons et nous percevons les sollicitations météorologiques. En été, ces surchauffes urbaines peuvent être néfastes au bien-être et à la santé des citoyens et des autres systèmes vivants, qui évoluent en ville.

Pour notre santé aujourd'hui et surtout pour celle des générations de demain, il est de notre responsabilité de proposer et mettre en œuvre des solutions pour nous adapter à ces problématiques qui sont liées les unes aux autres, à savoir le

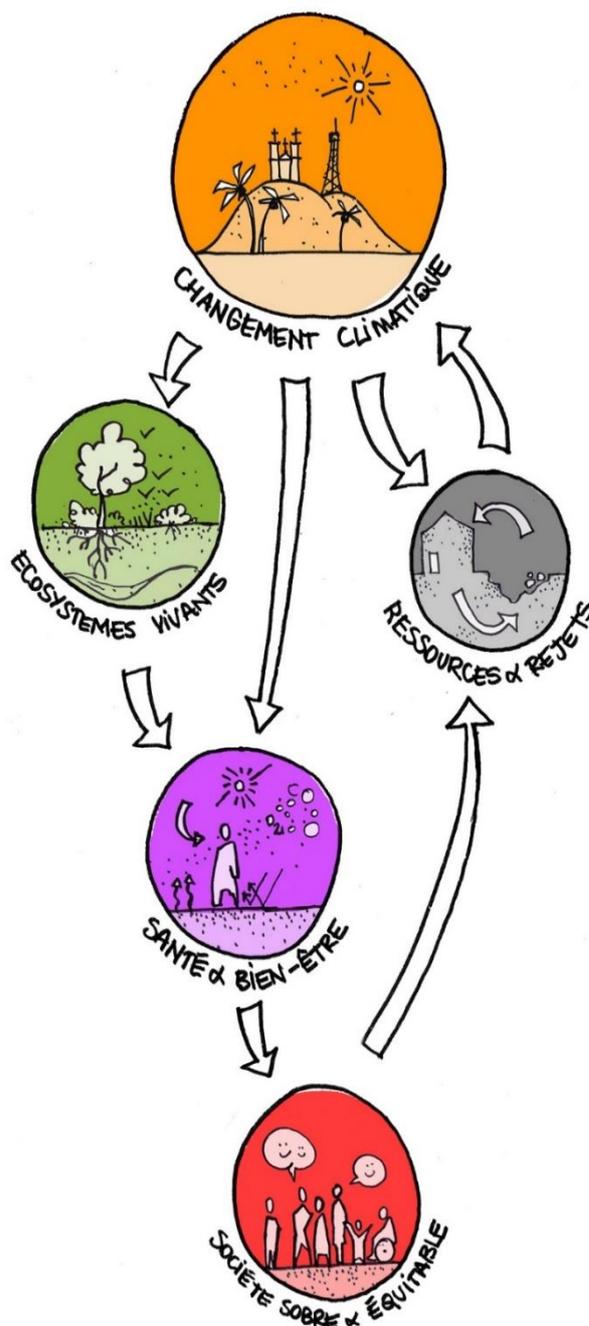


Figure a - Croisement des enjeux de la construction vus par TRIBU (Dessin Héroïse Marie, Source TRIBU).

changement climatique global, l'apparition d'ICU et l'augmentation de la population urbaine.

La liste des thèmes à revoir dans nos modes de vie est longue pour limiter notre impact environnemental et nous développer de façon durable et raisonnée. La construction de bâtiments est dans cette liste : c'est sur ce domaine et en particulier la conception de ceux-ci que ce travail de thèse se focalise. Si l'on considère une durée de vie de 80 à 100 ans pour un bâtiment, soyons conscients que nous sommes responsables de nos constructions actuelles sur l'ensemble de cette durée et notamment de leurs impacts sur l'environnement, jusqu'à leur rénovation ou destruction. C'est pourquoi les choix qui sont faits en phase de conception doivent répondre aux besoins vis-à-vis des enjeux actuels (climatique, densité de population, etc...) et futurs pour les prochaines années.

Les phases d'un projet opérationnel de bâtiment

La réalité opérationnelle du secteur du bâtiment est une notion importante à considérer pour les chercheurs qui développent des projets sur ce même secteur d'activité. Les différentes étapes d'un projet de construction (Figure b) sont présentées ici. Elles sont très bien expliquées dans le guide ADEME « LA QUALITÉ ENVIRONNEMENTALE DES BÂTIMENTS TERTIAIRES : RETOUR D'EXPÉRIENCES EN AUVERGNE-RHÔNE-ALPES » (Lapray et al., 2018). Cet ouvrage rédigé et illustré par TRIBU, à destination des acteurs de la construction, exprime les enjeux croisés environnementaux, de santé, climatiques relatifs aux projets de bâtiments (Figure a).

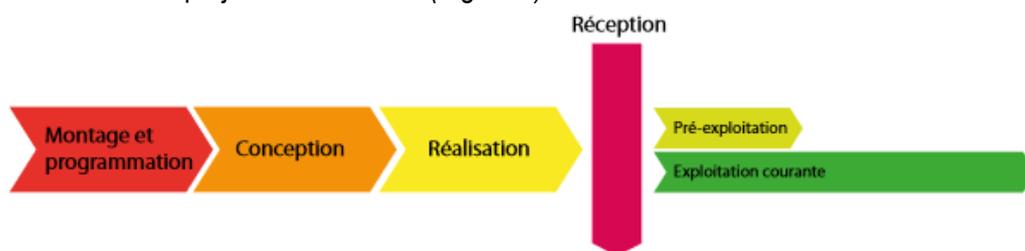


Figure b - Les phases d'un projet de construction de bâtiment (Lapray et al., 2018).

Programmation / Conception

Le projet de construction d'un bâtiment neuf ou à réhabiliter est composé de 3 phases : celle de la programmation du projet pour calibrer les attentes de la maîtrise d'ouvrage (MOA), la phase de conception, et la phase de réalisation. C'est en première partie de la phase de conception, lors des études d'avant-projet (AVP), que l'équipe de maîtrise d'œuvre (MOE), avec notamment l'architecte (mandataire) et le bureau d'études environnemental, travaillent sur l'enveloppe du bâtiment. La conception de celle-ci doit être en adéquation avec les atouts et faiblesses du site d'implantation, c'est la notion du bioclimatisme. L'objectif est d'atteindre un optimum dans les choix relatifs aux systèmes passifs (vitrage, morphologie, parois, etc...) pour obtenir un bâtiment qui satisfasse au mieux les besoins de confort (thermique, éclairement, etc...) et de santé (renouvellement d'air, etc...), et sans faire appel aux

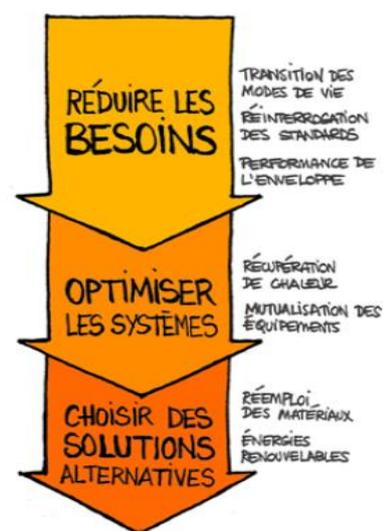


Figure c - Priorités des réflexions d'un projet bâtiment (Dessin Héloïse Marie, source TRIBU).

systèmes actifs (nécessitant une dépense énergétique) (Figure c). Pour l'adaptation des bâtiments aux aléas climatiques, une conception sobre et frugale de l'enveloppe, réfléchi en phase amont de projet, apparait ECO_{nomique}LOGIQUE d'un point de vue environnemental, c'est avec cette vision que la thèse a été développée.

Réalisation / Livraison / Suivi

La phase de réalisation des travaux est la phase concrète du chantier, pour lequel une charte chantier faible nuisance est signée (limite les pollutions sonores pour le voisinage, tri des déchets de chantier, etc.). Il est important de vérifier que les prescriptions des CCTP (cahiers des clauses techniques particulières) issus de la conception soient à minima respectées pour assurer la qualité du bâtiment.

A la livraison du bâtiment, les systèmes tels que les centrales de traitement d'air sont mis en marche, une brochure pédagogique sur les bonnes pratiques peut également être fournie aux usagers (explication du fonctionnement du bâtiment, comme imaginé en conception).

La phase de suivi est menée sur 2 ou 3 ans après la livraison du bâtiment. Après la première année, il est intéressant de comparer les consommations réelles en usage avec celles estimées lors de la conception. Cette comparaison permet de vérifier le bon fonctionnement et la bonne utilisation des locaux. En effet, des dysfonctionnements en exploitation du bâtiment peuvent être révélés, permettant par exemple la révision de la régulation de la chaudière. Ces retours d'expérience sont essentiels pour les projets futurs.

Maintenance / Rénovation / Réhabilitation / Démolition

Les projets de bâtiments sont également conçus avec une prise en compte de leur coût global, englobant notamment les frais liés à la maintenance des systèmes, et à la durée de vie des matériaux utilisés avant leur remplacement. Les systèmes simples tels que la ventilation hygiénique naturelle réduisent ces coûts de maintenance. La rénovation, la réhabilitation, ou la démolition sont aussi des phases dans le cycle de vie d'un bâtiment. Elles peuvent s'anticiper dès la phase de conception par exemple en favorisant les choix de biosourcés, facilitant ainsi le recyclage lorsque ces matériaux sont à remplacer (Figure d).



Figure d - Réemploi et recyclage des matériaux de construction (Dessin Héloïse Marie, source TRIBU).

Positionnement du travail de thèse

La Figure e reprend les étapes de cycle de vie d'un projet de construction et y positionne le travail réalisé au cours de cette thèse.

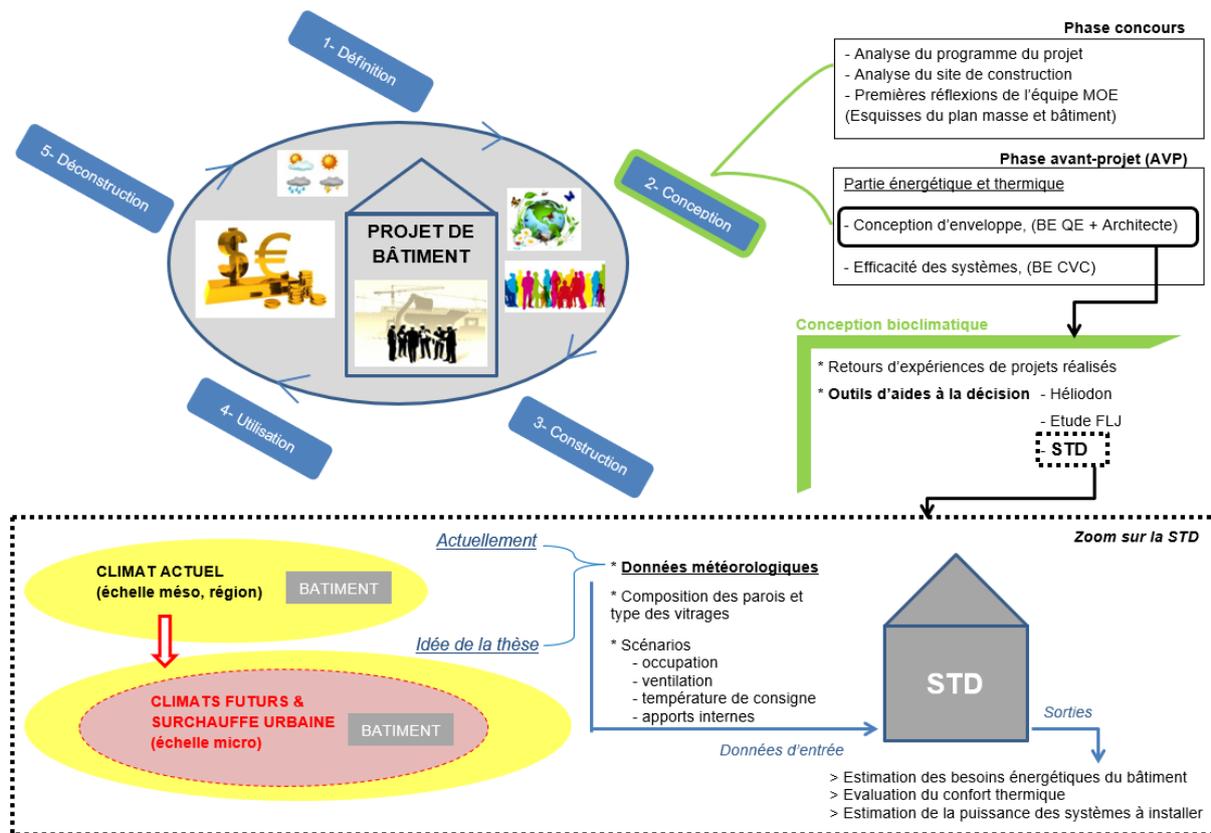


Figure e - Positionnement du travail de thèse dans un projet de bâtiment.

La Simulation Thermique Dynamique - STD

Pourquoi fait-on appel à la STD ?

Dans le cas de projets de bâtiments neufs ou à réhabiliter, la STD est un outil d'aide à la décision pour la co-conception au sein de l'équipe de MOE. La simulation numérique permet de tester rapidement différentes variantes pour optimiser les choix de conception d'un projet. Les résultats observés sont :

- le confort thermique (notamment les surchauffes estivales),
- les besoins énergétiques (notamment de chauffage),
- les puissances des systèmes à installer.

Sensibilités et incertitudes des STD

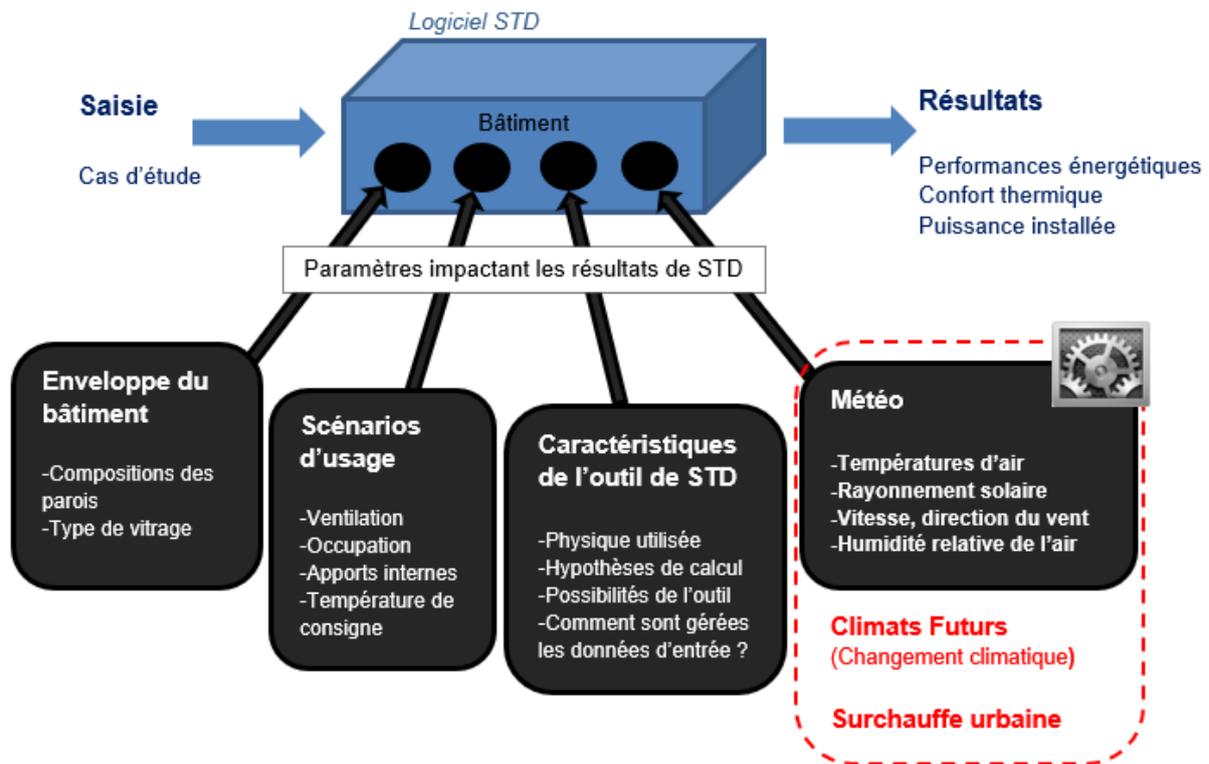


Figure f - Paramètres influant les résultats d'une STD – La donnée d'entrée météorologique.

La Figure f ci-dessus exprime les paramètres influant sur les résultats STD, parmi eux on retrouve la donnée d'entrée météo, la sensibilité et l'incertitude des résultats STD vis-à-vis des sollicitations météo utilisées en entrée STD sont discutées dans cette thèse.

Les données météo en projets opérationnels

En phase de conception de projet opérationnel, la MOE démarre par une analyse de programme et une analyse de site. L'objectif est de répondre au cahier des charges du MOA tout en intégrant et adaptant au mieux le projet dans le site, c'est l'essence même d'une conception bioclimatique. Dans l'analyse de site, on retrouve l'analyse du climat, très souvent à méso échelle à défaut d'avoir des données plus précises. Les données météo sont post-traitées sur l'année complète par les professionnels des bureaux d'études. Des nombres d'heures de gel, d'heures de chaud (supérieures à 28°C ou 30°C), des hauteurs de précipitations, des roses de vents, etc, sont ainsi évalués afin de caractériser le site d'étude. Ceci permet de cerner rapidement les enjeux d'un projet en termes de niveau d'isolation, de surface vitrée, de production d'énergie renouvelable, et de confort intérieur en été.

Si la donnée météo permet d'appréhender un site en phase très amont de conception, elle intervient aussi par la suite lors de vérification réglementaire ou d'objectif de labellisation.

Le climat et le calcul réglementaire RT2012

Dans la méthode de calcul Th-B-C-E 2012, les données climatiques sont définies d'après des années types de référence (suivant une procédure basée sur le choix de mois représentatifs) issues des mesures Météo France entre 1994 et 2008. Ces données climatiques ont ensuite été post-traitées afin de créer une segmentation géographique de 8 zones climatiques dont les stations de référence sont précisées sur la Figure g.



Figure g - Les 8 zones climatiques selon la RT2012.

Ces données climatiques représentent donc des moyennes des sollicitations météorologiques qu'on est susceptible de rencontrer dans chacune de ces 8 zones.

Souvent **les labels** (Bepos+Effinergie, etc...) et **certifications** (BREAM, HQE, etc...) utilisent les résultats du calcul réglementaire RT2012, et n'exigent donc pas l'utilisation de données météo spécifiques. Quand des résultats STD sont demandés, par exemple pour justifier un niveau de confort, le choix de la météo doit être argumenté sans pour autant qu'il soit imposé (cas du Référentiel Grand Lyon Bâtiment Durable, et de la certification HQE).



Dessin Héloïse Marie

Pour la préparation de la future réglementation environnementale **RE2020**, le groupe d'expertise 6 évoque la donnée climatique dans son rapport de mars 2019 (version 7) (RE2020_GE6, 2019). Le groupe de travail déclare que les fichiers climatiques de référence utilisés ne sont peut-être plus représentatifs du climat rencontré, et propose d'actualiser les données avec les mesures météo des dernières années et ainsi prendre en compte le changement climatique observé jusqu'ici. La méthode de construction des données, qui est utilisée pour créer des fichiers moyennés, n'est cependant pas remise en cause.

Enfin, outre la réglementation et les labels, la conception des bâtiments est d'abord réalisée par des personnes désireuses de proposer un projet de qualité via une démarche volontaire. Ainsi, la conception d'une enveloppe performante passe par la collaboration de l'architecte, du bureau d'études environnemental et des autres BE qui composent l'équipe de MOE. Les études STD qui orientent les choix de conception sont alors, comme pour le calcul réglementaire, souvent réalisées avec des fichiers météo moyennés sur une période, et quelques fois réalisées à partir de la météo d'une année choisi sur des critères spécifiques à chaque démarche.

L'inadéquation des approches actuelles et le manque de recul et de recommandations sur l'utilisation des données météorologiques en conception de bâtiment interrogent et sont à l'origine de la problématique de cette thèse.

Les interrogations traitées dans la thèse

Quelles données météorologiques utiliser en conception d'enveloppe de bâtiment de logements pour prendre en compte les enjeux liés au changement climatique (climats futurs) et à la surchauffe urbaine ?

Quelle est la réponse STD des logements aux aléas climatiques qu'ils subissent et subiront ? Quels indicateurs pour évaluer le confort d'été et les risques sanitaires concernant les habitants (Figure h) ? Des indicateurs qui orientent les choix faits en conception...

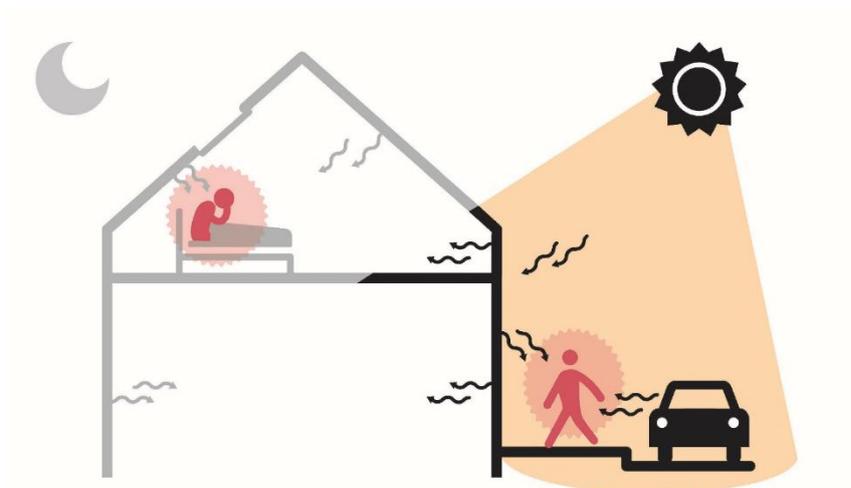


Figure h - Confort d'été et risques sanitaires des citoyens lors de fortes chaleurs (Source TADAA).

Pour répondre à ces questions, nous allons dans un premier temps procéder à une analyse des différents données météo disponibles en nous attachant à comprendre leur mode de production, les différences résultant de leur fabrication. Ensuite, nous étudions l'impact sur la conception d'un bâtiment de l'utilisation de ces données météo. Cette analyse est aussi l'occasion d'étudier la question des indicateurs utilisés pour évaluer la performance du bâtiment au regard du confort d'été et des risques sanitaires, dans des conditions extrêmes. Les résultats de cette analyse nous montrent que pour des conceptions en ville, il est indispensable de prendre en compte l'ICU. Comme peu de données et méthodologies fiables sont actuellement disponibles pour cette prise en compte, nous tentons d'en produire une par l'utilisation d'outils de simulations du microclimat urbain.

Le mémoire se compose de trois parties : la première partie commence par les notions de climat et météo, la deuxième partie se focalise sur la STD, enfin la troisième partie teste un chainage pour la simulation multi-échelle d'outils de microclimat urbain et de STD.

PREMIERE PARTIE

Analyse des données météorologiques

I CHAPITRE 1 DU CLIMAT AUX FICHIERS METEOROLOGIQUES

I.1	LES DIFFERENTES ECHELLES DU CLIMAT	29
I.1.1	Les climats globaux à l'échelle macroscopique.....	30
I.1.2	Les climats régionaux à l'échelle mésoscopique.....	31
I.1.3	Les climats locaux.....	32
I.1.4	Les microclimats	32
I.2	RECHAUFFEMENT : SYNERGIE DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN ET DU CHANGEMENT CLIMATIQUE GLOBAL.....	33
I.2.1	L'îlot de chaleur urbain.....	33
I.2.1.1	<i>Les causes de l'ICU et l'artificialisation des sols.....</i>	<i>33</i>
I.2.1.2	<i>Modification de la structure verticale de l'atmosphère urbain</i>	<i>35</i>
I.2.2	Le changement climatique global.....	37
I.2.2.1	<i>Les constats du GIEC.....</i>	<i>37</i>
I.2.2.2	<i>Les climats futurs selon des scénarii d'émissions de GES.....</i>	<i>38</i>
I.2.2.3	<i>Vagues de chaleur et canicules.....</i>	<i>40</i>
I.2.2.4	<i>Actions politiques.....</i>	<i>43</i>
I.3	FICHIERS CLIMATIQUES	44
I.4	ÉTAT DE L'ART SUR LA CONSTITUTION DE FICHIERS METEOROLOGIQUES 44	
I.4.1	Les types de fichiers météo utilisés en STD	44
I.4.2	Les fournisseurs de fichiers météo.....	46
I.5	METHODOLOGIE DE COMPARAISON DES DONNEES CLIMATIQUES	48
I.5.1	Quelques notions sur les statistiques et la climatologie	48
I.5.2	Post-traitement : Programmation Python	49
I.6	COMPARAISON DE DONNEES CLIMATIQUES LYONNAISES	50
I.6.1	Comparaison des données annuelles de température.....	51

1.6.2	Comparaison des évolutions horaires de température	54
1.6.3	Comparaison des autres sollicitations météorologiques	55
1.6.4	Synthèse	57
I.7	CONCLUSIONS DU CHAPITRE 1.....	57

Ce premier chapitre introduit les bases de la climatologie au travers d'une présentation des différentes échelles du climat, des dérèglements globaux observés ces dernières années sous le nom de changement climatique et de la particularité des climats urbains. Enfin, les données météorologiques mises à disposition des acteurs œuvrant à la construction de villes sont introduites.

I.1 Les différentes échelles du climat

« Le climat est la distribution statistique des conditions de l'atmosphère terrestre dans une région donnée pendant une période donnée, allant de quelques mois à plusieurs années. L'étude du climat est la climatologie. Elle se distingue de la météorologie qui désigne l'étude du temps à court terme et dans des zones ponctuelles ». Voici comment est définie la notion de climat par Météo France. On constate que climat et météorologie se distinguent par leurs échelles d'approches, spatiales et temporelles, qui sont différentes.

Les climats, qui témoignent de la diversité de notre monde et de nos régions, peuvent être définis à différentes échelles (Figure I. 1) : les climats globaux, régionaux, locaux et à échelle micro (ou macroscopique, mésoscopique, locale et microscopique).

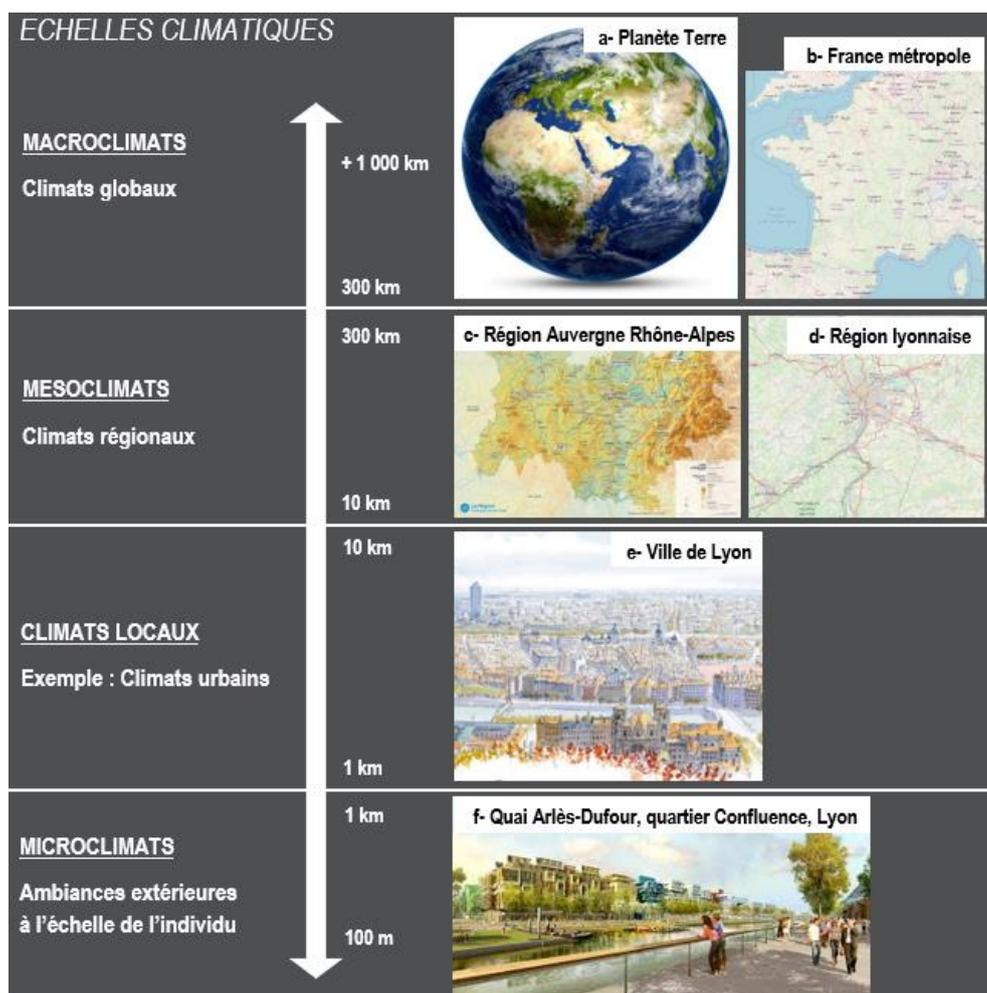


Figure I. 1 - Échelles climatiques (Sources : a- fr.123rf.com, b- OpenStreetMap, c- auvergnerhonealpes.fr, d- OpenStreetMap , e- Dessin de Vincent Brunot, f- Agence Claudine Colin Communication).

Quelle que soit l'échelle, les climats sont caractérisés à partir d'observations météorologiques au sol par des stations météo en complément des observations faites par les femmes et hommes. Les données atmosphériques locales mesurées (température, pression atmosphérique, précipitation, ensoleillement, humidité, vitesse du vent) sont traitées par des méthodes statistiques sur des périodes journalières, mensuelles et annuelles et/ou par des méthodes d'agrégation spatiale. Les phénomènes exceptionnels ainsi que leur récurrence sont également pris en compte.

1.1.1 Les climats globaux à l'échelle macroscopique

Au niveau mondial, les climats globaux sont définis sur des échelles supérieures à 1000 km. A cette échelle, ils sont représentés sous les grandes catégories de climats froids, tempérés ou chauds (Figure I. 2). En France métropolitaine, on retrouve deux climats tempérés, océanique et méditerranéen. Le climat méditerranéen est caractérisé par des étés chauds et très secs, et des hivers doux et humides avec des précipitations violentes. Ce climat doit son nom à la proximité de la mer Méditerranée mais se retrouve ailleurs dans le monde (Afrique du Sud, Australie, etc...). Le climat océanique est un climat avec des étés généralement doux et des hivers généralement frais. Il est humide en toutes saisons et influencé par la proximité des océans où l'on retrouve des courants chauds (en façade ouest des continents). Il évolue peu à peu en un climat continental en se dirigeant vers l'Est de la France. Le climat océanique est marqué par une amplitude thermique été/hiver faible (moins de 18 °C), qui s'accroît au fur et à mesure que l'on pénètre dans l'intérieur des continents. Les précipitations sont en général de l'ordre du mètre et bien réparties sur l'année.

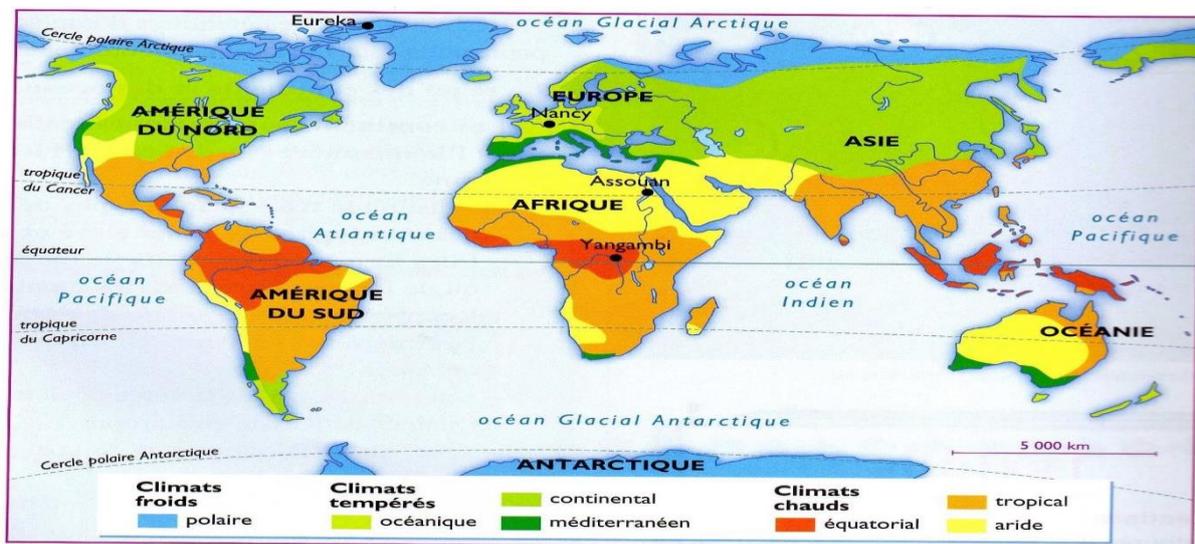


Figure I. 2 - Représentation des grandes catégories de climats globaux à l'échelle mondiale (Source Météo France).

Les climats globaux peuvent également être définis à des échelles moindres allant de 300 à 1000 km. Au niveau de la France, ces climats sont précisés en climats : océanique, océanique altéré, semi-continental, de montagne, méditerranéen (Figure I. 3). Cependant, l'influence de phénomènes météorologiques appartenant à de plus petites échelles spatio-temporelles tend à modifier les caractéristiques générales des climats globaux. Ces modifications se produisent soit en un lieu de plus ou moins grande étendue, soit à une époque annuelle de plus ou moins longue durée, soit aux deux. Les plus courantes d'entre

elles sont associées à des critères de dimension d'espace et d'environnement topographique ; elles définissent alors trois échelles du climat plus restreintes, les climats régionaux, locaux et micro.

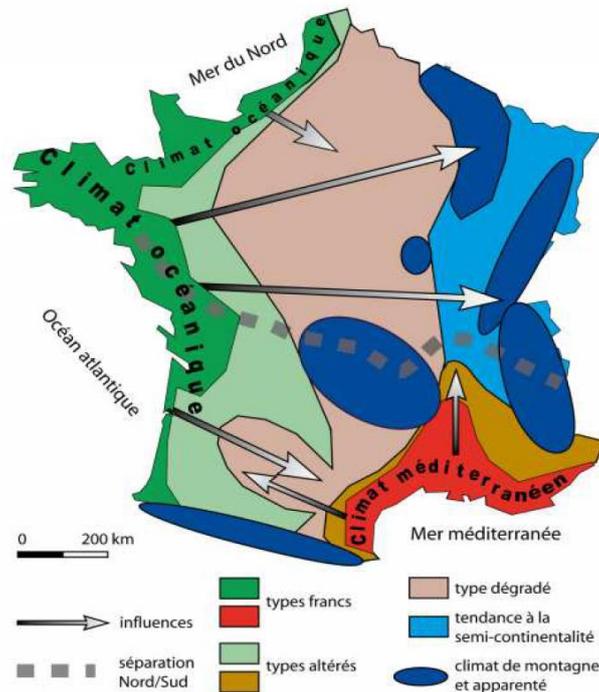


Figure I. 3 - Représentation des climats français à l'échelle macroscopique
(Source <http://cybergeo.revues.org/23155>).

I.1.2 Les climats régionaux à l'échelle mésoscopique

Les climats régionaux (ou mésoclimats) s'appliquent à des régions de plusieurs milliers de kilomètres carrés (échelle allant de 10 à 300 km). Ces régions sont soumises à certains phénomènes météorologiques bien particuliers (des vents régionaux, par exemple) du fait de l'interaction entre les flux d'air généraux et le relief. Par exemple, Mistral et Tramontane sont les vents régionaux français les plus connus.

En France métropolitaine, les climats régionaux sont notamment caractérisés par les mesures au sol des 578 stations Météo France. Ces stations mesurent automatiquement la force et la direction du vent, la température et l'humidité relative de l'air, les niveaux de précipitations et le rayonnement solaire avec un pas de temps infrahoraire. Sur l'ensemble du réseau, seules les données des stations VNM (en bleu, Figure I. 4) sont accessibles au public, les autres étant payantes pour couvrir les frais d'investissement et d'entretien importants. D'autres projets, tels que ceux menés par l'association Infoclimat, en contrat avec Météo France, poussent à l'accessibilité gratuite des mesures météorologiques aux travers ces 1500 stations du réseau Static (Figure I. 4). Leur site internet (<https://asso.infoclimat.fr>) permet la visualisation des données météorologiques moyennées à l'heure, au jour, au mois ou à l'année et des synthèses climatiques. Les données climatiques sources peuvent être éventuellement récupérées au bon vouloir des propriétaires des stations météo.

Réseau RADOME au 20/01/2017

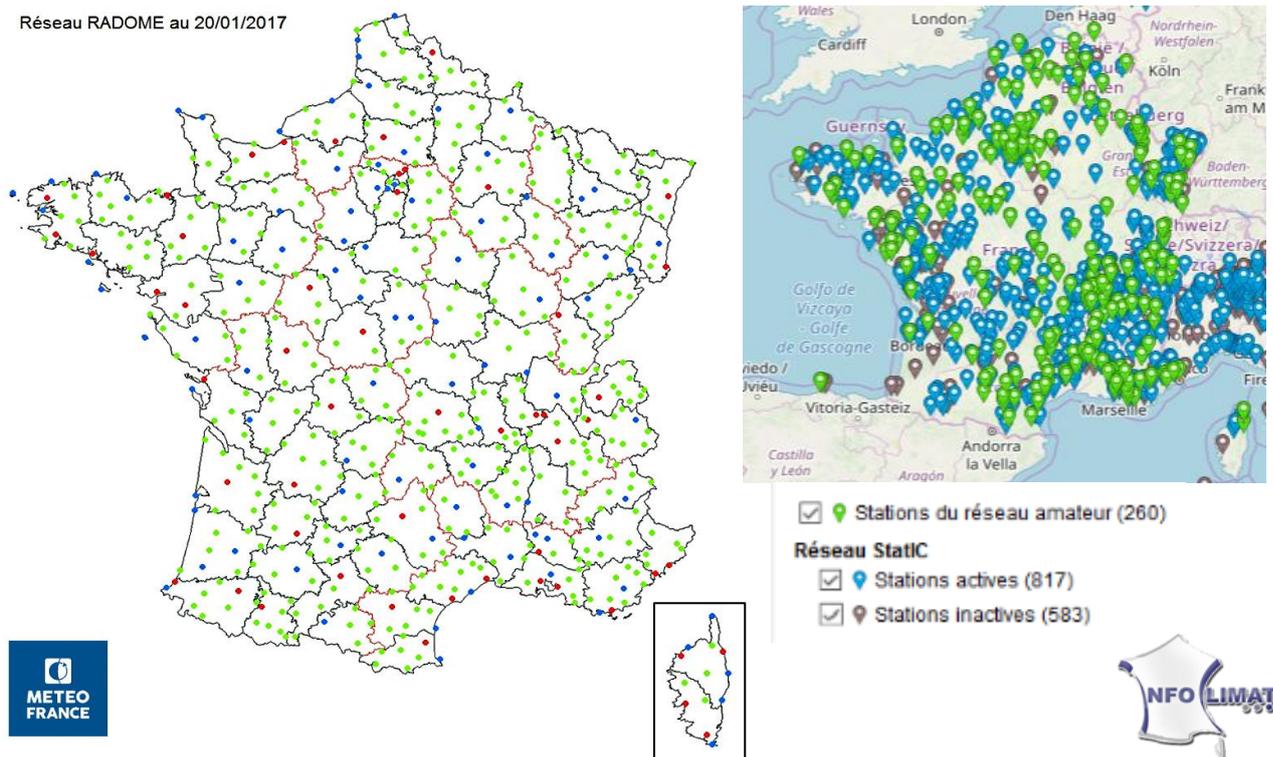


Figure 1. 4 - Réseau métropolitain des stations de Météo France, et celles de l'association Infoclimat.

Réseau des 578 stations Météo France

Points bleus : 94 stations du réseau de la VMM (Veille Météorologique Mondiale).

Points rouges : 53 stations installées sur une plateforme aéroportuaire.

Points verts : 431 stations automatiques avec 4 paramètres de base (vent, température, humidité et précipitations) pour le réseau national.

1.1.3 Les climats locaux

Les climats locaux sont relatifs à des sites s'étendant sur plusieurs dizaines de kilomètres carrés en moyenne (échelle allant de 1 à 10 km). Ce sont certaines particularités environnementales qui causent des phénomènes de vents locaux, d'écarts de température et d'humidité que l'on peut observer par rapport au climat régional. Notons que ces particularités peuvent avoir une origine humaine : par exemple, la construction de ville crée des modifications du climat à une échelle locale, urbaine, définissant des climats urbains. D'autres sortes de climats locaux sont entretenues par un milieu naturel tel qu'un rivage marin ou lacustre, une forêt ou une vallée.

1.1.4 Les microclimats

L'échelle des microclimats caractérise des sites peu étendus (quelques centaines ou milliers de mètres carrés). Les traits spécifiques de la topographie et de l'environnement à petite échelle, les bâtiments, les arbres, la spécificité de la morphologie et de la typologie des surfaces d'un lieu modifient les caractéristiques générales du climat. Parfois, cette modification se fait de façon très notable avec une altération de l'ensoleillement, des courants d'air, de la température ou de l'humidité. C'est ce microclimat, qui en ville est qualifié de microclimat urbain, que l'on ressent en tant que personne physique immergée

dans une scène urbaine. Ce sont ces variables microclimatiques qui influent sur notre confort en espace extérieur ou qui sollicitent l'enveloppe des bâtiments et modifient les ambiances intérieures.

I.2 Réchauffement : synergie de l'îlot de Chaleur Urbain et du changement climatique global

En construisant des villes, l'humain a minéralisé et densifié des zones et ainsi perturbé localement le climat. Cela se concrétise entre autres par la manifestation du phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU). Ce phénomène est une problématique en raison de ses nombreux impacts environnementaux dont son influence sur le fonctionnement de la nature en ville, et sur la santé ou le confort des citoyens. C'est un enjeu d'autant plus important du fait de l'urbanisation croissante à l'échelle mondiale. L'activité humaine est aussi ressentie au niveau des climats globaux avec le changement climatique, qui est une conséquence des émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, les projections climatiques prévoient d'ici la fin du siècle une augmentation de l'intensité et de la durée des vagues de chaleur, dans différentes régions du monde. Cumulés, l'îlot de chaleur urbain et le changement climatique génèrent en ville des surchauffes sévères.

I.2.1 L'îlot de chaleur urbain

En 1820, Luke Howard parle pour la première fois de climat urbain et révèle l'existence d'un îlot de chaleur urbain sur la ville de Londres (Mills, 2008). Il décrit une température plus élevée en ville qu'en banlieue, où les températures sont elles-mêmes plus chaudes que dans les campagnes environnantes. De nos jours, cette différence de température peut atteindre 8 degrés pour les grandes agglomérations (Figure I. 5), avec des conséquences sur le confort des habitants et la santé publique, en particulier la nuit et en période de canicule. L'îlot de chaleur est également caractérisé par une réduction de l'humidité relative due aux fortes températures et au manque de sources d'humidité (la végétation), des vents modifiés avec une réduction des vitesses d'air, contribuant à l'augmentation de la pollution de l'air, une réduction du rayonnement solaire direct et une augmentation du rayonnement diffus et enfin une diminution des échanges infrarouge avec la voûte céleste qui limite ce gisement de rafraîchissement.

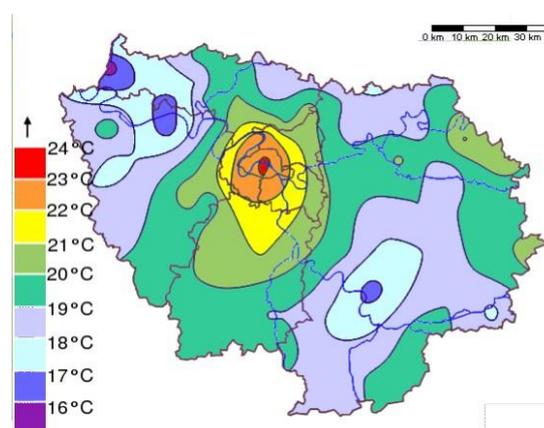


Figure I. 5 - Îlot de chaleur nocturne mesuré à Paris lors de la canicule 2003 (moyenne de 15 nuits consécutives, Source : Météo France).

I.2.1.1 Les causes de l'ICU et l'artificialisation des sols

Le Tableau I. 1 donne un aperçu des principales causes de l'ICU.

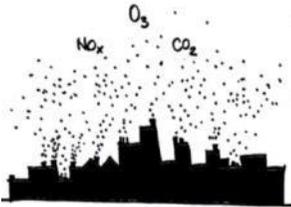
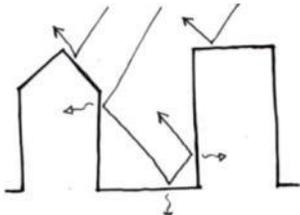
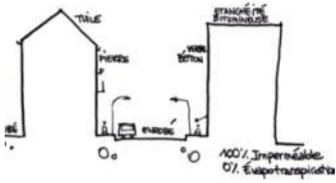
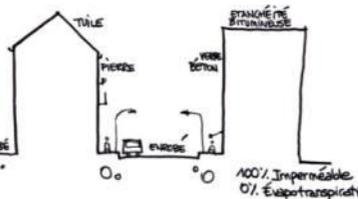
<p>Pollution atmosphérique</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Concentration importante de gaz à effet de serre au-dessus des villes - Émission de chaleur par rayonnement grande longueur d'onde de la voûte céleste du fait de la pollution atmosphérique - Émission de chaleur due aux transports (voitures, camions...) 	<p>Densité bâtie</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Piégeage radiatif solaire, rayonnement direct, diffus et inter-réfléchi. - La morphologie urbaine masque la visibilité vers la voûte céleste et donc les échanges infrarouges avec celle-ci. (Potentiel de rafraîchissement limité)
<p>Emissions de chaleurs anthropiques</p> 	<p>La concentration des activités humaines et notamment :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Déperditions de chauffage en hiver - Climatisation en été émettant de la chaleur dans l'espace extérieur - Émissions des véhicules - Émissions des industries 	<p>Evapotranspiration</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible évapotranspiration du fait des surfaces urbaines faiblement végétalisées et de l'absence de l'eau
<p>Rugosité aux vents</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - La réduction des vitesses de vent dues à la rugosité urbaine - Réduction des transferts thermiques par transport du fait de la diminution de la vitesse d'air. 	<p>Les surfaces : Albédo, Inertie</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible albédo des surfaces urbaines (matériaux minéraux sombres), ce qui engendre un haut taux d'absorption du rayonnement solaire. - Le déphasage de restitution de la chaleur lié à l'inertie thermique des matériaux extérieurs

Tableau I. 1 - Les causes de l'ICU (Illustrations, Héroïse Marie, TRIBU)

Parmi les causes de l'ICU, l'artificialisation des sols en est une qui dépasse la problématique de l'ICU. Le développement des zones urbaines a conduit à une augmentation de 548 milliers d'hectares de la surface de sols artificialisés (sols bâtis, sols revêtus ou stabilisés et autres sols artificialisés) entre 2006 à 2015, soit l'équivalent de la surface d'un département en dix ans (Figure I. 6). L'accroissement de l'artificialisation des sols n'est pas un cas singulier à la France. Dans les majeures partie du monde, le développement urbain se traduit par une minéralisation massive des surfaces, occasionnant des problématiques supplémentaires d'épuisement des ressources ou d'imperméabilisation des sols entraînant des difficultés pour la gestion des eaux pluviales. Cette expansion aux conséquences non-négligeables sur les enjeux environnementaux et sanitaires implique d'imaginer les projets urbains en faveur de la végétation et de la biodiversité pour atténuer l'impact de nos aménagements urbains sur le climat et microclimat et offrir des espaces extérieurs confortables pour les citoyens.

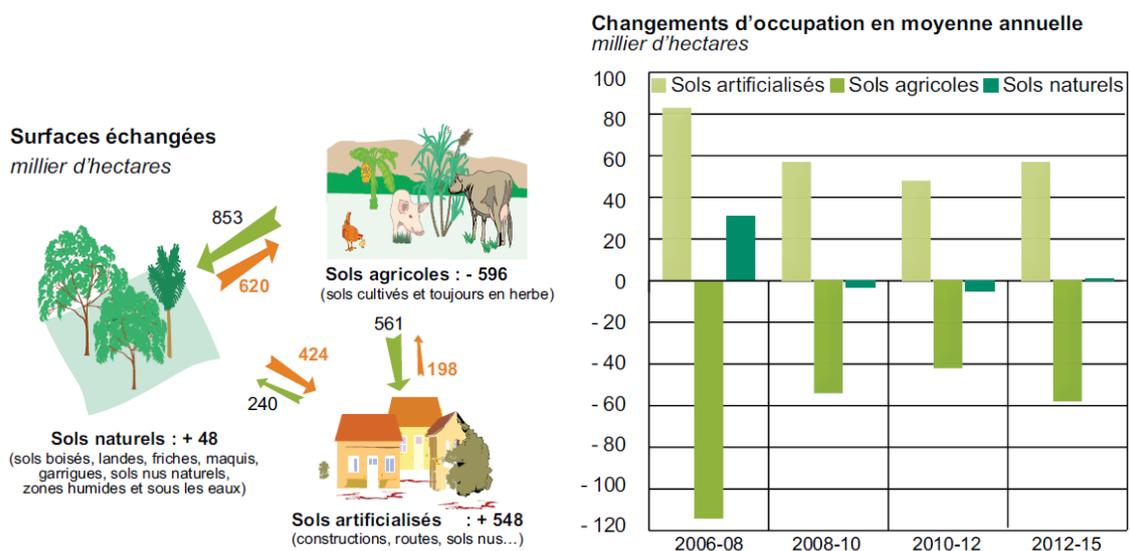


Figure I. 6 - Changement d'occupation des sols entre 2006 et 2015 (Source : Agreste – Teruti-Lucas).

1.2.1.2 Modification de la structure verticale de l'atmosphère urbain

L'atmosphère au-dessus des villes est structurée en différentes couches dont les définitions, les dimensions et les échelles climatiques sont précisées dans le Tableau I. 2. La Figure I. 7 illustre les conséquences de l'ICU sur la structure verticale de l'atmosphère urbain observées sur un grand nombre de campagnes expérimentales. Les profils des couches UCL et RSL sont les mêmes de jour comme de nuit. En revanche, on observe une différence de la sous-couche inertielle ISL entre le jour et la nuit. En journée, l'ISL apparait constante, peu importe le niveau d'urbanisation. Ceci est vrai pour une journée supposée ensoleillée où le flux solaire est la sollicitation prépondérante des surfaces terrestres. La nuit, sans rayonnement solaire, les flux de chaleur émanant de la ville provoquent une couche inertielle ISL au-dessus de celle-ci. En région péri-urbaine ou rurale, aucune ISL ne se forme, laissant place à une atmosphère stable (ML). Finalement, l'ICU a une influence sur l'atmosphère urbaine particulièrement durant les périodes nocturnes, ce qui induit des modifications sur les écoulements des masses d'air.

Nom de la couche	Définition	Dimension verticale typique	Échelle Climatique
Urban Canopy Layer (UCL) ^(1, 2)	Située entre le sol et la hauteur moyenne des bâtiments et des arbres. C'est l'ambiance qui sollicite les bâtiments et que les citoyens ressentent en espaces extérieurs	Dizaines de mètres	Micro
Roughness sublayer (RSL) ^(1, 2)	Entre le sol et 1 à 5 fois la hauteur moyenne des bâtiments et arbres (inclut UCL). Les flux d'air dans cette couche de rugosité sont impactés par les obstacles urbains.	Dizaines de mètres	Micro
Inertial sublayer (ISL) ^(1, 2)	Au-dessus de la couche de rugosité La vitesse des vents est caractérisable par un profil logarithmique et les flux turbulents sont homogènes.	~25-250 mètres	Locale
Mixed layer (ML) ⁽²⁾	Les conditions atmosphériques sont uniformes.	~250-2500 mètres	Méso

(1) La couche entre le sol et la limite haute ISL est appelée « surface layer » (SL). SL intègre UCL, RSL et ISL

(2) La couche entre le sol et la limite haute de la ML qui est influencée par les surfaces urbaines est appelée « Urban boundary layer » (UBL). UBL intègre UCL, RSL, ISL, et ML.

Tableau I. 2 - Classification des couches atmosphériques urbaines (Oke, et al., 2017).

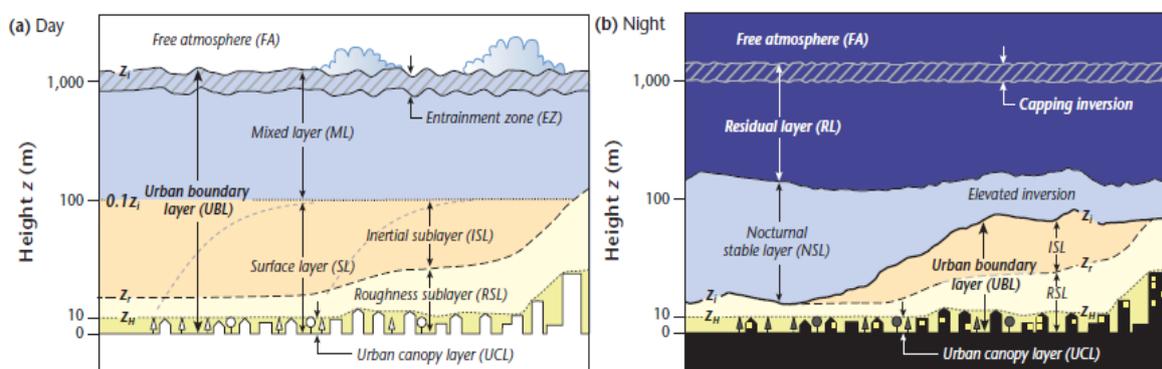


Figure 1. 7 - Schéma théorique des couches atmosphériques au-dessus d'une ville (a) la journée et (b) la nuit (Oke, et al., 2017).

1.2.2 Le changement climatique global

Le climat global est régi par le phénomène d'effet de serre. Il résulte de l'absorption des rayonnements solaire et infrarouge par des gaz présent naturellement dans l'atmosphère à relativement faibles concentrations comme le dioxyde de carbone (CO₂), la vapeur d'eau (H₂O) et le méthane (CH₄). Ce phénomène permet à la température au niveau du sol d'être d'environ 33°C supérieure à celle qui résulterait du simple équilibre radiatif avec le rayonnement solaire (Godard, 2001).

Au cours des siècles, le climat global a varié fortement sous l'influence de nombreux phénomènes astronomiques, géologiques...et plus récemment sous l'effet des activités humaines (l'anthropie). En effet, ces dernières ont contribué à sensiblement augmenter les teneurs de ces gaz depuis plus d'un siècle, tout en y ajoutant d'autres gaz spécialement actifs comme les chlorofluorocarbures (CFC) (dont l'usage a été interdit en 1987)¹. Cela se traduit par une absorption et donc une réémission de chaleur par rayonnement infrarouge plus importante, modifiant ainsi l'équilibre préexistant. C'est une cause du changement climatique actuel.

Devant ces urgences climatiques, un groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a été fondé en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale et le Programme des Nations Unis pour l'environnement. Sa mission est d'évaluer et de synthétiser les différentes études sur le changement climatique menées à travers le monde. Météo France participe activement à l'élaboration des rapports du GIEC qui sont produits tous les six ans et organisés suivant trois groupes de travail : le premier travaille sur la base scientifique du changement climatique, le second sur les conséquences de ces changements sur nos sociétés, et le troisième étudie les solutions pour atténuer ces changements. Enfin, une équipe spécialisée pour les inventaires nationaux développe un guide méthodologique standard pour le suivi des émissions de GES.

1.2.2.1 Les constats du GIEC

Le dernier rapport du GIEC (rapport du lundi 8 octobre 2018) souligne que le taux de GES est passé de 270 ppm à la fin du XIX^{ème} siècle à 400ppm aujourd'hui. Cela se traduit par une augmentation de la température mondiale de +0,8°C en un siècle, avec des vagues de chaleur plus intenses et fréquentes. De plus, 10 % de la surface de la planète est touchée de nos jours par des températures extrêmes contre seulement 1 % de la surface à la fin du XIX^{ème} siècle (Source Météo France). Plus généralement, le changement climatique se traduit également par l'élévation du niveau des océans, l'augmentation des cyclones en zone tropicale ou encore l'augmentation des précipitations. Ces catastrophes naturelles, qui risquent d'être de moins en moins des épisodes exceptionnels, touchent une part croissante de la

¹ Les CFC ont été très utilisés au cours du XX^{ème} siècle du fait de ses nombreux avantages, ces gaz sont très peu coûteux à fabriquer, non inflammables, et extrêmement stables et inertes. Ainsi les CFC se sont retrouvés dans les industries de froid (stabilité, chaleur de changement d'état favorable, absorbant beaucoup de calories par unité de masse, non toxiques) ; dans l'industrie des nettoyeurs (haut pouvoir dégraissant) ; l'industrie des propulseurs avec les bombes aérosols et les extincteurs (inodore, ininflammable, avec une vitesse d'évaporation élevée) ; et enfin dans l'industrie des mousses (incolor, ininflammable, expansion de la mousse à des pressions plus faibles que l'air comprimé). Les gaz CFC ont donc beaucoup d'atouts mais ce sont malheureusement des gaz puissants en termes d'effet de serre et ils sont en outre responsables pour une bonne part de la destruction de la couche d'ozone. Rappelons que cette couche d'ozone protège les écosystèmes des effets délétères des UV solaires. A la fin du XX^{ème} siècle, les CFC ont alors été interdits dans de nombreux pays dans le cadre d'un accord international dit Protocole de Montréal signé en 1987.

population sujette à une situation de précarité climatique. Enfin, les émissions de GES d'origine anthropique provoquent une hausse moyenne des températures de l'ordre de 0,2 °C par décennie à l'échelle de la planète. À ce rythme, le seuil de 1,5 °C de réchauffement, limite fixée lors de la conférence mondiale sur le climat COP 21 de 2015, devrait être atteint dès 2040.

A l'échelle de la France, le changement climatique est également observable. La Figure I. 8 issue de Météo France présente les écarts entre la température moyenne sur les années 1981-2010 et les températures moyennes annuelles des années 1900 à 2018 en France métropolitaine. On observe un réchauffement notable et continu à partir des années 1990, avec un maximum atteint lors de la dernière année complète de 2018.

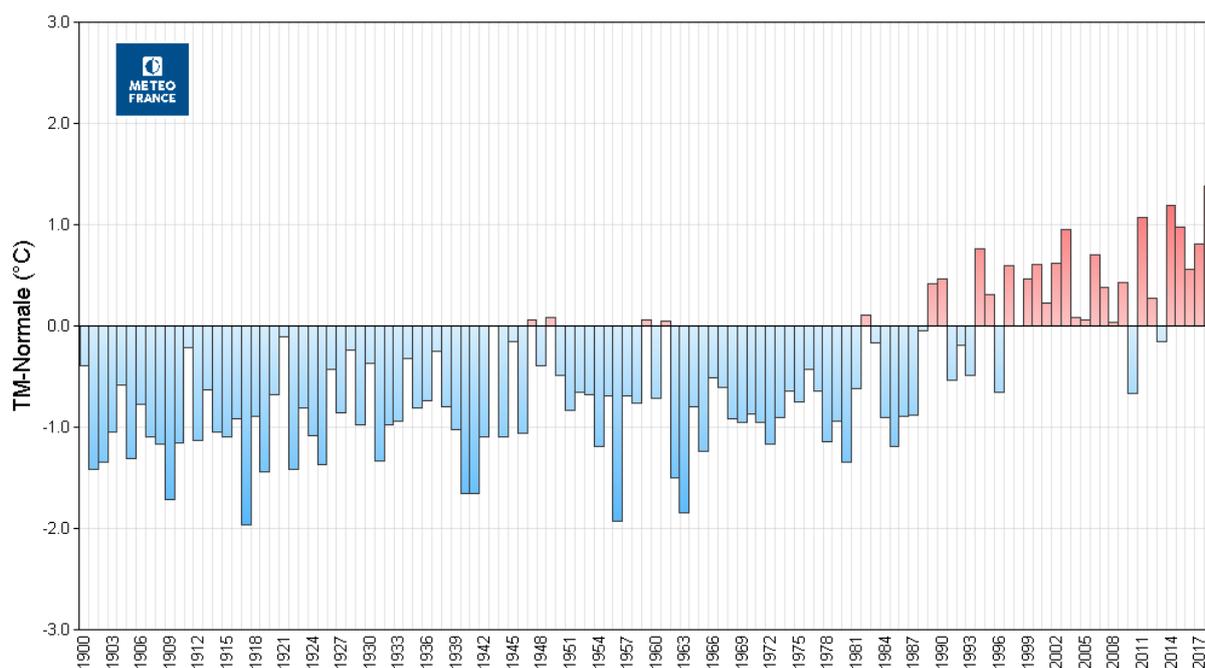


Figure I. 8 - Ecart à la normale 1981-2010 des températures moyennes (à l'échelle de la France métropolitaine) de 1900 à 2018 (Source : Météo France).

Outre l'augmentation des températures et des vagues de chaleur, le changement climatique s'accompagne d'autres effets qui tendent à amplifier le phénomène. Citons trois exemples. Le dégel des sols permanents provoque le relargage de CO₂ et de CH₄ lors de la décomposition de matière organique. La fonte des glaces permanentes (à hauteur de 10% de leur surface tous les 10 ans (Zwally et al., 2002)) caractérisée par un albédo élevé fait que les rayonnements solaires incidents sont moins réfléchis vers le ciel et plus absorbés par les sols et les océans. Enfin, l'augmentation de la température des océans limite la dissolution du CO₂ dans leurs eaux et donc leur pouvoir régulateur. Ce sont autant d'exemples qui montrent la difficulté à définir des scénarii d'émission de GES pour le futur.

1.2.2.2 Les climats futurs selon des scénarii d'émissions de GES

Des outils comme WRF, C25, C75 ou Aladin-Climat permettent de modéliser et simuler numériquement les échanges radiatifs courte et grande longueur d'onde (CLO et GLO) et par extension le climat à une échelle globale ou régionale. Ces outils sont donc naturellement utilisés pour prospecter sur les climats futurs. Cela se fait généralement par l'introduction d'un terme de forçage radiatif qui vient modifier le bilan

énergétique. Ce terme dépend de plusieurs facteurs, dont la concentration des GES. Pour réaliser des projections climatiques, il faut donc émettre des hypothèses sur l'évolution de ces concentrations. Dans les rapports du GIEC de 2001 et 2007, des scénarii socio-économiques, dit SRES (pour « Special Report on Emissions Scenarios »), organisés en trois familles (B1, A1B, et A2) ont été instaurés pour estimer les émissions GES du XXI^{ème} siècle. En 2014, ces scénarii ont été remplacés par quatre nouvelles trajectoires d'émissions GES baptisées RCP (pour « Representative Concentration Pathways ») qui résultent d'une meilleure connaissance du système climatique et des déterminants socio-économiques d'une part et d'un travail collectif entre climatologues, hydrologues, agronomes, économistes... d'autre part. Les principales hypothèses des scénarii RCP sont présentées dans le Tableau I. 3 et les évolutions du terme de forçage radiatifs sont illustrées sur la Figure I. 9 et comparées à celles des anciens scénarii SRES. On constate que le scénario RCP 8.5 est un peu plus pessimiste que le scénario SRES A2, le RCP 6 est proche du SRES A1B, tandis que le RCP 4.5 est proche du SRES B1. Le seul scénario sans équivalent est le RCP 2.6 qui intègre les effets d'une politique de réduction des émissions susceptible de limiter le réchauffement planétaire à 2°C à l'horizon 2100.

Scénarii prospectifs	Forçage radiatif	Concentration (ppm)	Trajectoire
RCP8.5	>8,5W.m-2 en 2100	>1370 eq-CO2 en 2100	Croissante
RCP6.0	~6W.m-2 au niveau de stabilisation après 2100	~850 eq-CO2 au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP4.5	~4,5W.m-2 au niveau de stabilisation après 2100	~660 eq-CO2 au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP2.6	Pic à ~3W.m-2 avant 2100 puis déclin	Pic ~490 eq-CO2 avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin

Tableau I. 3 - Détail des scénarii prospectifs RCP.

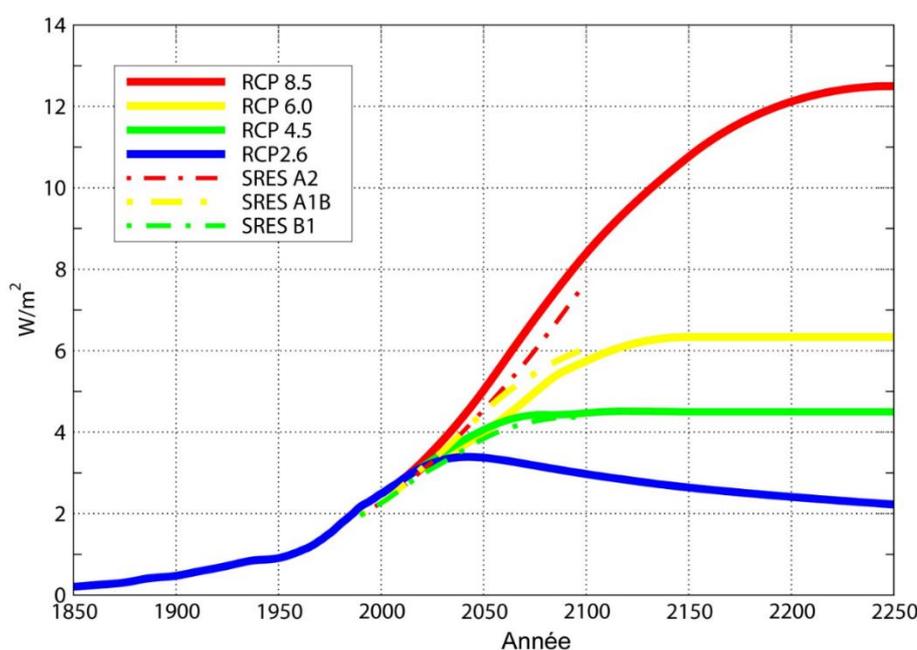


Figure I. 9 - Comparaison des scénarios RCP (traits pleins, 5^{ème} Rapport du GIEC 2014) et SRES (tirets, 5^{ème} Rapport du GIEC 2007) sur le forçage radiatif.

Ces scénarii RCP ont été testés dans les outils climatiques à l'horizon 2050 et 2100 (Tableau I. 4). Tous prédisent évidemment une augmentation de la température, mais les effets diffèrent selon les modèles numériques utilisés. A l'horizon 2021-2050, des écarts de 1,3°C sont observés entre les modèles C25 et C75, pour le scénario RCP 2.6. Pour la période plus éloignée, 2071-2100, les écarts sont encore plus importants, jusqu'à +2,1°C pour Aladin-Climat par rapport C25 (RCP 8.5).

TEMPERATURE ÉTÉ		C25	WRF	Aladin-Climat	C75
2021-2050	RCP 2.6	+0,7°C	Indisponible	+1,2°C	+2,0°C
	RCP 4.5	+0,6°C	+1,0°C	+1,3°C	+1,9°C
	RCP 8.5	+0,9°C	+0,6°C	+1,2°C	+2,0°C
2071-2100	RCP 2.6	+0,6°C	Indisponible	+1,3°C	+2,0°C
	RCP 4.5	+1,4°C	+1,2°C	+2,9°C	+2,9°C
	RCP 8.5	+3,2°C	+2,6°C	+5,3°C	+5,1°C

Tableau I. 4 - Ecart de température, en été, par rapport à la référence 1976-2005 calculées par quatre modèles climatiques européens, pour les périodes 2021-2050 et 2071-2100 (à l'échelle de la France) (Jouzel, 2014).

Le changement climatique se caractérise aussi par des vagues de chaleur de plus en plus extrêmes et fréquentes.

1.2.2.3 Vagues de chaleur et canicules

Le terme de canicule date de l'époque romaine et d'un certain Varron qui nomma « Canicula » traduit par « petite chienne » l'étoile la plus brillante de la constellation du Grand Chien (étoile maintenant nommée Sirius). En Europe, lors de la période du 24 juillet au 24 août, cette étoile très lumineuse se lève en même temps que le Soleil. Ce constat avait laissé penser aux anciens qu'il existait un lien entre l'apparition de cette étoile et les grandes chaleurs météorologiques (Rey et Tomi, 1998).

Si la définition de vague de chaleur semble... « vague », c'est qu'il n'y a pas de définition clairement établie pour ce terme. On peut tout de même dire qu'une vague de chaleur représente une période, définie dans le temps, de chaleur, définie par des seuils. Ce sont les définitions précises des seuils et de la durée de la période de chaleur qui spécifient le terme de vague de chaleur en canicule.

Suite à la vague de chaleur de 2003, la France a mis en place un plan national canicule destiné à réduire les impacts sanitaires des vagues de chaleur. Ainsi des indicateurs du « Système d'alerte canicule et santé » (Sacs) permettent de détecter les périodes caniculaires. Ces indicateurs sont définis par département, et après des retours d'analyse sur la surmortalité durant les précédents épisodes de chaud. La différenciation des seuils d'alerte par localité permet de tenir compte de l'adaptation génétique et culturelle des populations à leurs climats. En effet, une personne habitant sur la côte Méditerranée sera plus habituée aux fortes chaleurs qu'une personne vivant en Bretagne.

La vulnérabilité des personnes est à prendre en compte dans l'évaluation des risques sanitaires. On fait souvent allusion à la vulnérabilité des personnes âgées en période de canicule et à juste titre puisqu'en

2003 une surmortalité de quasiment 15000 personnes a été déplorée dont 70% avaient plus de 75 ans. Depuis les seuils d'alerte canicule ont été établis en fonction de ce public. Ces seuils sont donnés par rapport à des moyennes glissantes sur 3 jours (Wagner, 2018). Cette durée de 3 jours n'est pas définie par hasard, après 48h, l'efficacité du rafraîchissement corporel par sudation (ou transpiration) d'une personne âgée se dégrade fortement ce qui la rend vulnérable aux conditions thermiques extrêmes.

Une alerte canicule apparait donc lorsque les températures minimum et maximum, moyennées sur trois jours, atteignent ou dépassent les seuils du Sacs donnés dans la Figure I. 10 ci-dessous (Wagner, 2018).

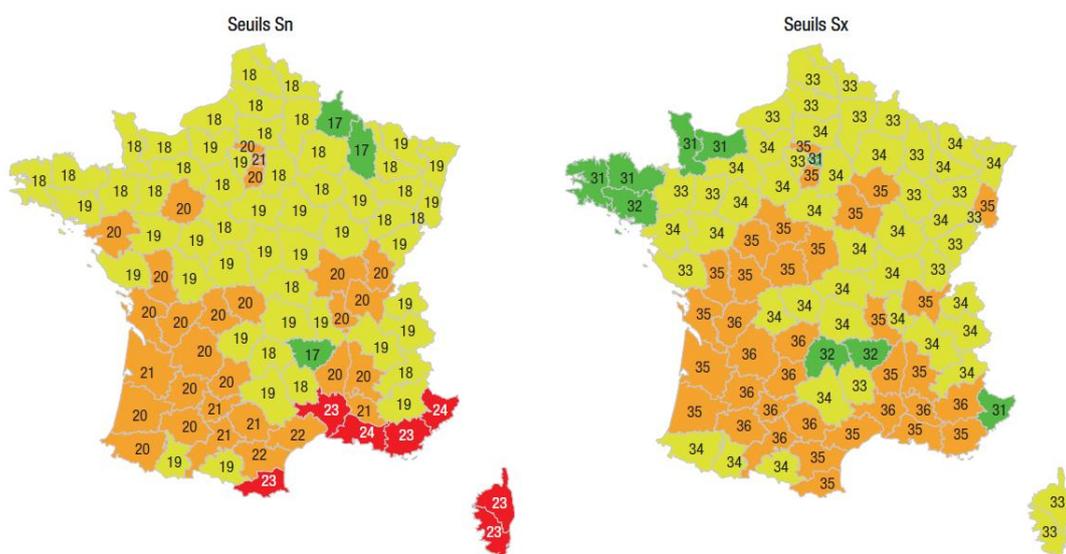


Figure I. 10 - Seuils des indicateurs du « Système d'alerte canicule et santé », actualisés en 2016. Avec Sn la température minimum moyennée sur trois jours et Sx la température maximum moyennée sur trois jours (Wagner, 2018).

Pour le cas de Lyon par exemple, si la moyenne glissante sur trois jours (consécutifs) atteint ou dépasse 34°C en journée et reste au-dessus de 20°C la nuit, l'alerte canicule est déclenchée. Cet épisode extrême est caractérisé suivant différents paramètres. Météo France évoque la durée, l'intensité maximale, et la sévérité d'un épisode caniculaire (Figure I. 11).

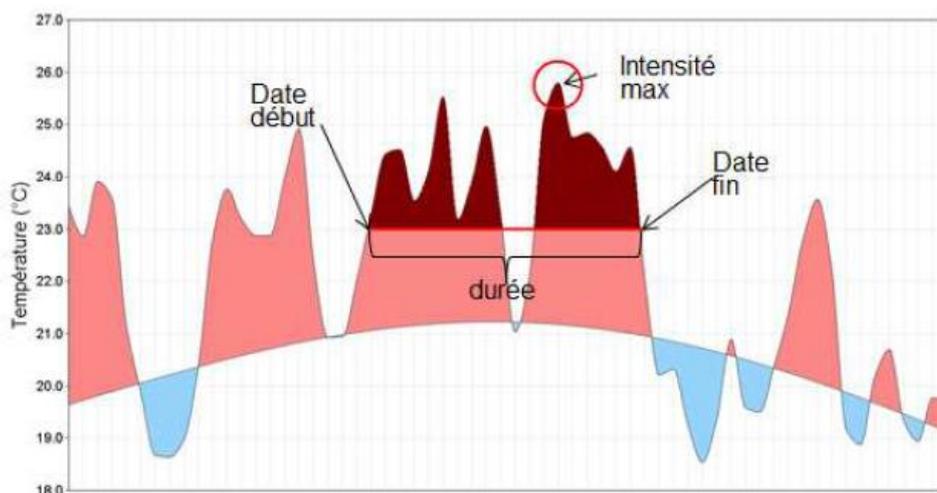


Figure I. 11 - Caractérisation d'une canicule à l'échelle de la France (Soubeyroux, Schneider, et Ouzeau, 2015), données du 1^{er} juillet au 31 août 2006.

L'évolution de la température journalière agrégée à l'échelle de la France est présentée Figure I. 11, et comparée à la normale 1981-2010 pour distinguer les périodes particulièrement chaudes lors de l'été 2006. Le seuil moyen entre S_x et S_n donne une limite à 23°C , qui sur trois jours fait apparaître une canicule. Cette canicule est définie par sa durée, en nombre de jours entre la date de début et de fin de l'épisode extrême. L'intensité maximale de la canicule est également évoquée, elle détermine la température maximale atteinte lors de l'épisode caniculaire. Enfin la sévérité, coloriée en marron sur la Figure I. 11, révèle l'intensité moyenne d'une canicule, il s'agit du niveau de température dépassant le seuil (ici 23°C) et intégré sur la période de la canicule.

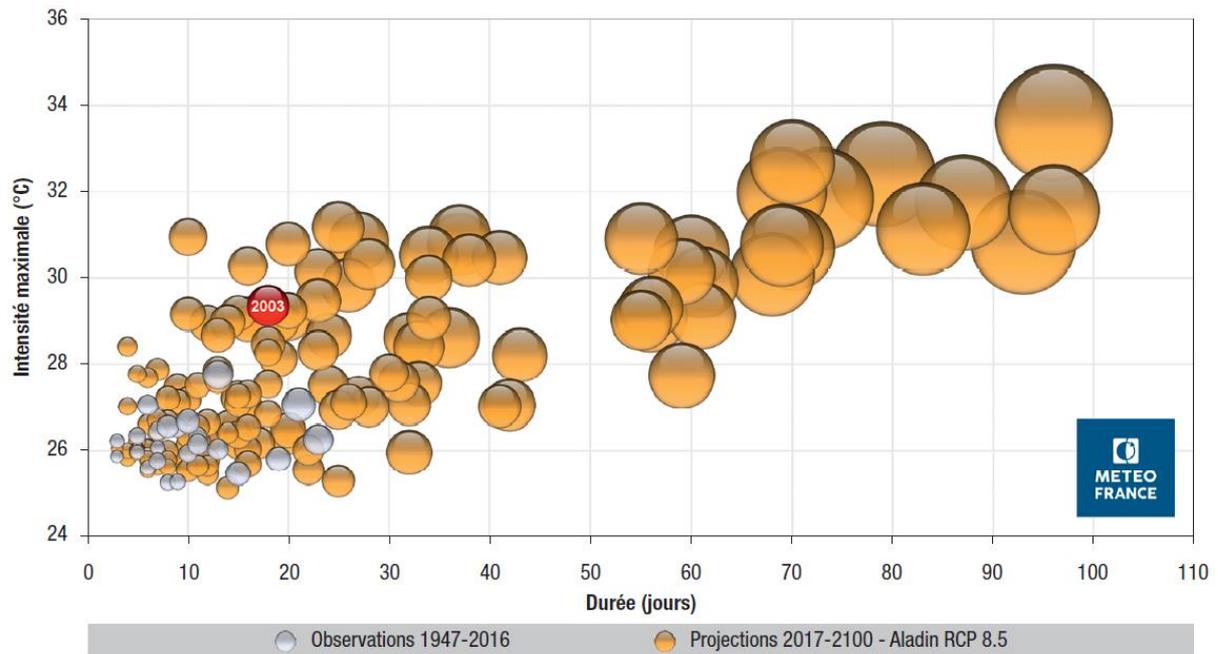


Figure I. 12 - Estimation des canicules (à l'échelle de la France) sous Aladin-Climat et pour le scénario RCP8.5. La taille des bulles est proportionnelle à la sévérité ou l'intensité globale ($^{\circ}\text{C}$) des vagues. (Source : METEO FRANCE).

Le tracé de la Figure I. 12 permet pour la France une caractérisation homogène des canicules passées observées entre 1947 et 2016, et celles estimées pour la période 2017-2100.

Voici un bilan des conclusions du dernier rapport du GIEC et leurs répercussions concernant les vagues de chaleur à l'échelle de la France (Wagner, 2018).

A l'horizon 2021-2050 on pourrait observer:

- près d'une vague de chaleur par an;
- un épisode au moins aussi sévère qu'en 2015 tous les trois ans;
- une vague de chaleur au moins aussi sévère qu'en 2006 tous les huit ans;
- une vague de chaleur au moins aussi sévère qu'en 2003 tous les quinze ans.

Et à l'horizon 2050-2100 :

- presque trois vagues de chaleur par an;
- presque deux épisodes au moins aussi sévères qu'en 2015 par an ;
- une vague de chaleur au moins aussi sévère qu'en 2006 tous les ans;
- une vague de chaleur au moins aussi sévère qu'en 2003 plus d'une année sur deux.

La prospection des canicules futures inquiète d'un point de vue sanitaire. Des actions de la part des politiques sont vitales.

1.2.2.4 Actions politiques

Les alertes du GIEC ont poussé les services publics à réagir et s'organiser. Ainsi, le portail DRIAS (Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnement) a pour vocation de mettre à disposition librement et gratuitement des projections climatiques régionalisées réalisées dans les laboratoires français de modélisation du climat (IPSL, CERFACS, CNRM-GAME). Ces données des climats régionaux futurs peuvent aider à la conception des Plan Climat Air-Énergie Territorial (PCAET) à l'échelle des agglomérations. En effet, le PCAET est un document-cadre de la politique énergétique et climatique des collectivités, dans lequel sont fixés des mesures de développement des énergies renouvelables, de maîtrise de la consommation d'énergie ou d'atténuation du changement climatique (Figure I. 13). Même s'il peut être de nature assez différente en fonction de l'engagement des collectivités concernées, son contenu reste fixé par la loi et contient :

- un diagnostic,
- une stratégie territoriale,
- un plan d'actions,
- un dispositif de suivi et d'évaluation des mesures initiées.

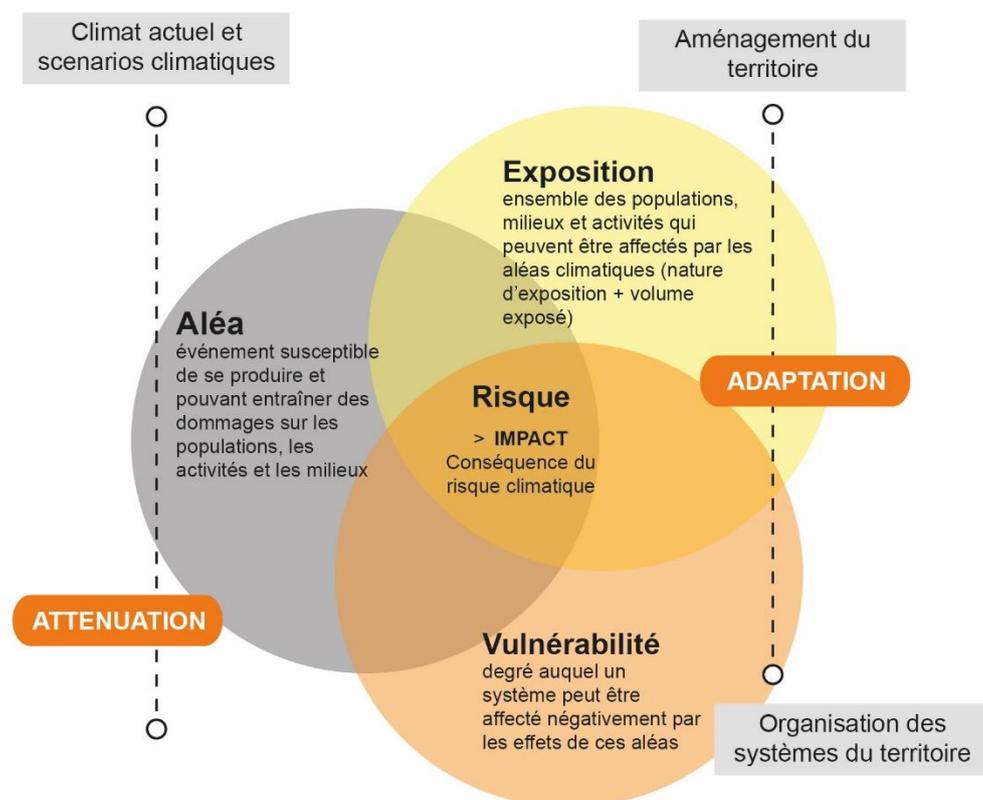


Figure I. 13 - Notions d'adaptation et d'atténuation des changements climatiques, enjeux et risques sanitaires (Source : TRIBU).

Les préconisations des PCAETs peuvent ensuite être utilisées comme support dans la rédaction des CPAUPE (cahier des prescriptions architecturales, urbaines, paysagères, et environnementales) lors des phases de programmations urbaines, puis arriver jusqu'aux cahiers des charges environnementaux à l'échelle des ilots urbains (ou parcelles) qui accueillent les nouveaux projets de bâtiment. Pour l'agglomération lyonnaise, les projets de bâtiments réalisés en ZAC sont soumis au Référentiel Bâtiment Durable du Grand Lyon.

I.3 Fichiers climatiques

Dans différents secteurs, la connaissance des données météorologiques locales est nécessaire. C'est le cas des outils de STD (Simulation Thermique Dynamique) qui permettent d'évaluer les performances du bâtiment, en termes de confort et de besoins énergétiques. Pour effectuer les calculs, il est nécessaire de renseigner un fichier indiquant les sollicitations météorologiques auxquelles est soumise l'enveloppe du bâtiment.

Aussi compte tenu des développements précédents sur les échelles climatiques d'une part et sur les effets d'îlot de chaleur urbain et/ou de changement climatique, disposer de fichiers climatiques appropriés et représentatifs des conditions actuelles comme futures est un vrai enjeu d'importance.

I.4 État de l'art sur la constitution de fichiers météorologiques

I.4.1 Les types de fichiers météo utilisés en STD

Deux grands types de fichiers météo sont utilisés en STD : les fichiers statistiques issus d'analyses climatologiques ou les fichiers de mesures météorologiques. Les seconds sont plutôt utilisés en phase de suivi de bâtiment, afin de confronter les estimations théoriques aux observations expérimentales, alors que les premiers sont fréquemment utilisés en phase de conception de bâtiments. Dans tous les cas, les fichiers météo se veulent être représentatifs d'une ou plusieurs années de mesures sur une zone climatique.

Les premiers fichiers météo disponibles ont été les fichiers de type TRY (« Test Reference Year »). Ce type de fichier correspond à une année réelle de mesure sélectionnée sur une période donnée de plusieurs années, durant laquelle les années les plus chaudes et les plus froides sont éliminées pour ne conserver que le fichier médian (Pernigotto et al., 2014). En 1993, Crawley (Crawley, 1993) propose d'utiliser des fichiers TMY (Typical Meteorological Year) qui n'analysent plus l'année dans sa globalité mais la discrétisent à l'échelle du mois. Ainsi, chaque mois ayant la température moyenne la plus représentative de la période est conservé, puis les 12 mois sélectionnés sont concaténés pour former un fichier météorologique artificiel, qui ne représente plus une année réelle de mesures. Le principe de construction des fichiers TRY et TMY est illustré sur la Figure I. 14.

Ces approches nécessitent de définir une période d'étude. En climatologie, les normales climatiques, qui sont des données de référence, sont calculées sur des périodes de 30 ans et actualisées tous les 10 ans. Les normales actuellement en vigueur ont été calculées sur la période 1981-2010 par Météo-France. Aujourd'hui, l'accélération des changements climatiques fait que cette synthèse de 30 ans est remise en

cause. Certains spécialistes du climat préfèrent se caler sur une période plus courte, une **décennale** (10 ans), afin de mieux représenter les tendances du réchauffement global (cf. METEONORM).

Outre la température d'air, les fichiers TRY ou TMY fournissent l'humidité relative d'air, les niveaux de précipitations, les vitesses et directions de vent et les données de rayonnement solaire et infrarouge descendant de la voûte céleste. De fait, ces fichiers sont abondamment utilisés en simulation thermique dynamique des bâtiments. De plus, la norme ISO 15927-4:2005 basée sur cette méthode de construction est également disponible pour réglementer la production de fichiers météo destinés à la thermique du bâtiment.

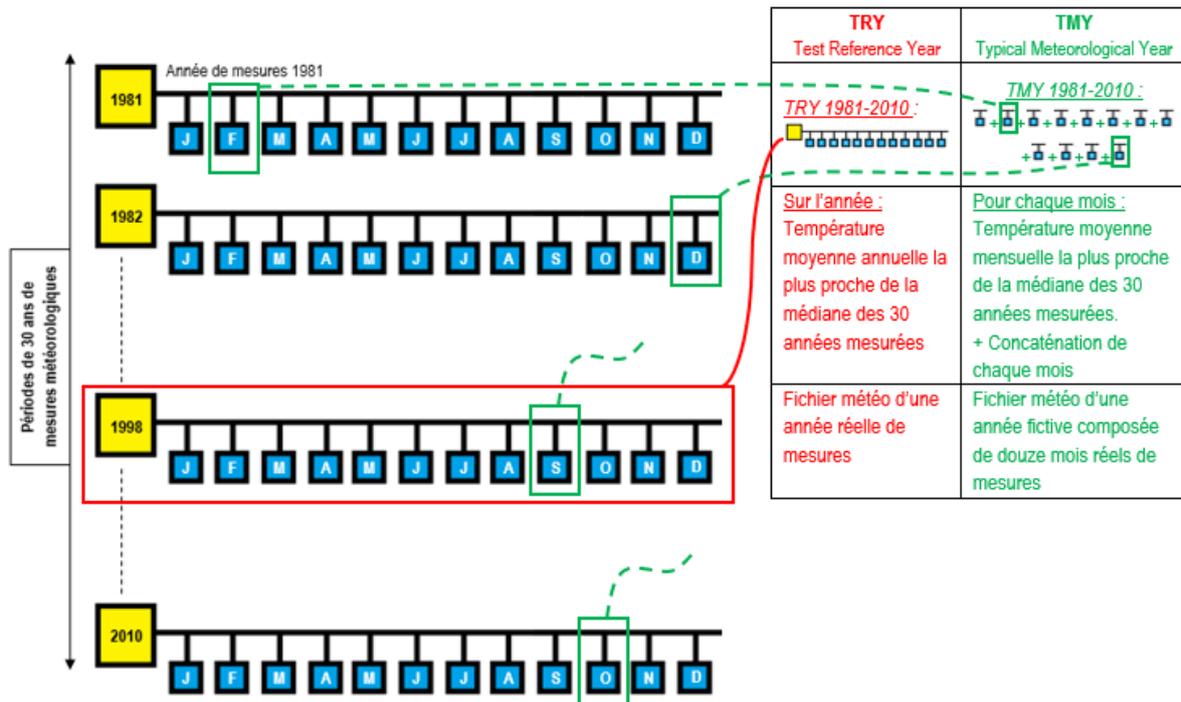


Figure I. 14 - Schéma explicatif de la construction des fichiers climatiques selon les méthodes TRY et TMY.

Cependant, d'autres types de fichiers météo sont disponibles afin de répondre à différentes problématiques. Une liste non exhaustive est présentée sur le site du logiciel de STD EnergyPlus (<https://energyplus.net/weather/sources>). Parmi ceux-ci, on retrouve les fichiers DSY pour « Design Summer Years » proposés par la CISBE (Chartered Institution of Building Services Engineers) au Royaume-Uni (Virk et Eames, 2016), (Eames, 2016). Ces fichiers DSY représentent une année réelle de mesure pour permettre l'étude des risques de surchauffe dans les ambiances intérieures des bâtiments. Après analyse des données mesurées entre avril et septembre, la 3^{ème} année la plus chaude de la période 1984-2004 était sélectionnée avant 2016. Depuis 2016, ce sont des fichiers construits à partir d'études de probabilité permettant de générer 3 types de fichiers DSY : DSY-1 - moderate warm summer, DSY-2 - long warm summer et DSY-3 - short intense summer.

La désignation AMY (Actual Meteorological Year) est le fait d'utiliser une année réelle de mesures météorologiques.

Enfin, si les fichiers météo sont souvent issus de mesures météorologiques historiques (passées), des fichiers prospectifs du climat futur sur la base des scénarii du GIEC sont aussi disponibles.

I.4.2 Les fournisseurs de fichiers météo

La donnée météo utilisée en STD vient principalement de deux sources : EnergyPlus (IWEC et Climate.onebuilding.org) et METEONORM.

- **EnergyPlus**

Le site web EnergyPlus fournit un grand nombre de fichiers météo à l'échelle mondiale. Ceux proposés pour l'Europe sont transmis par l'IWEC et représentent la dernière normale climatique en vigueur (1981-2010) construite à partir de la méthode TMY (Annexe I. 1). Construit à l'initiative des chercheurs Dru Crawley and Linda Lawrie de l'université de Bentley, le site climate.onebuilding.org fournit également des fichiers TMY pour la normale 1981-2010, mais aussi pour la période plus récente 2003-2017.

- **METEONORM**

METEONORM est un logiciel mondialement connu qui répond aux besoins en données climatiques des outils de STD (PLEIADES, Design Builder...), mais également de transferts hygrothermiques (WUFI), d'estimation de potentiel solaire photovoltaïque (PVSYST, PVSOL...) ou thermique (TSOL, Polysun...).

Le logiciel possède une base de données climatiques importantes issues de mesures de terrain (station météo) et de mesures par satellites pour différentes périodes. L'irradiation solaire est disponible pour l'ensemble du globe pour les périodes 1981-1990 et 1991-2010. Les autres paramètres météorologiques sont disponibles pour les périodes 1961-1990 et 2000-2009. Du fait des changements climatiques rapides constatés lors des dernières décennies, METEONORM a fait désormais le choix de se baser sur des fichiers climatiques construits à partir de décennales afin d'avoir une représentation plus juste des conditions climatiques actuelles. Un modèle d'interpolation permet de recalculer de la donnée météo pour n'importe quel site dans le monde en fonction de ses caractéristiques (ville, lac, océan, vallée...). A titre d'exemple, les Tableau I. 5 et Tableau I. 6 présentent respectivement les facteurs de correction des valeurs moyennes mensuelles des données de températures et des vitesses de vent. Les données d'ensoleillement et d'humidité relative sont également corrigées suivant les mêmes méthodes. Pour le rayonnement, METEONORM tient compte de la réduction globale du rayonnement causée par une grande ligne d'horizon (masques solaires lointains). Dans le logiciel, cette dernière peut être saisie graphiquement (ligne de résistance) ou calculée automatiquement sur la base d'un modèle numérique de terrain.

Feature	Zone	Jan	Feb	Mar	April	May	June	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
open	A	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
depression	A	-1.6	-0.7	-0.5	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.4	-0.7	-1.2
cold hollow	A	-3.9	-2.8	-1.7	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-1.0	-2.2	-3.8
sea/lake	A	1.2	0.8	0.0	-0.5	-0.7	-0.7	-0.4	-0.1	0.4	0.6	0.7	1.1
city	A	1.1	1.0	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1.1	1.2
S-facing incline	N	1.8	1.2	1.0	0.8	0.8	0.6	0.8	0.8	1.1	1.4	1.7	1.7
S-facing incline	S	3.4	2.9	1.9	1.3	1.3	1.3	1.5	1.7	1.8	2.1	2.8	3.7
W/E-facing incline	N	0.9	1.8	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.6	0.7	0.9
W/E-facing incline	S	1.7	1.5	1.0	0.7	0.7	0.7	0.8	0.9	0.9	1.1	1.4	1.9
valley	N	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
valley	S	1.8	1.6	1.1	1.0	1.0	0.7	0.9	1.0	1.0	1.2	1.6	2.1

*S-facing incline. For southern hemisphere: N-facing incline!
Zone: **N:** Regions north of 45°N or south of 45°S **A:** General **S:** Regions south of 45°N and north of 45°S

Feature: **Depression:** Small and medium depressions with formation of cold hollows, particularly in winter, or strongly shaded. Mainly confined to mountainous regions.
Cold hollow: Includes the extensive cold hollows of central Alpine valleys such as in upper Engadine in Switzerland.
Lake: Vicinity of sea or larger lakes (> 100 km²). Site not more than 1 km from the shore.
City: Applicable to centers of larger cities with over 100,000 inhabitants.

Tableau I. 5 - Facteur de correction des températures moyennes mensuelles (Meteonorm, 2018).

Terrain	Correction factor [m/s] (applicable to all months of year)
sheltered terrain (cities)	-1.0
open	0.0
sea/lake	1.0
Summits (hills and ridges)	3.0

Tableau I. 6 - Facteur de correction des vitesses de vent moyennes mensuelles (Meteonorm, 2018).

Les données météo horaires requises sont générées à l'aide d'un modèle stochastique à partir des valeurs moyennes mensuelles (données de la station, données interpolées ou données importées). Les paramètres suivants sont obtenus :

- Température d'air
- Vitesse et direction de vent
- Azimut et hauteur solaire,
- Rayonnement solaire direct et diffus,
- Rayonnement de grande longueur d'onde (échange avec le ciel),
- Intensité lumineuse,
- Précipitation, pluie battante,
- Paramètres d'humidité (point de rosée, humidité relative).

Ces données horaires ou mensuelles peuvent être exportées sous 36 formats différents fréquemment rencontrés ou sous un format défini par l'utilisateur.

Les différents fichiers METEONORM utilisés dans cette thèse ont été générés avec la version 7.1. Actuellement, la dernière version est la 7.3. Cette dernière version fournit des données de rayonnement

actualisées sur de nouvelle partie du monde et possède un module d'îlot de chaleur urbain pour 4 villes européennes (Barcelone, Berne, Rome et Vienne). Ces données climatiques urbaines détaillées sont issues du projet H2020 « climate-fit.city ». D'autres villes seront progressivement ajoutées à la base de données.

I.5 Méthodologie de comparaison des données climatiques

I.5.1 Quelques notions sur les statistiques et la climatologie

Par définition, la climatologie s'intéresse aux valeurs moyennes des paramètres météorologiques, à leur dispersion autour de cette moyenne, aux valeurs extrêmes et à leur durée de retour (ou fréquence). Elle fait donc appel au vocabulaire des statistiques.

Moyennes climatiques

La moyenne est la grandeur statistique la plus simple et la plus utilisée. Elle permet de représenter une série de données en une valeur unique. En climatologie, la moyenne fait référence à une période : moyenne sur la journée, le mois, l'année ou sur les trente dernières années.

Quartile et médiane d'un jeu de données

Les quartiles, de même que les quintiles ou la médiane, mesurent la dispersion d'un échantillon. Par exemple, les quartiles sont les valeurs séparant l'échantillon des données en 4 parts égales (25% chacune). Dans une série de températures, 25% des valeurs sont inférieures au premier quartile (également appelé quartile inférieur) et 25% des valeurs sont supérieures au 3e quartile (quartile supérieur). Ces mesures de dispersion sont importantes à considérer car la moyenne ne suffit pas à caractériser un échantillon. Ainsi deux villes peuvent avoir toutes les deux une température moyenne annuelle de 15°C mais l'une connaît de grands écarts de température entre été et hiver (cas d'un climat continental) et l'autre peu de variabilité autour des 15°C (cas d'un climat océanique). Les quartiles inférieur et supérieur seront plus éloignés de la moyenne dans le premier cas (grande dispersion des valeurs) que dans le second. La médiane sépare l'échantillon en deux parties égales : 50 % des valeurs sont inférieures à la médiane, 50 % sont supérieures. Elle permet de juger de la répartition hétérogène des valeurs autour de la moyenne. Ces grandeurs statistiques peuvent être représentées graphiquement par une boîte à moustache (ou box plot). Un exemple est proposé sur la Figure I. 15 pour les données horaires de température de l'année 2013 de la station Météo France de Lyon Bron : la moyenne est de 12,2 °C et la médiane est de 13,0°C. 25% des températures sont inférieures à 6,8°C (quartile inférieur) et 25% sont supérieures à 19,0 °C (quartile supérieur).

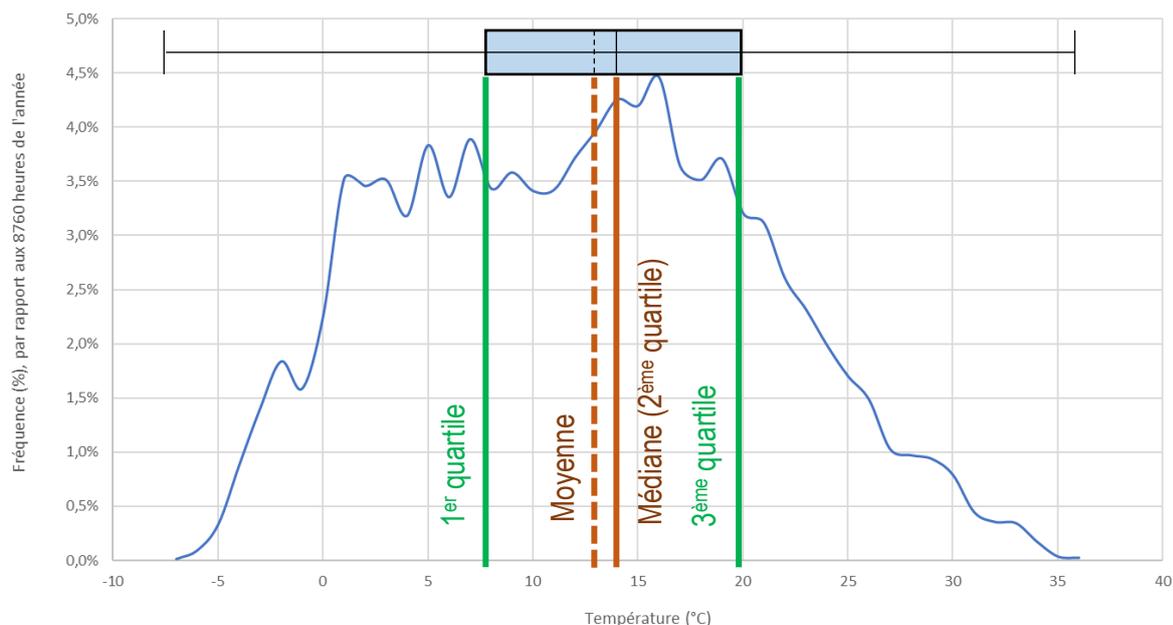


Figure I. 15 - Distribution des températures horaires de Lyon Bron pour l'année 2013, Météo France

Valeurs extrêmes et durées de retour

L'étude des extrêmes et des durées de retour des aléas climatiques représente exactement l'analyse qui est faite sur les événements de canicule. D'autres secteurs d'activité s'intéressent aux valeurs extrêmes et aux durées de retour des paramètres météorologiques, notamment pour dimensionner des ouvrages d'art : résistance au vent d'un pont suspendu, capacité d'une toiture à supporter le poids de la neige, capacité d'un système d'écoulement des eaux pluviales... Ces données extrêmes qui reviennent tous les 5, 10, 50 ou 100 ans sont à différencier des données record qui elles sont uniques.

1.5.2 Post-traitement : Programmation Python

La quantité importante de données à traiter et post-traiter a naturellement suscité le recours à la programmation. Le choix du langage s'est porté sur Python en raison de sa grande communauté et de son caractère open source. De nombreuses bibliothèques existent sous Python pour encapsuler des opérations et des fonctions prédéfinies afin d'aider et d'optimiser les programmes. Parmi ces bibliothèques, 2 d'entre elles ont largement été utilisées aux cours de la thèse : les bibliothèques Pandas et Numpy.



Pandas (logiciel libre sous licence BSD) est une bibliothèque Python permettant la manipulation et l'analyse des données. Elle propose en particulier des structures de données et des opérations de manipulation de tableaux numériques et de séries temporelles. Les principales structures de données sont les séries (pour stocker des données selon une dimension - grandeur en fonction d'un index) et les DataFrames (pour stocker des données selon 2 dimensions - lignes et colonnes).

NumPy est une bibliothèque destinée à manipuler des matrices ou tableaux multidimensionnels ainsi que des fonctions mathématiques opérant sur ces tableaux. Plus précisément, elle fournit de multiples

fonctions permettant notamment de créer directement un tableau depuis un fichier ou au contraire de sauvegarder un tableau dans un fichier, et manipuler des vecteurs, matrices et polynômes.

Sur Windows, l'installation d'un environnement de programmation Python a été facilitée par Anaconda. Anaconda est une distribution libre et open source des langages de programmation Python et R appliqués au développement d'applications dédiées à la science des données et à l'apprentissage automatique (traitement de données à grande échelle, analyse prédictive, calcul scientifique) qui vise à simplifier la gestion des paquets. Les versions de paquetages sont gérées par le système de gestion de paquets Conda. Parmi ces paquets, Spyder (un environnement de développement pour Python) et Jupyter (une application web utilisée pour programmer dans plus de 40 langages de programmation) sont installés. Ici, la quasi-totalité des post-traitements sont issus de scripts réalisés sous Jupyter.



I.6 Comparaison de données climatiques lyonnaises

Nous mettons ici en œuvre une comparaison de différentes données climatiques récupérées pour la ville de Lyon (France) à partir des bases de données de METEONORM et EnergyPlus. Les fichiers, présentés dans le Tableau I. 7, se distinguent selon la période de données utilisée (moyennes sur 10 ou 30 ans), la temporalité (méthode du passé ou projection du futur), la nature des données (mesures réelles EnergyPlus ou génération stochastique par METEONORM), et le lieu (zone péri-urbaine/aéroportuaire ou ville). Les météo sont classées suivant les temporalités d'Hier, d'Aujourd'hui, de Demain, et d'Après-demain. Pour les fichiers prospectifs de Demain et Après-demain, les horizons sont les années 2050 et 2080, que les bâtiments que nous construisons actuellement devraient connaître. L'ancien scénario A2 du GIEC (disponible sur METEONORM) est choisi ici car il est le plus défavorable pour étudier le changement climatique futur (équivalent au nouveau scénario RCP 8.5). Enfin, la notion de surchauffe urbaine est testée via l'option de METEONORM qui recale la moyenne mensuelle des sollicitations climatiques comme illustré dans le Tableau I. 7 pour le cas de la température.

Temporalité de la météo	METEONORM	EnergyPlus
Hier	1961_1990	-
Aujourd'hui	2000_2009 Ville_2000_2009	St Exupéry 1981_2010 (IWECE) Bron 1980_2010 (IWECE) Bron 2003_2017 (ClimateOne)
Demain	A2_2050 Ville_A2_2050	-
Après-demain	A2_2080 Ville_A2_2080	-

Tableau I. 7 – Classement des fichiers climatiques lyonnais étudiés.

Dans la suite, la comparaison porte sur les sollicitations de température (annuelle et horaire), de vent, d'ensoleillement et d'humidité relative.

1.6.1 Comparaison des données annuelles de température

La distribution statistique des températures horaires sur l'année complète est présentée sur la Figure I. 16 pour l'ensemble des fichiers météo. On observe une augmentation continue des températures entre les données de « Hier » (période 1961_1990), de « Aujourd'hui » (période 2000_2009), de « Demain » (Scénario A2 du GIEC à l'horizon 2050), et de « Après-demain » (Scénario A2 du GIEC à l'horizon 2080). L'augmentation de la température moyenne annuelle est de 4,4°C entre la période 1961-1990 ($T_{\text{mean_year}} = 11,4^{\circ}\text{C}$) et le scénario A2_2080 ($T_{\text{mean_year}} = 15,8^{\circ}\text{C}$). Également, l'option ville de METEONORM apporte une correction des valeurs mensuelles prenant ainsi en compte l'effet d'ICU en zones urbaines, ceci se traduit par une surchauffe par rapport aux fichiers standards. Enfin, la distribution statistique des données IWECEnergyPlus (données horaires réelles) pour la période 2003-2017 et comparable à la période 2000-2009 proposée par METEONORM (données stochastiques).

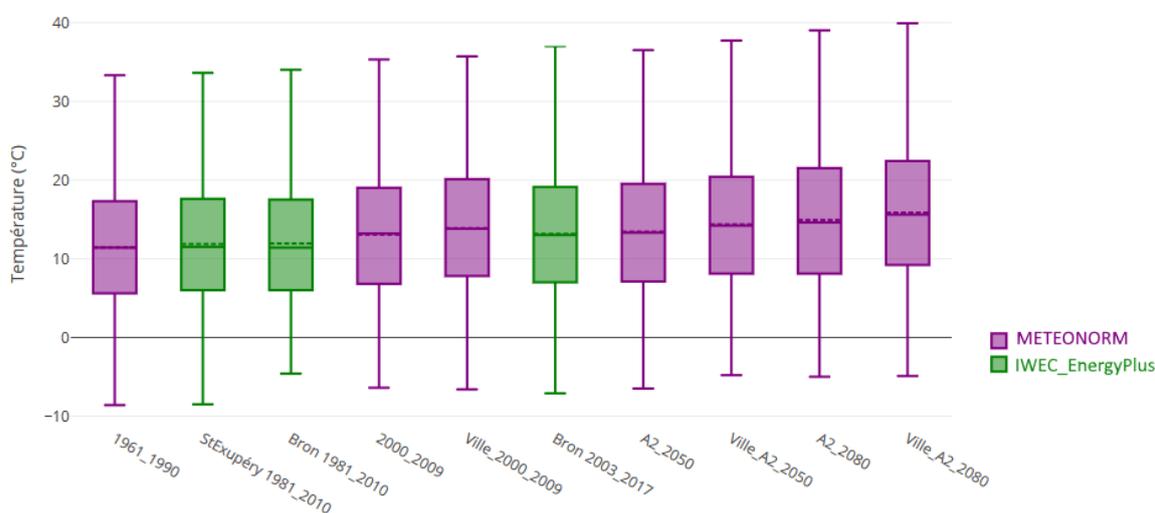


Figure I. 16 - Comparaison des distributions statistiques des températures des différents fichiers climatiques lyonnais.

En complément de cette analyse statistique, les cumuls horaires sur l'année de dépassement de seuils haut ou bas sont des indicateurs intéressants pour caractériser les données météo. Ici, deux seuils bas sont retenus : 0°C pour évaluer les périodes de gel et la rudesse de l'hiver et 14°C pour évaluer les périodes de chauffage des bâtiments. Un seuil haut de 28°C est également considéré pour évaluer le niveau de chaleur de la donnée météo (essentiel quand on travaille sur les risques de surchauffe des bâtiments). Ces cumuls horaires sont présentés respectivement sur les Figure I. 17, Figure I. 18, et Figure I. 20 sous forme d'histogrammes. Enfin, un dernier indicateur utilisé pour estimer les consommations de chauffage est le DJU (Degrés Jours Unifiés). Cet indicateur est obtenu en sommant par période de 24 h sur la période de chauffe la différence entre la moyenne des températures minimale et maximale du jour et une température de référence. Usuellement, une température de référence de 18 °C est retenue en considérant que la température intérieure des locaux est à 19 °C et que les apports gratuits internes

(occupants, éclairage, équipements, etc.) et externes (rayonnement solaire, etc.) couvrent l'équivalent de 1 °C de déperditions thermiques. Cet indicateur de DJU est présenté sur la Figure I. 19.

D'après la Figure I. 17, les fichiers « option ville » ont moins de périodes de gel que les fichiers METEONORM « standard », car ils prennent en compte un recalage des températures pour considérer l'ICU. Cette réduction est d'autant plus flagrante pour les fichiers prospectifs. De même, les données de l'aérodrome de Bron présentent 112 heures de gel en moins que celles de l'aéroport de St Exupéry, qui est plus éloigné de l'agglomération lyonnaise. Qu'elles soient mesurées ou générées, les données de « Hier » et de « Aujourd'hui » sont équivalentes en termes de dépassement de seuil. En revanche, les projections des climats futurs conduisent à des périodes de gel moins importantes.

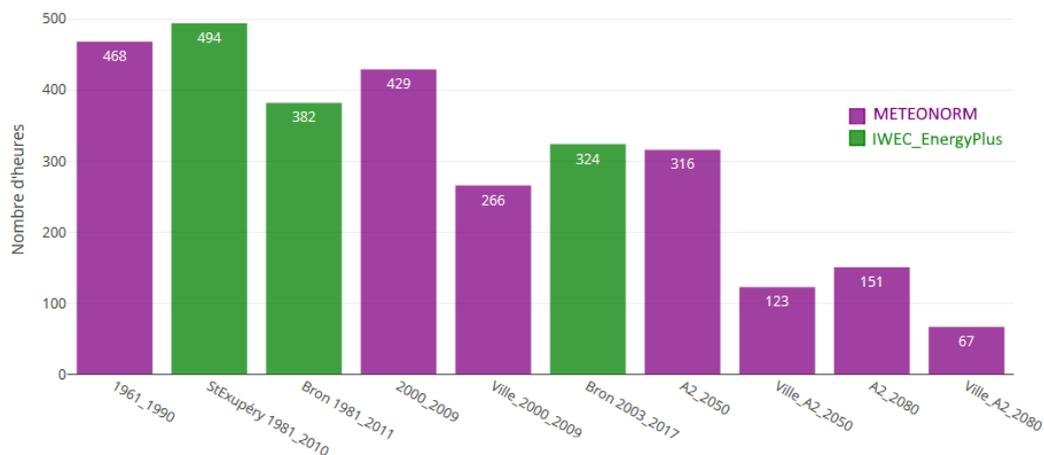


Figure I. 17 - Cumul de nombre d'heures où la température est inférieure à 0°C des différents fichiers climatiques lyonnais.

La Figure I. 18 souligne que la normale météo 1961_1990 représentant le climat « d'Hier » traduit un climat plus froid que les autres données. Ce jeu de données « défavorable » est souvent utilisé en projet opérationnel de conception bâtiment pour l'estimation des besoins de chauffage. Cependant, les données actuelles et futures indiquent des dépassements progressivement plus faibles, en raison des projections du changement climatique. Cette diminution est également visible pour les données urbaines, en raison de l'ICU. Au final, la combinaison des deux effets conduit à une différence de 1500 heures entre la météo de « Après-demain » en ville (scénario Ville_A2_2080) par rapport à la météo de « Hier ». Cette diminution d'environ 30% induira des besoins de chauffage moins importants. Enfin, on ne note pas de différence significative entre les données mesurées et générées. Logiquement, les données de DJU (Figure I. 19) présentent la même allure que le tracé des nombres d'heures où la température est inférieure à 14°C.



Figure I. 18 - Cumul de nombre d'heures où la température est inférieure à 14°C des différents fichiers climatiques lyonnais.



Figure I. 19 - Degrés Jours Unifiés (DJU) des différents fichiers climatiques lyonnais.

La Figure I. 20 présente une évolution complémentaire à la Figure I. 18. Elle montre un dépassement croissant du seuil de 28 °C au cours du temps (des données de « Hier » à celles de « Après-demain ») et en ville en raison du cumul de l'ICU et du changement climatique. Par exemple, cela se traduit par une augmentation de 468 heures entre la donnée météo de « Aujourd'hui » (2000_2009) qui est principalement utilisée en phase de conception et la donnée météo de « Après-demain » en ville, soit 174% d'augmentation relative d'ici 70 ans. Ce constat implique d'accorder une grande importance à la conception bioclimatique des bâtiments vis-à-vis de la question du confort d'été en se projetant dans les climats futurs.



Figure I. 20 - Cumul de nombre d'heures où la température est supérieure à 28°C des différents fichiers climatiques lyonnais.

1.6.2 Comparaison des évolutions horaires de température

La comparaison précédente des données annuelles de température a montré des tendances logiques entre les données passées et futures, des zones urbaines et péri-urbaines. Ici, on propose de focaliser l'analyse sur une échelle temporelle plus fine. A cet effet, la Figure I. 21 compare les évolutions horaires de température de trois fichiers météo (METEONORM 2000_2009, METEONORM Ville_2000_2009 et IWECEnergyPlus 2003_2017) sur la période du 12 au 19 juin. Deux faits marquants peuvent être tirés de cette comparaison.

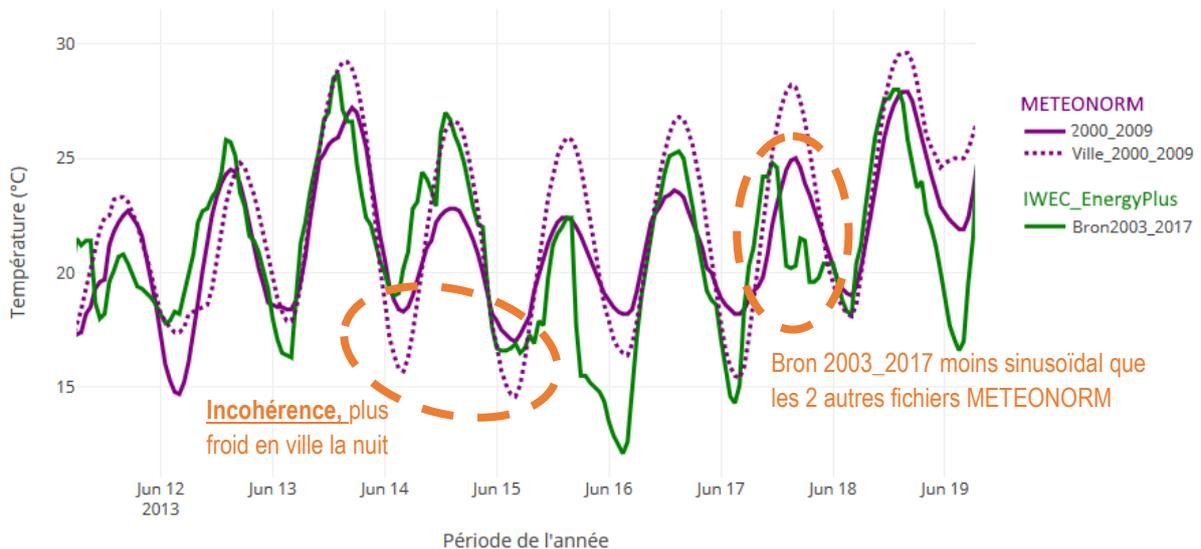


Figure I. 21 - Évolutions horaires de températures METEONORM et IWECE sur une semaine de juin.

Premièrement, on observe des températures nocturnes prédites avec l'option « Ville » qui sont inférieures d'au moins 3 °C à celles du fichier standard pour les nuits des 14 et 15 juin. Cela va à contre sens des observations qui sont faites de l'ICU. Cette incohérence vient du mode de construction des données météo par METEONORM. En effet, les synthèses climatiques sont d'abord effectuées à l'échelle mensuelle, expliquant les tendances logiques de la section précédente, puis à l'aide de modèles stochastiques pour générer des données sub-mensuelles (températures de jour, puis horaires). Le

caractère aléatoire de ces modèles ne recouvre malheureusement pas la réalité des phénomènes physiques.

Deuxièmement, les données générées par METEONORM présentent une forme sinusoïdale quasiment idéale, alors que les données Bron 2003_2017 issues de mesures météorologiques horaires revêtent une forme moins parfaite et plus aléatoire. Aussi, les bâtiments peuvent subir des sollicitations importantes en début ou fin de journée en conditions réelles et non pas systématiquement en milieu de journée en conditions idéales. Cela est particulièrement visible pour la journée du 17 juin.

Ces deux exemples soulignent les limites imposées par la physique et le volet aléatoire du climat lors de la génération de données météo. L'impact de ces limites sur des simulations STD est questionné dans les chapitres suivants.

I.6.3 Comparaison des autres sollicitations météorologiques

Les distributions statistiques des humidités relatives, des vitesses de vent et du rayonnement solaire sur l'année complète sont présentées respectivement sur la Figure I. 22 pour l'ensemble des fichiers météo. Pour le climat lyonnais, l'humidité relative moyenne est comprise entre 67 et 82 %, la vitesse moyenne de vent varie entre 1,5 et 3 m.s⁻¹ et le flux solaire moyen oscille autour de 150 ± 20 W.m⁻².

Comparées aux données générées par METEONORM, les données mesurées (fichiers IWECEnergyPlus) présentent globalement des humidités moyennes plus importantes et des variations plus amples, des vitesses de vent très similaires et des valeurs de flux solaire moyen et maximum plus importantes.

En ville, les humidités relatives sont inférieures de 5 à 7 % par rapport à celles des zones péri-urbaines. A pression de vapeur constante, une augmentation de température induit naturellement une baisse de l'humidité relative. Compte tenu de la rugosité urbaine, les vitesses de vent sont plus faibles. Enfin, on ne note pas d'écarts sur les données de rayonnement solaire.

Enfin, les scénarios futurs prédisent des niveaux d'humidité relative plus importants de près de 10 %. Combiné à des niveaux de température également plus élevés, l'humidité absolue de l'air augmenterait d'environ 2 g d'humidité par kg d'air sec. Les vitesses de vent prédites sont du même ordre de grandeur que les actuelles, alors que les flux solaires moyens et extrêmes sont légèrement plus importants.

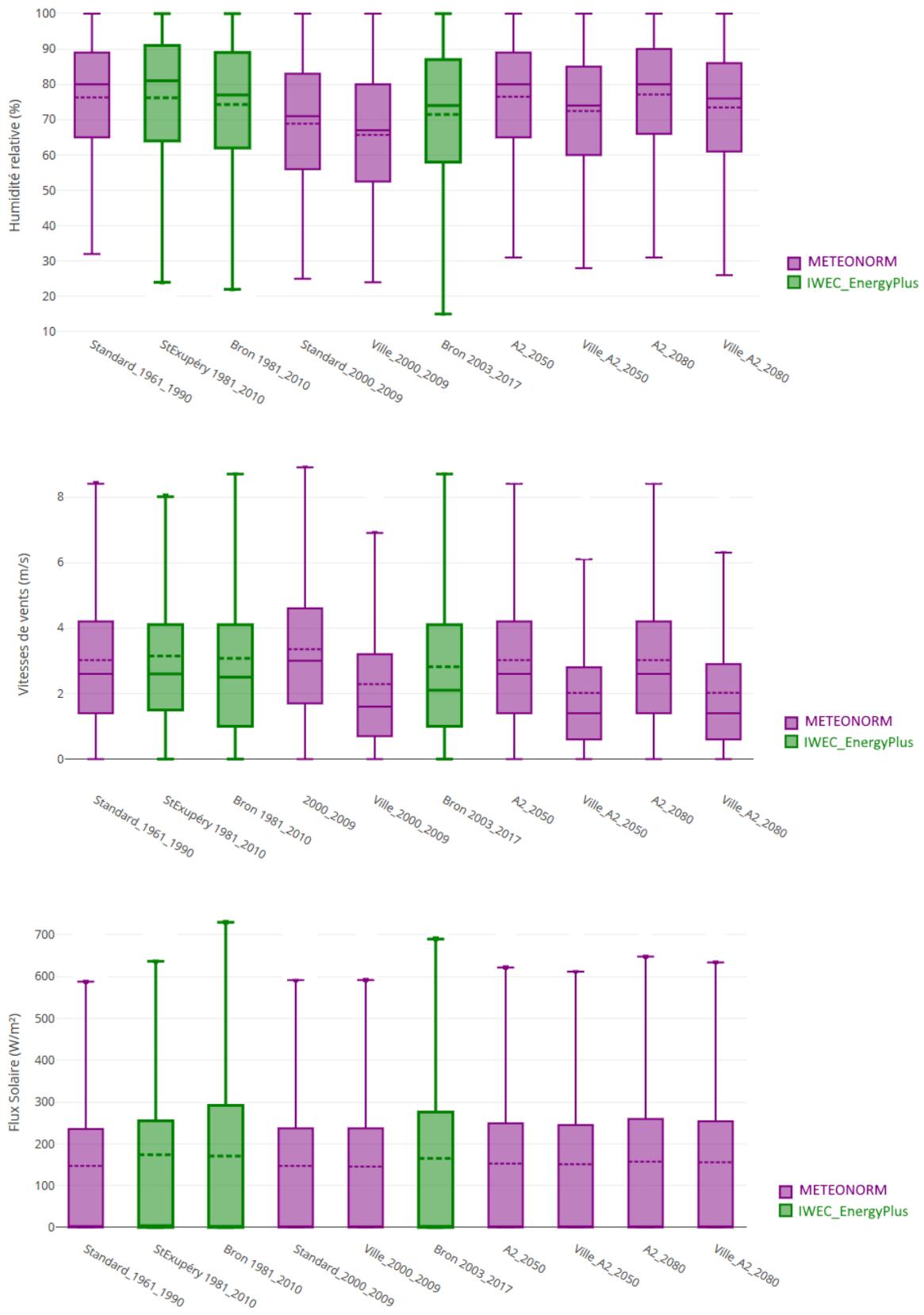


Figure I. 22 - Comparaison des distributions statistiques des humidités relatives, des vitesses de vent et du rayonnement solaire des différents fichiers climatiques lyonnais.

1.6.4 Synthèse

Différents fichiers météo représentatifs du climat lyonnais ont été étudiés. Les analyses statistiques mensuelles fournissent des tendances cohérentes au regard des phénomènes physiques, que ce soit pour la température ou d'autres sollicitations comme l'humidité relative ou la vitesse de vent. En revanche, une analyse à un niveau de temporalité inférieur a souligné la limite des méthodes de génération quasi-aléatoire des données météo.

1.7 Conclusions du chapitre 1

La climatologie est une discipline qui analyse par les statistiques les phénomènes météorologiques observés sur des échelles spatiales et temporelles définies. Au cours des cent dernières années, des dérèglements du climat à l'échelle globale ont été constatés. Ceux-ci sont corrélés à la suractivité humaine conduisant à des émissions importantes de gaz à effet de serre. Dans nos sociétés, l'économie, le travail et, par conséquent, les personnes, se regroupent en ville. Ce développement crée toujours plus de besoins de bâtiments de logements, tertiaires ou industriels, nous mettant face au compromis entre densification et étalement urbain. Que ce soit par la densification (et les constructions verticales) ou par l'étalement (et le remplacement des surfaces naturelles par des surfaces artificielles), le développement des zones urbaines s'accompagne d'une minéralisation des espaces, ce qui traduit par le réchauffement de la scène urbaine illustré par les ICU à l'échelle locale. Ces surchauffes aux échelles globale et locale sont à considérer pour adapter nos procédés de conception des villes et tester la pertinence de nos constructions actuelles aux prospections climatiques des prochaines décennies.

Jusqu'ici, les fichiers météo utilisés en thermique du bâtiment sont issus d'analyses statistiques des mesures antérieures de 30 ans (normales climatiques) ou 10 ans (décennales) et respectent généralement le standard TMY. Cependant, la pertinence de ces fichiers peut être discutée selon trois axes. Premièrement, les données des fichiers générés à l'aide d'un modèle stochastique de METEONORM présentent des dynamiques et des extrêmes climatiques différentes de ceux mesurés à l'échelle horaire, même si les tendances mensuelles ou annuelles sont similaires. Deuxièmement, le climat futur sera certainement différent du climat actuel. Des projections cohérentes avec les scénarii de changement climatique du GIEC permettent de créer des données météo prospectives pour tester la résistance des bâtiments aux climats futurs. Enfin, des possibilités existent pour reconstruire une donnée climatique en zone urbaine. Toutefois, si les principaux phénomènes physiques sont bien appréhendés pour des temporalités mensuelles, des incohérences persistent pour des échelles horaires.

Cette analyse montre bien qu'une abondance de données météo ne facilite pas la tâche du concepteur de bâtiments qui fait face au questionnement suivant : quel fichier météo choisir en phase amont de conception de bâtiments au regard de critères de performance énergétique et de confort d'été à respecter pour les climats d'Aujourd'hui, de Demain, et d'Après-demain en milieu urbain ? Des éléments de réponse sont apportés dans le chapitre 2 pour le cas de Lyon Confluence et les conditions estivales.

II CHAPITRE 2 CHOIX DES FICHIERS METEOS : CHANGEMENT CLIMATIQUE & SURCHAUFFE URBAINE

II.1	CAS D'ETUDES, SURCHAUFFE URBAINE DE LYON CONFLUENCE.....	60
II.2	ANALYSE DE SITE	60
II.2.1	Étude initiale de la surchauffe urbaine à Lyon Confluence	62
II.2.1.1	Présentation de l'étude	62
II.2.1.2	Résultats de l'étude	64
II.3	CONFIRMATION DES MESURES METEOROLOGIQUES URBAINES ET PERI- URBAINES.....	66
II.3.1	Les ressources de données météo libres.....	66
II.3.2	Caractéristiques des stations météorologiques lyonnaises retenues	67
II.3.3	Validation des mesures météorologiques de CONFLUENCE	70
II.4	CHOIX DES METEO	72
II.4.1	Analyse préliminaire : comparaison d'une année réelle avec les normales climatiques.....	73
II.4.2	Sélection des fichiers représentatifs du changement climatique et de la surchauffe urbaine 73	
II.4.2.1	Pré-sélection des années réelles.....	73
II.4.2.2	Axe 1 : sélection des fichiers représentatifs du changement climatique.....	76
II.4.2.3	Axe 2 : sélection des fichiers représentatifs de la surchauffe urbaine	77
II.4.2.4	Synthèse des fichiers sélectionnés.....	78
II.4.3	Distribution statistique des grandeurs météorologiques des fichiers sélectionnés	78
II.4.3.1	Température	78
II.4.3.2	Rayonnement solaire.....	79
II.4.3.3	Humidité relative	80
II.4.3.4	Vitesse de vent	81
II.5	CONCLUSIONS DU CHAPITRE 2.....	81

Le chapitre 1 a présenté différents fichiers climatiques. La diversité des fichiers recouvre l'historique des bases de données (10 ou 30 ans), le type de données (mesurée ou générée), la temporalité (passé, présent ou futur) et la localisation (péri-urbain ou urbain). Deux questionnements ressortent de l'analyse : 1. Les données générées de façon stochastiques présentent des évolutions quasi parfaites contrairement aux données mesurées ; 2. Les données générées en ville ne respectent pas les phénomènes physiques qui régissent l'îlot de chaleur urbain à l'échelle horaire. Par ailleurs, les différentes données météorologiques sont largement influencées par les prédictions des scénarii du GIEC sur le changement climatique.

Lorsqu'ils sont utilisés en STD, les fichiers météo définissent les conditions aux limites extérieures pour les études de performance énergétique et de confort des bâtiments en phase de conception. Or, les bâtiments sont majoritairement construits en zone urbaine d'une part et subiront les conditions climatiques de Demain, et d'Après-demain, d'autre part. De fait, ils seront soumis aux surchauffes urbaines et globales présentées dans le chapitre 1. Compte tenu des questionnements précédents, l'idéal serait alors de disposer de données météo futures mesurées en ville. Ce chapitre vise à proposer une méthodologie pour atteindre cet idéal dans le quartier de Lyon Confluence.

II.1 Cas d'études, surchauffe urbaine de Lyon Confluence

Le cas d'étude traité dans ce chapitre et plus généralement dans cette thèse porte sur le quartier Confluence de Lyon. Anciennement industriel, ce quartier est en pleine reconversion depuis le début des années 2000 pour devenir un « centre-ville » sous la responsabilité de la *SPL Lyon Confluence (Société Publique Locale)*. Ce projet urbain d'une ampleur inédite se veut être exemplaire et novateur tant sur l'aménagement urbain (maîtrise de la voiture individuelle, développement des modes doux, imbrication et générosité des espaces publics, place de l'eau, de la végétation et du paysage dans la ville, préservation de la biodiversité) que sur la place accordée aux femmes et aux hommes (mixité sociale et fonctionnelle, recherche de solutions respectueuses des habitants et de leur qualité de vie, etc.). D'un point de vue énergétique, les objectifs sont de construire des bâtiments sobres en énergie et de recourir massivement aux énergies renouvelables.

L'aménageur *SPL Lyon Confluence* a missionné TRIBU pour être assistant à maîtrise d'ouvrage (AMO) en qualité environnementale et développement durable (QE & DD) de la ZAC (Zone d'aménagement concertée). TRIBU possède donc une expérience approfondie et longue de ce quartier, avec des informations sur tous les projets construits depuis 2002. Par ailleurs, TRIBU a été chargé d'effectuer une étude spécifique du microclimat urbain de ce quartier entre 2013 et 2015. Cette étude, dont les éléments principaux sont présentés ci-après, est le point de départ du travail développé dans ce chapitre.

II.2 Analyse de site

Le quartier Confluence se trouve dans le deuxième arrondissement de Lyon, sur la presqu'île juste avant la jonction entre la Saône et le Rhône. Ces deux cours d'eau créent des couloirs de vents, ce qui rend les conditions climatiques particulières au niveau des quais (Figure II. 1). A l'Ouest, le rayonnement solaire est masqué en fin de journée d'été par le relief des Balmes (Figure II. 2).

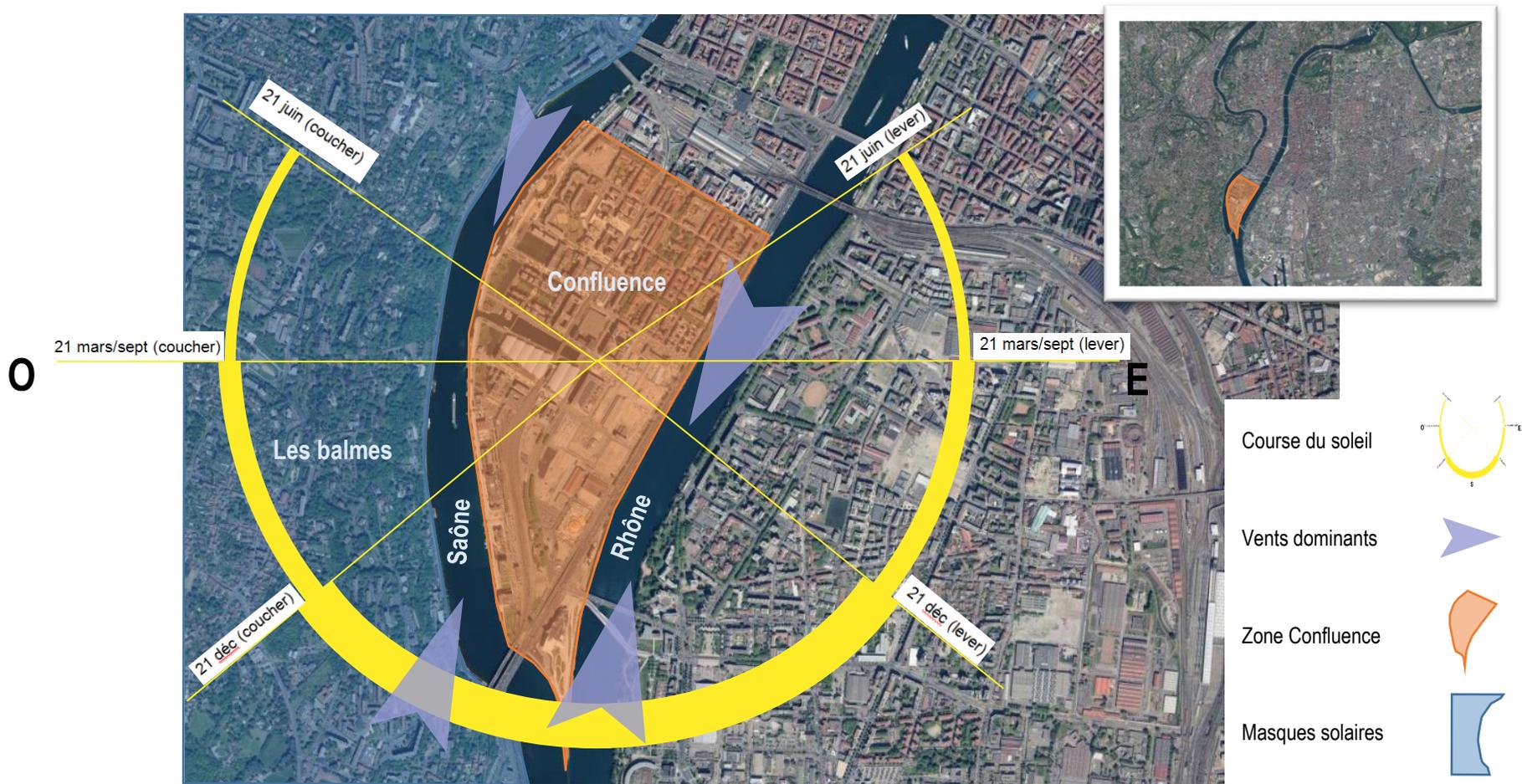


Figure II. 1 - Vue aérienne du quartier Confluence de Lyon (image Géoportail)

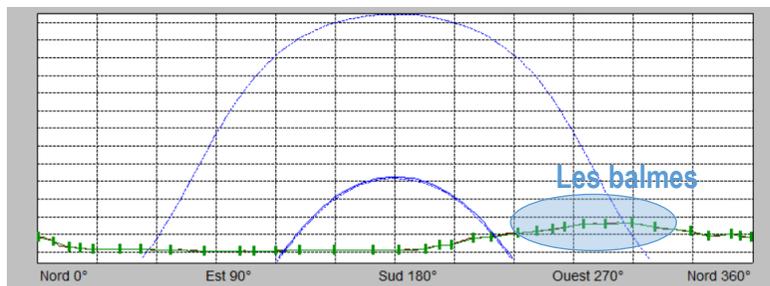


Figure II. 2 - Diagramme solaire et ligne d'horizon avec le logiciel Carnaval V0.8.

II.2.1 Étude initiale de la surchauffe urbaine à Lyon Confluence

II.2.1.1 Présentation de l'étude

La *SPL Lyon Confluence* a missionné TRIBU sur l'approche durable en matière d'espaces publics pour offrir aux futurs habitants un quartier du bien-vivre en ville et répondant aux enjeux environnementaux. Entre 2013 et 2015, la mission a consisté à étudier les microclimats du quartier par l'installation de stations météorologiques pour répondre à deux objectifs.

Le premier est de caractériser l'effet de surchauffe urbaine au niveau du quartier Lyon Confluence par rapport à la station Météo France de Lyon-Bron dans le but de préciser les choix en termes de bioclimatisme sur la construction des bâtiments et, si nécessaire, de redéfinir les références climatiques (Figure II. 3).



Figure II. 3 - Localisation des stations météorologiques pour l'étude sur la surchauffe urbaine du quartier Lyon Confluence.

Le second est d'apporter des données chiffrées sur le confort des espaces extérieurs dans le but de confronter et valider les indicateurs de conception et de produire des préconisations spécifiques (exemple : taux de surface végétalisée) pour la phase 2 de l'aménagement de la ZAC 2. Le confort en espace extérieur a été étudié en fonction de l'aménagement des bords de la darse (le canal de Lyon Confluence), quai Rambaud (Balise 1, Figure II. 4) ou de la végétation et de la configuration en cœur d'îlot du Jardin Erevan (Balise 2) par rapport à la balise de référence située proche des locaux de la *SPL Lyon Confluence*.

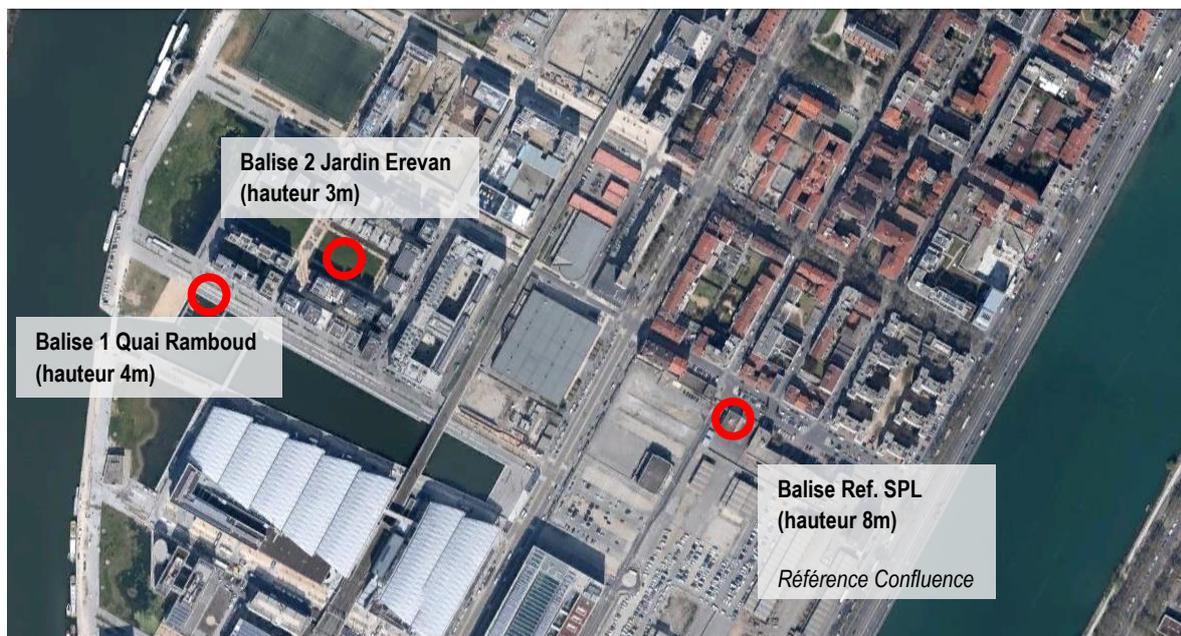


Figure II. 4 - Localisation des stations météo pour l'étude sur le confort extérieur de Lyon Confluence.

Les stations météorologiques utilisées sont des stations Greenbee® fournies par AZIMUT Monitoring. Elles sont équipées de capteurs pour la mesure de la température, de l'humidité relative de l'air, de la direction et de la vitesse du vent, et de l'ensoleillement (Tableau II. 1). Elles sont autonomes en énergie car alimentées par panneaux solaires et renvoient les informations sur les serveurs d'AZIMUT Monitoring via une communication GPRS.

Indicateur	Technologie utilisée	Plage de mesure	Résolution de mesure	Précision de mesure	Méthodologie d'acquisition des données
Température	Capteur capacitif en polymère	-20°C à +60°C	0,1°C	0,4°C (entre 10°C et 60°C)	Moyenne des 4 valeurs toutes les 15 minutes
Humidité relative	Capteur capacitif en polymère	20% à 80%HR	1% HR	3% HR (sans condensation)	Une seule mesure réalisée au cours de la période de 15 min
Direction du vent	Girouette résistive	0 à 360°	8 directions majoritaires, 45°	7°	La balise construit une rose des vents chaque 15min avec les données seconde et ne retient que la direction prépondérante sur la période
Vitesse du vent	Anémomètre à coupelle	1 à 300km/h (0,3 à 83,0 m/s)	1 m/s	5%	On compte un nombre d'impulsions sur la période et on en déduit la vitesse moyenne sur 15min
Ensoleillement	Capteur photovoltaïque	10 à 1300 W/m ² (400 à 1100nm)	5W/m ²	10%	Mesures périodiques (toutes les minutes) et on établit la valeur moyenne sur 15min

Tableau II. 1 - Informations techniques sur les capteurs de mesures météorologiques.

II.2.1.2 Résultats de l'étude

Comparaison des trois balises de Confluence :

Après 3 années de mesures entre 2013 et 2015, il a été constaté que la balise 2 du Jardin Erevan a enregistré des températures moyennes annuelles sensiblement plus faibles que la Balise Ref SPL Confluence (environ $-0,5^{\circ}\text{C}$) : la végétation joue son rôle d'atténuation de la surchauffe en zone urbaine. La balise 1 quai Rambaud a obtenu des températures moyennes comparables, voire sensiblement plus élevées en été que la station Confluence (environ $0,3^{\circ}\text{C}$) : l'inertie apportée par le volume d'eau important de la darse peut être une explication de ce constat.

Comparaison entre la balise de Lyon CONFLUENCE et la station METEO FRANCE (Bron) :

Sur la période d'étude, les températures moyennes mesurées en zone urbaine à Confluence sont plus élevées que celles mesurées dans le secteur péri-urbain de Bron. En 2013, l'écart moyen annuel est de $1,09^{\circ}\text{C}$ (Tableau II. 2). L'écart moyen est légèrement plus important en période hivernale qu'estivale. De même, il est plus important la nuit que le jour. Enfin, l'écart moyen le plus important est observé durant les nuits estivales (Figure II. 5).



Figure II. 5 - Constat expérimental de la surchauffe urbaine

Période d'étude	Température moyenne [$^{\circ}\text{C}$]		Ecart moyen de température entre Lyon Confluence et Lyon Bron [$^{\circ}\text{C}$]		
	METEO FRANCE (Bron)	CONFLUENCE	Jour	Nuit	Global
Annuelle	12,15	13,24	+0,25	+1,78	+1,09
Hivernale	3,52	4,75	+0,81	+1,59	+1,20
Estivale (1 ^{er} mai – 30 septembre)	21,09	22,14	-0,13	+1,90	+1,06

Tableau II. 2 - Analyse des mesures de l'îlot de chaleur urbain de Lyon Confluence sur l'année 2013.

La Figure II. 6 présente les différences des températures mesurées entre CONFLUENCE et METEO FRANCE pour l'année 2013. Les résultats sont donnés sous la forme d'un diagramme tapis qui permet de visualiser finement les écarts sur l'ensemble des périodes de l'année ainsi que des heures de la journée. L'effet de surchauffe urbaine est visible principalement dans les périodes nocturnes, surtout sur la période allant d'avril à septembre. Sur cette même période, on constate qu'il fait plus frais le matin en ville qu'en zone péri-urbaine en raison des ombrages des bâtiments.

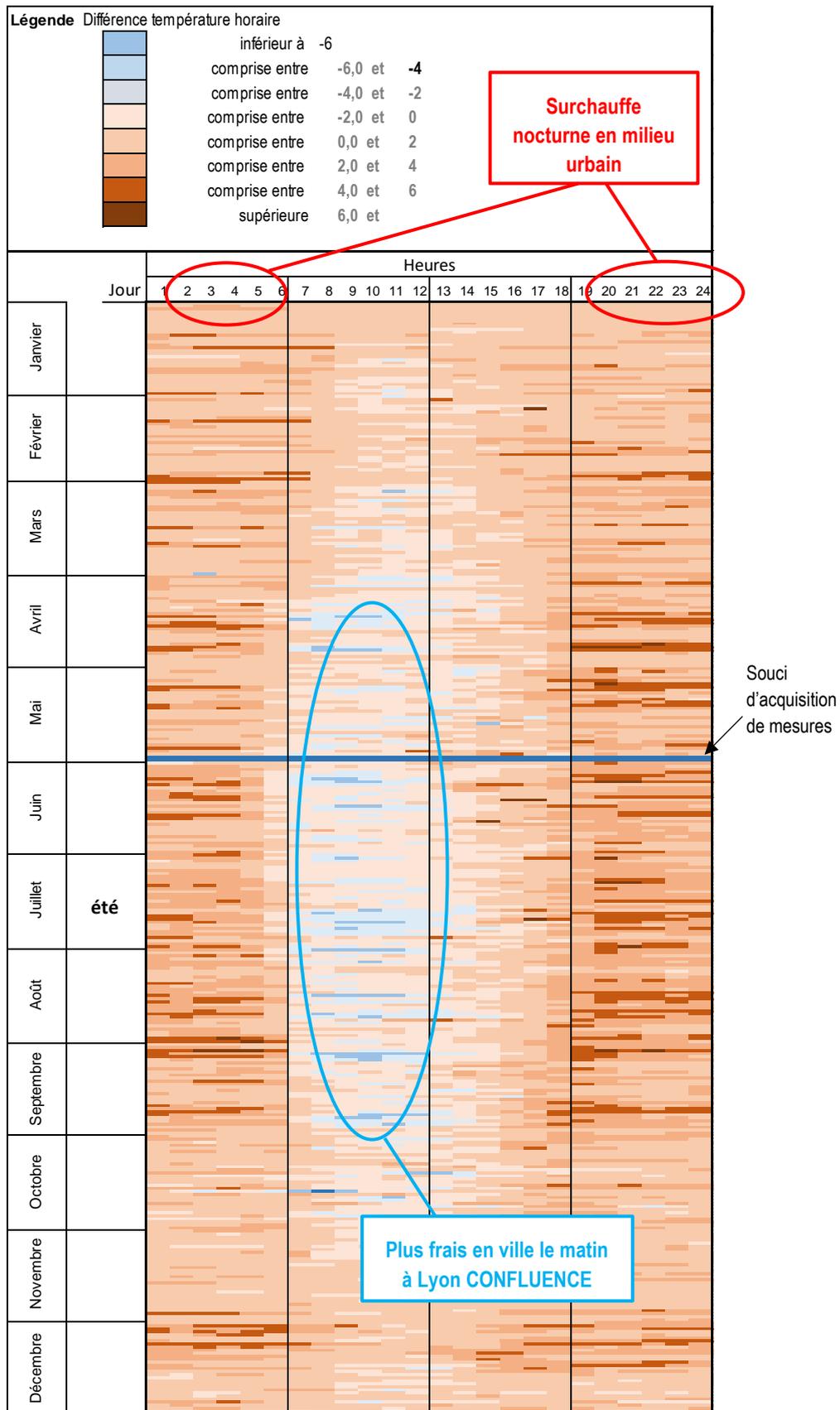


Figure II. 6 - Diagramme tapis des écarts de mesures de températures entre Lyon CONFLUENCE et METEO FRANCE pour l'année 2013.

Enfin, la Figure II. 7 présente l'évolution des températures mesurées à CONFLUENCE et METEO FRANCE du 20 au 28 juillet 2013. Outre le phénomène de surchauffe urbaine, un déphasage de 1 à 2

heures est identifiable. Il est causé par l'inertie des minéralités de la ville et par sa morphologie dense limitant l'accès du vent et le rafraîchissement via les échanges infrarouges nocturnes avec le ciel.

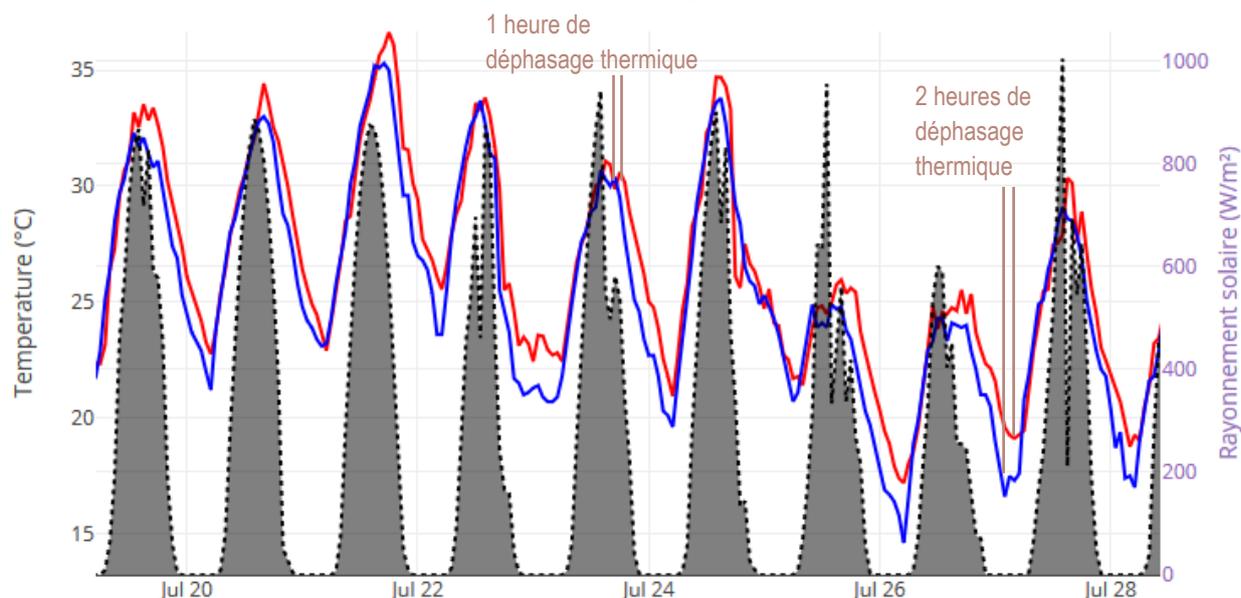


Figure II. 7 - Évolution des températures d'air mesurées à CONFLUENCE et BRON du 20 au 28 juillet 2013.

— T_CONFLUENCE
— T_METEO FRANCE
■ Rayonnement solaire global

II.3 Confirmation des mesures météorologiques urbaines et péri-urbaines

II.3.1 Les ressources de données météo libres

Afin de conforter cette étude expérimentale sur la surchauffe urbaine, il peut être intéressant de disposer d'autres données météo. Dans cette optique, l'agglomération lyonnaise est bien pourvue. Un réseau de stations météo a été déployé dans plusieurs bâtiments d'enseignement lyonnais (Figure II. 8) par l'Institut français de l'éducation (IFÉ) et Météo-France dans le cadre d'un projet « Météo & Climat, un tremplin pour l'enseignement des sciences » financé par l'ANRU (Agence Nationale de Rénovation Urbaine). Les données sont consultables en ligne (<http://stationsdata.climatetmeteo.fr/Opendata/>), mais les données brutes ne sont pas toujours téléchargeables. Toutefois, nous avons pu récupérer gracieusement les données pour l'année 2015 de la station localisée sur le site de l'École Normale Supérieure (ENS), qui est à proximité du quartier Confluence. Depuis 2018, ces données sont en accès libre.

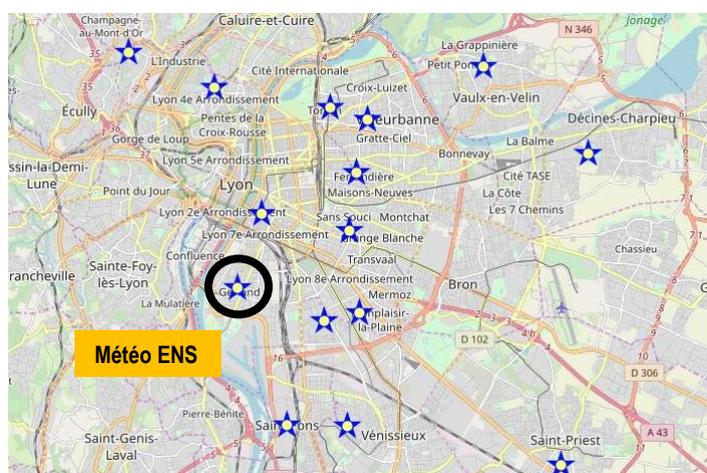


Figure II. 8 - Réseau lyonnais des stations météo du projet « Météo & Climat, un tremplin pour l'enseignement des sciences ».

Une seconde source de données est fournie par une station météo localisée sur le site de l'École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE). Cette station météo a été installée dans le cadre du programme international IDMP (International Daylight Measurement Programme). Les données collectées depuis 1992 sont en accès libre au téléchargement (<http://idmp.entpe.fr/stafr.htm>).

L'accès libre aux données (open data) est une chance pour aider tous les acteurs à développer leurs projets, même sans beaucoup de moyens, et avec parfois des finalités inattendues et novatrices. Au final, les données de quatre stations météo vont être comparées par la suite : les stations CONFLUENCE & ENS en zone urbaine et les stations METEO FRANCE & ENTPE en zone péri-urbaine. Leur localisation est présentée sur la Figure II. 9. A chacune des stations est associé un code couleur défini comme suit :

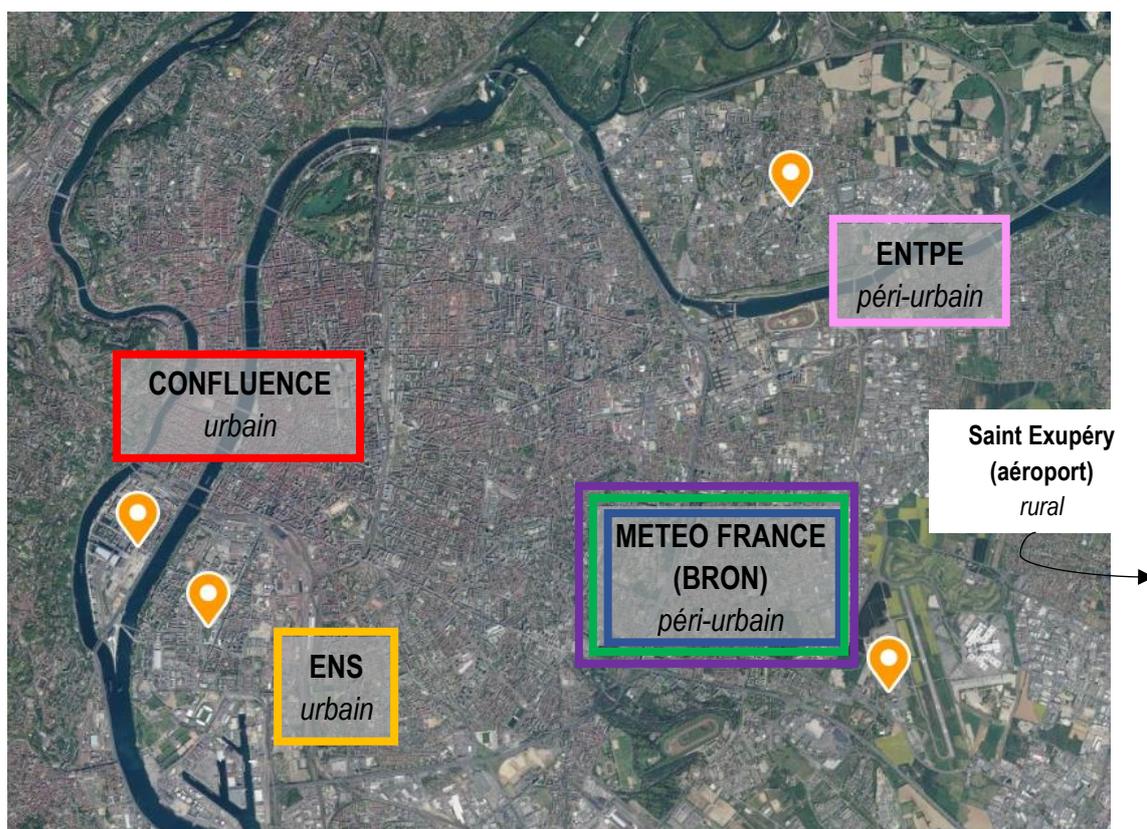
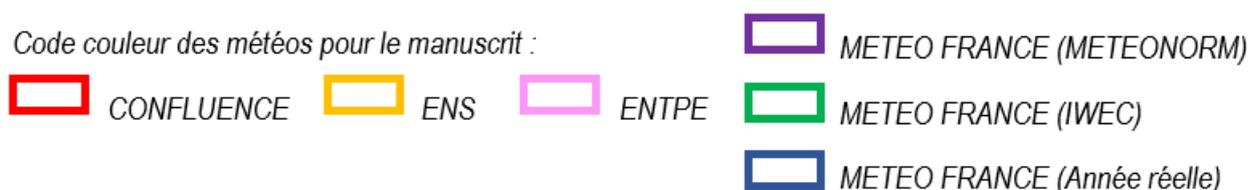


Figure II. 9 - Localisation des stations météorologiques situées en zones urbaines et péri-urbaines de Lyon (avec une précision sur la station de Saint Exupéry utilisée plus loin dans le PCAET du Grand Lyon).

II.3.2 Caractéristiques des stations météorologiques lyonnaises retenues

Les caractéristiques des sites de mesures météorologiques et du matériel sont présentées respectivement sur la Figure II. 10 et dans le Tableau II. 3. L'ensemble des stations mesure la température

et l'humidité relative de l'air et la vitesse et la direction du vent. La station ENTPE mesure en plus divers éclairagements et rayonnements, dont le rayonnement solaire direct et diffus. L'environnement de ces stations peut avoir une incidence sur les mesures des données météorologiques. Ici, les stations urbaines CONFLUENCE et ENS sont localisées dans des sites plutôt aérés, alors que d'autres quartiers lyonnais présentent des morphologies plus denses. Les stations ENS et METEO France sont installées au sol et dans un contexte végétalisé, alors que les stations CONFLUENCE et ENTPE sont positionnées sur des toitures terrasses minérales. La végétalisation joue sur l'humidité relative en raison de l'évapotranspiration des plantes et les niveaux de température de surface qui seront plus bas que pour une surface minérale. Enfin, les observations de la station ENS sont faites sur un mat à 2 m, à 8 m pour CONFLUENCE, et à 10 m pour l'ENTPE et METEO France. Les mesures de vent au niveau des stations en toiture sont impactées par des turbulences engendrées par les parois verticales des bâtiments et les effets de décollement au niveau des toitures.

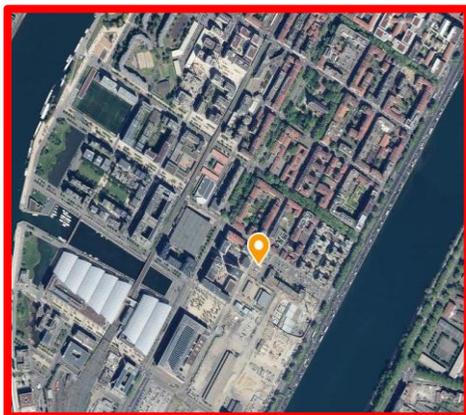
Station CONFLUENCE

Hauteur 8m

Positionnée sur une toiture terrasse

Environnement minéral

Localisation urbaine



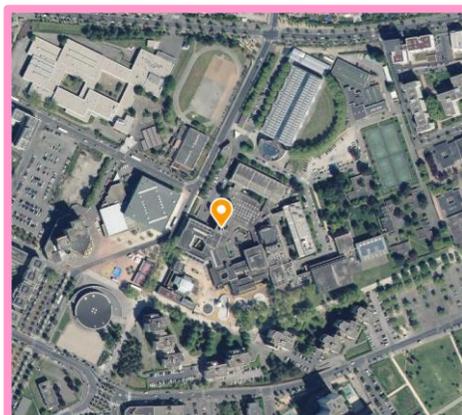
Station ENTPE

Hauteur 10m

Positionnée sur toiture terrasse

Environnement minéral

Localisation péri-urbaine



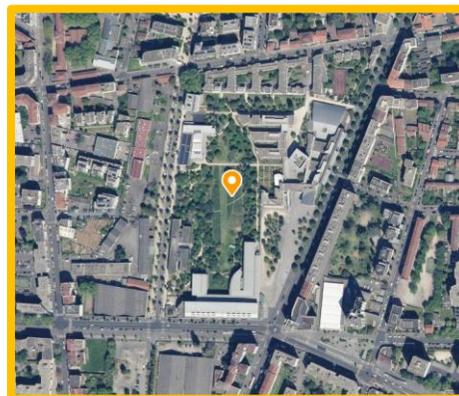
Station ENS

Hauteur 2m

Positionnée au sol

Environnement végétalisé

Localisation urbaine



Station METEO FRANCE (BRON)

Hauteur 10m

Positionnée au sol

Environnement végétalisé

Localisation péri-urbaine

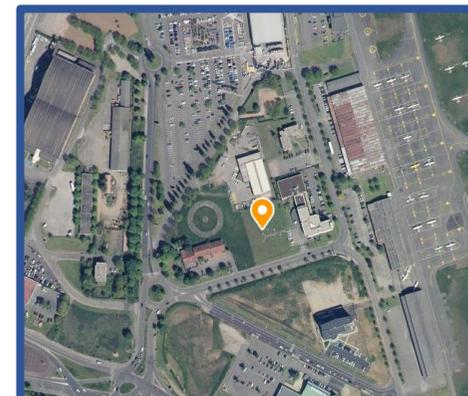


Figure II. 10 - Vues aériennes et locales des stations lyonnaises retenues – (Sources : Géoportail, Google Street View, Infoclimat, Station IDMP Vaulx-en-Vellin)

<u>Station CONFLUENCE</u>	<u>Station ENTPE</u>
<i>Mesures : T, HR, Vent Fréquence d'acquisition : horaires Disponibilités des mesures : 2013, 2014, 2015</i>	<i>Mesures : T, HR, Vent, CLO (direct et diffus) Fréquence d'acquisition : toutes les minutes Disponibilités des mesures : Depuis 1992</i>
<u>Station ENS</u>	<u>Station METEO France (BRON)</u>
<i>Mesures : T, HR, Vent Fréquence d'acquisition : toutes 10 minutes Disponibilités des mesures : 2015, et depuis 2018</i>	<i>Mesures : T, HR, Vent Fréquence d'acquisition : horaires Disponibilités des mesures : 2003, 2004, 2013, 2014, 2015 (Données achetées par TRIBU)</i>

Tableau II. 3 - Données disponibles pour les stations lyonnaises retenues.

Les détails techniques des matériels utilisés au niveau de chaque station sont disponibles sur les sites suivants :

- ENTPE : <http://idmp.entpe.fr/stafr.htm>
- ENS : <https://www.infoclimat.fr/observations-meteo/temps-reel/lyon-07/000BG.html>
- CONFLUENCE : <https://pro.hagerservices.fr/wp-content/uploads/sites/2/2017/08/HSE-Fiche-technique-greenbee.pdf>
- METEO FRANCE: <https://www.infoclimat.fr/observations-meteo/temps-reel/lyon-bron/07480.html>

II.3.3 Validation des mesures météorologiques de CONFLUENCE

Les Figure II. 11 et Figure II. 12 présentent 8 jours d'évolution des températures des quatre stations météo pour des périodes estivales et hivernales de l'année 2015 (seule année disponible pour les 4 stations). Le rayonnement solaire global est issu de la station ENTPE. Les températures mesurées à ENTPE sont comparables à celles de METEO France en particulier en été. En hiver, des écarts inférieurs à 2 °C sont constatés, surtout en l'absence d'ensoleillement, mais ne peuvent être expliqués rationnellement. De même, on observe une très bonne concordance en termes d'amplitude et de phase des mesures ENS et CONFLUENCE, tant en hiver qu'en été. Toutefois, la température mesurée à ENS est ponctuellement plus froide pour certaines nuits (22, 27 ou 28 juillet) : cela peut venir du fait que les mesures sont effectuées à seulement 2 m d'une zone végétalisée pour laquelle sous refroidissement nocturne et évaporation/condensation modifie l'équilibre thermique très local. Enfin, la comparaison des données urbaines et péri-urbaines confirme l'existence de l'ICU sur la zone Lyon Confluence / ENS.

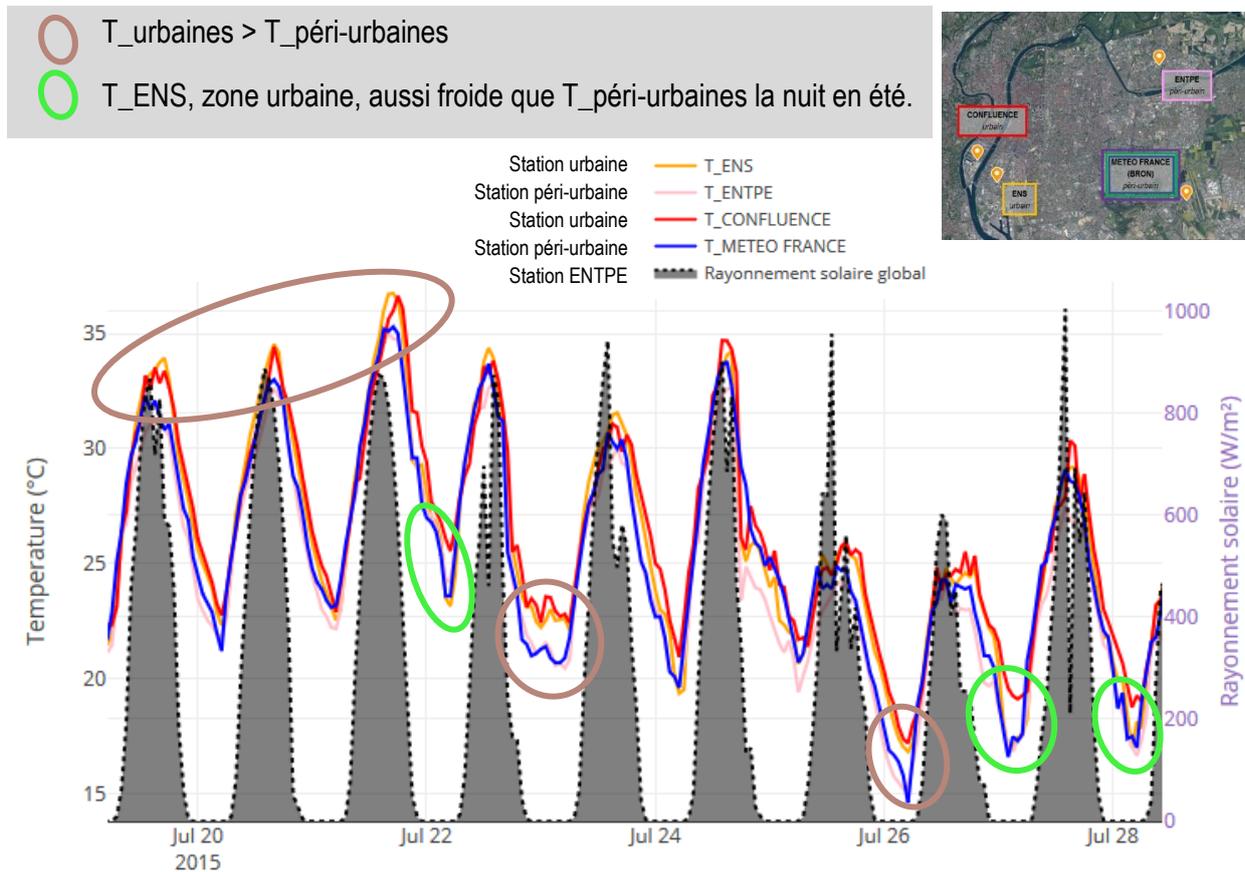


Figure II. 11 - Comparaison des températures d'air mesurées à ENS, ENTPE, CONFLUENCE et METEO FRANCE du 20 au 28 juillet 2015.

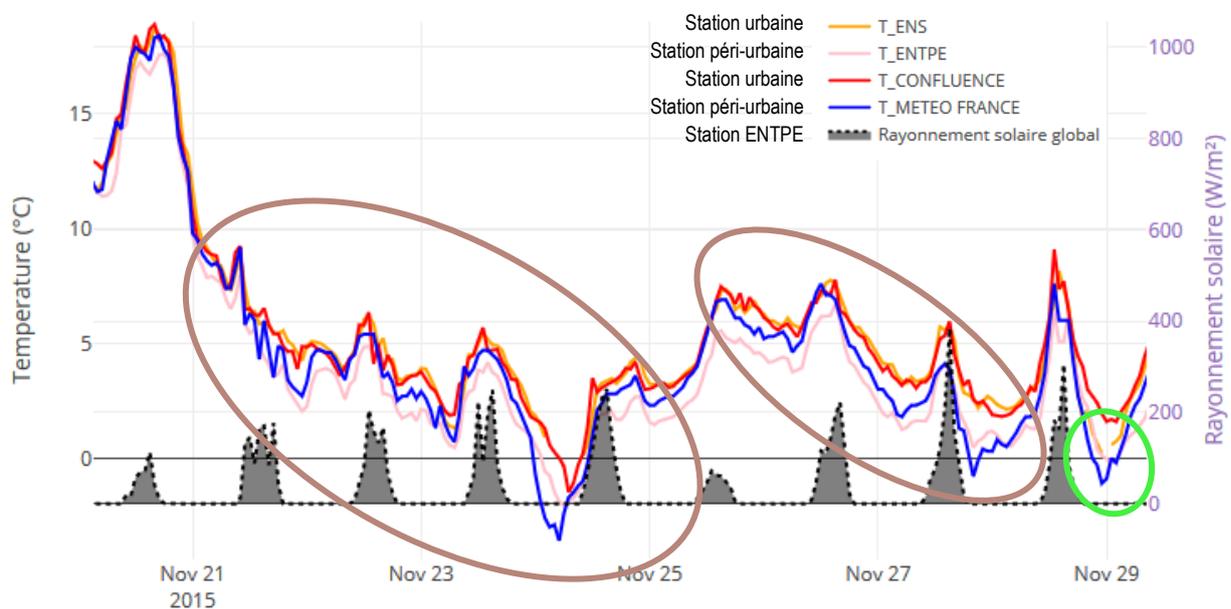


Figure II. 12 - Comparaison des températures d'air mesurées à ENS, ENTPE, CONFLUENCE et METEO FRANCE du 21 au 29 novembre 2015.

La Figure II. 13 présente les distributions statistiques des températures uniquement sur la période du 21 juin au 31 décembre 2015, en raison de la disponibilité de la mesure ENS. Cependant, les périodes hivernale et estivale restent couvertes par l'analyse. On retrouve bien une similitude des différents indicateurs statistiques entre les deux stations urbaines d'une part et entre les deux stations péri-urbaines

d'autre part. Ces différentes analyses valident ainsi l'étude expérimentale de TRIBU concernant la surchauffe urbaine du quartier de Confluence.

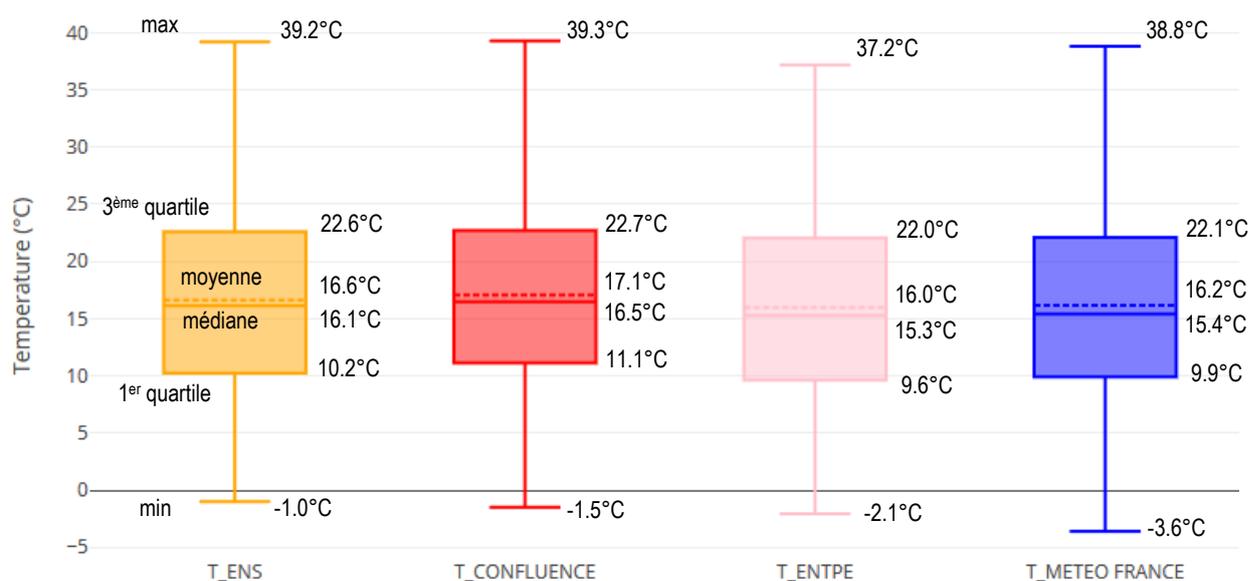


Figure II. 13 - Distributions statistiques des températures d'air mesurées à ENS, ENTPE, CONFLUENCE et METEO FRANCE sur la période du 21 juin au 31 décembre 2015.

II.4 Choix des météo

L'abondance de données météo sur la région lyonnaise est une chance qu'il convient de saisir pour définir de nouvelles classes de fichiers météo qui peuvent être utilisées en thermique du bâtiment. En particulier, on recherchera à lever les limites identifiées dans le Chapitre 1 et notamment répondre aux interrogations listées dans le Tableau II. 4.

Quid	Axe d'analyse
Qu'en est-il de l'utilisation de fichiers climatiques moyennés qui par définition suppriment les conditions climatiques extrêmes de froid et de chaud avec les vagues de chaleur qui vont s'intensifier et devenir de plus en plus fréquentes dans les prochaines décennies selon le GIEC. ?	<u>Axe préliminaire</u> : Les données d'une année réelle de mesure de la station ENTPE sont comparées avec les dernières normales climatiques en vigueur.
Qu'en est-il du changement climatique global, et les différences entre le climat d'Aujourd'hui, celui de Demain (horizon 2050), et d'Après-demain (horizon 2080) qui sont les temporalités d'espérance de vie des constructions actuelles (seront-elles adaptées aux climats futurs) ?	<u>Axe1</u> : Pour la station ENTPE, nous recherchons les fichiers réels équivalents aux fichiers moyennés et fictifs METEONORM aux différents horizons de temps (Aujourd'hui, Demain, et Après-demain).
Qu'en est-il de l'intégration de la surchauffe urbaine comparée au climat péri-urbain ?	<u>Axe2</u> : Pour étudier l'impact de la densité urbaine, une comparaison est proposée entre les fichiers ENTPE et ENS pour les mêmes périodes d'étude.

Tableau II. 4 - Axes d'analyse pour le choix de la donnée météo à destination des outils STD.

II.4.1 Analyse préliminaire : comparaison d'une année réelle avec les normales climatiques

Les normales climatiques représentent les données moyennées du climat sur 30 ans, voire 10 ans, au niveau d'un site. Ces normales englobent donc des années avec des profils très variés, mais ne peuvent traduire leurs évolutions extrêmes. Aussi semble-t-il intéressant d'évaluer les écarts d'une année réelle de mesures horaires par rapport à la dernière normale climatique en vigueur (1981-2010), celle fournie par IWECE_EnergyPlus à la station METEO FRANCE de Bron. A titre d'exemple, le choix de l'année réelle s'est porté sur l'année 2018, caractérisée comme l'année la plus chaude depuis le début du XX^{ème} siècle en France. Les évolutions des moyennes journalières des deux jeux de températures mesurées à l'ENTPE et à METEO FRANCE sont comparées sur la Figure II. 14. Les périodes particulièrement chaudes, définies lorsque la mesure réelle est supérieure à la normale, sont logiquement très prédominantes. L'écart moyen est évalué à +1,78 °C, ce qui est conforme avec les valeurs de Météo France (environ 1,8°C) (*Annexe II. 1*).

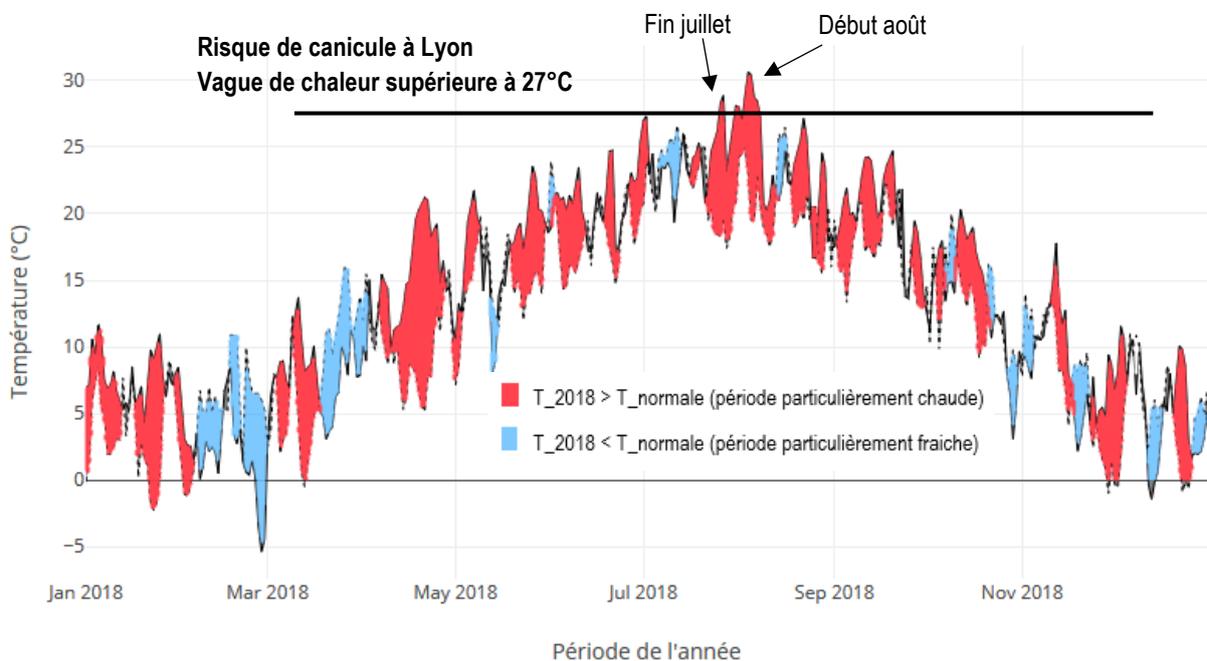


Figure II. 14 - Évolution des températures de Lyon (station ENTPE) 2018 et de la normale 1981-2010.

Alors que la comparaison des données METEONORM et IWECE_EnergyPlus a montré dans le Chapitre 1 l'intérêt de prendre une météo mesurée plutôt que générée, cette comparaison a été effectuée sur des données fictives reconstruites. L'exemple présenté ici vient en complément de cette analyse et souligne les écarts notables qui peuvent exister entre une année réelle de mesure et les normales climatiques. Aussi, il semble donc pertinent d'identifier des années réelles mesurées représentatives.

II.4.2 Sélection des fichiers représentatifs du changement climatique et de la surchauffe urbaine

II.4.2.1 Pré-sélection des années réelles

Les différentes stations météorologiques lyonnaises ont pu fournir des données météo réelles pour 24 années. Ce nombre conséquent nécessite d'effectuer une pré-sélection avant de traiter plus spécifiquement les axes. Celle-ci se fait en analysant le cumul d'heures sur l'année où la température est

supérieure à 28°C, critère qui est également utilisé en STD pour évaluer le confort d'été d'une zone thermique d'un bâtiment. Ces données sont comparées sur la Figure II. 15 avec celles obtenues pour les fichiers METEONORM 2000-2009, A2_2050 et A2_2080, qui définissent respectivement les niveaux « Aujourd'hui, Demain et Après-demain ». On observe que certaines années réelles possèdent un nombre de cumul d'heures très similaires aux données METEONORM. Ainsi, les fichiers ENTPE 1999, 2000, 2002, 2004, 2010 et 2013 sont proches du fichier METEONORM 2000-2009 (météo d'Aujourd'hui). Ensuite, les fichiers ENTPE 1995, 2001, 2005, 2006, 2009, 2016, 2017 s'approchent du niveau de A2_2050 (météo de Demain). Et enfin, seule la météo de 2003 atteint et même dépasse les 600 h où la température est supérieure à 28°C du fichier A2_2080 (météo d'Après-demain).

En ce qui concerne la surchauffe urbaine, les données ne sont disponibles simultanément pour les stations ENS et ENTPE que pour l'année 2018. Dans ce cas, la surchauffe urbaine à l'ENS est perceptible avec un cumul plus élevé de 87 heures qu'à l'ENTPE.

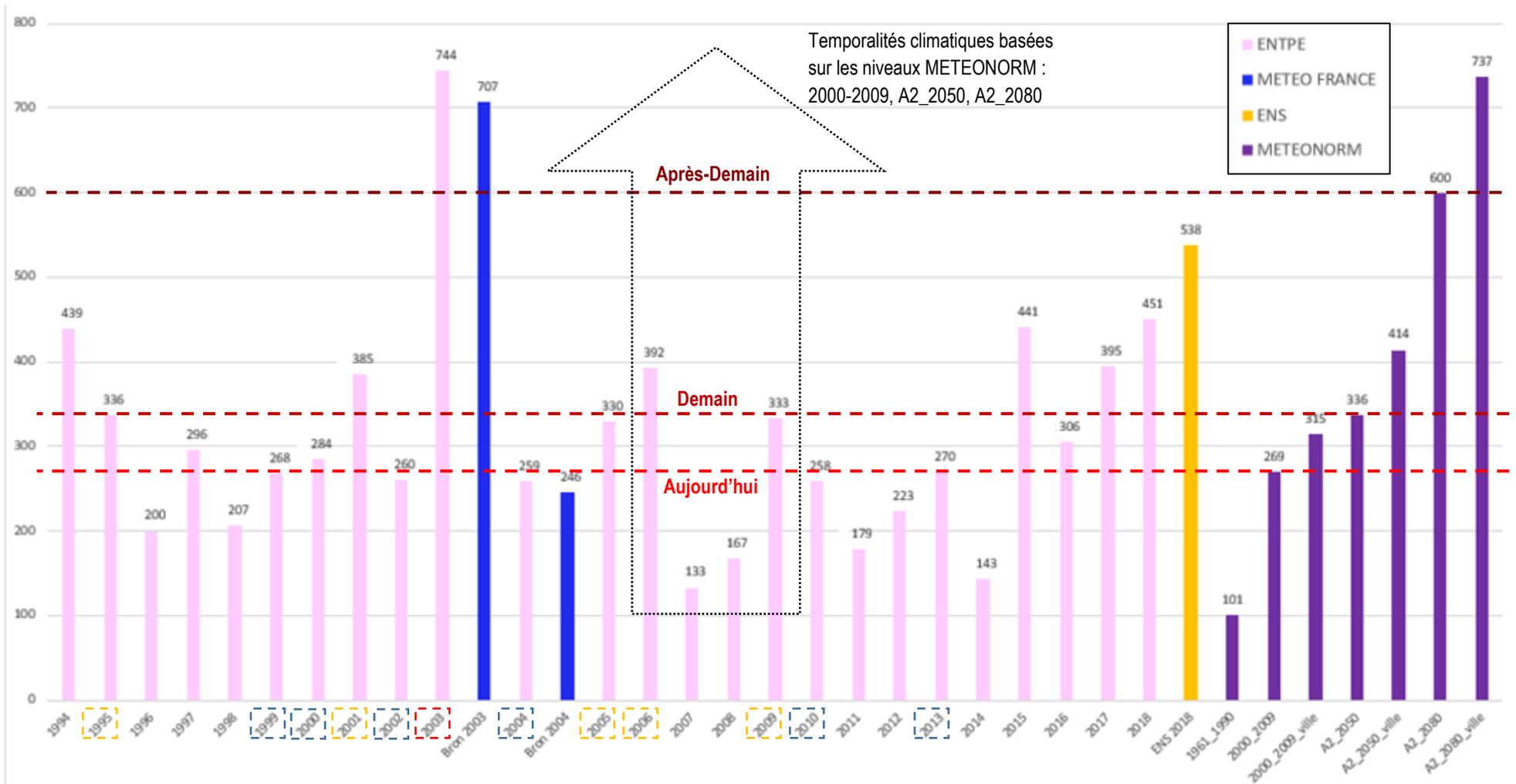


Figure II. 15 - Cumul de nombre d'heures où la température est supérieure à 28°C dans les différents fichiers météo ENTPE, METEO FRANCE, ENS, METEONORM.

II.4.2.2 Axe 1 : sélection des fichiers représentatifs du changement climatique

Au-delà du cumul d'heures où la température est supérieure à 28 °C, il convient maintenant d'affiner la sélection au regard d'autres indicateurs. Pour caractériser le changement climatique, l'analyse porte sur la présence, la durée, l'intensité et la sévérité des vagues de chaleur, et plus précisément des périodes de canicules. Ces épisodes caniculaires sont tracés sur la Figure II. 16 sous forme de « bubble chart » (selon la méthodologie définie dans le Chapitre 1) pour les données mesurées présélectionnées et les données fictives de METEONORM.

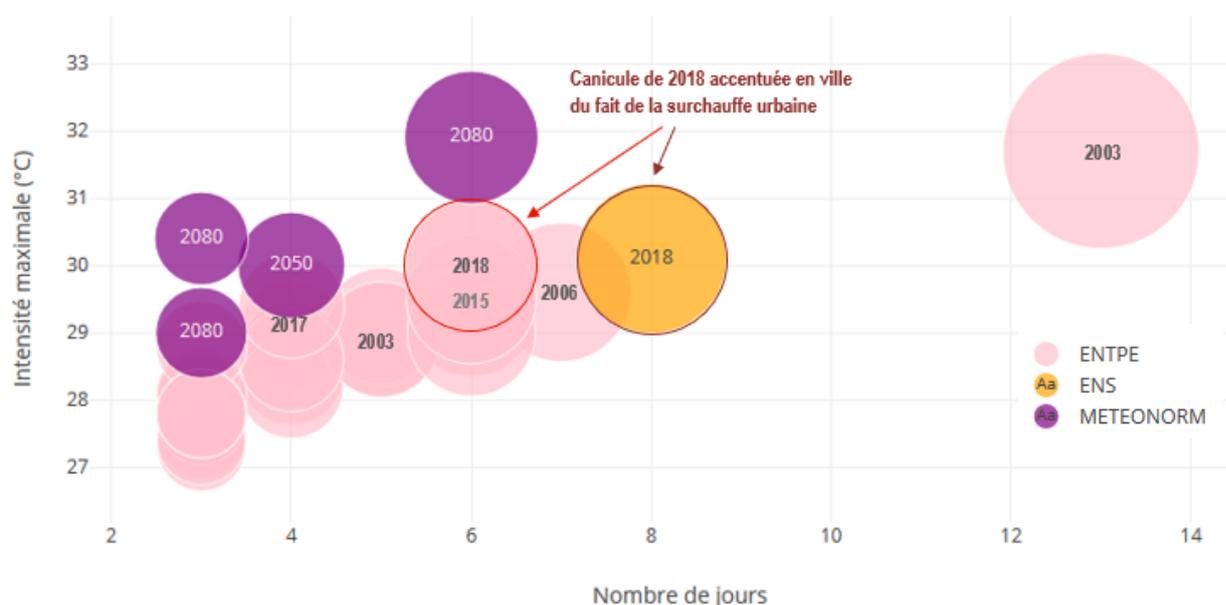


Figure II. 16 - Tracé bubble chart des périodes de canicule pour les données mesurées des stations ENS & ENTPE et générées par METEONORM.

Pour faciliter l'analyse, les résultats de la Figure II. 16 sont mis en regard de la synthèse du PCAET du Grand Lyon (Tableau II. 5). Dans cette dernière, les projections sont faites via les données de la station aéroportuaire de Saint Exupéry qui se situe en zone rurale. Par conséquent, il n'est pas surprenant d'obtenir des périodes de canicules plus courtes de 1 à 5 jours comparées à celles mesurées à la station péri-urbaine de l'ENTPE. Egalement, la synthèse propose des durées de canicule pour les climats futurs : 2 à 8 jours/an à l'horizon 2021-2050 et de 9 à 28 jours à l'horizon 2071-2100.

	Observation (1971-2000)	Court terme (2021- 2050)	Moyen terme (2071-2100)
Température moyenne annuelle	11 °C	13 à 14 °C	14 à 16 °C
Nombre de jours de canicule	< 1 jour/an	2 à 8 jours/an	9 à 28 jours/an
Nombre de jours de forte chaleur (>35°C)	2 jours/an	4 à 10 jours/an	14 à 30 jours/an

Tableau II. 5 - Synthèse PCAET Grand Lyon (GrandLyon, 2019).

Une première remarque concerne les résultats des données METEONORM. Le fichier 2000_2009 n'indique aucune période caniculaire. Un épisode de 4 jours est relevé sur le fichier A2_2050 en cohérence avec le PCAET. En revanche, le fichier A2_2080 ne prédit qu'une durée maximale de 6 jours bien en deçà des projections fournies par le PCAET. Au final, les données METEONORM tendent à sous-estimer les épisodes caniculaires.

Cette remarque se confirme en analysant les données mesurées de 2003 : l'épisode relevé dure plus longtemps (13 jours) et est d'une sévérité plus forte pour une intensité équivalente. Cela confirme bien que l'année 2003 est représentative de la météo d'Après-demain. Pour la météo de Demain, les années 2006, 2015 et 2018 présentent une intensité équivalente à celle du fichier A2_2050, mais une durée de canicule de 6 à 7 jours qui est plus conforme avec les critères du PCAET. Néanmoins, les météo de 2015 et 2018 étant nettement plus chaudes que les prévisions A2_2050, l'année 2006 est finalement conservée. Enfin, l'analyse des épisodes caniculaires n'est pas discriminante pour sélectionner la météo d'Aujourd'hui. Ici, le choix s'est porté sur l'année 2004 à deux titres : elle présente un cumul d'heures où la température est supérieure à 28 °C très proche de celui des données METEONORM 2000-2009 et elle était préconisée dans le référentiel Bâtiment Durable du Grand Lyon de 2013 (même si une version actualisée de 2016 de ce référentiel laisse libre le choix de la donnée météo, tant que celui-ci est argumenté).

II.4.2.3 Axe 2 : sélection des fichiers représentatifs de la surchauffe urbaine

Sur la Figure II. 17, les données de l'ENS indiquent un épisode caniculaire plus long et légèrement plus intense et sévère qu'à l'ENTPE. Cette Figure II. 17 présente les évolutions des températures mesurées aux stations ENTPE (péri-urbaine) et ENS (urbaine) pour ces épisodes caniculaires. Les seuils $S_x = 34^\circ\text{C}$ et $S_n = 20^\circ\text{C}$ pour Lyon sont également tracés. Compte tenu de la surchauffe urbaine, les niveaux de température mesurés à l'ENS sont régulièrement supérieurs à ceux de l'ENTPE. Les canicules étant définies par des dépassement de seuils, on observe deux jours durant lesquels ces seuils sont dépassés pour l'ENS et pas l'ENTPE, augmentant mécaniquement la durée de la canicule. Par conséquent, pour limiter les conséquences des épisodes caniculaires en ville, il convient donc de traiter la problématique de surchauffe urbaine, notamment en portant la réflexion sur l'aménagement urbain.

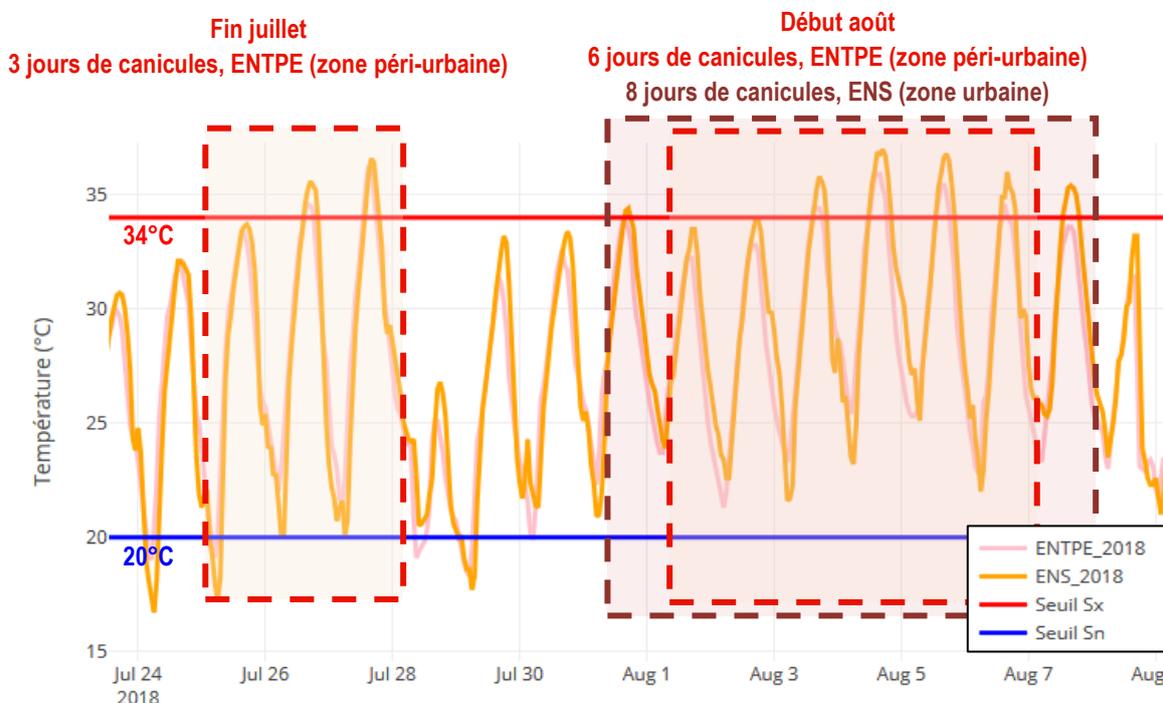


Figure II. 17 - Évolution de température durant la canicule de 2018 à Lyon, mise en évidence de la surchauffe urbaine.

II.4.2.4 Synthèse des fichiers sélectionnés

Une analyse des données météo mesurées (ENTPE, ENS, METEO FRANCE) dans des zones urbaines et péri-urbaines sur plusieurs années et des données météo générées pour différentes temporalités a conduit à sélectionner les fichiers suivants pour caractériser le changement climatique et la surchauffe urbaine (Tableau II. 6).

Temporalité de la météo	METEONORM	ENTPE
Aujourd'hui	2000_2009	2004
Demain	A2_2050	2006
Après-Demain	A2_2080	2003

ENTPE	ENS
2018	2018
Péri-urbain	Urbain

Tableau II. 6 – Sélection météo pour caractériser le changement climatique et la surchauffe urbaine.

II.4.3 Distribution statistique des grandeurs météorologiques des fichiers sélectionnés

Pour finaliser et conforter la sélection des fichiers météo, les distributions statistiques de l'ensemble des grandeurs météorologiques sont présentées ci-après.

II.4.3.1 Température

La distribution statistique est effectuée sur la Figure II. 18 pour les températures estivales (de début mai à fin septembre). Les données caractérisant le changement climatique montrent bien une augmentation de la température moyenne des climats futurs. Pour les fichiers METEONORM comme pour les fichiers ENTPE retenus, la hausse est de +1°C à l'horizon 2050 et de +3°C à +4°C à l'horizon 2080. Les moyennes des deux types de fichiers sont sensiblement équivalentes, alors que les données mesurées présentent des extrêmes plus importants, du fait notamment des vagues de chaleur. Concernant la surchauffe urbaine, on constate un écart d'environ +1°C à l'ENS par rapport à l'ENTPE.

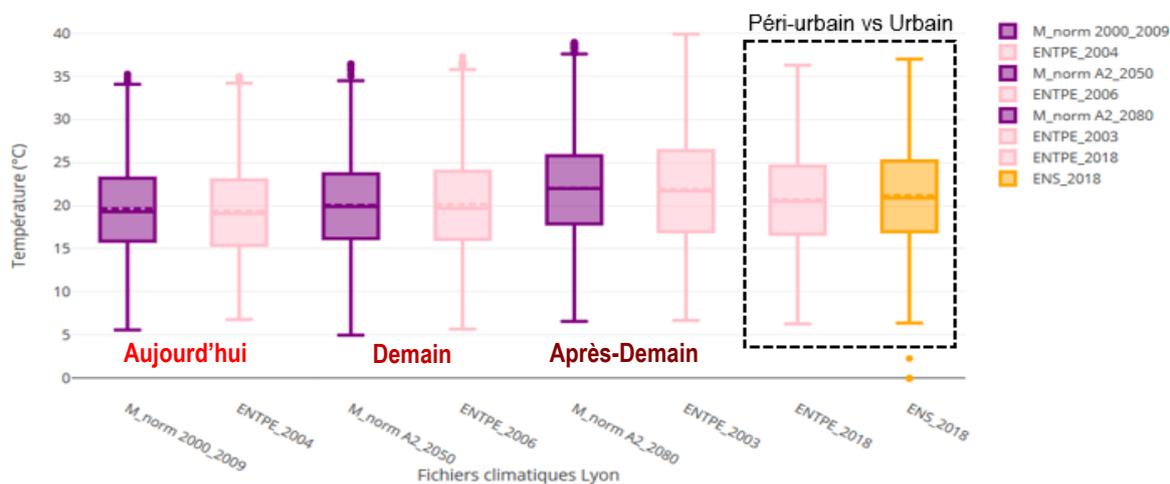


Figure II. 18 - Distribution statistique des températures estivales (de début mai à fin septembre) des météo retenues.

La température estivale moyenne des fichiers mesurés est repositionnée par rapport aux derniers scénarios du changement climatique du GIEC sur la Figure II. 19. Celle-ci illustre les écarts entre une référence 1976-2005 et les températures estivales moyennes mesurées pour toutes les années depuis 1970 à l'échelle de la région Rhône-Alpes d'une part et les projections futures effectuées sous Aladin-Climat pour trois scénarii d'évolution d'autre part (<http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd>). La météo 2004, au centre du bandeau gris, est bien représentative de la météo mesurée ces dernières années. La météo de 2003 choisie pour représenter le climat d'Après-demain est valable pour le scénario RCP 8.5 (scénario le plus pessimiste, bandeau violet), équivalent à l'ancien scénario A2 retenu dans METEONORM, nos résultats convergent avec ces données. En revanche la météo de 2006 choisie pour représenter le climat de Demain paraît un peu faible pour représenter le scénario RCP 8.5. D'après ce graphique, les niveaux de chaleur de l'année 2006 pourraient être vécus plus tôt, à l'horizon 2030, des années plus chaudes comme 2015 et 2018 correspondraient mieux aux prospections pessimistes (RCP 8.5) de 2050.

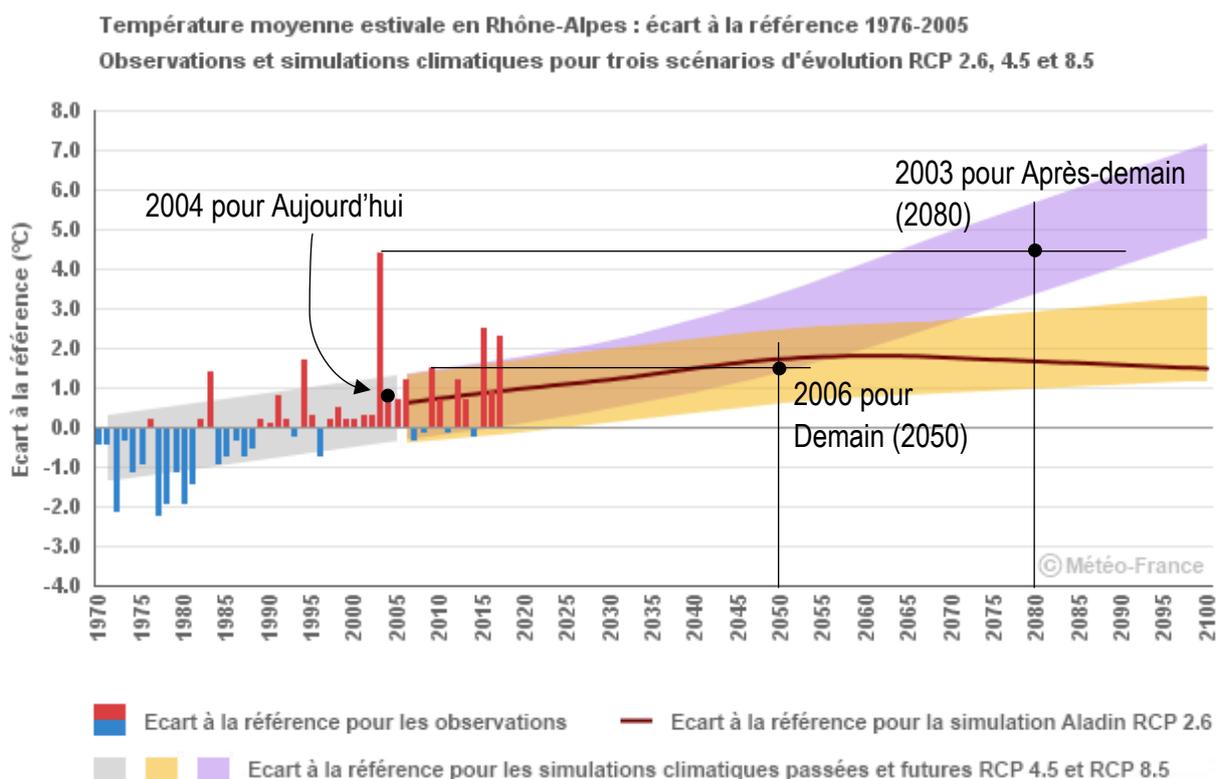


Figure II. 19 - Température moyenne estivale en Rhône-Alpes : écart à la référence 1976-2005. Observations et simulations climatiques futures sous Aladin-Climat pour les scénarios d'évolution RCP 2.6, 4.5, et 8.5. (Source : Météo France)

II.4.3.2 Rayonnement solaire

La Figure II. 20 présente la distribution statistique du rayonnement solaire sur la période estivale (de début mai à fin septembre) des fichiers sélectionnés hormis l'ENS pour lequel la donnée de rayonnement solaire n'est pas fournie par la station météo. Les fichiers METEONORM et ENTPE possèdent des niveaux de rayonnement solaire similaires, quelle que soit la temporalité.

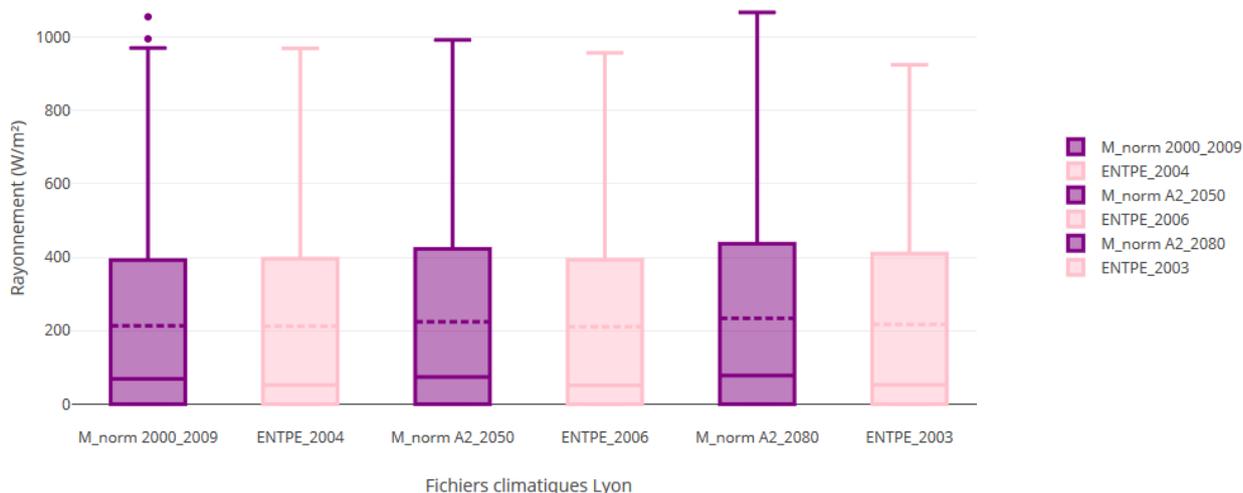


Figure II. 20 - Distribution statistique sur la période estivale (de début mai à fin septembre) du rayonnement solaire des fichiers sélectionnés.

II.4.3.3 Humidité relative

La Figure II. 21 présente la distribution statistique de l'humidité relative sur la période estivale (de début mai à fin septembre) des fichiers sélectionnés. En 2018, les mesures ENS (zone urbaine) sont plus humides que celles de l'ENTPE pourtant en zone péri-urbaine, alors que le contraire était attendu. Cependant, les mesures de l'ENS sont effectuées au sol sur un espace enherbé pour lequel l'évapotranspiration modifie localement l'humidité relative, alors que la station ENTPE est positionnée sur une toiture minérale. Les données de cette dernière sont comparées en 2013 aux données METEO FRANCE et ainsi confortées. Concernant la temporalité, les fichiers ENTPE tendent vers une humidité relative plus faible à mesure que la température augmente, ce qui serait logique si l'humidité absolue de l'air est considérée constante. En revanche, les fichiers METEONORM prédisent des climats de plus en plus chauds et humides.

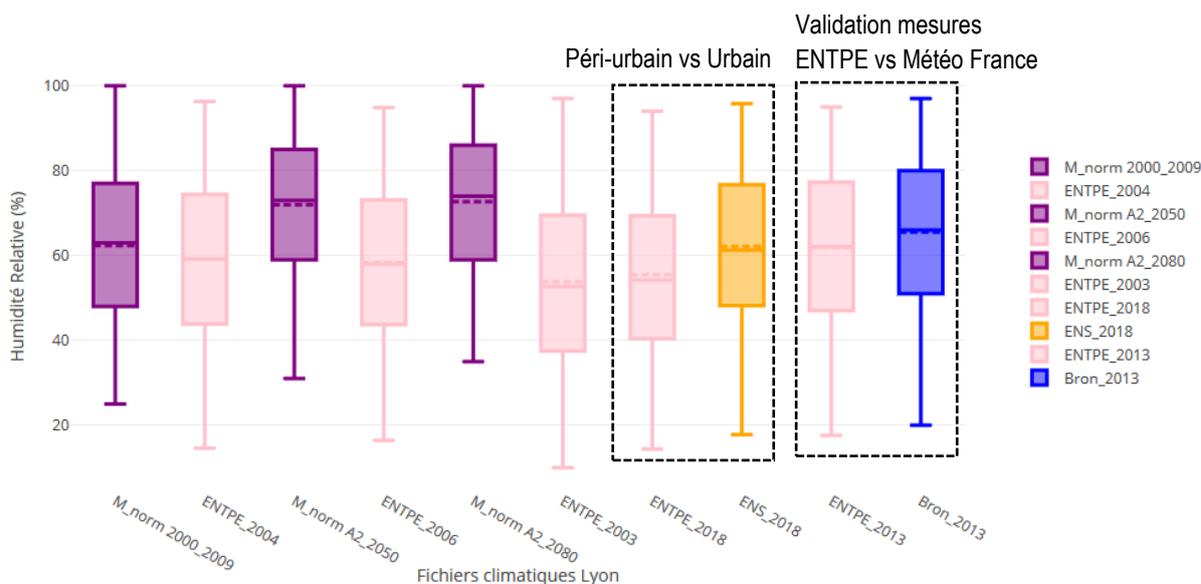


Figure II. 21 - Distribution statistique sur la période estivale (de début mai à fin septembre) de l'humidité relative des fichiers sélectionnés.

II.4.3.4 Vitesse de vent

La Figure II. 22 présente les données de vitesse de vent (de début mai à fin septembre). Celles mesurées à l'ENS sont deux fois plus faibles qu'à l'ENTPE, en raison de la rugosité de la ville. En revanche, on observe des différences notables, tant sur la moyenne que sur les extrêmes, entre les données METEONORM et ENTPE, les secondes étant plus faibles.

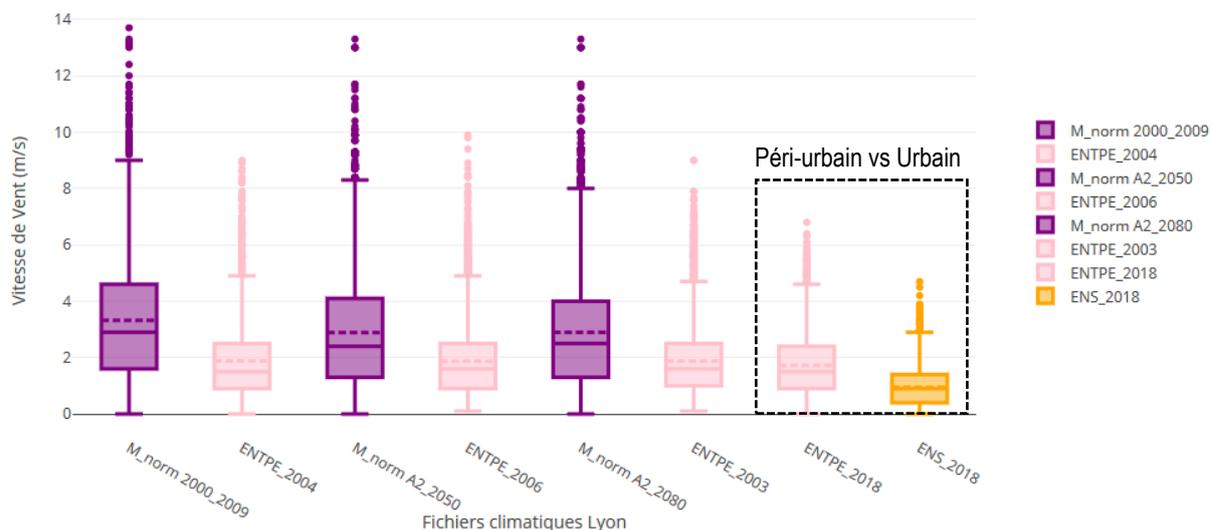


Figure II. 22 - Distribution statistique sur la période estivale (de début mai à fin septembre) de la vitesse de vent des fichiers sélectionnés.

II.5 Conclusions du chapitre 2

La première partie de ce chapitre a présenté l'étude expérimentale de TRIBU qui a mis en évidence le phénomène de surchauffe urbaine à Lyon CONFLUENCE par rapport aux mesures de la station péri-urbaine de METEO FRANCE située à Bron, entre 2013 et 2015 (Figure II. 23). Les résultats de cette étude ont été confortés par l'analyse de données météo récupérées sur deux autres stations météo lyonnaises : ENS en zone urbaine et ENTPE en zone périurbaine.

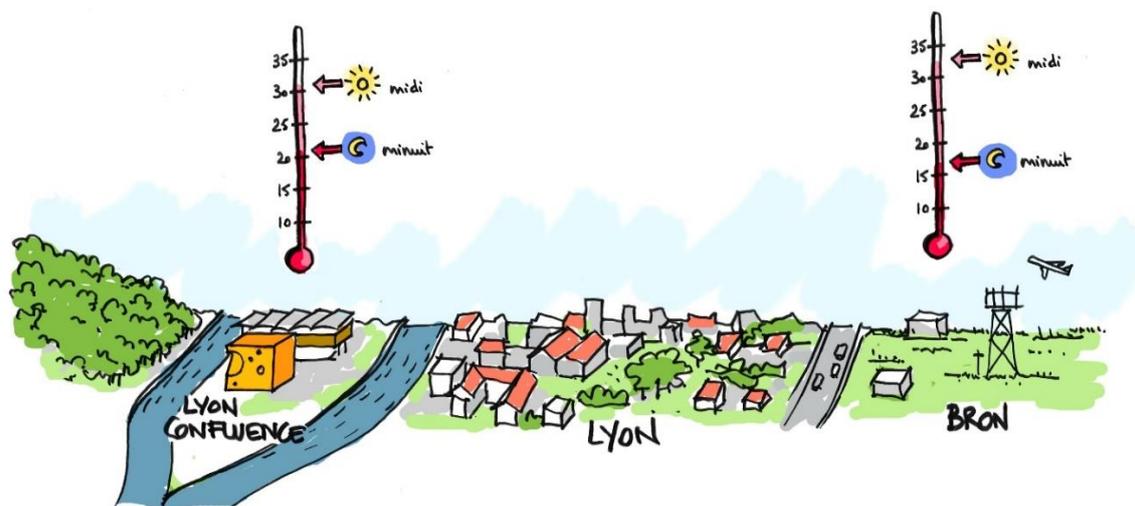


Figure II. 23 - Illustration de la surchauffe urbaine à Lyon Confluence (Source : TRIBU, dessin d'Héloïse Marie).

Face à la relative abondance de données météo lyonnaises sur différentes années et différents lieux, la dernière partie de chapitre a permis de développer une méthodologie pour sélectionner des fichiers météo mesurés pour représenter le changement climatique d'une part et la surchauffe urbaine d'autre part. L'application de cette méthodologie a conduit à sélectionner les fichiers ENTPE des années 2004, 2006, et 2003 (parmi les 24 fichiers disponibles) pour représenter les météo d'Aujourd'hui, Demain et Après-Demain. Toutefois, la comparaison des fichiers mesurés et générés par METEONORM pour les différentes temporalités a souligné que les seconds tendent à sous-estimer les épisodes caniculaires et extrêmes du fait de leur construction basée sur des moyennes climatiques. Concernant la surchauffe urbaine, une ressource limitée des données de la station ENS a contraint le choix de l'année d'étude sur 2018, qui est cependant identifiée comme une année chaude.

La prise de conscience des enjeux de confort et sanitaires liés au changement climatique et urbain est dès à présent un challenge pour la construction urbaine allant des aménagements extérieurs à la conception d'enveloppes abritant des espaces intérieurs. Pour cette dernière, la conception bioclimatique des enveloppes doit être repensée au regard de ces données actuelles et futures, péri-urbaines et urbaines. Cette question est traitée dans la seconde partie de cette thèse.

DEUXIEME PARTIE

Simulation thermique dynamique

Cette seconde partie concerne la simulation thermique dynamique (STD) qui, comme évoqué en introduction, repose sur des outils numériques largement utilisés en bureaux d'études en phase de conception bioclimatique des projets. Le Chapitre 3 propose de faire un point sur ces outils et modèles numériques. Pour répondre aux enjeux climatiques actuels et futurs, des interrogations concernant les fichiers météo utilisés en entrée STD ont été exprimés. Afin d'apporter des éléments de réponse, un travail d'étude de sensibilité concernant l'influence de la donnée météo sur la sortie STD est ensuite présenté en Chapitre 4.

III CHAPITRE 3 MODELES STD, INCERTITUDE & SENSIBILITE : UN BREF ETAT DE L'ART

III.1	MODELES STD	86
III.1.1	Les outils STD étudiés	86
III.1.2	Transferts thermiques par conduction	88
III.1.3	Rayonnement Solaire.....	89
III.1.3.1	Rayonnement solaire direct et diffus.....	90
III.1.3.2	Inter-réflexions solaires.....	90
III.1.4	Rayonnement Infrarouge.....	91
III.1.4.1	Echanges seulement avec le ciel et le sol, et linéarisation	91
III.1.4.2	Echanges complet avec le ciel, le sol et les bâtiments	92
III.1.5	Aéroulrique	93
III.1.5.1	Transfert de chaleur par convection.....	93
III.1.5.2	Infiltration et ventilation	93
III.1.6	Hygrométrie.....	94
III.1.7	Discussions sur les outils STD	95
III.2	SENSIBILITE ET INCERTITUDES EN STD	96
III.2.1	La validation des outils STD.....	96
III.2.1.1	Les BESTEST.....	96
III.2.1.2	Comparaisons STD et études expérimentales.....	97
III.2.2	Incetitudes et analyses de sensibilité STD.....	99
III.2.2.1	Incetitudes des résultats STD.....	99
III.2.2.2	Analyse de sensibilité des STD.....	100
III.3	CONCLUSION DU CHAPITRE 3.....	101

Un travail bibliographique de différents modèles numériques de thermique du bâtiment existants est tout d'abord présenté. Celui-ci a pour objectif d'analyser la manière dont ils simulent les phénomènes physiques à l'interface bâtiment – environnement extérieur. La modélisation, par définition, tente de représenter la réalité mais elle doit la simplifier et les hypothèses émises pour cela induisent des biais que nous expliquerons en seconde partie via les procédés de validation des outils, et les études d'incertitude et de sensibilité.

III.1 MODELES STD

Initiés dans les années 1960 aux États-Unis avec DOE et BLAST, les outils de thermique du bâtiment ont ensuite évolué dans les années 1990 avec les avancées informatiques vers des calculs en régime transitoire (STD). Sous l'impulsion du Centre d'Énergétique de l'École des Mines de Paris, le modèle COMFIE voit le jour en 1990 ; agrémenté d'une interface graphique, il deviendra Pléiades+COMFIE en 1994, puis PLEIADES aujourd'hui. Outre atlantique, les modèles DOE et BLAST font émerger l'outil STD EnergyPlus en 1997. Initialement restreint aux utilisateurs experts des laboratoires, l'usage de ces outils s'est démocratisé dans les bureaux d'études de conception bâtiment, notamment par le biais d'une offre commerciale grandissante et d'interfaces graphiques plus conviviales. Par ailleurs, leur utilisation est peu à peu remontée des phases aval de la conception aux phases amont. En effet, les études STD permettent d'orienter le projet vers des choix bioclimatiques pour assurer le confort intérieur et minimiser les besoins énergétiques du futur bâtiment. Toutefois, les résultats des simulations, et les choix qui en découlent, sont inévitablement corrélés aux hypothèses simplificatrices des modèles qu'il est nécessaire de connaître. Une analyse détaillée de quelques outils est présentée ci-après.

III.1.1 Les outils STD étudiés

Ce travail s'est concentré sur les outils STD jugés comme étant les principaux sur la scène nationale et internationale, à savoir : TRNSYS (McDowell et al., 2018), PLEIADES , BuildSysPro (Plessis, Kaemmerlen, et Lindsay, 2014), Design Builder, EnergyPlus (EnergyPlus, 2019), Virtual Environment (IES, 2019), et Citysim (Robinson, F Haldi, et al., 2009). Leurs principales caractéristiques sont rassemblées dans le Tableau III. 1. Un premier critère de classification est leur architecture (Tittlein, 2012). BuildSysPro, TNRSYS et EnergyPlus sont basés sur des modèles modulaires, c'est-à-dire suffisamment « ouverts » pour permettre le couplage d'un nouveau module de calcul et ainsi réaliser des études spécifiques. De fait, ils sont plutôt utilisés en projets de recherche. Les autres outils sont basés sur des architectures « monolithiques », pour lesquelles l'accent a été mis sur la praticité et la convivialité pour permettre leur usage dans des bureaux d'études par des experts opérationnels (même si ces outils ne sont pas exclus des projets de recherche). Notons que le moteur de calcul EnergyPlus peut être utilisé de manière indépendante ou sous forme encapsulée dans Design Builder : leurs possibilités sont donc équivalentes et ces deux outils sont considérés comme un seul dans la suite du document. Enfin, même s'il est plutôt utilisé à l'échelle quartier pour des calculs de rayonnement et de thermique du bâtiment, l'outil CitySim est intégré à cette liste puisqu'il est utilisé dans la Partie III de cette thèse.

TRNSYS



Logiciel propriétaire

Modulaire, il est présent dans les projets de recherche appliqués et spécialisés.

PLEIADES



Logiciel propriétaire

Convivial et relativement simple à prendre en main, il est très présent en en BE sur la scène nationale.

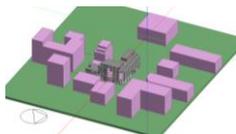
BuildSysPro



Logiciel open source (langage Modelica)

Modulaire, il est utilisé en recherche fondamentale, développement technologique, recherche appliquée, études prospectives.

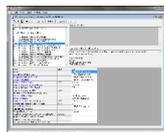
Design Builder



Logiciel propriétaire

Utilisé en bureau d'études à l'échelle mondiale.

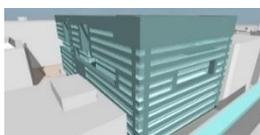
EnergyPlus



Logiciel open source

Mondialement utilisé en recherche, et souvent encapsulé dans des outils en tant que moteur de calcul STD (Design Builder, Archiwizard, SketchUp).

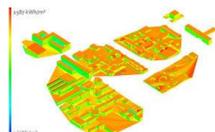
Virtual Environment



Logiciel propriétaire

Utilisé en bureau d'études à l'échelle mondiale.

CitySim



Interface graphique propriétaire (Kaemco)

Code open source

Tableau III. 1 - Aperçu des principales caractéristiques des outils étudiés.

La suite de ce chapitre propose un état des lieux des modèles utilisés par ces outils STD, et notamment de leur manière d’appréhender les différents flux de chaleur échangés à l’interface entre le bâtiment et son environnement. Ainsi, les modèles utilisés pour représenter de transfert par conduction (Tableau III. 2), le rayonnement solaire (Tableau III. 3), le rayonnement infrarouge (Tableau III. 4), la convection (Tableau III. 5), la ventilation et les infiltrations (Tableau III. 6) sont comparés. L’objectif est de mieux comprendre la construction des outils, leurs hypothèses simplificatrices, leurs possibilités et leurs limites dans leur façon de prendre en compte les données d’entrée météorologiques et les interactions thermiques d’un bâtiment avec son environnement.

III.1.2 Transferts thermiques par conduction

Les transferts thermiques par conduction à travers les murs, la dalle, la toiture sont fréquemment modélisés en 1D via des modèles mathématiques tels que les fonctions de transfert, les différences finies, les éléments finis, ou encore des modèles réduits (Tableau III. 2).

	Fonctions de transfert	Différences finies	Eléments finis	Réduction de modèle	Modèles simplifiés
TRNSYS	Fonction de transfert de systèmes dynamiques linéaires discrets ou fonction de transfert en z				
PLEIADES				Différences finies avec réduction de modèle par méthode modale	
BuildSysPro	Peuvent être utilisées	Bibliothèque Modelica « Thermal.Heat.Transfer »	Peuvent être utilisés	Peut être utilisée	Peuvent être utilisés
Design Builder / EnergyPlus	Option standard Option EMPD (Effective Moisture Penetration Depth)	Option recommandée pour les matériaux à changement de phase, les parois minces ou les pas de temps de calculs faibles (inférieurs à 15 minutes) Méthodes de résolution numérique : - Crank-Nicholson - Semi-implicite - Euler implicite	Option HAMT (Heat and Moisture Transfer)		
Virtual Environment		Euler implicite			
CitySim					Modèle résistance capacité R2C

Tableau III. 2 - Méthodes de résolution des transferts thermiques par conduction.

Les fonctions de transfert sont fréquemment utilisées en raison de la rapidité des calculs. Lorsque cette technique est utilisée, les approches DRF (Direct Root Fiding), SS (State Space), et FDR (Frequency Domain Regression) permettent de déterminer les coefficients de la fonction. Dans TRNSYS, c'est l'approche DRF qui est utilisée, alors qu'EnergyPlus fait appel à l'approche SS. Ces deux approches induisent une erreur qui s'accroît en fonction de la réciproque du produit du nombre de Fourier et des caractéristiques thermo-structurelles du bâtiment (Delcroix et al., 2012). Par conséquent, plus le bâtiment est isolé et inertiel, plus l'erreur sur le calcul du transfert thermique est grande lorsque le temps de calcul est inférieur à 15 minutes. En revanche, l'approche FDR engendre une erreur toujours inférieure à 1%, mais aux dépens d'un temps de calcul fortement rallongé, ce qui limite son déploiement dans les outils STD. Les résolutions par différences finies sont moins rapides, mais plus précises pour des pas de temps de calcul courts (Mazzarella et Pasini, 2015) ou pour des simulations de parois minces comme les vitrages (EnergyPlus, 2019). PLEIADES utilise également les différences finies, mais avec une réduction de modèle par méthode modale qui permet d'augmenter les performances de calculs (Peuportier, 2005). Enfin, la modélisation de la conduction dans CitySim se réfère à un schéma électrique équivalent avec des résistances et des capacités pour représenter respectivement l'isolation et l'inertie des parois. Cette méthode simple est moins précise, mais donne des résultats satisfaisants pour aborder l'échelle de plusieurs bâtiments avec des temps de calcul acceptables.

On remarque que EnergyPlus et BuildSysPro offrent plusieurs possibilités en termes de méthode de résolution des transferts thermiques par conduction. Chaque méthode est évidemment adaptée à un cas d'étude qu'il est important de maîtriser pour assurer un compromis entre rapidité de calcul et précision des résultats. Par exemple, l'utilisation du modèle par différences finies est nécessaire dans EnergyPlus lorsqu'on étudie les matériaux à changement de phase (EnergyPlus, 2019). Les méthodes EMPD et HAMT ont la particularité de faire apparaître les transferts de masse (de vapeur d'eau) dans le jeu d'équations. La prise en compte de l'interaction entre les phénomènes thermiques et hydriques devient possible : ce point est abordé dans la section 1.6 de ce chapitre.

III.1.3 Rayonnement Solaire

Le rayonnement solaire, ou rayonnement courtes longueurs d'onde (CLO), joue un rôle majeur sur la performance énergétique des bâtiments et le confort intérieur (Bouyer, Inard, et Musy, 2011). Dans les climats tempérés comme celui de la métropole française, l'objectif de la conception bioclimatique est de maximiser les apports solaires en hiver pour réduire les besoins de chauffage et de s'en protéger en été afin d'éviter les risques de surchauffe et d'inconfort. Les réglages pour atteindre ce compromis hiver/été se font lors de la conception de l'enveloppe du projet de bâtiment et notamment à l'aide des études STD. Il paraît donc essentiel de comprendre comment est pris en compte le rayonnement solaire dans les logiciels utilisés. Le rayonnement solaire est divisé en trois composantes que sont le direct, le diffus, et les inter-réflexions (Figure III. 1).

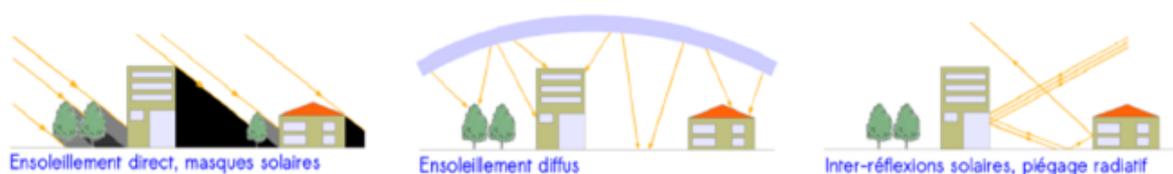


Figure III. 1 - Illustration des rayonnements directs, diffus, et inter-réflexions solaires (Bouyer, 2009).

III.1.3.1 Rayonnement solaire direct et diffus

Tous les outils STD considèrent le rayonnement direct et diffus, ainsi que les ombres générées par les masques des bâtiments voisins. Pour améliorer la précision du calcul des sollicitations liées au rayonnement solaire diffus, un facteur de vue du ciel (SVF, Sky View Factor) peut être calculé, il représente la portion de ciel observable à partir de la surface considérée et le tout moyenné à l'échelle de l'enveloppe du bâtiment. Également, les masques lointains relatifs à la topographie des sites peuvent être pris en compte. Ces éléments sont présentés dans le Tableau III. 3.

Les flux solaires directs et diffus incidents sont en partie réfléchis en fonction de l'albédo (coefficient de réflexion) des surfaces, en partie absorbés, et enfin éventuellement transmis à travers le matériau comme dans le cas des vitrages. La part transmise du rayonnement solaire est distribuée à l'intérieur du bâtiment, soit par suivi de tache solaire (calcul précis), soit par méthode pondérée. Différentes méthodes pondérées existent : le flux solaire entrant peut être affecté au sol ou distribué sur le sol et les murs via un ratio pondéré par les surfaces (Tableau III. 3).

	Inter-réflexions solaires	Répartition intérieure des flux solaires
TRNSYS	Seulement avec le sol	Méthode pondérée (ratio par rapport aux surfaces)
PLEIADES	Seulement avec le sol	Méthode pondérée (ratio par rapport aux surfaces)
BuildSysPro	Seulement avec le sol en version de base, mais possibilité d'ajouter un module de calcul	Méthode pondérée (ratio par rapport aux surfaces)
Design Builder EnergyPlus	En version de base, seulement avec le sol. Une option permet de considérer la réflexion avec les surfaces des bâtiments voisins	Méthode pondérée (ratio par rapport aux surfaces) en version de base. Option de suivi de la tache solaire
Virtual Environment	Seulement avec le sol	Suivi de la tache solaire
CitySim	Entre toutes les surfaces de la scène urbaine (sol, façades, toitures, et arbres)	Sur le sol uniquement

Tableau III. 3 - Comment les outils STD considèrent le rayonnement solaire CLO.

III.1.3.2 Inter-réflexions solaires

Le calcul des inter-réflexions solaires entre les surfaces urbaines permet d'estimer le flux supplémentaire qui, après inter-réflexions, est reçu par les surfaces du bâtiment. Ce calcul nécessite une représentation explicite de la géométrie (bâtiments voisins) et une connaissance des albédos des surfaces urbaines. La géométrie de l'environnement proche du bâtiment n'est pas toujours représentée et les options de calcul pour prendre en compte les inter-réflexions ne sont pas toujours intégrées aux outils STD. Le plus souvent, seules les inter-réflexions venant du sol (et un seul rebond) sont prises en compte en considérant un albédo moyen représentatif du site. Par ailleurs, dans cette approximation, il faut également noter qu'aucune ombre n'est portée sur le sol (celle du bâtiment lui-même ou des bâtiments voisins), et toutes les orientations de façades sont soumises à un rayonnement réfléchi qui parfois n'a pas lieu d'être.

EnergyPlus propose une option pour prendre en considération les inter-réflexions solaires entre les surfaces extérieures urbaines, l'ombrage du sol est alors pris en compte. Les réflexions sont supposées diffuses sur les surfaces opaques, et spéculaires sur les surfaces vitrées. Enfin, CitySim, qui travaille à l'échelle quartier avec une géométrie 3D de la scène urbaine, simule les rayonnement solaires directs, diffus, et inter-réfléchis entre les surfaces via des calculs de facteurs de formes et la méthode des radiosités (Robinson, Frédéric Haldi, et al., 2009).

III.1.4 Rayonnement Infrarouge

Toutes les surfaces urbaines en covisibilité échangent par rayonnement dans les grandes longueurs d'onde (GLO ou Infrarouge) lorsqu'elles possèdent des températures différentes. De même, la température de la voûte céleste étant plus froide que la température d'air (d'environ 10 degrés), des échanges infrarouges entre celle-ci et la ville se produisent et constituent une source de rafraichissement pour les surfaces urbaines. A titre d'exemple, Lou Chesné (Chesné, 2012) indique que 20% de besoin de fraîcheur pourraient être couverts par ce vecteur de rayonnement GLO avec le ciel.

Les échanges GLO entre deux surfaces urbaines sont décrits par la loi de Stefan-Boltzmann en fonction de leurs températures à la puissance 4 et de l'émissivité des matériaux :

$$\varphi_{IRTnet} = \sum_{j=1}^n \sigma F_{ij} (\varepsilon_i T_{si}^4 - \varepsilon_j T_{sj}^4) \quad (1)$$

avec :

- ε L'émissivité thermique des matériaux i et j,
- σ La constante de Stefan = $5,67 \cdot 10^{-8} \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$,
- T_s La température des surfaces i et j,
- F_{ij} Le facteur de forme entre les surfaces i et j.

Prendre en compte ces échanges nécessite donc non seulement de connaître les températures de toutes les surfaces mais aussi de calculer les échanges de chacune avec toutes les autres. Pour cela un calcul préliminaire qui consiste à définir les facteurs de forme entre les surfaces urbaines est nécessaire. Celui-ci est coûteux en temps de calcul. Par ailleurs, l'intégration d'un système d'équations non linéaire avec un exposant 4 augmente aussi considérablement les temps de calcul. Deux voies de simplifications existent et peuvent cohabiter : la limitation des surfaces prises en compte dans le rayonnement GLO et la simplification de la loi de Stephan Boltzmann.

III.1.4.1 Echanges seulement avec le ciel et le sol, et linéarisation

Les surfaces urbaines sont souvent supposées à la même température et donc en équilibre thermique. Les échanges radiatifs GLO se limitent donc au mieux entre les surfaces du bâtiment et le sol ou la voûte céleste. C'est ce qui est fait dans Virtual Environment ou TRNSYS, qui tiennent compte des masques aux travers de SVF. En revanche, PLEIADES ne considère que les échanges avec la voûte céleste sans prendre en compte les masques.

Ces échanges sont évalués à l'aide de la loi de Stefan-Boltzmann comme :

$$q_{LWR} = \varepsilon \sigma F_{grd} (T_{grd}^4 - T_{surf}^4) + \varepsilon \sigma F_{sky} (T_{sky}^4 - T_{surf}^4) \quad (2)$$

avec :

- F_{grd}, F_{sky} Facteur de vue du sol et du ciel
- $T_{grd}, T_{sky}, T_{surf}$ Température de sol, de ciel et de la surface

La température du ciel est souvent estimée en fonction de la température de l'air, voire en fonction d'autres paramètres comme l'humidité ou la couche nuageuse. La température de sol peut être prise égale à la température d'air en première approximation.

Lorsque les écarts de température ne sont pas trop importants, l'équation (2) peut être linéarisée :

$$q_{LWR} = h_{r,grd}(T_{grd} - T_{surf}) + h_{r,sky}(T_{sky} - T_{surf}) \quad (3)$$

avec les coefficients de transferts radiatifs qui s'écrivent sous la forme :

$$h_{r,X} = \frac{\varepsilon\sigma F_X(T_{surf}^4 - T_X^4)}{(T_{surf} - T_X)} \quad (\text{Source : documentation EnergyPlus}) \quad (4)$$

L'équation (3) présente ainsi une forme similaire aux équations de transfert par convection. Parfois, les flux radiatifs GLO sont agrégés au flux convectif en « dopant » le coefficient de convection à défaut de connaître précisément les températures de ciel ou de sol.

III.1.4.2 Echanges complet avec le ciel, le sol et les bâtiments

EnergyPlus tient compte des échanges avec les autres bâtiments en intégrant à l'équation (3) une composante supplémentaire. La température de surface des autres bâtiments est supposée égale à celle de l'air extérieur. BuildSysPro et CitySim sont les seuls outils capables de prendre en compte l'intégralité des échanges GLO d'une scène urbaine, incluant les rayonnements entre façades de bâtiments en utilisant les facteurs de forme entre chaque surface. BuildSysPro, utilise la méthode de lancer de rayons du logiciel Archiwizard via une interopérabilité d'outils matérialisée par un fichier XML. CitySim, utilise la méthode des radiosités pour estimer les échanges GLO. Pour évaluer les flux, ces outils calculent les températures des surfaces environnantes de manière dynamique.

	Échanges GLO avec le ciel	Échanges GLO avec le sol	Échanges GLO entre les surfaces des bâtiments	Méthodes de calcul
TRNSYS	X	X		Linéarisé
PLEIADES	X			Linéarisé
BuildSysPro	X	X	X	Linéarisé ou Loi de Stefan-Boltzmann <i>Un module a été développé pour permettre le couplage avec Archiwizard qui excelle en calcul de rayonnement. (Module non libre)</i>
Design Builder EnergyPlus	X	X	X	Linéarisé
Virtual Environment	X	X		Linéarisé
CitySim	X	X	X	Loi de Stefan-Boltzmann <i>Méthode des radiosités</i>

Tableau III. 4 - Comment les outils STD considèrent le rayonnement infrarouge GLO.

III.1.5 Aéraulique

Les transferts thermiques liés aux écoulements d'air concernent les transferts de chaleur par convection au niveau des surfaces et les transferts liés aux flux d'air à travers les parois et systèmes du bâtiment (ventilation et infiltrations).

III.1.5.1 Transfert de chaleur par convection

Les transferts de chaleur par convection à la surface extérieure du bâtiment peuvent être qualifiés de naturels, forcés ou mixtes selon que le mouvement d'air est induit par un gradient de température entre la surface et l'air à proximité, le vent, ou les deux. Ce transfert est généralement exprimé en fonction de l'écart de température air-surface et d'un coefficient de transfert de chaleur par convection, lequel dépend du régime de convection. Toutefois, les coefficients de transfert de chaleur par convection sont communément considérés constants dans les outils de simulation pour des raisons de simplicité. Parfois, une différenciation peut être faite suivant l'inclinaison des façades (horizontal ou vertical) (Mirsadeghi et al., 2013). Des formulations en fonction des vitesses d'air ou des différences de température fluide/solide peuvent également être rencontrées. Idéalement, leur application nécessiterait de prendre en compte les données de vent et de température d'air dans l'environnement proche de l'enveloppe du bâtiment qui ne sont ni connues, ni calculées. Concrètement, les vitesses de vent issues des stations météo sont soit directement utilisées, soit recalées à la hauteur du bâtiment via un profil de vent qui prend en compte la rugosité du site dans lequel le bâtiment est implanté. En revanche, aucune méthode simple de recalage local n'existe pour les températures d'air.

	Convection naturelle (flottabilité de l'air en fonction du gradient de température)	Convection forcée (en fonction de la vitesse de vent du fichier météo)
TRNSYS		X
PLEIADES		X
BuildSysPro	Implémentation possible	X (La vitesse de vent au proche du bâtiment peut être considérée afin de préciser le coefficient de convection)
Design Builder / EnergyPlus	Avec les méthodes « Adaptive Convection Algorithm » et « Simple Combined »	X
Virtual Environment		X
CitySim		X

Tableau III. 5 - Comment les outils STD déterminent les coefficients de transfert par convection.

III.1.5.2 Infiltration et ventilation

Les transferts d'air à la température extérieure vers l'intérieur du bâtiment se font d'une part par ventilation mécanique ou naturelle au travers des ouvertures et d'autre part par les infiltrations à travers les défauts

de l'enveloppe. Ces transferts d'air sont pris en compte dans les outils de simulation selon trois approches :

- Une première solution standard est de supposer un taux horaire constant par zone thermique pour le renouvellement d'air par ventilation. Dans ce cas, la seule connexion avec la donnée météorologique est la température d'air extérieure, qui provient directement du fichier météo.
- Une seconde approche plus détaillée consiste à prendre en compte les champs de pression au niveau des façades pour estimer les débits de ventilation naturelle et les infiltrations parasites. Ces champs de pression dépendent de la vitesse du vent et de l'exposition des façades. Les pressions, dont dépendent les transferts aérauliques, sont calculées en fonction de coefficients de pression. Ceux-ci sont généralement issus des tableaux proposés par l'AICV (Air Infiltration and Ventilation Centre) (AICV, 1986).
- Une troisième approche extrêmement détaillée consiste à résoudre des équations de mécanique des fluides par simulation CFD (Computational Fluid dynamics). Ceci permet l'étude fine et discrétisée des écoulements d'air aussi bien en espace extérieur autour du bâtiment qu'en ambiance intérieure. Cependant, ce genre de calcul est extrêmement coûteux et est donc souvent réalisé sur une seule journée.

	Constant	Equation de débit	Mécanique des fluides (CFD)
TRNSYS	X	Modèle TRNFLOW	
PLEIADES	X	X (basé sur le modèle CONTAM)	
BuildSysPro	X	Peut être implémenté	Peut être implémenté
Design Builder / EnergyPlus	X	X	X (Algorithme SIMPLER)
Virtual Environment	X	Modèle MacroFlo	Modèle MicroFlo
CitySim	X	X	

Tableau III. 6 - Comment les outils STD gèrent le renouvellement d'air par ventilation et infiltration.

III.1.6 Hygrométrie

L'humidité relative intérieure est une grandeur d'importance dans l'évaluation du confort intérieur. Actuellement, la plupart des outils STD la calcule dans un bilan a posteriori sans tenir compte des échanges avec l'enveloppe. Dans cette phase de post traitement, le niveau d'humidité dépend donc du fichier météo (via les transferts d'air), du scénario d'occupation (qui prend en compte une production de vapeur d'eau liée aux occupants) et du scénario d'apports internes (par exemple des apports latents pour simuler une cuisson).

Lorsque des matériaux hygroscopiques sont utilisés dans l'enveloppe (comme les enduits chaux ou la terre crue), il s'avère utile de décrire les transferts d'humidité afin de mettre en avant leurs qualités en termes de régulation hygrométrique et de confort. Cela nécessite des modèles supplémentaires.

EnergyPlus propose deux modèles de résolution permettant de prendre en compte les transferts d'humidité dans les matériaux : EMPD (Effective Moisture Penetration Depth) et HAMT (Heat And Moisture Transfer finite). Le modèle EMPD permet d'estimer la quantité d'eau emmagasinée dans les matériaux de construction en fonction de l'humidité relative de la zone thermique, par la méthode de la courbe de sorption. Ces variations d'accumulation d'eau dans l'enveloppe modifient l'humidité relative et la température de la pièce. Le modèle HAMT est un modèle thermo-hydrigue complet, qui couple les équations de transfert thermique et de transfert de masse (d'eau). Jun Yang et al. ont comparé ces modèles suivant les différents contextes climatiques mondiaux (Yang, Fu, et Qin, 2015). L'utilisation de ces modèles s'avère intéressante, même si actuellement, elle se fait au prix de temps de calcul démultipliés : par exemple, les modèles EnergyPlus EMPD et HAMT sont respectivement 2 fois et 100 fois plus coûteux en temps de calcul que le modèle standard de résolution par fonction de transfert sur un cas simple de type BESTEST (Goffart, Rabouille, et Mendes, 2017).

	Humidité d'air intérieure issue d'un post-traitement du fichier météo et du scénario d'occupation	Prise en compte de l'inertie hygroscopique Stockage et déstockage d'humidité dans les matériaux	Résolution couplée des phénomènes thermiques et hydriques
TRNSYS	X		
PLEIADES	X		
BuildSysPro	X	Implémentation possible	Implémentation possible
Design Builder / EnergyPlus	X	EMPD	HAMT
Virtual Environment	X		
CitySim	X		

Tableau III. 7 - Comment les outils STD gèrent l'humidité relative de l'air intérieur.

III.1.7 Discussions sur les outils STD

L'analyse comparative développée précédemment illustre les nombreuses différences qui existent entre les modèles malgré des objectifs identiques. Chaque outil, par les choix qui sont à la base de son développement, a ses forces et ses faiblesses qu'il est intéressant de connaître en tant qu'utilisateur. Des différences telles que les hypothèses simplificatrices de calcul, les choix des méthodes mathématiques, puis des méthodes de résolutions numériques sont autant de facteurs qui induiront des différences entre les résultats des outils STD. A ces différences, engendrées par les modèles, viennent s'ajouter les différences dans la représentation du bâtiment et sa saisie, relative à l'utilisateur expert qui fera aussi ses approximations dans l'entrée des caractéristiques du bâtiment. Ainsi, à projet et étude équivalents, il y aura autant de résultats STD que de saisies numériques.

Pour analyser l'impact des modèles et des données saisies par l'utilisateur, des démarches de validation, d'analyses d'incertitudes et d'études de sensibilités des résultats STD ont été menées. Leur présentation fait l'objet de la partie suivante.

III.2 Sensibilité et incertitudes en STD

Les outils de STD simulent les phénomènes physiques qui interviennent en thermique du bâtiment. Ils peuvent être utilisés pour analyser plusieurs variantes de conception et donc orienter les choix. Cependant, ces outils sont basés sur des modèles qui sont une représentation du système bâtiment et ne sont donc pas en mesure de fournir à l'utilisateur une « vérité ».

Or, certains projets bâtiments demandent des garanties et des engagements via un contrat de performance énergétique (CPE) qui est un partenariat entre un maître d'ouvrage et un opérateur afin de fixer un objectif d'efficacité énergétique. S'engager sur des performances énergétiques n'est pas une chose évidente tant il est difficile voire impossible de prévoir l'exact comportement d'un bâtiment, qui plus est, sollicité par une météo qui n'est pas encore connue. Le comportement des usagers également est une inconnue et n'est jusqu'ici que supposé par des scénarii répétitifs. Pourtant, d'après Quentin Darakdjian (Darakdjian, 2018), ce comportement des usagers a un impact sur le bilan énergétique d'autant plus important que le bâtiment est performant.

Par conséquent, la validation des outils, les études d'intervalles de confiance et de limite de précision des résultats sont des sujets délicats, mais importants à traiter pour ces modèles. De même, des analyses de sensibilité des modèles afin d'identifier les paramètres qui prédominent dans le bilan thermique sont profitables pour mieux maîtriser les outils et savoir profiter de leurs résultats pour orienter des choix dans les projets.

III.2.1 La validation des outils STD

III.2.1.1 Les BESTEST

Les BESTEST sont des processus de validation de modèles standardisés. Basés sur des cas d'études et des conditions aux limites définis, ils testent la réponse des modèles qui doivent fournir des résultats se trouvant entre une limite basse et une limite haute pour que ce dernier soit validé. Ces limites sont notamment déterminées par des modèles similaires éprouvés et considérés comme étant des références du domaine. Comme d'autres, le domaine de la STD a son propre BESTEST, dont la dernière version est ANSI/ASHRAE Standard 140-2017 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). Notons que l'International Energy Agency (IEA) a déclaré ce BESTEST comme étant le standard en modélisation thermique du bâtiment, une approbation suivie par le Comité Européen de Normalisation (CEN).

Ce BESTEST est composé de multiples examens qui viennent valider les différentes parties des modèles de thermique du bâtiment tels que les calculs des flux solaires pour le bâtiment (Joseph et al., 2013), les températures intérieures (Buonomano, 2016), ou encore les niveaux d'humidité relative (Woloszyn et Rode, 2008). Cependant, la procédure principale du BESTEST est un examen complet du modèle qui est réalisé sur des cas d'étude théoriques, mono-zones et bi-zones qui ont été étudiés expérimentalement.

Les cas d'études mono-zones du BESTEST sont illustrés Figure III. 2. La procédure inclut un détail exhaustif des données d'entrée pour toutes les configurations évaluées : en l'absence d'ambiguïté, une bonne reproductibilité et des résultats théoriques précis et proches de la donnée expérimentale sont attendus.

Ainsi, plusieurs modèles de thermiques du bâtiment ont été testés et validés, comme TRNSYS ou EnergyPlus (EnergyPlus, 2011). Cependant, ces cas d'études restent théoriques et des doutes subsistent concernant la validité des simulations réalisées sur des cas plus concrets multi-zones.

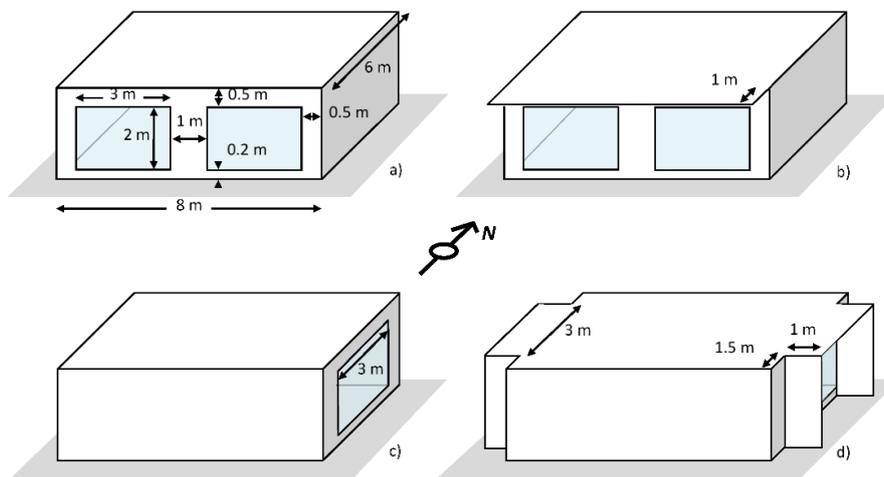


Figure III. 2 - Cas d'études BESTEST a) cas 600/900, b) cas 610/910 c) cas 620/920, d) cas 630/930 (Buonomano, 2016) la désignation 600 caractérisant un mode constructif léger en bois, 900 traduisant un mode constructif lourd et inertiel en béton.

III.2.1.2 Comparaisons STD et études expérimentales

Afin de tester les modèles STD sur des cas d'études plus réalistes, des plateformes expérimentales ont vu le jour en France cette dernière décennie. On peut citer la plateforme INCAS à l'INES près de Chambéry (Figure III. 4) ou encore la plateforme BESTLab installée sur le site du centre de recherche des Renardières d'EDF R&D (Figure III. 3).



Figure III. 3 - Plateforme expérimentale BESTLab, site des Renardières d'EDF R&D (Bontemps, 2016)



Figure III. 4 - Plateforme expérimentale INCAS, sur le site INES

Les résultats de mesures issus du site de la plateforme INCAS ont largement été utilisés par la communauté française pour valider expérimentalement certains outils STD comme PLEIADES (Recht et

al., 2014) et EnergyPlus (Stefanoiu et al., 2014). Ces études ont montré jusqu'à environ 2°C d'écart entre les températures intérieures simulées et celles mesurées. L'écart entre les deux valeurs est la conséquence des incertitudes de la modélisation numérique d'une part et des incertitudes de mesures d'autres part. En effet, les erreurs de métrologie sont souvent négligées dans les études. Les erreurs peuvent concerner aussi bien les variables mesurées à l'intérieur qu'à l'extérieur. Jérémy Bernard (Bernard, 2017), dans sa thèse, montre que malgré le respect de préconisations en amont sur le matériel et les techniques de mesures de température d'air en extérieur, des erreurs lui sont apparues lors du post-traitement de ses données.

Dans la même optique, Adrien Brun et al. (Brun et al., 2009) ont proposé une étude comparative entre les mesures réalisées dans maisons INCAS et cinq outils STD, dont TRNSYS, EnergyPlus et PLEIADES. La Figure III. 5 présente les évolutions simulées de la température intérieure sur 2 jours de juin de la maison INCAS. On note que les écarts maximums entre les outils TRNSYS et PLEIADES interviennent la nuit avec 1 à 1,5°C de différence, EnergyPlus se trouvant entre ces deux outils. La Figure III. 5 présente également le cumul d'heures supérieures à 27°C sur l'été pour deux configurations de simulation modifiant uniquement les coefficients de convection (Tableau III. 8 et Tableau III. 9). A première vue, le taux de surchauffe augmente à mesure que les valeurs des coefficients de convection diminuent. Mais il est aussi intéressant de constater qu'à modification équivalente, les réponses de TRNSYS et d'EnergyPlus ne sont pas du même ordre. En effet, le passage de la simulation 1 à la simulation 2 provoque l'augmentation de 100 heures supérieures à 27°C pour TRNSYS contre une augmentation de 250 heures pour EnergyPlus. On voit donc que pour une même modification, les conséquences sur les résultats des outils leurs sont singulières. On comprend donc qu'une incertitude en donnée d'entrée ne se propage pas de la même manière dans tous les outils. C'est alors que les analyses d'incertitudes et de sensibilités sont effectuées pour un cas d'étude et un modèle numérique donné.

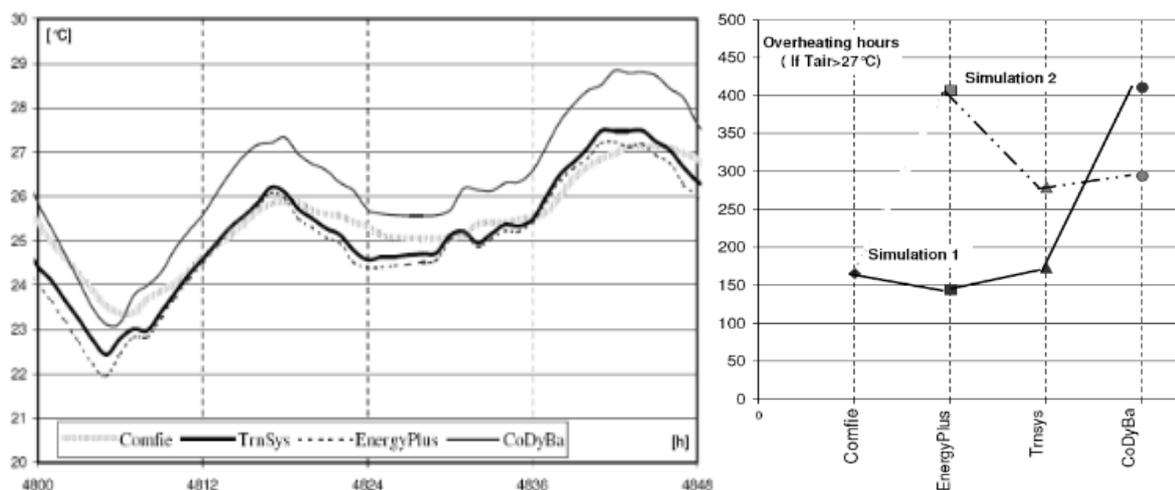


Figure III. 5 - Evolution de la température intérieure du RDC de la maison INCAS les 15, 16 juin et comparaison du nombre d'heures d'inconfort (Brun et al., 2009).

PB		PV		Pvi		PI		PH	
Int	Ext	Int	Ext	Int	Ext	Plaf	Plac	Int	Ext
1.8	3.3	3.3	14.9	3.3	14.9	3	3	4.6	18.9

Tableau III. 8 - Simulation 1 - Coefficients de transfert par convection standard proposés par les outils [W/(m²K)] (Brun et al., 2009)

PB		PV		Pvi		PI		PH	
Int	Ext	Int	Ext	Int	Ext	Plaf	Plac	Int	Ext
1.0	1.3	1.1	5.6	1.9	3.6	1.0	0.9	1.0	2.4

Tableau III. 9 - Simulation 2 - Coefficients de transfert par convection standard proposés par les outils $[W/(m^2K)]$ (Brun et al., 2009)

III.2.2 Incertitudes et analyses de sensibilité STD

L'analyse d'incertitudes vise à quantifier la variabilité des sorties d'un modèle induite par les incertitudes sur les paramètres d'entrée. Elle permet donc d'évaluer la fiabilité de la réponse simulée. Souvent les études d'incertitudes sont complétées par des analyses de sensibilité du modèle afin de déterminer le poids de chaque paramètre incertain dans le biais final du résultat en sortie. Pour un modèle validé, l'analyse de sensibilité est intéressante pour déterminer les facteurs les plus influents, sur lesquels les efforts de conception pourront porter pour atteindre les objectifs visés dans une étude.

III.2.2.1 Incertitudes des résultats STD

La thermique du bâtiment développe des outils STD depuis les années 1990, ces outils sont de plus en plus complexes et font intervenir un grand nombre de phénomènes qui peuvent aller au-delà des phénomènes physiques développés précédemment en incluant par exemple la physiologie et sociologie pour les modèles de confort et le comportement des usagers. Cette complexité tente de rendre les logiciels STD plus représentatifs de la réalité mais augmente aussi l'incertitude des résultats à la sortie. A titre d'exemple, la Figure III. 6 illustre schématiquement la corrélation entre incertitude et nombre d'entrées à renseigner. Concrètement, Recht et al. (Recht et al., 2014) soulignent dans une étude sur l'analyse de la fiabilité de PLEIADES que les températures intérieures peuvent être évaluées avec une précision de +/- 1°C. De même, les résultats de la thèse de Goffart (Goffart, 2013) indiquent entre 20 et 30% d'incertitude sur l'estimation des besoins de chauffage d'une maison INCAS.

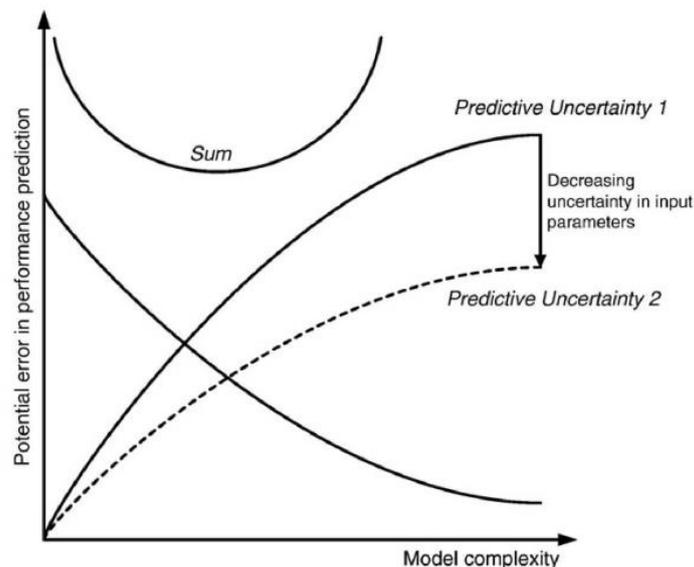


Figure III. 6 - Représentation de l'incertitude potentielle dans les prédictions de performance en STD en fonction de la complexité du modèle (Marija, Michael, et Jan, 2007).

Plus généralement, Goffart (Goffart, 2013) fait référence à deux composantes pour décrire l'incertitude :

- L'incertitude systématique, qui représente les biais systématiques entre la simulation et la réalité, ce qui traduit une connaissance non aboutie du système.
- L'incertitude aléatoire, qui représente la variabilité naturelle des grandeurs physiques, comme la variabilité des sollicitations météorologiques.

Par ailleurs, l'utilisateur du logiciel entre également en compte dans le jeu des erreurs. En effet, le nombre d'entrées augmentant, la probabilité d'erreurs de saisie de la part de l'utilisateur augmente. D'après Guyon (Guyon, 1997), l'utilisateur logiciel est l'une des plus grandes sources d'erreur. Une étude où plusieurs participants (simulateurs plus ou moins réguliers) ont simulé le même bâtiment donne des résultats de dispersions de plus de 40% par rapport à la valeur moyenne des besoins calculés. Un autre constat de l'étude était que les utilisateurs ont en général tendance à surestimer les besoins comparés à la simulation de référence.

Pour conclure, les résultats exacts, autrement dits sans biais, n'existent pas en simulation numérique. Seuls des outils d'une certaine précision existent, avec à minima, une faible incertitude aléatoire. Face à un système complexe il n'est pas évident de lier l'impact des choix faits en entrée avec la sortie observée. C'est pourquoi les analyses de sensibilités STD paraissent intéressantes.

III.2.2.2 Analyse de sensibilité des STD

En étudiant comment la réponse du modèle réagit aux variations de ses variables d'entrée, l'analyse de sensibilité permet de répondre à un certain nombre de questions :

- Quelles sont les variables qui contribuent le plus à la variabilité de la réponse du modèle ?
- Quelles sont au contraire les variables les moins influentes ?
- Quelles variables interagissent avec quelles autres ?

Plusieurs méthodes d'analyse de sensibilité existent, comme la méthode de SOBOL, la méthode FAST, ou encore RDB-FAST. Cette dernière permet d'allier rapidité et qualité d'évaluation de la sensibilité des différents paramètres étudiés (Goffart et Woloszyn, 2018). Les plages de variation des paramètres d'entrée démultiplient les configurations de calcul, c'est pourquoi, des procédés d'échantillonnage comme la technique de Monte Carlo ou Latin Hypercube Sampling sont utilisés afin de diminuer le nombre de simulations à lancer pour l'analyse par l'élaboration d'un plan d'expérience. Les résultats de ces méthodes sont donnés sous la forme d'indices de sensibilité (indices de Sobol (Sobol', 1993)), qui quantifient l'impact du paramètre x sur la sortie y . Les valeurs de ces indices sont toujours comprises entre 0 et 1, où plus l'indice est proche de 1 plus l'influence du paramètre x sur la sortie y est forte.

Dans sa thèse sur l'analyse de la fiabilité des outils STD, Spitz (Spitz, 2012) a évalué la sensibilité d'un nombre important de paramètres sur la simulation des maisons INCAS à l'aide de l'outil EnergyPlus. La Figure III. 7 exprime ces indices de sensibilité pour le confort d'été au rez-de-chaussée de la maison I-BB de la plateforme INCAS, mode constructif ITE tout béton. D'après ces résultats, ce serait l'épaisseur de la chape qui serait le facteur déterminant concernant le confort d'été au RDC. Ces résultats sont propres au cas d'étude simulé, au modèle numérique utilisé ainsi qu'à tous les autres choix de saisie réalisés par le simulateur.

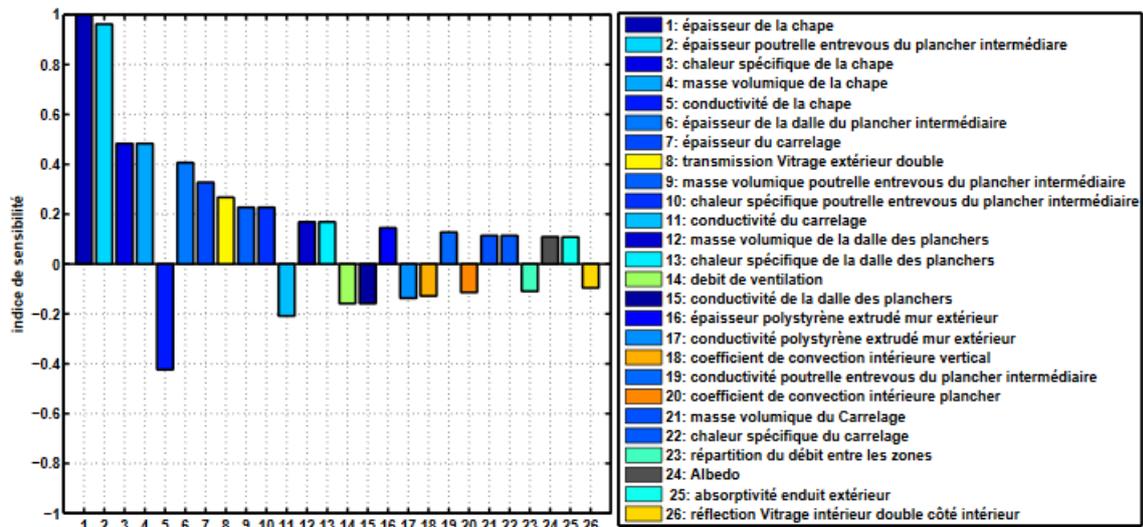


Figure III. 7 - Résultats de l'étude de sensibilité pour le confort d'été au rez-de-chaussée de la maison I-BB de la plateforme INCAS (Spitz, 2012).

D'autres analyses de sensibilité STD ont été recensées dans la littérature. Bontemps (Bontemps, 2016) a travaillé sur la validation de modèles de thermique du bâtiment sur le cas d'étude de la maison ITI béton du BESTLab, sur le site des Renardières d'EDF R&D. Pour son étude, ce sont les paramètres niveaux d'isolation et valeur d'albédo qui sont les facteurs les plus influents sur la température intérieure. Dans sa thèse sur l'influence de l'inertie thermique dans les bâtiments performants, Munaretto (Munaretto, 2014) a mis en évidence la contribution importante de la température extérieure et des débits de ventilation sur les sorties de consommation énergétique et de confort.

Enfin, Goffart (Goffart, 2013) s'est focalisée dans sa thèse sur la sensibilité des résultats de simulation aux données d'entrée aléatoire comme les sollicitations météorologiques. Pour cela, une méthodologie est proposée pour créer la plage de variation des données météo en prenant soin de rester dans des ordres de grandeurs plausibles et en tenant compte des inter-corrélations entre les sollicitations (par exemple, la température extérieure qui dépend du rayonnement solaire) et sur la sollicitation elle-même (par exemple, la température d'air à un instant « t » dépend de la température d'air à l'instant « t-1 »). Son cas d'étude a porté de nouveau sur une des maisons INCAS, simulée sous EnergyPlus. Ses conclusions plaçaient la température extérieure puis le rayonnement solaire direct comme étant les sollicitations les plus impactantes sur les besoins de chauffage.

III.3 CONCLUSION DU CHAPITRE 3

Les outils de STD ont émergé il y a deux à trois décennies pour évaluer le comportement thermique dynamique des bâtiments, leur besoin énergétique et des indicateurs de confort. Dans ce chapitre, l'attention a été portée sur 6 d'entre eux, sur leurs hypothèses simplificatrices et leurs modèles de résolution numérique. Un focus plus particulier a été porté sur les phénomènes physiques à considérer au niveau de l'interface bâtiment-environnement, c'est-à-dire sur les thèmes de la conduction thermique, du rayonnement solaire, des échanges infrarouges, de l'aéraulique (convection, et renouvellement d'air), et de l'hygrométrie. Chaque outil, par son historique et ses objectifs de développement, a ses avantages et ses inconvénients qui pourront être intéressants ou pénalisants selon le type d'étude que l'on souhaite

réaliser. Néanmoins, l'ensemble de ces outils a été validé sur les cas simples théoriques que sont les benchmarks BESTEST. Ils ont aussi fait l'objet de comparaisons inter-outils STD, et de confrontations aux études expérimentales.

Cependant, ces outils restent basés sur des modèles qui simplifient la réalité pour en simuler les tendances et pour lesquels les sources d'erreurs sont multiples. Si leurs performances étaient acceptables pour simuler des bâtiments globalement moins isolés que ceux actuellement conçus, leur fiabilité est actuellement questionnée, notamment dans un contexte d'une demande croissante de contrats de garantie de performance énergétique qui sont formulés dans les appels d'offre des projets opérationnels. Les études d'incertitude sont des approches qui apportent des réponses à ces questions. En complément, les études de sensibilité permettent d'évaluer l'influence de chaque paramètre ou sollicitation d'entrée sur les résultats en sortie de modèle. Les premières études de sensibilité faites en thermique du bâtiment dans les projets de recherche ont souligné l'importance de paramètres physiques du bâtiment, mais également des sollicitations extérieures comme la température.

Or, les outils STD actuels utilisent principalement les données météorologiques moyennées des stations météo péri-urbaines, lissant ainsi les sollicitations réelles et faisant fi des phénomènes d'îlot de Chaleur Urbain (ICU) en ville ou du changement climatique. Ces points seront abordés dans le chapitre suivant au travers d'une étude de l'impact du fichier météo sur la sortie STD (simulée avec l'outil Design Builder) pour un bâtiment existant de logements collectifs basé dans le quartier de Confluence de Lyon.

IV CHAPITRE 4 INFLUENCE DU FICHER METEO SUR LA STD – CONFORT D’ETE & RISQUES SANITAIRES

IV.1	PRESENTATION DU CAS D’ETUDE	105
IV.1.1	Présentation du bâtiment de logements collectifs « J1a ».....	105
IV.1.2	Scénarii d’usage.....	107
IV.1.2.1	Occupation.....	107
IV.1.2.2	Apports internes.....	107
IV.1.2.3	Ventilation.....	107
IV.1.2.4	Autres hypothèses.....	108
IV.1.3	Modes constructifs et macrocomposants.....	108
IV.1.4	Niveaux de conception.....	111
IV.1.5	Les météo étudiées.....	111
IV.1.6	Synthèse.....	112
IV.2	CONFORT THERMIQUE D’ETE ET RISQUES SANITAIRES.....	113
IV.2.1	L’humain au centre des enjeux de confort thermique.....	113
IV.2.2	Les critères de confort thermique en conception de bâtiments.....	115
IV.2.2.1	Cumuls d’heures de dépassement d’un seuil de température.....	116
IV.2.2.2	Indicateurs PMV/PPD et modèle de Fanger.....	116
IV.2.2.3	Le confort thermique selon GIVONI.....	118
IV.2.2.4	Les critères de confort adaptatif.....	119
IV.2.2.5	Comparatifs et perspectives.....	120
IV.2.2.6	Proposition d’une approche mixte entre EN 15251 et GIVONI.....	122
IV.2.3	La quantification des risques sanitaires.....	123
IV.3	CADRAGE DE L’ANALYSE DE SENSIBILITE.....	124
IV.3.1	Questionnements et axes d’analyses.....	125
IV.3.2	Locaux analysés : Chambre & Séjour.....	126

IV.4	EXPLOITATION DES RESULTATS.....	127
IV.4.1	Analyse préliminaire : Fichiers météo moyens fictifs vs fichiers météo années réelles	127
IV.4.1.1	<i>Météo fictives et réelles : cumuls de dépassement de seuils</i>	127
IV.4.1.2	<i>Analyses multicritères de l'inconfort</i>	128
IV.4.2	Axe 1 : Impact du changement climatique	129
IV.4.2.1	<i>Etude de confort et risques sanitaires</i>	130
IV.4.2.2	<i>Adaptation de l'organisme aux conditions extérieures</i>	131
IV.4.3	Axe 2 : Impact de la surchauffe urbaine	134
IV.4.3.1	<i>Surchauffe urbaine : accentuation de l'inconfort</i>	135
IV.4.3.2	<i>Surchauffe urbaine et impact sanitaire nocturne</i>	136
IV.4.4	Axe 3 : Aléas climatiques & Niveaux de conception.....	138
IV.4.5	Axe 4 : Aléas climatiques & Modes constructifs	140
IV.4.5.1	<i>L'inertie pour lutter contre les pics de chaleur</i>	140
IV.4.5.2	<i>Le confort des matériaux hygroscopiques</i>	141
IV.5	CONCLUSION DU CHAPITRE 4	143

Quelles données météo utiliser lors d'études en phase de conception de bâtiments ? Quel est l'impact de cette météo sur les études de conception, notamment sur l'évaluation du confort d'été ? C'est autour de ces questions que ce chapitre 4 s'articule. Les niveaux de confort d'été annoncés pour des bâtiments conçus avec des fichiers météo moyennés à l'échelle méso interrogent sur le fait qu'avec cette façon de faire, on ne tient compte ni du changement climatique à l'échelle globale, ni des surchauffes urbaines. Dans une démarche prospective, la résistance ou l'adaptabilité des projets de construction aux climats futurs des 50 prochaines années (durée de vie usuelle des bâtiments) n'est quasiment jamais évaluée. Or cette adaptabilité du bâtiment est primordiale afin d'éviter le recours aux systèmes énergétiques en tant que stratégie d'adaptation en réaction à des conditions d'ambiances devenues non acceptables. Sur la base des fichiers météorologiques d'années réelles proposés en chapitre 2, une étude de sensibilité de l'impact de la météo sur la sortie STD est réalisée dans ce chapitre.

Comme présenté dans le chapitre 3 précédent, si des analyses de sensibilités et d'incertitudes ont été menées en STD, notamment par Clara Spitz (Spitz, 2012) sur une maison de la plateforme INCAS (institut INES à Chambéry), et par Stéphanie Bontemps (Bontemps, 2016) sur la plateforme BESTLab des Renardières (EDF R&D à Moret-sur-Loing), il semble que ce type d'analyse n'a pas été réalisé en situation réelle sur des projets de logements collectifs de grande ampleur, dans un contexte d'aménagement urbain et surtout, en regard des choix de conception auxquels les simulation STD peuvent mener.

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer l'impact de la météo sur la STD et les résultats en termes de niveau de confort d'été et de risques sanitaires. Pour ce faire, l'étude porte sur un bâtiment de logements collectifs concret, l'opération « Lux » désignée J1a sur la ZAC de Confluence, le quartier présenté dans le chapitre 2.

IV.1 Présentation du cas d'étude

IV.1.1 Présentation du bâtiment de logements collectifs « J1a »

Les simulations STD sont réalisées sur le bâtiment de logements collectifs J1a (Figure IV. 1). Cet immeuble, situé au croisement de la rue Bichat et de la rue Denuzière dans le quartier de Lyon-Confluence, a été livré en 2016. Il comporte un parking souterrain, des commerces au rez-de-chaussée et cinq étages comprenant 42 logements allant du T2 au T4. Un dernier étage est constitué de 2 logements de type attique qui viennent « couronner » la structure (R+5 + attiques). La surface de plancher totale s'élève à 3920 m². Les autres indicateurs principaux de description du bâtiment J1a sont rassemblés dans le Tableau IV. 1. La proportion de surface vitrée répond à un compromis entre éclairage naturel, confort thermique d'été, déperditions thermiques, vues et architecture. Elle est représentée par son indice d'ouverture, définie par le rapport entre la surface vitrée et la surface dans l'œuvre (SDO, environ $SDP \cdot 1,1$). L'immeuble est conforme à la RT2012 et au label Effinergie+ avec un Bbio égal à 28,7 et un Cep de 53,4 kWh/m².an.

Indice de compacité	1,12
SDO	3 920 m ²
Hauteur sous plafond	2,60m
Surface d'enveloppe	4 980,4 m ²
Indice d'ouverture	15%

Tableau IV. 1 - Principaux indicateurs de description du bâtiment J1a.

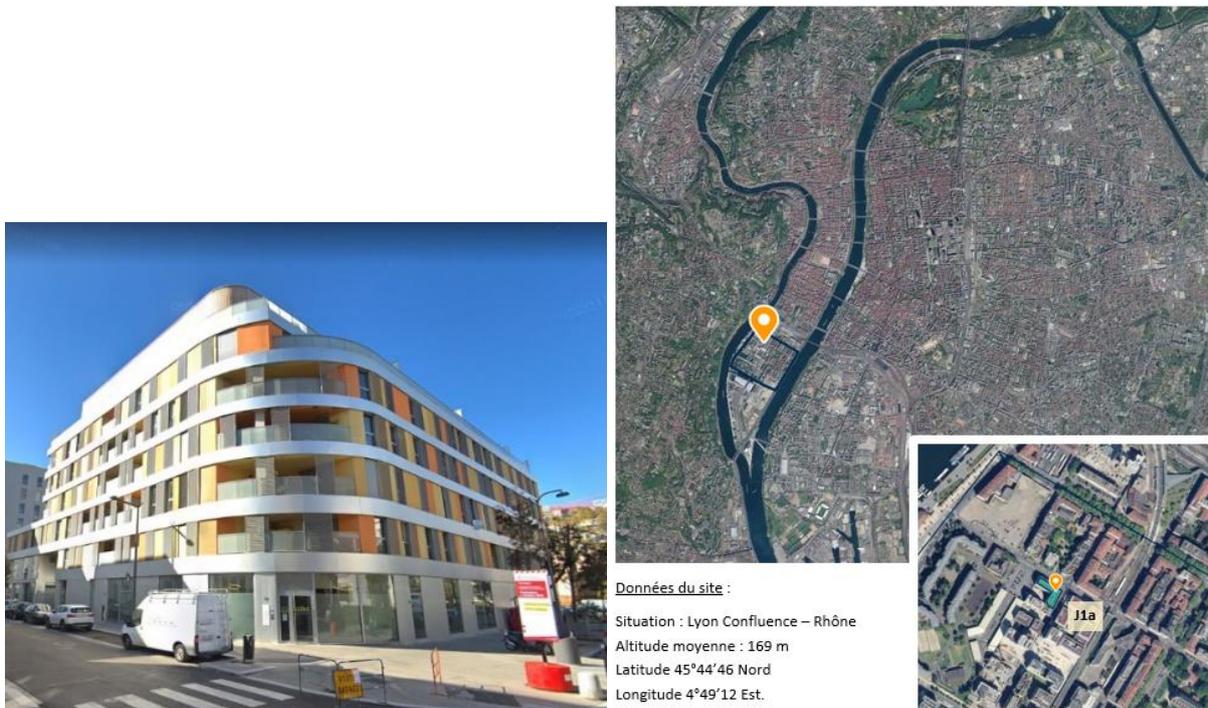


Figure IV. 1 - Photo du bâtiment J1a et localisation sur le site de Lyon Confluence.

Le projet est modélisé sur l'outil de STD Design Builder (version 6.1.1) suivant les plans transmis par l'architecte à la phase de conception PRO-DCE. La STD réalisée porte sur l'ensemble des locaux du projet (Figure IV. 2).

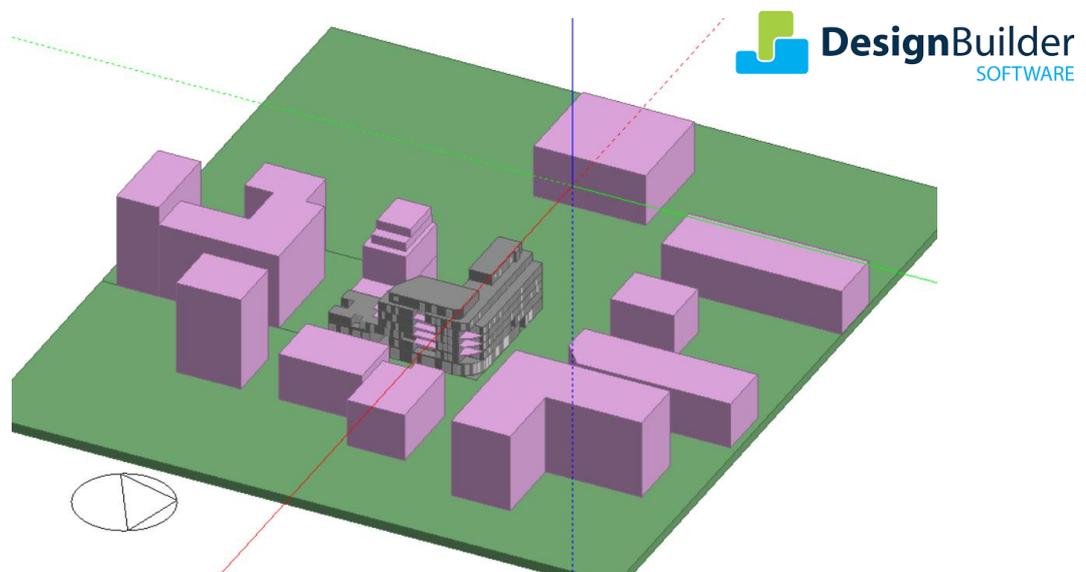


Figure IV. 2 - Modélisation 3D du projet de logements collectifs J1A.

Dans cette étude, différentes variantes sont simulées. Elles se différencient selon :

- Les modes constructifs choisis (Section 1.3),
- Le niveau d'isolation (Section 1.4),
- La donnée météo utilisée (Section 1.5).

En revanche, les scénarii d'usage restent identiques pour toutes les STD (Section IV.1.2).

IV.1.2 Scénarii d'usage

Usuellement, des scénarii d'occupation, d'apports internes et de ventilation sont moyennés à l'échelle du logement pour estimer les besoins de chauffage et de puissances à installer. Lorsque l'on s'intéresse au confort d'été, il est toutefois nécessaire de les détailler à l'échelle des pièces (séjour, chambre, etc.). Dans ce chapitre, les scénarii proposés sont ceux classiquement utilisés chez TRIBU ; ils ont été définis et actualisés en fonction des différents retours d'expérience concernant les analyses de programmes, les simulations réalisées, et aussi les suivis des bâtiments durant les premières années d'exploitation. Également, le rapport d'étude de mesures expérimentales de la société Enertech sur ces sujets a été pris en compte pour élaborer ces scénarii d'usage en logements.

IV.1.2.1 Occupation

Le nombre de personnes maximum par zone est défini comme suit :

T2 : 2 occupants T3 : 3 occupants T4 : 4 occupants

Les plannings d'occupation à l'échelle des locaux « chambre », « cuisine », et « séjour », ainsi qu'à l'échelle du logement entier sont disponibles en Annexe IV. 1. Pour les apports générés par les personnes, une valeur de 90W/pers est définie. Concernant le confort des occupants, ceux-ci sont supposés vêtus avec 1 vê (ou clo) en hiver et 0,5 vê en été (avec 1 vê = 0,155 K·m²/W).

IV.1.2.2 Apports internes

Les apports internes pris en compte sont issus des modes de faire TRIBU basés sur l'expérience du bureau d'études. Avec l'utilisation de plus en plus fréquente des ampoules LED, les apports caloriques liés à l'éclairage ont été actualisés et revus à la baisse. Les tableaux Annexe IV. 2 et Annexe IV. 3 présentent les plannings de ces apports internes en puissances ou densités de puissance (en W ou W/m²).

IV.1.2.3 Ventilation

Deux modes de ventilation sont considérés :

- Hygiénique : Ventilation autoréglable fixée en continu à 0,5Vol/h sur l'ensemble des logements,
- Nocturne : pour le rafraîchissement, les valeurs de débits supplémentaires liés à cette ventilation naturelle nocturne (de 22h à 7h) sont définies en fonction du type de logements, à savoir :
 - Logement mono-orienté : 1,5 vol/h
 - Logement double orientation : 2,5 vol/h
 - Logement traversant : 3,5 vol/h



Dessin Héloïse Marie

Différencier dans le calcul les taux de renouvellement d'air atteints en fonction des configurations mono – bi – orientées ou traversantes des logements est important du point de vue de la conception. Cela permet d'abord de se rapprocher de la réalité et ensuite d'encourager les maitrises d'ouvrage à opter pour des appartements traversants pour assurer une meilleure ventilation (et souvent un meilleur ensoleillement de surcroit).

IV.1.2.4 **Autres hypothèses**

Les températures de consigne sont fixées à 20°C avec un réduct nocturne à 18°C (de 23h à 6h). Une occultation de type BSO (Brise-soleil-orientable) est considérée, permettant 85% d'occultation en période estivale pour éviter les surchauffes.

IV.1.3 **Modes constructifs et macrocomposants**

Le choix des modes constructifs étudiés a été réalisé à partir de projets livrés, soit issus du projet ADEME PEBIOS (Performance Environnementale des bâtiments BIOSourcés) auquel TRIBU a participé, soit issus d'opérations menées par le bureau d'études TRIBU. Ici, 2 modes constructifs ont été retenus dans le but de caractériser :

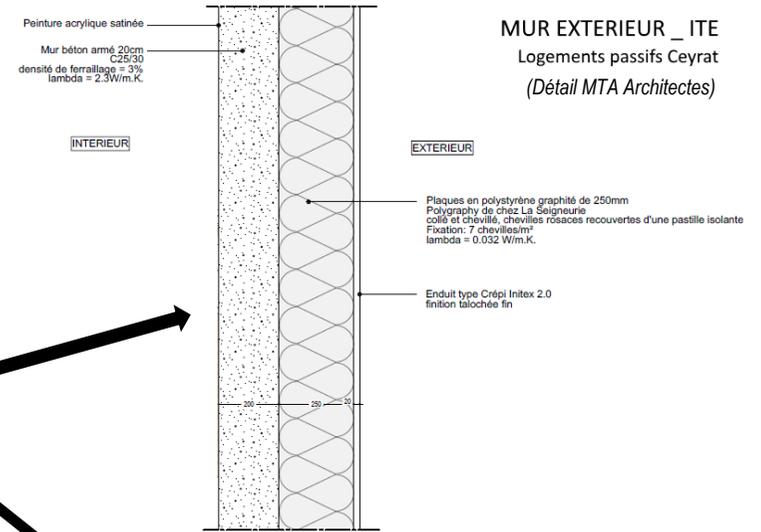
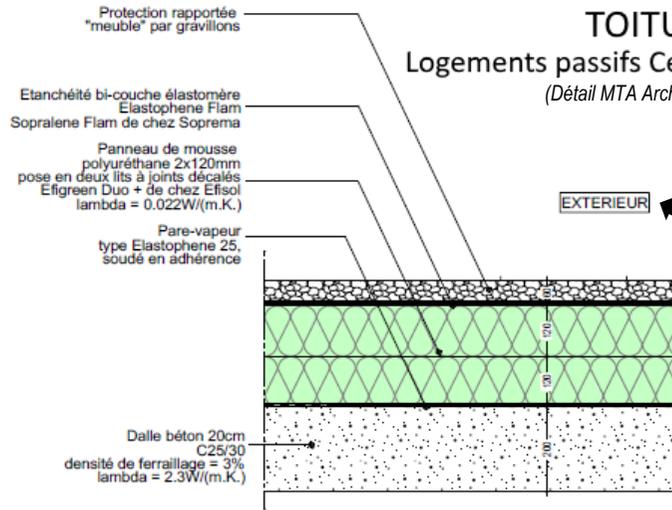
- Un mode de construction lourd (inertiel), la variante V1 (Figure IV. 3) en béton et isolation par l'extérieur,
- Un mode de construction léger (faible inertie), la variante V2 (Figure IV. 4) en structure bois, plancher et mur à ossature bois et isolation répartie (extérieure et intégrée entre montants) en matériaux biosourcés.

Ces modes de construction ont été définis sous la forme de Macrocomposants, dont le principe est repris du projet PEBIOS. Ces Macrocomposants donnent un aperçu des détails techniques de chaque mode constructif. Les propriétés thermiques des matériaux utilisés dans ces Macrocomposants sont détaillées pour les 2 variantes V1 et V2 en Annexe IV. 4 et Annexe IV. 5. Les valeurs renseignées sont issues des bases de données de la RT2012 et des règles Th-U ex, Th-Bat, ainsi que de la base EDIBATEC, du guide matériaux CIBSE, et de la réglementation Wallonne « Performance Énergétique des Bâtiments ».

V1 ITE Béton

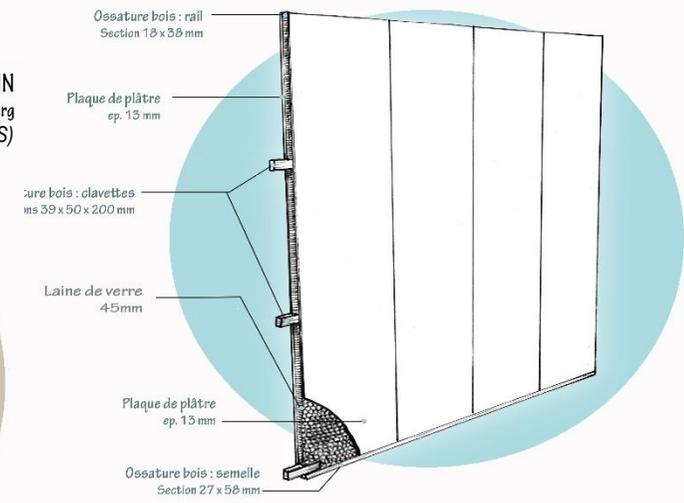
| Inertie lourde | Non Biosourcé

TOITURE
Logements passifs Ceyrat
(Détail MTA Architectes)

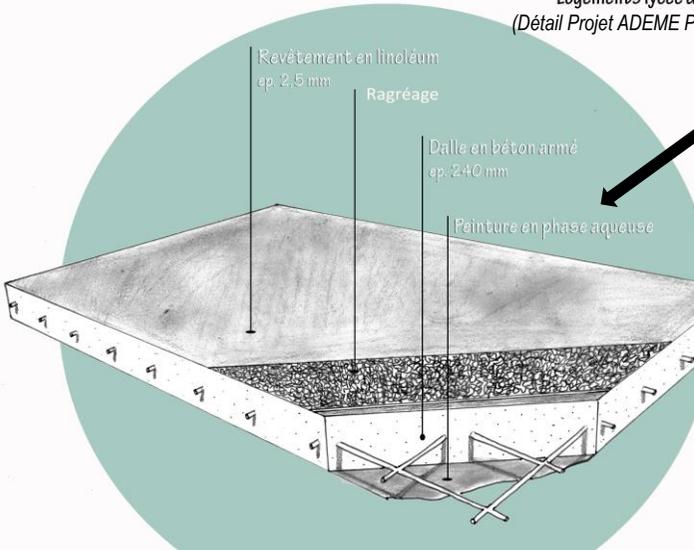


MUR EXTERIEUR _ ITE
Logements passifs Ceyrat
(Détail MTA Architectes)

CLOISON BOIS ENTRE PIECES D'UN MEME LOGEMENT
Logements Fixericourt
(Détail Projet ADEME PEBIOS)



PLANCHER PIECE SECHE SUR LOGEMENT
Logements lycée de Bègles
(Détail Projet ADEME PEBIOS)



PLANCHER BAS SUR TERRE PLEIN
lôt bois Strasbourg
(Détail Projet ADEME PEBIOS)

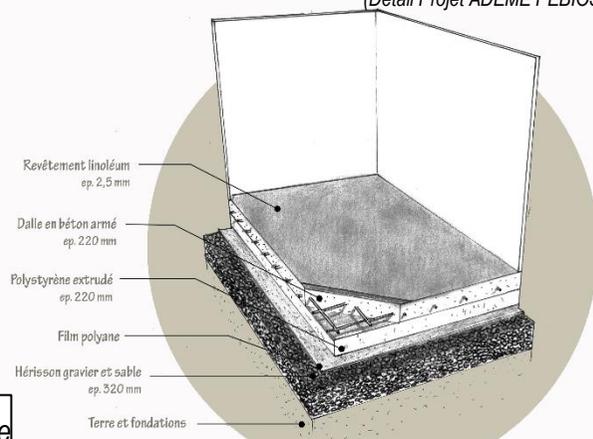


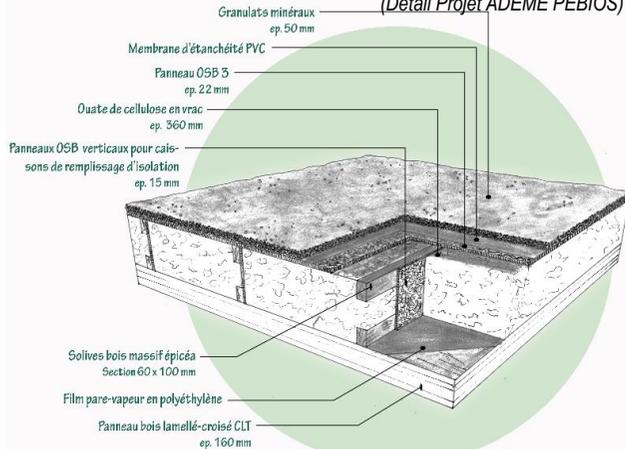
Figure IV. 3 - Macrocomposant V1 ITE Béton, inertie lourde, non-biosourcé

V2 ITR Structure Bois | Inertie légère | Biosourcé

TOITURE CHARPENTE BOIS

Résidence Jules Ferry

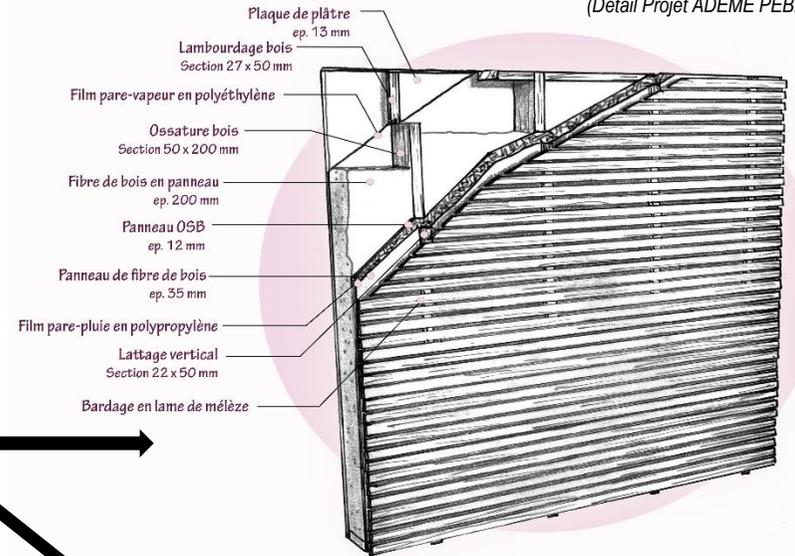
(Détail Projet ADEME PEBIOS)



MUR OSSATURE BOIS ET BARDAGE BOIS

Logements Pixericourt

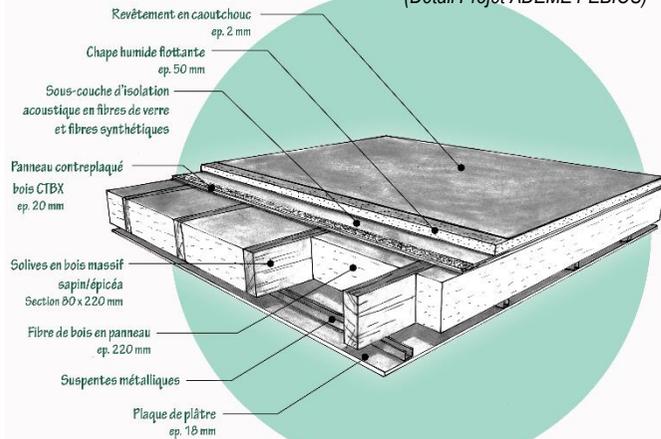
(Détail Projet ADEME PEBIOS)



PLANCHER EN BOIS MASSIF, FIBRE DE BOIS ET CAOUTCHOUC

Logements Pixericourt

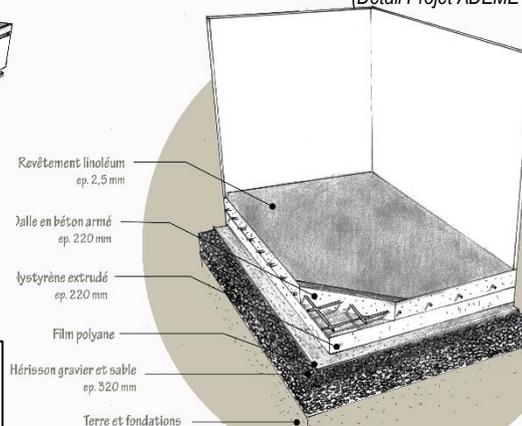
(Détail Projet ADEME PEBIOS)



PLANCHER BAS SUR TERRE PLEI

Ilôt bois Strasbourg

(Détail Projet ADEME PEBIOS)



CLOISON BOIS ENTRE PIÈCES D'UN MÊME LOGEMENT

Logements Pixericourt

(Détail Projet ADEME PEBIOS)

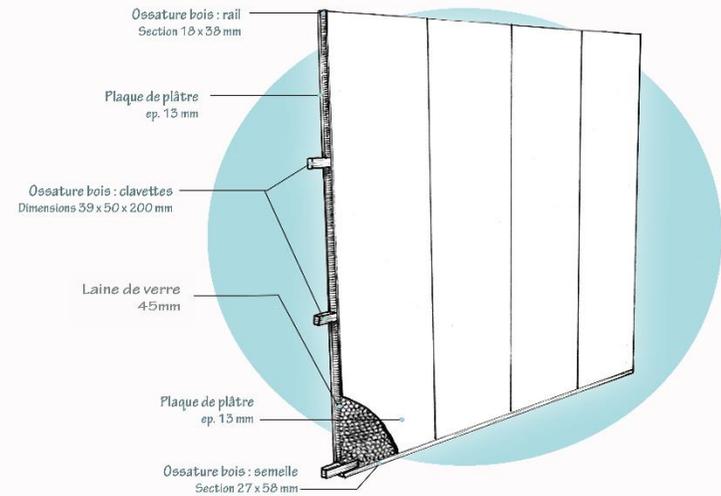


Figure IV. 4 - Macrocomposant V2 ITR Structure Bois, inertie légère, biosourcé

IV.1.4 Niveaux de conception

Le niveau de conception caractérise en partie la performance énergétique du projet de construction. Les ambitions en termes d'isolation d'enveloppe sont décrites ci-dessous Figure IV. 5.

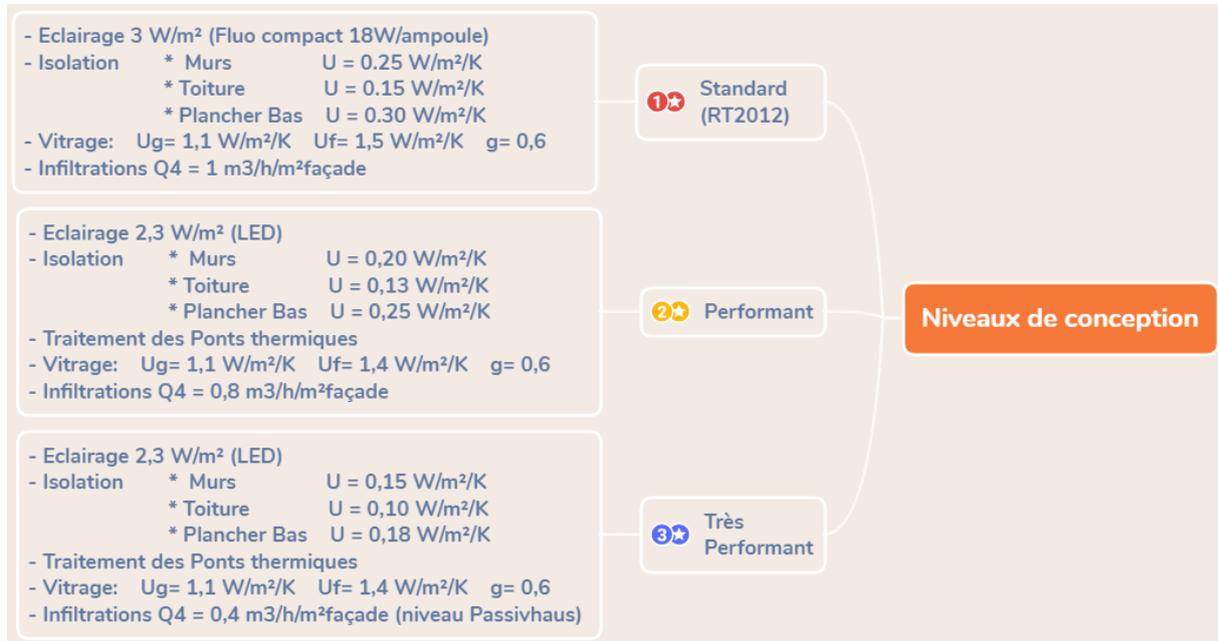


Figure IV. 5 - Niveaux de conception et de performance de l'enveloppe et du bâtiment.

La différenciation des niveaux de conception a été faite suivant la qualité d'isolation (façades, toitures, et planchers bas) et le traitement des ponts thermiques. Elle différencie également la qualité des vitrages, l'étanchéité à l'air et l'efficacité des systèmes d'éclairage. Le niveau très performant est actuellement rencontré dans les ZAC où les constructions tendent à être exemplaires, mais ne représente qu'une part marginale des opérations réalisées.

IV.1.5 Les météo étudiées

Les météo utilisées pour cette étude de sensibilité STD sont celles déterminées en chapitre 2. Les données météo sont positionnées sur cette frise chronologique (Figure IV. 6) selon le climat d'Aujourd'hui, de Demain, ou d'Après-demain.

Les fichiers météo :	Aujourd'hui	Demain		Après-demain
METEONORM <i>péri-urbain</i>	2000-2009	A2_2050		A2_2080
ENTPE <i>péri-urbain</i>	2004 2013	2006	2018	2003
ENS <i>urbain</i>			2018	

Figure IV. 6 - Fichiers représentant les météo d'Aujourd'hui, de Demain, et d'Après-demain retenus pour les STD.

Les météo présentées Figure IV. 6 sont des données fictives issues de METEONORM en violet, des années réelles la station péri-urbaine de l'ENTPE en rose, et l'année 2018 de la station urbaine de l'ENS en orange (ce code couleur est conservé tout au long du manuscrit). Ces jeux de données sont examinés selon les cumuls d'heures où la température d'air est supérieure à 26, 27, 28, 29, 30, 31, et 32°C en Figure IV. 7.

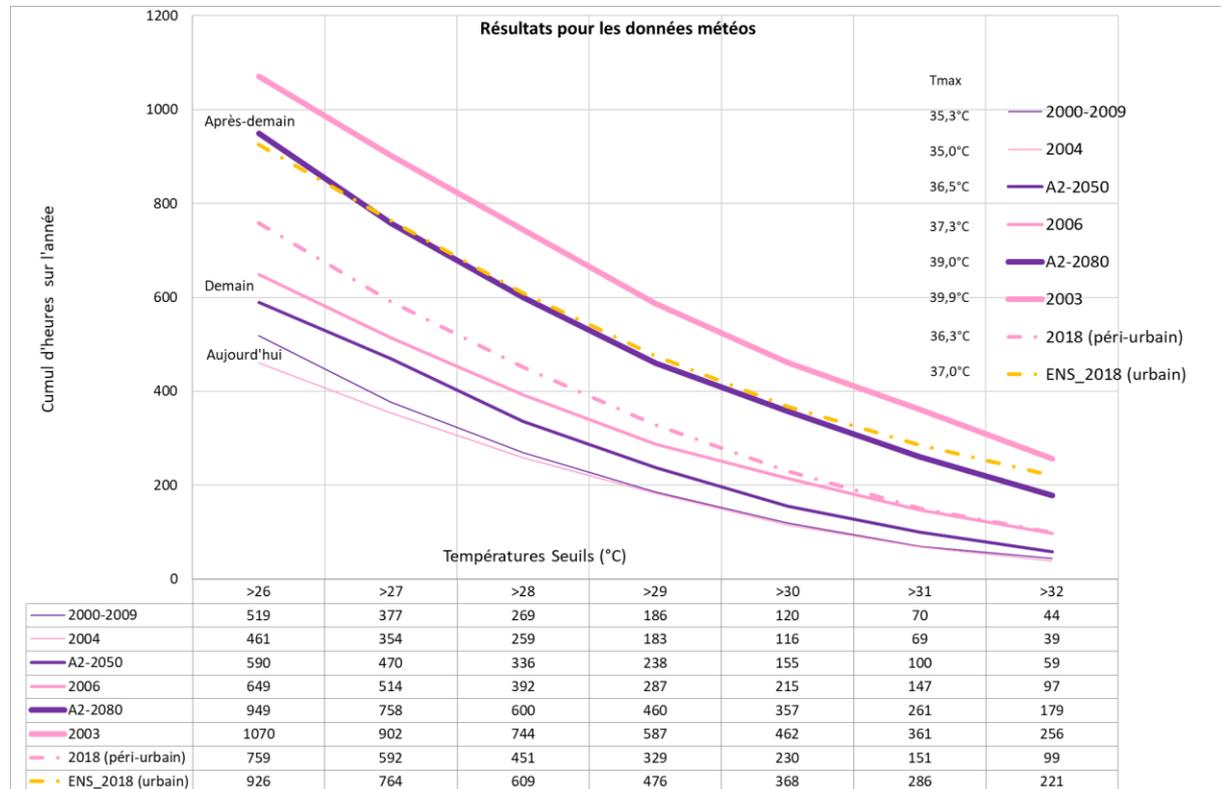


Figure IV. 7 - Caractérisation des fichiers météo suivant les cumuls des nombres d'heures où la température est supérieure à 26, 27, 28, 29, 30, 31, et 32°C.

L'aspect extrême des météo réelles apparaît bien sur ce graphique de cumul où la différence entre les météo réelles 2006 et 2003 comparées aux météo METEONORM A2_2050 et A2_2080 intervient principalement sur les nombres d'heures supérieures à 32°C. On peut faire la même observation pour la comparaison sur l'année 2018 avec valeurs urbaines ENS plus extrêmes au-dessus de 32°C que les mesures péri-urbaines de l'ENTPE. Les mesures ENS 2018 sont même plus extrêmes que la météo A2_2080.

IV.1.6 Synthèse

L'ensemble des variantes simulées est présenté Figure IV. 8. Celles-ci concernent principalement les modes constructifs et les fichiers météo, avec un focus sur le niveau de conception. Dans cette étude, le niveau performant est principalement utilisé. Cependant, afin de corréliser le confort intérieur d'été au niveau de conception, les niveaux « RT2012 » et « Très Performant » sont testés suivant les différentes sollicitations climatiques déterminées au chapitre 2.

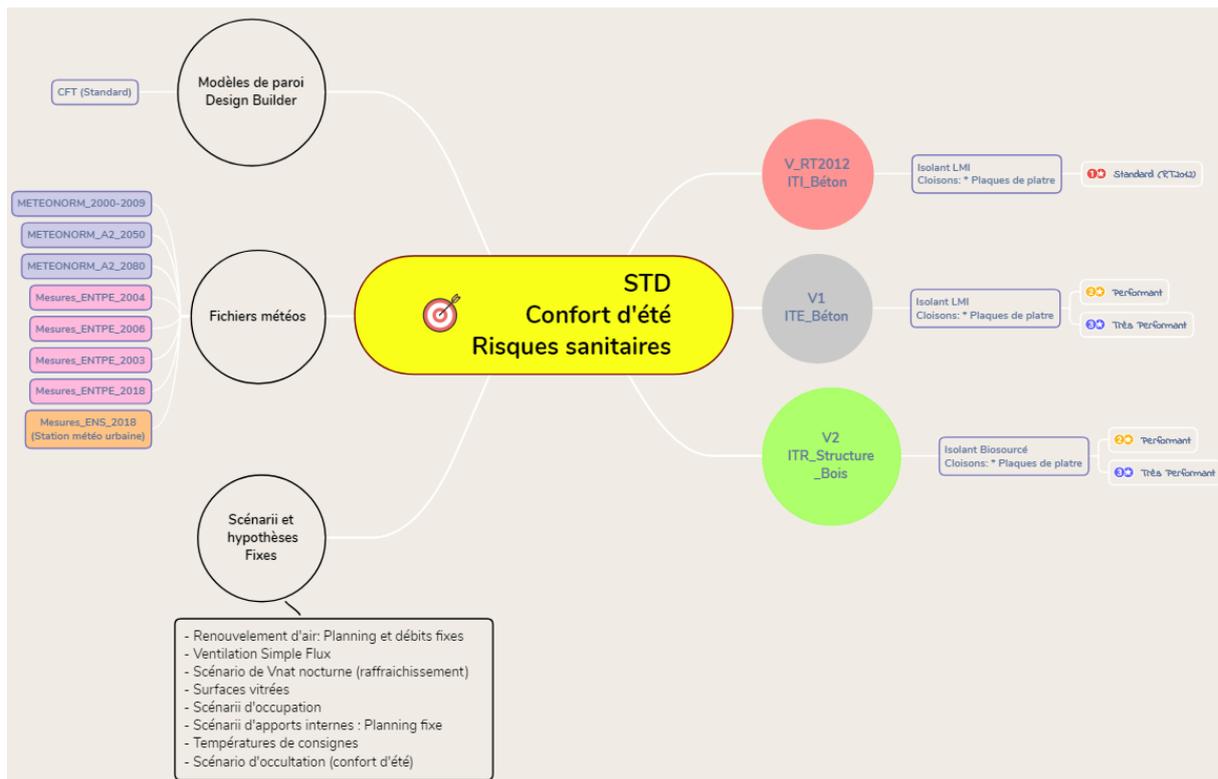


Figure IV. 8 - Les variables de l'analyse de sensibilité STD à la donnée météo.

IV.2 Confort thermique d'été et risques sanitaires

Le bâtiment est une enveloppe qui permet de se protéger des conditions climatiques extérieures et au sein de laquelle les occupants recherchent le confort quand ils s'y abritent. En logement, une conception qui anticipe les enjeux de confort d'été dès les premières phases de conception et de choix d'enveloppe est une conception qui est en mesure de proposer des espaces intérieurs confortables, sans avoir recours à du rafraîchissement actif, des systèmes représentant les béquilles des bâtiments handicapés par leur conception. Cependant, l'évaluation des conditions de confort est encore une problématique complexe tant les critères à prendre en compte sont nombreux et divers.

IV.2.1 L'humain au centre des enjeux de confort thermique

Le confort thermique correspond à un état d'équilibre thermique entre le corps humain et les conditions d'ambiance. Il dépend de la sensibilité (aspect psycho-sociologique), de l'habillement, du métabolisme et de l'activité physique de chaque individu, d'une part, mais aussi de la température de l'environnement (air, parois), des mouvements d'air, et de l'humidité, d'autre part (Figure IV. 9). Au-delà d'un certain niveau de déséquilibre, l'individu va ressentir de l'inconfort.

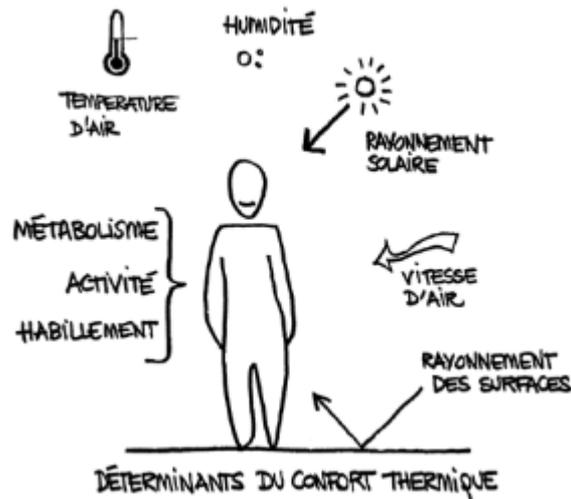


Figure IV. 9 - Equilibre thermique entre une personne et son environnement (Dessin Héloïse Marie).

L'équilibre se fait entre la chaleur produite par l'individu et la chaleur échangée avec son environnement. La chaleur produite est liée au métabolisme de l'individu, la chaleur échangée est liée non seulement à l'individu (métabolisme, respiration) mais aussi à son environnement via des échanges de chaleur à la surface de la peau par convection, rayonnement infra-rouge, rayonnement solaire, et/ou conduction.

On considère six variables de base pour décrire les échanges thermiques entre l'homme et son environnement :

- La température ambiante de l'air T_a (échanges convectifs et respiratoires) ;
- La température moyenne des parois (échanges radiatifs infrarouges) ;
- L'humidité relative de l'air (HR), qui est le rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température T_a et la quantité maximale d'eau pouvant être contenue à la même température (échange par évaporation et transpiration) ;
- La vitesse de l'air (échanges de chaleur par convection) ;
- Le métabolisme, qui est la production de chaleur interne au corps humain permettant de maintenir celui-ci autour de $36,7^\circ\text{C}$ (thermorégulation). Un métabolisme de travail correspondant à une activité particulière s'ajoute au métabolisme de base du corps au repos ;
- L'habillement, qui représente une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement.

Les 4 premiers paramètres décrivent l'environnement extérieur, les deux derniers sont relatifs aux personnes. Le corps d'un individu va chercher à rétablir l'équilibre par différentes réactions demandant un certain effort : des réactions comportementales et des réactions physiologiques.

- La thermorégulation comportementale comprend le changement de posture, d'activité, de vêtue;
- La thermorégulation physiologique comprend notamment frissons, transpiration, vasodilatation, vasoconstriction (Figure IV. 10).

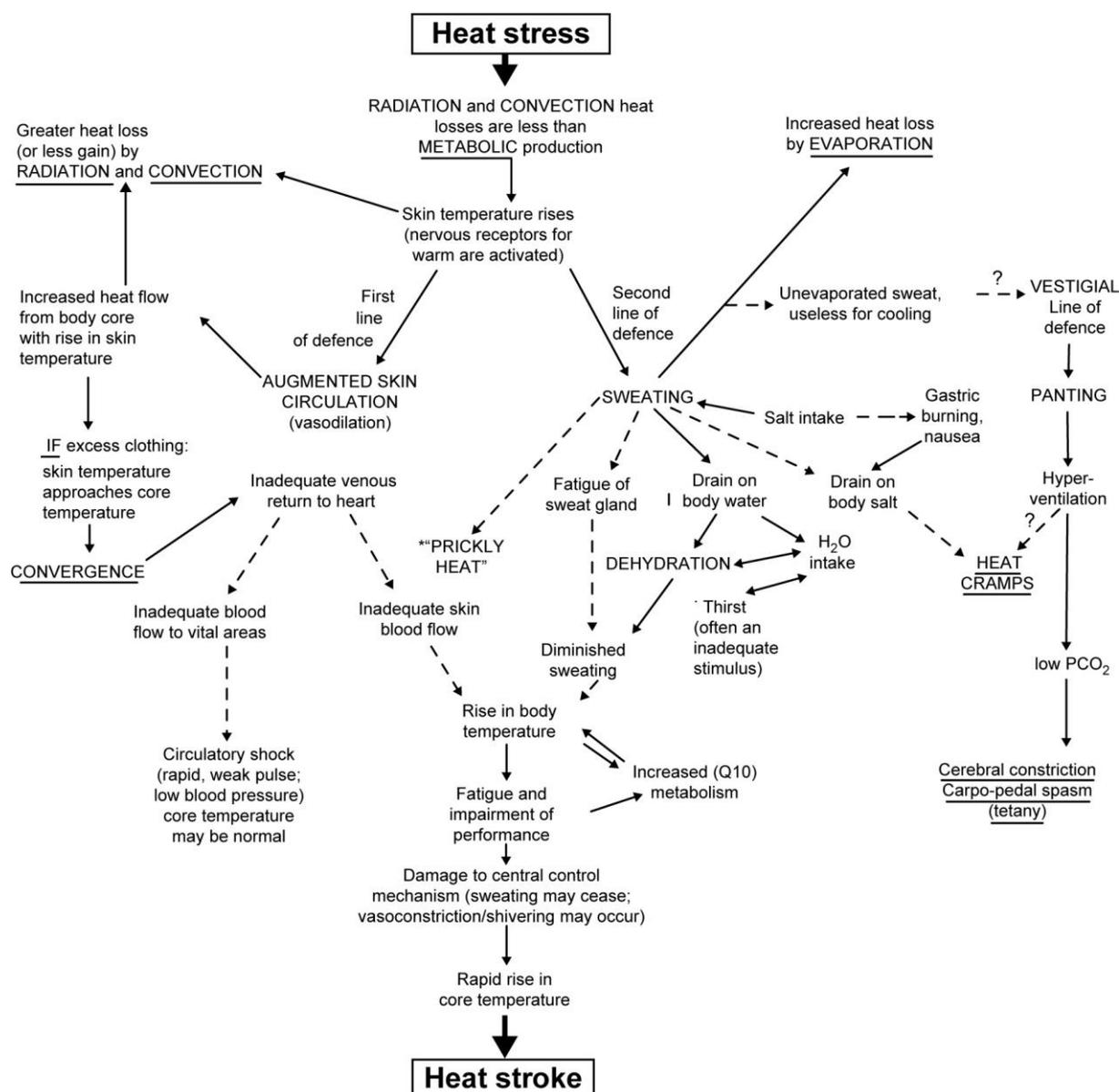


Figure IV. 10 - Les causes des coups de chaleur chez l'être humain (Parsons, 2009).

La Figure IV. 10 présente les réactions physiologiques du corps humain en réponse à un environnement chaud. Une première ligne de défense est la vasodilatation, soit la dilatation des veines et vaisseaux sanguins afin d'augmenter le flux sanguin et ainsi faire réchauffer la surface de la peau et par conséquent augmenter les déperditions thermiques. La seconde ligne de défense est traduite par la sudation qui vient humidifier la peau et la rafraîchir par l'évapotranspiration, soit la captation des calories pour faire s'évaporer (énergie latente) la transpiration. Ces mécanismes de défense du corps contre des sollicitations climatiques extrêmes peuvent être insuffisants pour assurer le confort des personnes et peut même occasionner des risques sanitaires importants et des coups de chaleurs pouvant engendrer jusqu'à des décès, comme l'illustre le taux de surmortalité lié à la canicule de 2003.

IV.2.2 Les critères de confort thermique en conception de bâtiments

Jusqu'ici, nos climats français métropolitains font que nous sommes quasiment dans l'obligation de chauffer en période de froid. Le confort d'hiver est donc assuré par des systèmes de chauffage qui

consomment de l'énergie. De ce point de vue hiver, le but d'une bonne conception est de limiter les besoins de chauffage. Cet objectif est quantifié en kWh/m²/an.

L'été, nos climats nous ont jusqu'ici permis de vivre confortablement dans nos bâtiments sans avoir recours au rafraîchissement par des systèmes actifs. Dès lors, la qualité d'une conception d'un point de vue des conditions climatiques estivales ne peut se quantifier par le paramètre besoin de froid en kWh/m²/an. Aussi, même si la notion de confort est subjective d'un individu à l'autre et donc difficilement quantifiable, plusieurs méthodes et critères plus ou moins complexes existent cependant pour décrire le bien être d'un point de vue thermique dans un local.

Une liste non exhaustive d'indicateurs du confort d'été est détaillée ci-après selon la classification suivante :

- Les indicateurs basés sur la température opérative intérieure : cumul d'heures de dépassement de seuil, Température Intérieure Conventionnelle
- Les indicateurs plus complexes, basés sur l'écriture d'un bilan thermique du corps : PMV/PPD et modèle de Fanger
- Les indicateurs conçus pour les ambiances non climatisées : GIVONI, les indicateurs de confort adaptatif

IV.2.2.1 Cumuls d'heures de dépassement d'un seuil de température

Au niveau réglementaire français, une des 3 exigences de la RT 2012 (et auparavant de la RT 2005) est la TIC (Température intérieure conventionnelle) : elle représente la température intérieure maximum pour les 5 jours les plus chauds de l'été. Elle doit rester inférieure à une valeur de référence (TIC REF RT2012).

Le cumul d'heures de dépassement correspondant au nombre d'heures (en occupation) où la température est supérieure à un seuil allant de 26 à 32°C est une donnée intéressante à fournir pour exprimer le confort d'une pièce. Ici on parle de température opérative intérieure, une résultante de la température d'air sec et de la température moyenne radiante, pondérée en fonction de la vitesse de l'air. A titre d'exemple, un seuil de 28°C est souvent retenu dans les programmes de conception pour lesquels un dépassement annuel maximum de 50 heures est permis en logement. De même, le label allemand Passivhaus comprend un critère de confort d'été qui demande moins de 10% d'heures supérieures à 25°C sur une année de simulation.

L'utilisation de cette température opérative, n'intègre cependant pas l'humidité de l'air qui est aussi un paramètre influant sur le confort, qui devrait être considéré, notamment lors de l'usage de matériaux hygroscopiques (terre crue, chaux...) qui régulent l'hygrométrie des pièces.

IV.2.2.2 Indicateurs PMV/PPD et modèle de Fanger

Le PMV (Predicted Mean Vote) est un indicateur de confort représentant l'avis moyen d'un groupe important de personnes qui exprimerait un vote de sensation de confort thermique. Cet indicateur se mesure sur une échelle de sensation thermique à 7 niveaux (Tableau IV. 2). Une valeur de PMV négative signifie que la température est plus basse que la température idéale et réciproquement une valeur positive signale qu'elle est plus élevée. Cette échelle a été conçue en confrontant les équations physiques avec

des expériences réalisées en chambre climatique et validée à la fin des années 70 par une enquête statistique sur un grand nombre de personnes (500) placées dans des conditions thermiques données.

Echelle de ASHRAE	
+3	Très chaud
+2	Chaud
+1	Légèrement chaud
0	Neutre
-1	Légèrement froid
-2	Froid
-3	Très froid

Tableau IV. 2 - Échelles de sensation de confort thermique PMV (ASHRAE).

A partir de l'indicateur PMV, il est possible d'évaluer le pourcentage de personnes insatisfaites par rapport à la situation thermique à l'aide de la Figure IV. 11. Par exemple, 25 % de la population n'est pas satisfaite pour un PMV est de -1 ou $+1$. A l'inverse, pour limiter le PPD à 10 % (comme précisé dans la norme ISO 7730), le PMV doit se situer entre $-0,5$ et $+0,5$. Notons enfin que même pour un état de confort thermique optimal (PMV = 0), il y a encore 5 % d'insatisfaits.

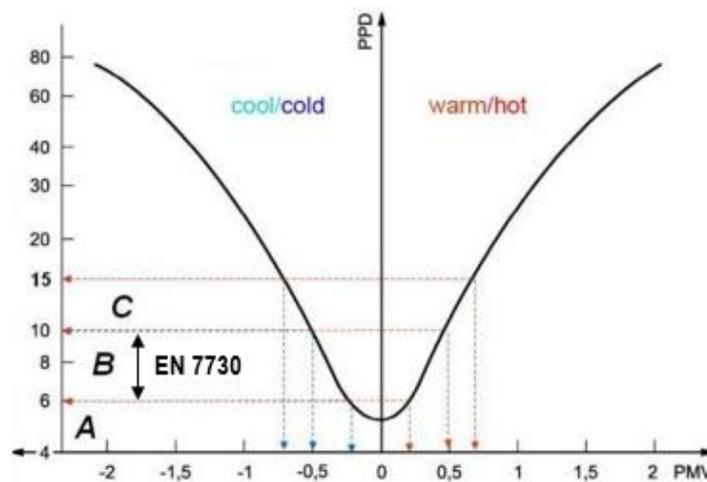


Figure IV. 11 - Le pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD - Predicted Percentage Dissatisfied) en fonction de l'indice PMV (Norme EN 7730).

Le sondage d'un nombre significatif d'occupants étant rarement possible, le modèle de Fanger permet d'évaluer l'indicateur PMV en fonction des paramètres d'ambiance cités plus haut (température d'air, températures de parois, humidité de l'air, vitesse de l'air fixée à 0,12m/s) et des paramètres de comportement (habillement, activité).

Ce modèle de Fanger a été appliqué aux résultats de simulations du bâtiment étudié. La Figure IV. 12 présente l'évolution des indices de votes moyens prévisibles PMV obtenus sur une période estivale. On constate que les indices PMV oscillent autour d'un PMV de 1,5 et surpassent la limite de 0,5 durant la période de canicule (entre le 4 et le 8 août) : environ 40 % des personnes sont supposées insatisfaites. Hors canicule, les indices PMV sont plus proches de la zone de confort fixée par la norme, même si des dépassements sont notés en journée, mais également la nuit (15 août) en raison d'un inconfort froid dû à la ventilation naturelle nocturne.

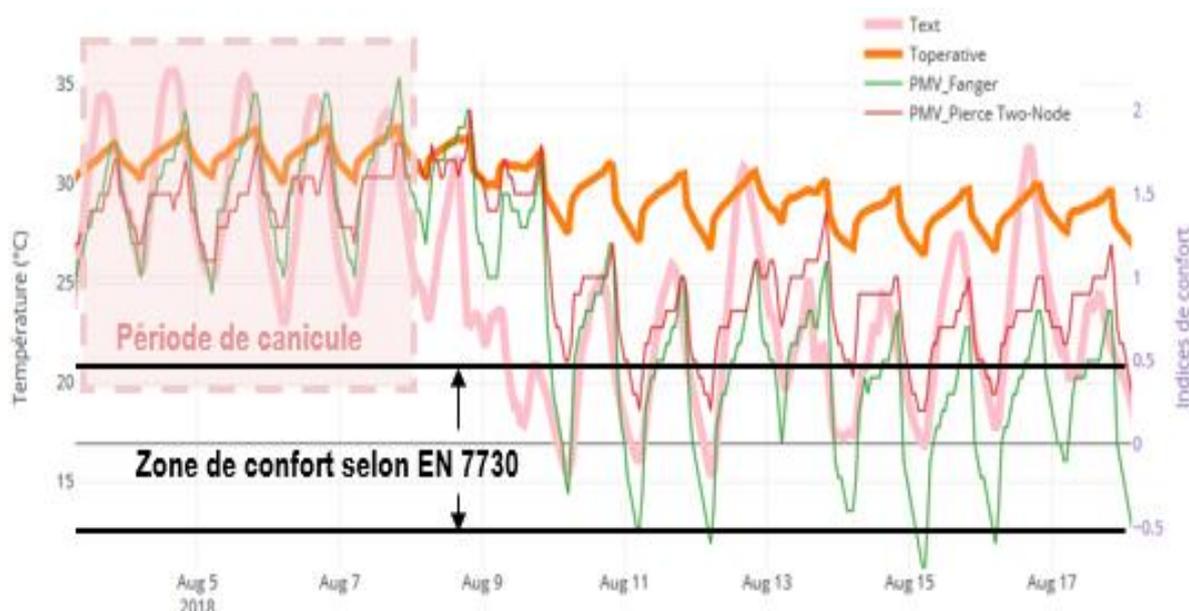


Figure IV. 12 - Indices PMV prédits avec le modèle de Fanger du 4 au 18 aout 2018 (station météo ENTPE), pour le séjour du T4 (A43) et le mode constructif bois (V2).

Cet exemple montre les difficultés à respecter les conditions de confort définies par la norme ISO 7730 sans l'ajout d'un système de rafraîchissement actif, autrement dit de climatisation. Dans l'idée de concevoir des bâtiments de manière frugale et limiter, voire éviter, l'utilisation de ces systèmes, d'autres critères de confort construits pour des ambiances non climatisées sont étudiés par la suite.

IV.2.2.3 Le confort thermique selon GIVONI

Pensant aux nombreux foyers dépourvus de systèmes de rafraîchissement actif, Givoni travaille dans les années 80 sur l'expression du confort pour des bâtiments naturellement ventilés. Son modèle prend en compte la température résultante (ou opérative), l'humidité, et la vitesse d'air (Givoni, 1992). Le diagramme de GIVONI (Figure IV. 13) définit sur le diagramme de l'air humide des zones de confort pour une activité sédentaire et avec un habillement adapté à l'été (0,5 clo).

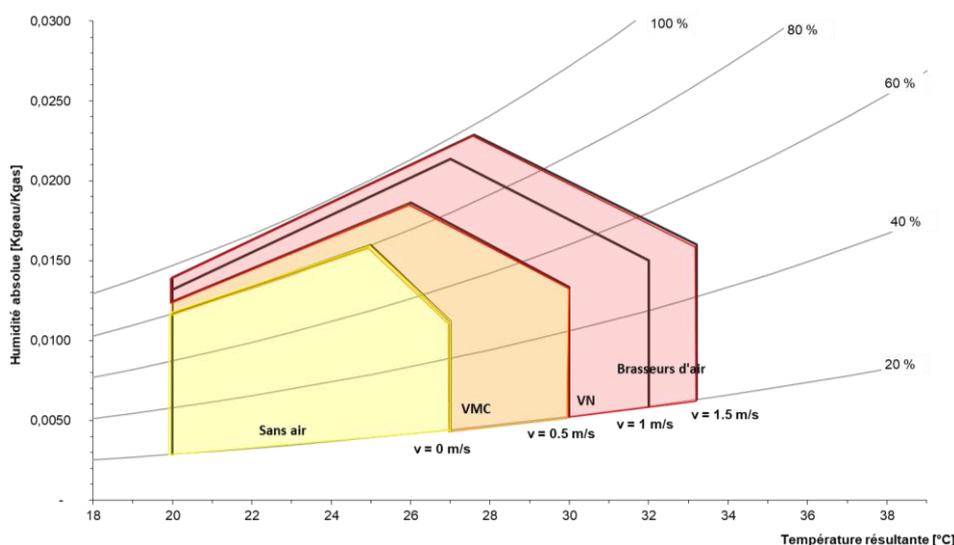


Figure IV. 13 - Zone de confort selon GIVONI sur le diagramme psychrométrique des conditions ambiantes (Outil de Kevin Maiques, TRIBU).

Les zones sont définies pour des plages de vitesse d'air allant de 0 jusqu'à 1,5 m/s, vitesse au-delà de laquelle un risque de nuisance existe. La plage 0 m/s correspond aux modèles de confort classiques (valables jusqu'à 0,20 m/s). La plage 0,5 m/s peut être atteinte avec des dispositions de ventilation naturelle et l'ouverture des fenêtres, ou par sur-ventilation mécanique sur le réseau de renouvellement d'air hygiénique. Les vitesses supérieures ne peuvent être atteintes que grâce à des dispositifs mécaniques (brasseur d'air ou ventilateur de plafond). Bien que nécessitant de l'énergie électrique pour mettre les pales en rotation, ces dispositifs sont des solutions simples et intéressantes : elles ne déplacent pas les calories à l'extérieur et n'accroissent donc pas la surchauffe urbaine.

Comme pour l'indice PMV ou les indicateurs de cumul d'heures de dépassement de seuils, le nombre d'heures d'inconfort estimé d'après GIVONI est exprimé en heures d'occupation, pour des conditions d'ambiance temporelles mais selon un modèle quasi-statique (qui considère chaque instant comme indépendant du précédent). Or, la perception du confort est aussi fonction de ce qui s'est passé récemment et de comment notre corps a réagi pour mieux supporter le froid en hiver ou la chaleur en été.

IV.2.2.4 Les critères de confort adaptatif

En 1998, Brager et De Dear (Brager et de Dear, 1998) ont questionné la notion de confort par rapport à l'historique vécu, soit les conditions climatiques passées, l'aspect culturel... Ainsi, un premier graphique présentant la température opérative intérieure souhaitable en fonction de la température moyenne mensuelle passée est tracé. Basée sur ce concept de confort adaptatif, la norme EN 15251 est instaurée en 2007. Elle préconise de tracer la température opérative T_{op} en fonction de la température moyenne glissante hebdomadaire extérieure T_{ext_mg} . Cette T_{ext_mg} est une moyenne glissante sur les 7 derniers jours (T_{jm} : température journalière moyenne) avec un coefficient α qui attribue un poids plus important à la température extérieure de la veille, qu'à celle de l'avant-veille, et ainsi de suite. Elle se calcule de la manière suivante (avec $\alpha = 0.8$) :

$$T_{ext_mg}^i = (1 - \alpha) * \{T_{jm}^{i-1} + \alpha * T_{jm}^{i-2} + \alpha^2 * T_{jm}^{i-3} + \alpha^3 * T_{jm}^{i-4} + \alpha^4 * T_{jm}^{i-5} + \alpha^5 * T_{jm}^{i-6} + \alpha^6 * T_{jm}^{i-7}\} \quad (5)$$

$$T_{ext_mg}^{i+1} = (1 - \alpha) * T_{jm}^i + \alpha * T_{ext_mg}^i \quad (6)$$

Ces données du projet sont comparées aux plages acceptables de température définies sur la (Figure IV. 14). On y distingue 3 catégories de confort définies pour une vitesse d'air de 0.12 m/s et une humidité relative à 50 % :

- Catégorie I : 90% de satisfaction, réservée aux publics vulnérables (EPHAD, crèches...)
- Catégorie II : 80% de satisfaction, doit être utilisée pour les bâtiments neufs ou rénovés
- Catégorie III : 65% de satisfaction, réservée aux bâtiments existants

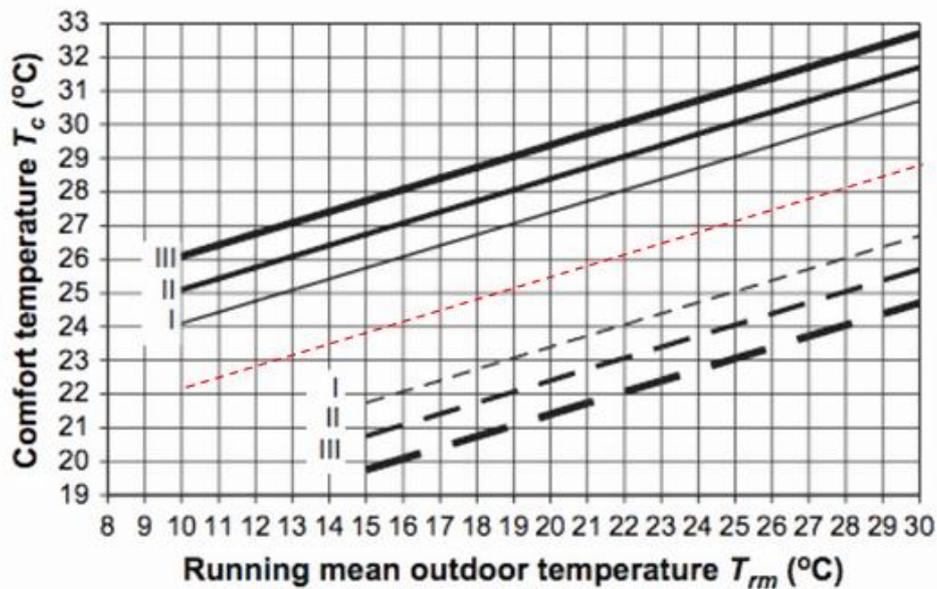


Figure IV. 14 - Catégories de confort de la norme européenne EN15251.

Cette norme s'applique essentiellement aux bâtiments non industriels pour lesquels les critères d'ambiance intérieure sont déterminés par l'occupation humaine et dont l'ambiance intérieure n'est pas notablement influencée par une production de chaleur ou par des procédés. La norme est ainsi applicable aux types de bâtiments suivants : maisons individuelles, immeubles d'habitation, bureaux, bâtiments d'enseignement, hôpitaux, hôtels et restaurants.

Le critère de confort adaptatif EN 15251 étant basé sur la confrontation de la température intérieure, et de la température extérieure, il reprend également la notion de confort relatif, soit le delta de température entre l'extérieur et l'intérieur. L'intérêt de prendre en compte le caractère adaptatif du confort a été exposé dans le guide sur le confort d'été de l'ICEB (Figure IV. 16).

IV.2.2.5 Comparatifs et perspectives

Le guide sur le confort d'été de l'Institut pour la Conception Écoresponsable du Bâti (ICEB) sorti en 2014 revient sur l'évolution de la notion de confort.

« Les standards, les normes et les modèles de calcul ont accompagné, et même encadré, l'évolution de la notion de confort. Aujourd'hui, le contexte environnemental a changé et cette notion « moderne » du confort se trouve en décalage avec les enjeux environnementaux. Une évolution des normes est amorcée depuis quelques années. Elle est encore peu visible dans les milieux professionnels de l'ingénierie et de la maîtrise d'ouvrage.»

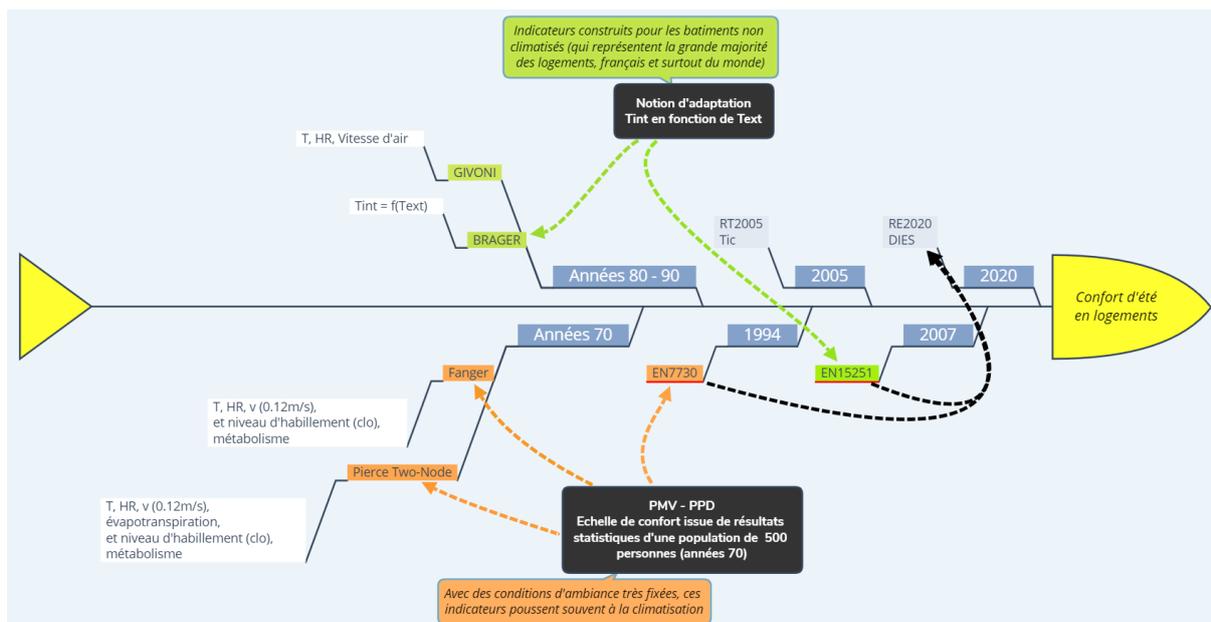


Figure IV. 15 - Evolution chronologique des méthodes d'analyses du confort dans les bâtiments, et des normes et réglementations mises en place.

En réponse à la méthode de Fanger des années 70, faisant l'objet d'une norme ISO 7730 à partir de 1994, les études de confort suivant GIVONI ou BRAGER pour les bâtiments fonctionnant de façon bioclimatiques (sans système de rafraîchissement actif) sont apparues, avec 2007 la norme EN 15251 pour la prise en compte du confort adaptatif (Figure IV. 15). La Figure IV. 16, issue du guide de l'ICEB, compare les plages de confort suivant les normes ISO 7730 et EN 15251.

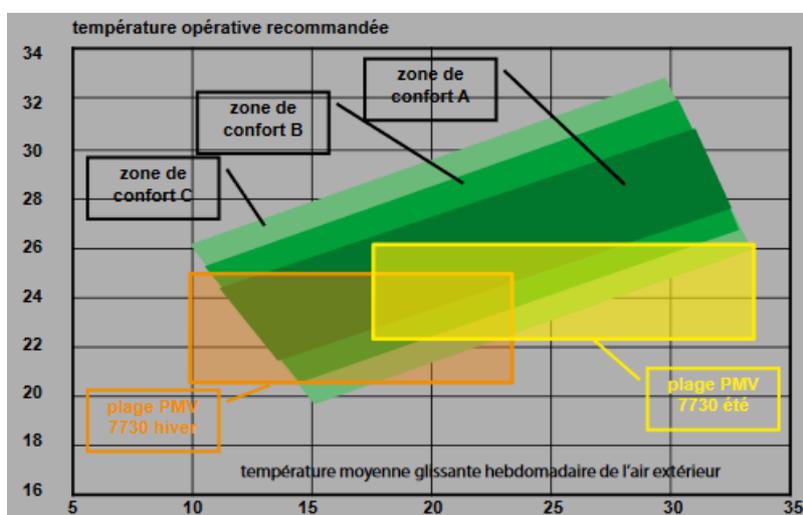


Figure IV. 16 - Comparaison des zones de confort suivant les normes ISO 7730 et EN 15251 (source : guide sur le confort d'été de l'ICEB (Bornarel et al., 2014)).

On observe que pour une semaine enregistrée à 25°C en moyenne, la norme ISO 7730 autorise une température opérative maximale T_{op} à 26°C, alors que la norme EN 15251 considère que le corps humain peut s'adapter à une température opérative T_{op} jusqu'à 30°C (en catégorie II). Cet exemple souligne bien les écarts qui peuvent exister entre ces deux indicateurs de confort.

Une des conséquences de l'utilisation du PMV peut être la préconisation de systèmes de rafraîchissement actifs dans le bâtiment qui ne seraient peut-être pas jugés utiles avec l'utilisation du confort adaptatif. La question de l'utilisation de ces systèmes peut bien évidemment être étendue à son intérêt en termes de confort (est-ce que cela apporte réellement plus de confort?), à son efficacité énergétique, ou à son intégration dans un milieu urbain et aux charges climatiques induites.

Finalement, deux constats s'imposent :

- L'utilisation de l'indicateur PMV ne devrait se faire qu'à titre indicatif. Au-delà, une révision de cet indicateur serait nécessaire compte tenu des évolutions culturelles, sociétales...des 50 dernières années.
- L'utilisation d'indicateurs de confort adaptatif (Givoni, EN 15251) devrait se généraliser dans les projets de bâtiment.

Notons par ailleurs que l'échelle de PMV a été produite par l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) qui à cette époque, prônait le maintien de conditions de confort par l'usage de systèmes actifs. L'amélioration de l'efficacité des systèmes, leur démocratisation et leur commercialisation en masse ont fait qu'aujourd'hui, la chaîne du froid est assurée, de la maison au bureau en passant par la voiture. Sous le couvert de la modernité et d'un certain statut social, un standard de confort s'est imposé chez nous et a remplacé d'autres conceptions du confort qui préexistaient. Et pourtant, la climatisation n'équipe qu'une part minime des bâtiments dans le monde et, là où elle est pratiquée, le confort qu'elle est sensé offrir est loin de faire l'unanimité (Pellegrino, Simonetti, et Chiesa, 2016).



Figure IV. 17 - Des climatiseurs sur les murs d'un immeuble à Fuzhou, dans la province de Fujian, en Chine, le 25 mai 2016 (Source franceinfo).

D'après l'International Energy Agency (IEA) les niveaux d'émissions de GES dû aux rafraîchissement actif pourraient doubler d'ici 2050. Une stratégie d'adaptation aux climats futurs basée sur la climatisation (Figure IV. 17) n'est pas une solution durable à l'échelle mondiale.

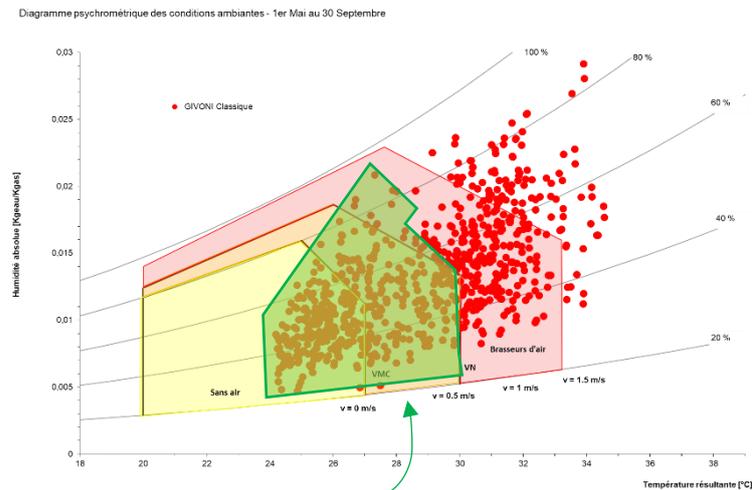
IV.2.2.6 Proposition d'une approche mixte entre EN 15251 et GIVONI

La norme EN 15251 décrit le confort selon la relation température intérieure, température extérieure, pour une vitesse de déplacement d'air fixée à 0,12 m/s et une humidité relative à 50 %. Le diagramme de

GIVONI exprime le confort suivant l'humidité, la température et la vitesse de déplacement de l'air intérieur, sans prendre en compte la notion d'adaptation qui est pourtant importante. Une idée d'utiliser les avantages de ces deux indicateurs est proposée par le chainage suivant et illustrée sur la Figure IV. 18, nous procédons ainsi en 2 étapes :

- 1- Évaluation des heures inconfortables selon la norme EN 15251 (celles pour lesquelles il est jugé que le corps n'a pas pu s'adapter),
- 2- Tracé de ces heures inconfortables uniquement sur le diagramme de GIVONI.

Tracé classique de GIVONI reprenant toutes les heures en occupation



Tracé de GIVONI avec pré-traitement EN15251 qui supprime les heures confortables, où les personnes sont considérées comme adaptées

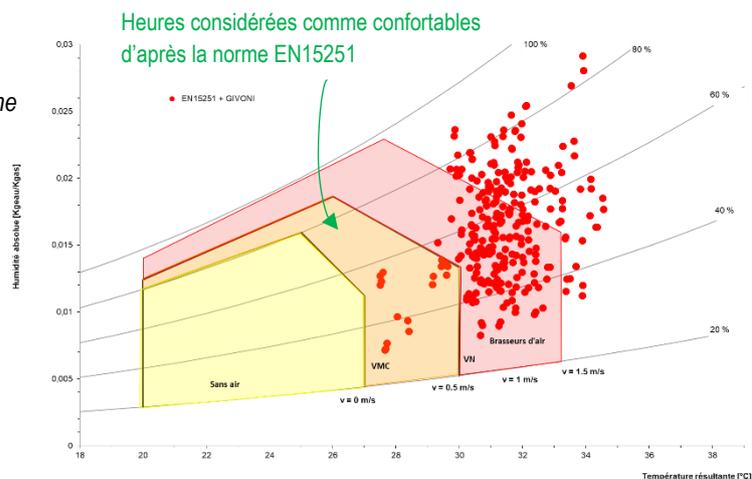


Figure IV. 18 - Présentation du chainage EN 15251 + GIVONI pour l'analyse du confort, résultats issus du séjour du T4 pour la météo d'Après-demain (2003).

IV.2.3 La quantification des risques sanitaires

La question des risques sanitaires liés à un inconfort chaud important est moins traitée dans la littérature.

En première approche, la notion de température opérative maximale T_{op_max} qui donne le niveau de température maximum atteint en occupation dans une pièce donne une idée sur les conditions extrêmes potentielles.

L'association anglaise Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE) propose des tests pour évaluer les risques de surchauffe, notamment par son examen TM59 relatif aux projets de

logements. Ce test demande que la température opérative des chambres ne dépasse pas 26 °C pendant plus de 1 % des heures d'occupation en configuration de ventilation naturelle, et 3 % des heures en ventilation mécanique. Des températures supérieures à 26°C peuvent empêcher les personnes de dormir et de récupérer de leur fatigue. Par ailleurs, des températures supérieures à 35 °C dans une pièce peuvent provoquer du stress, de l'anxiété, voire même la mort prématurée de personnes vulnérables comme les personnes âgées ou les nouveaux nés.

Enfin l'Institut National de Recherche Sécurité (INRS) qui traite les questions de la santé et la sécurité au travail propose un Heat Index (Figure IV. 19) pour les risques de coup de chaleur en cas de travaux en extérieur ou d'activité physique importante. Cet indicateur s'exprime en fonction de l'humidité relative et de la température d'air mesurées à l'ombre. Pour les expositions en plein soleil, une addition de 15°C est à prendre en compte sur la température d'air. En revanche, la notion d'adaptation n'est pas prise en compte dans cet indicateur. Même s'il est défini pour des conditions extérieures, l'utilisation de cet indicateur en intérieur pourrait être pertinente pour anticiper les risques de coup de chaleur, notamment pour des périodes d'exposition longues et en particulier durant des épisodes caniculaires.

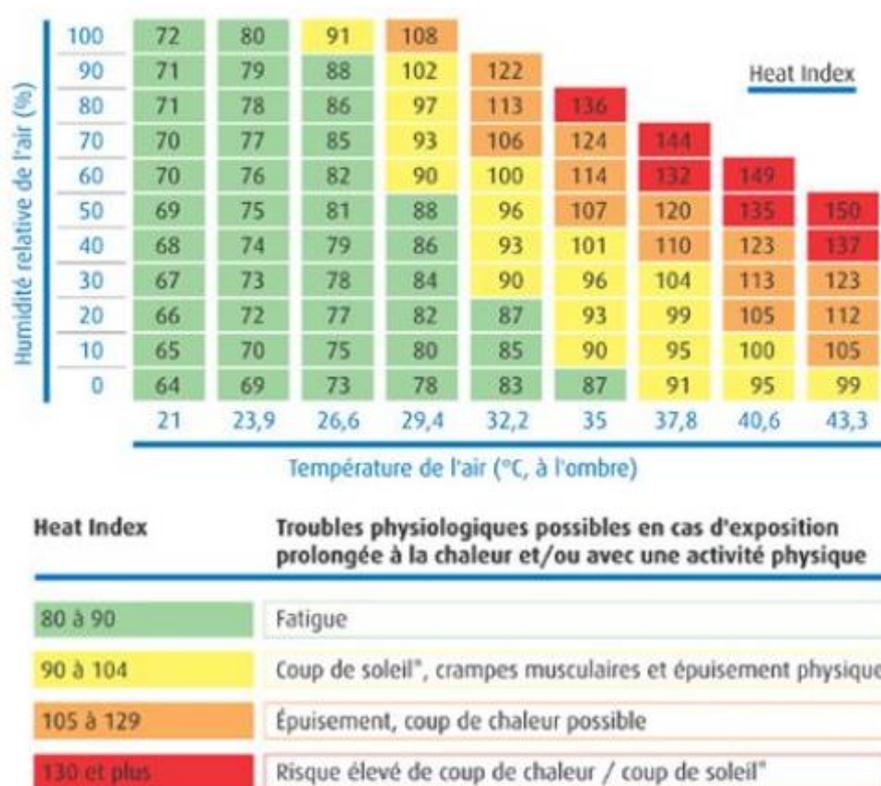


Figure IV. 19 - Heat Index pour l'évaluation des risques de coup de chaleur selon INRS.

IV.3 Cadrage de l'analyse de sensibilité

Le changement climatique et les surchauffes urbaines présentés en chapitre 2 engendrent des aléas climatiques qui sollicitent les bâtiments et altèrent le confort d'été des occupants. Plus grave, des risques sanitaires peuvent également être des conséquences tragiques de ces surchauffes. Le rôle des acteurs de la construction des villes est de concevoir des bâtiments confortables malgré les aléas climatiques,

soit une ADAPTATION qui doit se faire de manière frugale et lowtech pour éviter d'accentuer les phénomènes de réchauffement, et donc être conforme aux objectifs d'ATTENUATION (Figure IV. 20).

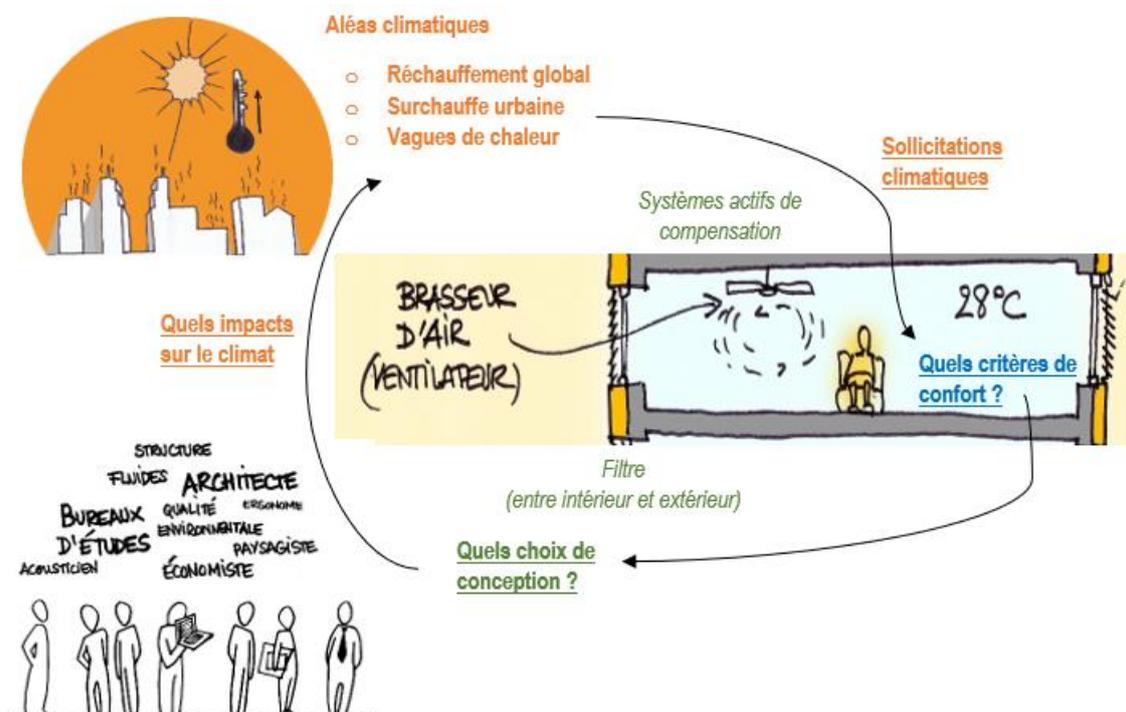


Figure IV. 20 - Adaptation aux aléas climatiques, conception frugale et critères de confort d'été (Source TRIBU, dessins : Héloïse Marie et Marie Leroy).

La question qui est posée à travers la Figure IV. 20 est de savoir quel(s) indicateur(s) de confort d'été utiliser pour faire des choix pour une conception frugale afin d'éviter la rétroaction néfaste de systèmes complexes actifs sur le climat et l'environnement. L'enjeu climatique va plus loin que la simple échelle du bâtiment pour lequel une adaptation par rafraîchissement actif conviendrait mais est non durable (voire irresponsable) à l'échelle mondiale.

Nous avons vu dans les chapitres précédents la question des fichiers météo à utiliser pour des approches locales et prospectives. Nous venons de présenter notre cas d'étude et de soulever la question de l'évaluation des conditions de confort ou des risques sanitaires pour la conception des bâtiments. Nous allons maintenant présenter comment nous avons analysé la sensibilité de l'approche de la conception vis-à-vis des fichiers climatiques et au regard de critères de confort d'été.

IV.3.1 Questionnements et axes d'analyses

Le chapitre 2 a émis des interrogations concernant les données météo utilisées en STD. Souvent ces données sont des moyennes climatiques basées sur des périodes de 10 ou 30 ans. Ces fichiers moyennés sont des années météorologiques fictives dont les extrêmes ont été écartés. Ce sont justement ces extrêmes climatiques qui nous intéressent, et l'analyse de la réponse des bâtiments à ces aléas climatiques. Une méthodologie permettant de définir 3 années réelles (2004, 2006, et 2003) caractéristiques du climat lyonnais suivant 3 temporalités (Aujourd'hui, Demain, et Après-demain) a été proposée. Pour finir, une surchauffe urbaine a été observée dans le quartier de Confluence et pose la question de la prise en compte de tels effets climatiques urbains en conception de bâtiment.

Pour bien analyser l'impact de l'usage des données météo en STD, nous proposons de comparer les résultats des simulations selon des axes, chacun de ces axes tente de répondre à une question ciblée :

- *Analyse préliminaire* « **Impact de la fabrication de fichiers météo** » : simulations faites avec des fichiers météo moyens fictifs ou des fichiers météo années réelles ;
- *Axe 1* « **Impact du changement climatique** » : simulations faites avec des fichiers météo actuels ou des fichiers météo futurs ;
- *Axe 2* « **Impact de la surchauffe urbaine** » : simulations faites avec des fichiers météo locaux ou des fichiers météo de la station de référence ;
- *Axe 3* « **Aléas climatiques & Niveaux de conception** » : simulations faites pour des niveaux d'isolation différents ;
- *Axe 4* « **Aléas climatiques & Modes constructifs** » : simulations faites pour les modes constructifs V1 et V2.

IV.3.2 Locaux analysés : Chambre & Séjour

Les résultats de confort d'été sont présentés pour le séjour orienté Sud-Ouest d'un logement traversant de type T4 (A43) et pour la chambre d'un logement mono-orienté de type T2 (Figure IV. 21). Ces deux locaux adjacents sont situés au R+4 avec une orientation Sud-Ouest et sont considérés comme des locaux défavorables pour le confort d'été. En effet, le 4^{ème} niveau limite les masques solaires, et l'orientation Sud-Ouest est très ensoleillée en milieu et fin de journée où les rayons du soleil sont rasants, il est donc délicat de s'en protéger. Pour la chambre, le pic de chaleur est atteint en fin de journée, ce qui peut occasionner de l'inconfort au coucher et des difficultés à trouver le sommeil. Enfin, notons que le logement de type T2 dispose d'une capacité de ventilation naturelle nocturne moins importante que le logement de type T4 (1,5 vol/h contre 3,5 vol/h pour le séjour du T4 traversant).



Figure IV. 21 - Localisation des locaux étudiés pour le confort d'été.

IV.4 Exploitation des résultats

Cette partie exploite les résultats des STD des différentes variantes de météo, de modes constructifs, et de niveaux de conception (principalement niveau d'isolation). Pour l'axe 1 (Impact du changement climatique en conception d'enveloppe), les résultats graphiques sont présentés de manière exhaustive selon les différents critères de confort : dépassement de seuils, de GIVONI, et de la norme adaptative EN 15251. Pour les autres axes, les résultats sont accompagnés des graphiques les mieux adaptés selon la nécessité de l'analyse. Pour rappel, les études de confort sont traitées uniquement en période d'occupation.

IV.4.1 Analyse préliminaire : Fichiers météo moyens fictifs vs fichiers météo années réelles

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, les fichiers météo fictifs issus de METEONORM (construits de façon à exprimer le climat moyen sur 10 ou 30 ans) souvent utilisés en étude STD, contiennent trop peu d'extrêmes climatiques. Se pose alors la question de l'impact de l'utilisation de cette donnée pour des études sur le confort d'été en conception. Dans cette sous-partie, les simulations sont effectuées d'une part avec les fichiers météo fictifs A2_2050 et A2_2080 et d'autre part les données météo des années réelles 2006 et 2003 mesurés à l'ENTPE, que nous avons trouvés comme équivalents du point de vue des moyennes ne chapitre 2.

IV.4.1.1 Météo fictives et réelles : cumuls de dépassement de seuils

La Figure IV. 22 présente les dépassements de seuils (de 26 à 32°C), en occupation, pour le séjour (T4) de la variante V1 béton. Ces évolutions sont tracées pour les météo d'Après-demain (A2_2080 et 2003). On constate que les nombres d'heures de dépassement de 26°C et 27°C sont plus importants pour les météo fictives METEONORM. Au-delà de ces niveaux de température, on observe une inversion (matérialisée par une croix) des tendances : les nombres d'heures de dépassement deviennent plus élevés pour la météo réelle, qui est plus extrême. Des observations similaires sont retrouvées pour la variantes V2, le local de la chambre du T2 mono-orienté (Annexe IV. 6 et Annexe IV. 7) et les autres données météo.

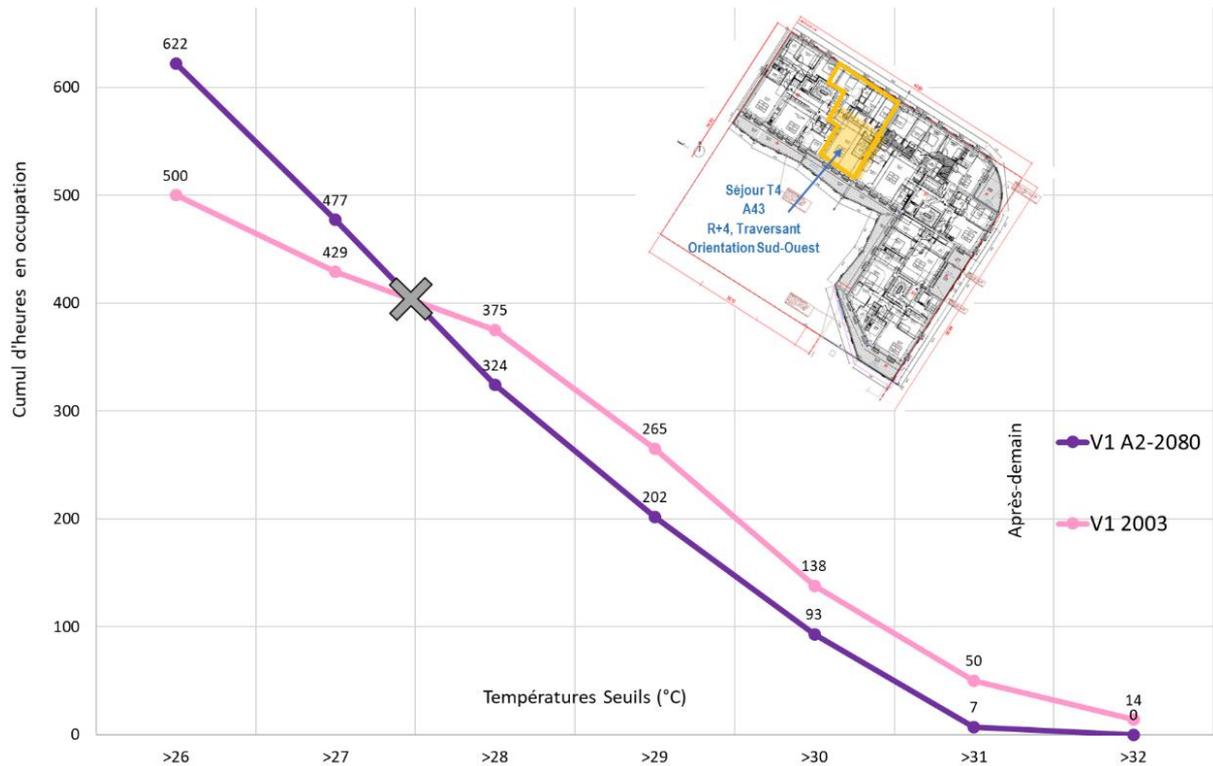


Figure IV. 22 - Cumul annuel de dépassement de seuils sur le séjour du T4 (A43) pour les météo d'après-demain pour le mode constructif V1.

IV.4.1.2 Analyses multicritères de l'inconfort

Outre le dépassement de seuils de température, le Tableau IV. 3 présente les nombres d'heures d'inconfort estimés par la norme EN 15251 pour la catégorie II, par la méthode de GIVONI pour une vitesse d'air de 1m/s, et par la méthode mixte proposée chainant confort adaptatif EN 15251 et confort GIVONI. Les résultats indiquent que les météo réelles 2006 et 2003 donnent des ambiances intérieures avec plus d'inconfort que ce que n'en génèrent les météo équivalentes METEONORM A2_2050 et A2_2080. Ce constat est vrai pour la chambre et pour le séjour, pour la variante béton V1 (forte inertie) et la V2 bois (faible inertie). En ce qui concerne la temporalité « météo d'aujourd'hui », quasiment aucun inconfort n'est observé que ce soit pour la donnée METEONORM ou la donnée mesurée en 2004. Ainsi, il était légitime de questionner la pertinence de l'utilisation de cette donnée METEONORM pour des études de confort d'été. En effet, les années 2003 et 2006, mais également 2001 et 2009 (qui s'approchent de 2006), sont quatre années chaudes de la décennie pour lesquelles l'inconfort d'été s'est trouvé plus élevé que celui estimé avec le fichier METEONORM 2000-2009.

Variante Béton V1

METEOS		Séjour (T4 A43)						Chambre (T2 A42)							
		Tmax °C	>26	>28	>32	EN15251	Givoni	EN15251 +	Tmax °C	>26	>28	>32	EN15251	Givoni	EN15251 +
						Cat II	1m/s	Givoni					Cat II	1m/s	Givoni
		Nombre d'heures d'inconfort en occupation						Nombre d'heures d'inconfort en occupation							
Aujourd'hui	METEONORM 2000-2009	28,3	339	13	0	0	0	0	27,8	402	0	0	0	0	0
	ENTPE 2004	28,7	275	27	0	0	0	0	28,4	287	7	0	0	0	0
Demain	METEONORM A2_2050	29,3	353	94	0	0	2	0	28,9	489	45	0	0	7	0
	ENTPE 2006	31,2	304	119	0	3	0	0	30,7	397	166	0	0	0	0
Après-demain	METEONORM A2_2080	31,2	507	311	0	43	59	29	31,0	858	455	0	8	113	8
	ENTPE 2003	32,6	500	375	14	73	105	49	32,2	817	579	1	8	132	7

Variante Bois V2

METEOS		Séjour (T4 A43)						Chambre (T2 A42)							
		Tmax °C	>26	>28	>32	EN15251	Givoni	EN15251 +	Tmax °C	>26	>28	>32	EN15251	Givoni	EN15251 +
						Cat II	1m/s	Givoni					Cat II	1m/s	Givoni
		Nombre d'heures d'inconfort en occupation						Nombre d'heures d'inconfort en occupation							
Aujourd'hui	METEONORM 2000-2009	29,8	429	185	0	19	0	0	29,5	537	86	0	2	0	0
	ENTPE 2004	30,3	434	130	0	13	0	0	29,9	488	79	0	0	0	0
Demain	METEONORM A2_2050	31,1	469	221	0	61	12	12	30,9	591	193	0	11	22	11
	ENTPE 2006	33,0	450	201	21	83	21	21	32,3	576	239	2	39	2	2
Après-demain	METEONORM A2_2080	33,1	566	409	40	210	125	113	33,1	871	561	12	144	160	118
	ENTPE 2003	34,6	597	421	68	267	165	157	34,0	879	654	57	186	213	148

Tableau IV. 3 - Nombre d'heures d'inconfort pour le séjour et la chambre, et les variantes V1 et V2 : comparaison des résultats pour les météo fictives METEONORM et réelles ENTPE.

La Figure IV. 23 illustre les résultats du Tableau IV. 3 pour le séjour (T4, A43) de la variante bois V2 et les météo de Demain et d'Après-demain sous une forme de diagramme radar. D'après tous les indicateurs de confort, les météo réelles traduisent des ambiances bien plus inconfortables que les météo fictives. Par conséquent, l'utilisation d'années météorologiques réelles en STD est absolument nécessaire pour une prise en compte réaliste du confort d'été en conception. C'est ce qui est fait pour l'analyse des axes suivants.

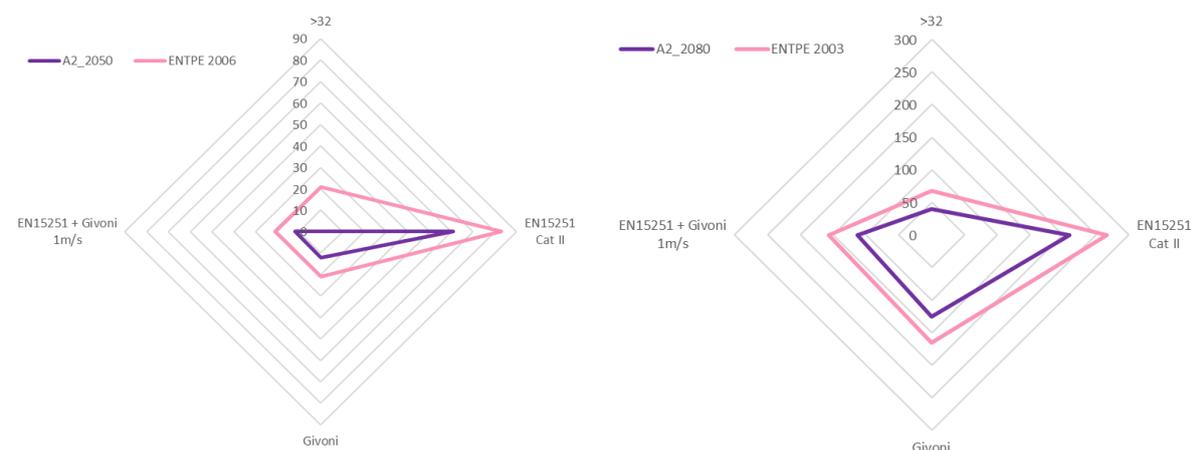


Figure IV. 23 - Diagramme radar des différents indicateurs de confort pour la variante bois V2, comparaison des météo de demain et d'après-demain.

IV.4.2 Axe 1 : Impact du changement climatique

Les bâtiments étant construits pour au moins 50 ans, cet axe d'analyse porte sur l'intérêt d'intégrer les prévisions climatiques futures et du réchauffement à l'échelle mondiale dans les études de confort. Ici,

les années réelles 2004, 2006 et 2003 issues de la station météo péri-urbaine de l'ENTPE sont retenues pour caractériser les climats d'aujourd'hui, de demain et d'après-demain respectivement.

IV.4.2.1 Etude de confort et risques sanitaires

La Figure IV. 24 montre les dépassements de seuils de 26°C à 32°C pour le séjour du T4 (A43), les variantes V1 et V2, et les météo actuelles et futures de la station péri-urbaine ENTPE. Les écarts observés sont sans appel : évidemment la prise en compte du changement climatique a un impact conséquent sur la température intérieure du séjour. Pour la variante V1 (en trait plein), les différences les plus importantes constatées entre les 3 niveaux de météo se situent entre les seuils 27°C et 29°C. Concernant la variante V2 (en pointillé), ces différences interviennent principalement entre les seuils de 28 à 30°C. Ce décalage est la conséquence d'une faible inertie qui n'est pas en mesure d'atténuer suffisamment les montées en température du local. Cet aspect inertiel est rediscuté dans l'axe d'analyse numéro 4. Enfin pour la V1 et la V2, les écarts sont plus prononcés entre les météo de Demain et d'Après-demain qu'entre Aujourd'hui et Demain.

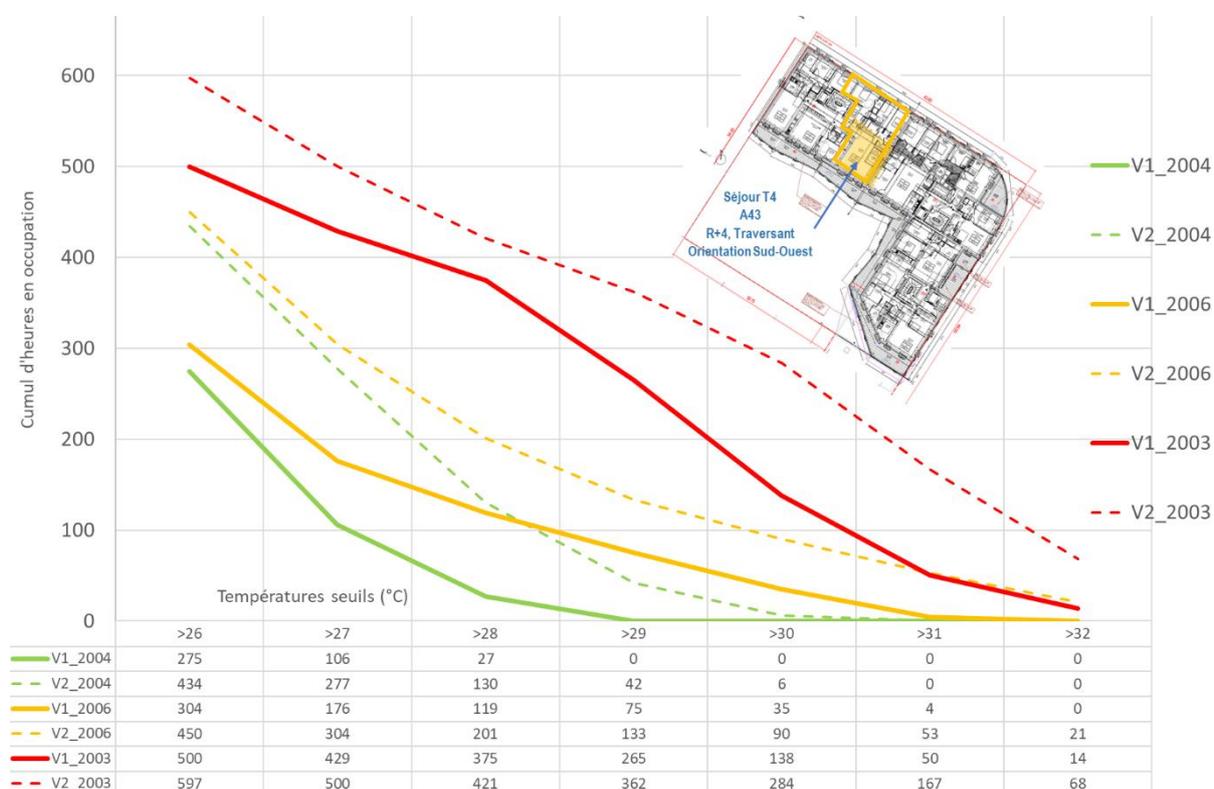


Figure IV. 24 - Cumul annuel de dépassement de seuils sur le séjour du T4 (A43) pour les météo d'Aujourd'hui, Demain, et Après-demain, pour les modes constructifs V1 et V2.

Toujours pour le séjour du T4 (A43) traversant, le graphique de GIVONI est tracé (Figure IV. 25) pour la variante bois V2 et les 3 météo : Aujourd'hui (2004, en vert), Demain (2006, en jaune), et Après-demain (2003, en rouge). Pour cette dernière année, les résultats obtenus lors de la principale canicule d'août 2003 (qui a duré 13 jours à Lyon) sont tracés sous forme de croix noires. Pour une plage de confort pour une vitesse de déplacement de 1m/s, la Figure IV. 25 n'indique aucun inconfort pour la météo Aujourd'hui, 21 heures d'inconfort pour Demain, et 165 heures pour Après-demain. La canicule de 2003 se retrouve bien dans la zone de situation inconfortable selon GIVONI.

Diagramme psychrométrique des conditions ambiantes - 1er Mai au 30 Septembre

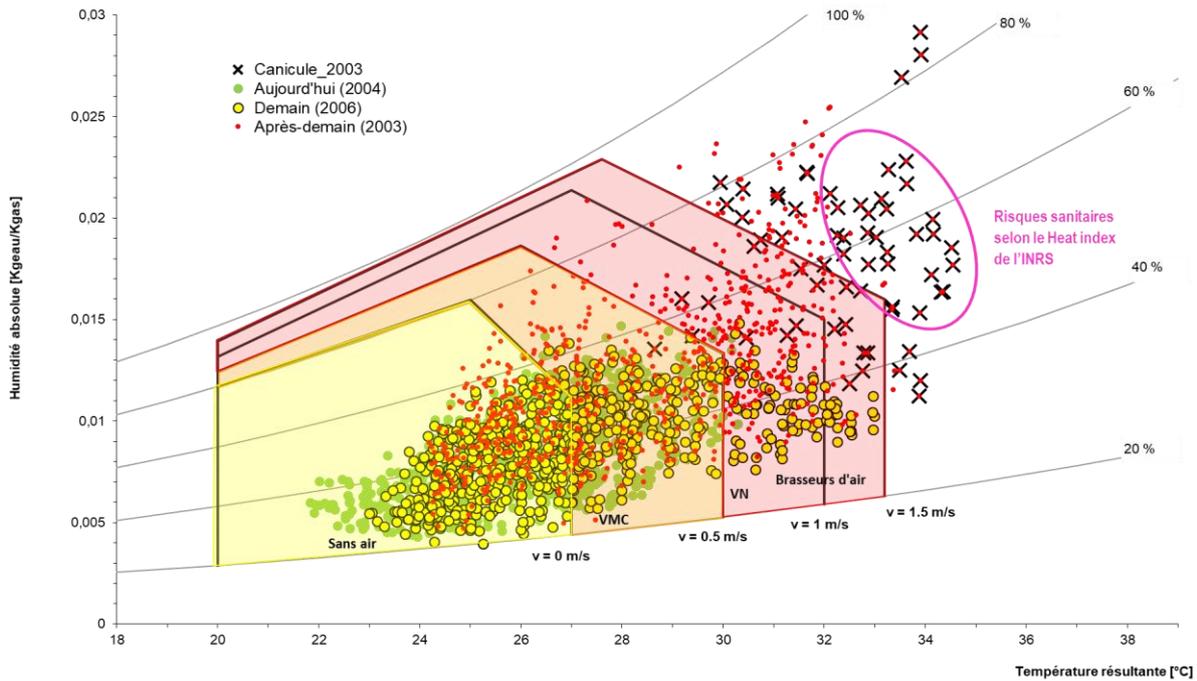


Figure IV. 25 - Graphique de GIVONI sur le séjour du T4 (A43), pour le mode V2, pour les météo d'Aujourd'hui, Demain et Après-demain.

D'un point de vue sanitaire, si on regarde les résultats avec l'échelle de risque Heat index suggérée par l'INRS, des niveaux critiques sont atteints (Figure IV. 26), en particulier pour la canicule de 2003 : pour les résultats STD de la V2, beaucoup d'heures en occupation (Figure IV. 25) du séjour dépassent les valeurs de 105 en Heat index.

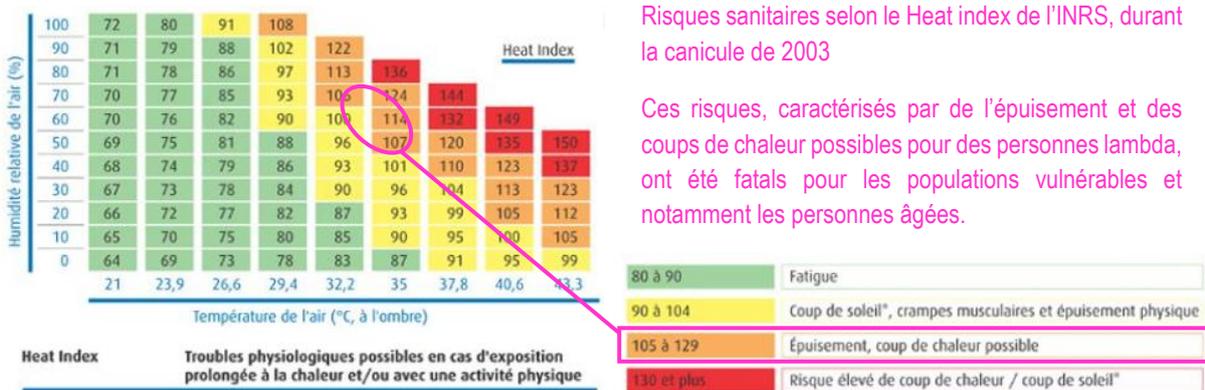


Figure IV. 26 - Risques sanitaires sur le séjour du T4 (A43), pour le mode constructif V2, pour la canicule de 2003, selon le Heat index de l'INRS.

IV.4.2.2 Adaptation de l'organisme aux conditions extérieures

La Figure IV. 27 représente la projection des températures calculées selon le modèle de confort adaptatif de la norme EN 15251 pour le séjour (T4), le mode constructif V2 et nos 3 séquences climatiques. Les résultats de simulations attribuent 13 heures d'inconfort en occupation pour la météo Aujourd'hui, 83 heures pour Demain et 267 heures pour Après-demain par rapport aux limites de la catégorie II. Comme

pour le graphique GIVONI (Figure IV. 25), la canicule de 2003 imagée par les croix noires, est bien la période la plus inconfortable. La quasi-totalité des heures occupées lors de cette canicule sont au-delà de la limite de la catégorie II.

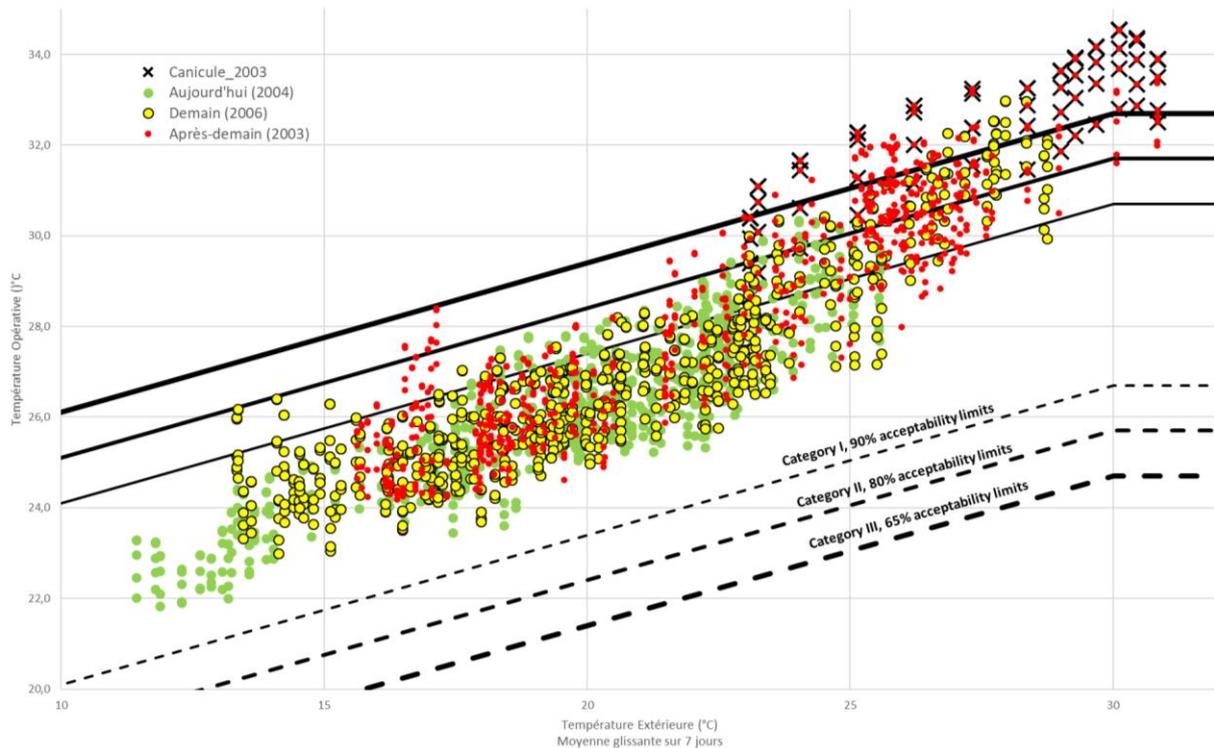


Figure IV. 27 - Confort adaptatif selon la norme EN 15251 sur le séjour du T4 (A43), le mode constructif V2 pour les météo aujourd'hui, demain et après-demain.

Le chainage des méthodes d'évaluation du confort selon la norme EN 15251 puis GIVONI est ensuite testé. Sur le séjour et pour la météo d'Après-demain, le principe de chainage ne fait pas une grande différence en termes d'heures d'inconfort avec 165 heures inconfortables selon GIVONI (classique, pour un déplacement d'air de 1m/s), contre 157 heures pour la méthode EN 15251 + GIVONI. Si l'on fait la même comparaison pour une configuration sans brasseur d'air et donc un mouvement d'air à 0,5m/s (par ouverture de fenêtre) les différences sont plus notables. En effet, de 350 heures d'inconfort estimées suivant GIVONI classique, on passe à 250 heures avec la méthode EN 15251 + GIVONI.

Les Figure IV. 28 et Figure IV. 29 illustrent la même comparaison entre GIVONI et EN 15251+GIVONI pour la chambre. Celle-ci étant occupée de 23h à 7h, l'impact de l'horizon météo est notable. Les heures de la canicule de 2003 apparaissent également bien comme inconfortables sur ce tracé GIVONI (Figure IV. 28). A nouveau, la prise en compte du paramètre adaptatif supprime tout inconfort pour la météo d'Aujourd'hui qui comporte pourtant un épisode caniculaire (Figure IV. 29). Pour la météo de Demain, la durée d'inconfort est de 39 heures avec un courant d'air de 1m/s. Pour la météo Après-demain, elle est de 186 heures au total, de 148 heures avec un brassage d'air à 1m/s et de 100 heures avec un brassage d'air à 1,5m/s. Il est également intéressant de voir que les occupants se sont adaptés à la chaleur pour une partie des heures d'occupation durant la canicule.

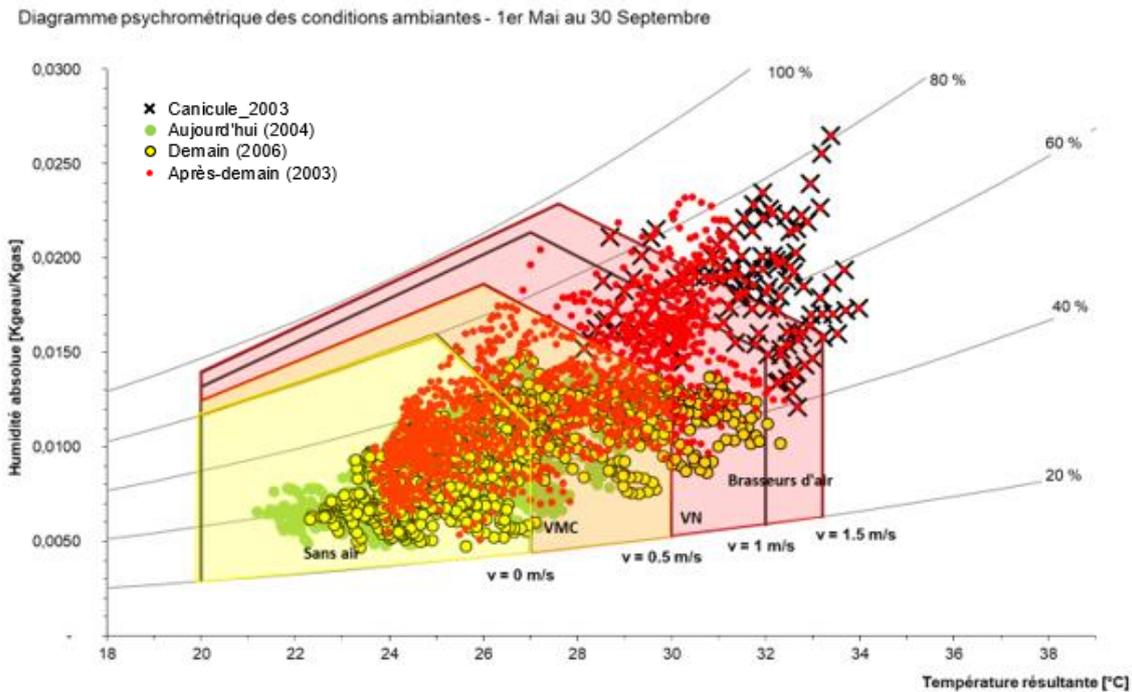


Figure IV. 28 - Confort selon GIVONI sur la chambre du T2 (A42), le mode constructif bois V2, pour les météo ENTPE aujourd'hui, demain et après-demain.

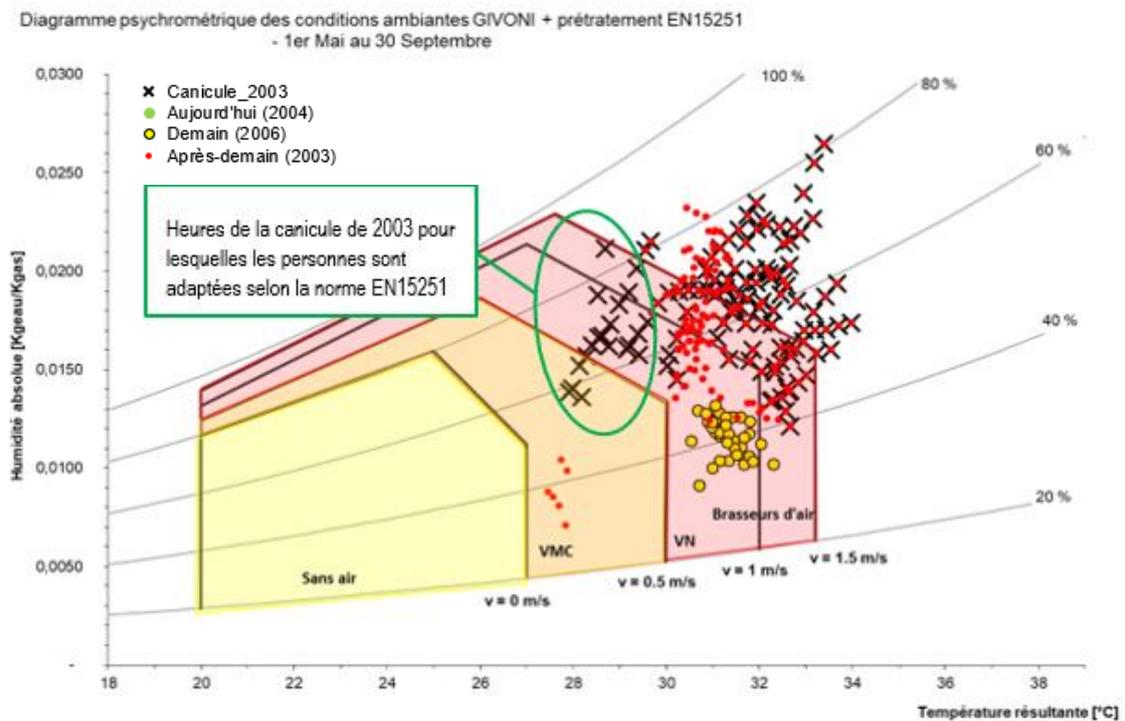


Figure IV. 29 - Confort selon EN15251 + GIVONI sur la chambre du T2 (A42), le mode constructif bois V2, pour les météo Aujourd'hui, Demain et Après-demain.

En résumé, les études de confort d'été du séjour du T4 (A43) et de la chambre du T2 (A42) ont été réalisées en utilisant différents indicateurs. Ces résultats, synthétisés dans le Tableau IV. 4, soulignent l'influence de la prise en compte du climat futur. En se basant sur un seuil maximum de 50 heures d'inconfort souvent demandé dans les programmes de logements, les résultats relatifs au confort sont

bons pour la variante V1 (forte inertie) et la météo « Aujourd'hui », ils nécessitent du brassage d'air mécanique pour la météo « Demain ». Pour la variante bois V2 (faible inertie), le brassage d'air est nécessaire dès « Aujourd'hui », et, suffisant pour la météo « Demain ». Pour la météo « Après demain », la variante V1 permet d'atteindre les performances de confort d'après l'indicateur EN 15251 adaptatif pour la chambre, et d'après le critère couplé EN15251 + GIVONI dans le séjour. Sans inertie, la V2 paraît en revanche inconfortable pour cette météo « Après demain ». Un apport d'inertie par les cloisons intérieures est une solution pertinente à combiner avec un mode constructif léger en structure bois, cette solution est étudiée dans l'axe 4.

		Variante Béton V1													
		Séjour (T4 A43)						Chambre (T2 A42)							
METEOS		Tmax	>26	>28	>32	EN15251	Givoni	EN15251 +	Tmax	>26	>28	>32	EN15251	Givoni	EN15251 +
		°C				Cat II	1m/s	Givoni	°C				Cat II	1m/s	Givoni
		Nombre d'heures d'inconfort en occupation						Nombre d'heures d'inconfort en occupation							
Aujourd'hui	ENTPE 2004	28,7	275	27	0	0	0	0	28,4	287	7	0	0	0	0
Demain	ENTPE 2006	31,2	304	119	0	3	0	0	30,7	397	166	0	0	0	0
Après-demain	ENTPE 2003	32,6	500	375	14	73	105	49	32,2	817	579	1	8	132	7

		Variante Bois V2													
		Séjour (T4 A43)						Chambre (T2 A42)							
METEOS		Tmax	>26	>28	>32	EN15251	Givoni	EN15251 +	Tmax	>26	>28	>32	EN15251	Givoni	EN15251 +
		°C				Cat II	1m/s	Givoni	°C				Cat II	1m/s	Givoni
		Nombre d'heures d'inconfort en occupation						Nombre d'heures d'inconfort en occupation							
Aujourd'hui	ENTPE 2004	30,3	434	130	0	13	0	0	29,9	488	79	0	0	0	0
Demain	ENTPE 2006	33,0	450	201	21	83	21	21	32,3	576	239	2	39	2	2
Après-demain	ENTPE 2003	34,6	597	421	68	267	165	157	34,0	879	654	57	186	213	148

Tableau IV. 4 - Indicateurs d'inconfort pour le séjour et la chambre, selon les variantes V1 et V2, comparaison des résultats pour les météo ENTPE Aujourd'hui, Demain, et Après-demain.

IV.4.3 Axe 2 : Impact de la surchauffe urbaine

L'axe 2 est focalisé sur la seconde source de surchauffe, la surchauffe urbaine. Outre le fait qu'il fasse plus chaud en ville, traduit par un offset de 2°C en moyenne durant la période estivale de 2013 dans le quartier de Confluence à Lyon, l'allure sinusoïdale de l'évolution journalière de la température est également déphasée de 2 ou 3 heures en raison de la morphologie et de l'inertie de la ville très minérale. Ceci induit des débuts de nuit plus chauds en zone urbaine et réduit le potentiel de rafraîchissement par ventilation naturelle nocturne. L'influence de la prise en compte de la surchauffe urbaine est étudiée sur l'année chaude de 2018, année pour laquelle il a été possible de récupérer les données météo open data des stations ENTPE (péri-urbaine) et ENS (urbaine). Les résultats indiqués dans le Tableau IV. 5 expriment la nécessité de ne pas négliger l'effet de la surchauffe urbaine sur le confort d'été d'un projet de conception.

		Séjour (T4 A43)						Chambre (T2 A42)							
METEOS		T _{max} >26 °C			T _{max} >28 °C			T _{max} >26 °C			T _{max} >28 °C				
		EN15251	Givoni	EN15251 + Givoni	EN15251	Givoni	EN15251 + Givoni	EN15251	Givoni	EN15251 + Givoni	EN15251	Givoni	EN15251 + Givoni		
		Nombre d'heures d'inconfort en occupation													
Péri-urbaine	ENTPE 2018	31,0	414	131	0	2	0	0	30,5	581	161	0	0	0	0
Urbaine	ENS 2018	31,6	442	216	0	17	0	0	31,3	658	269	0	0	0	0

		Séjour (T4 A43)						Chambre (T2 A42)							
METEOS		T _{max} >26 °C			T _{max} >28 °C			T _{max} >26 °C			T _{max} >28 °C				
		EN15251	Givoni	EN15251 + Givoni	EN15251	Givoni	EN15251 + Givoni	EN15251	Givoni	EN15251 + Givoni	EN15251	Givoni	EN15251 + Givoni		
		Nombre d'heures d'inconfort en occupation													
Péri-urbaine	ENTPE 2018	32,8	543	254	14	89	14	14	32,0	674	252	1	46	1	1
Urbaine	ENS 2018	33,5	581	320	27	141	29	28	32,9	745	397	18	78	29	24

Tableau IV. 5 - Indicateurs d'inconfort pour le séjour et la chambre, et les variantes V1 et V2, comparaison des résultats pour la météo péri-urbaine de l'ENTPE et urbaine de l'ENS.

IV.4.3.1 Surchauffe urbaine : accentuation de l'inconfort

Si l'on regarde le nombre d'heures où la température est supérieure à 28°C, pendant la période occupée, que ce soit pour le séjour du T4 (A43) (occupé 1 heure le matin, 1 heure le midi, et 3 heures le soir) ou pour la chambre du T2 (A42) (occupée la nuit), la donnée météo urbaine génère des surchauffes qui sont visibles pour les 2 modes constructifs. Cette analyse concernant l'accentuation de l'inconfort via la surchauffe urbaine est détaillée dans la Figure IV. 30 ci-après. D'après l'indicateur du nombre d'heures où la température est supérieure à 28°C, la surchauffe urbaine provoque une augmentation du niveau d'inconfort d'environ 10% pour le séjour ainsi que pour la chambre, et ceci est vrai pour les 2 modes constructifs béton ou bois.



Figure IV. 30 - Taux d'inconfort généré par la surchauffe urbaine, en se basant sur le nombre d'heures supérieures à 28°C en occupation (météo de l'année 2018) (Sources des photographies : Picasa, et Mapio).

Le détail des dépassements de seuils est ici celui du séjour du T4 (A43) (Figure IV. 31), l'impact de la donnée urbaine est visible pour les 2 modes constructifs avec des écarts allant de +85h où la température est supérieure à 28°C pour la V1, et +84h où la température est supérieure à 29°C pour la V2 et la météo mesurée à l'ENS, en centre-ville.

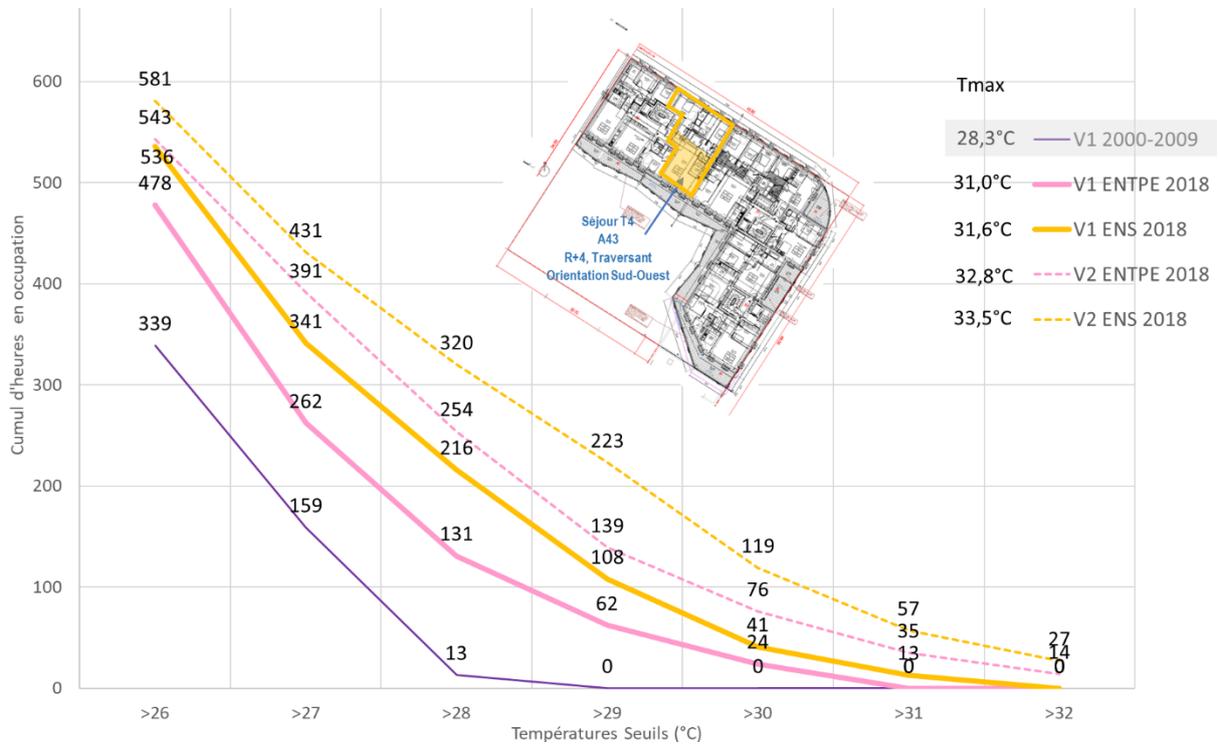


Figure IV. 31 - Cumul annuel de dépassement de seuils sur le séjour du T4 (A43) pour la météo péri-urbaine ENTPE 2018 et urbaine ENS 2018, pour les modes constructifs V1 et V2.

Pour rappeler l'importance de prendre en compte de la donnée météo en année réelle, les résultats pour la météo METONORM 2000-2009 et la variante V1 sont tracés. Avec seulement 13 heures supérieures à 28°C, le confort d'été sur le séjour apparaît satisfaisant. Pour les météo de 2018, les cumuls d'heures inconfortables vont de 131 (pour la météo ENTPE et la V1) à 320 heures (pour la météo ENS et la V2), soit des résultats bien supérieurs au seuil de 50 heures de dépassement préconisé en opérationnel. Ceci indique également que ce seuil est à réactualiser si l'on utilise de nouvelles données d'entrée météo plus extrêmes, et incite à aborder l'idée qu'il est préférable d'étudier d'autres indicateurs en parallèle, tels que les méthodes GIVONI et EN15251.

IV.4.3.2 Surchauffe urbaine et impact sanitaire nocturne

Jusqu'ici, l'influence de la prise en compte de la surchauffe urbaine a été étudiée sur la période estivale complète. Un zoom sur la canicule de début août de 2018 proposé permet de visualiser les différentes dynamiques de réponse suivant les données météo. La Figure IV. 32 propose l'évolution des températures opératives de la chambre du T2 (A42) pour les 2 modes constructifs V1 et V2, ainsi que pour les météo ENTPE (péri-urbaine, en rose) et ENS (urbaine, en orange). Comme pour la température extérieure, l'analyse des températures opératives intérieures montrent également que la surchauffe urbaine est à son apogée durant la nuit. Le 7 août 2018, en fin de canicule, la comparaison entre météo

urbaine et péri-urbaine implique des écarts de +0,7°C pour la configuration V1 et +0,8°C pour la configuration V2, à 4h du matin.

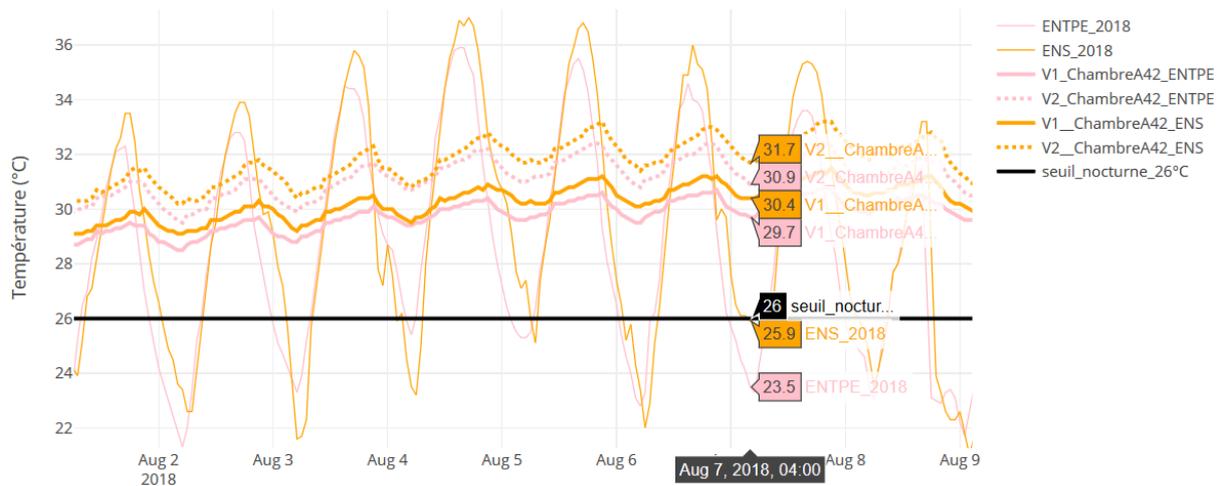


Figure IV. 32 - Evolutions des températures opératives de la chambre du T2 (A42) pour la météo péri-urbaine ENTPE 2018 et urbaine ENS 2018, pour les modes constructifs V1 et V2, en période caniculaire.

D'un point de vue sanitaire, on constate que le seuil nocturne de 26°C défini par la CIBSE est largement dépassé dans toutes les configurations durant cette période caniculaire. En dézoomant Figure IV. 33, on se rend compte qu'aucune nuit ne descend sous ce seuil de 26°C pendant 2 mois, de début juillet à fin août, traduisant des difficultés à bien dormir. Toutefois, deux points méritent d'être soulignés : 1. aucune notion d'adaptation n'est prise en compte ici ; 2. ce seuil de 26°C a été déterminé par une association anglaise, et donc valable pour leur population : on peut raisonnablement penser qu'une personne vivant à Lyon sera moins gênée par la chaleur pour dormir.

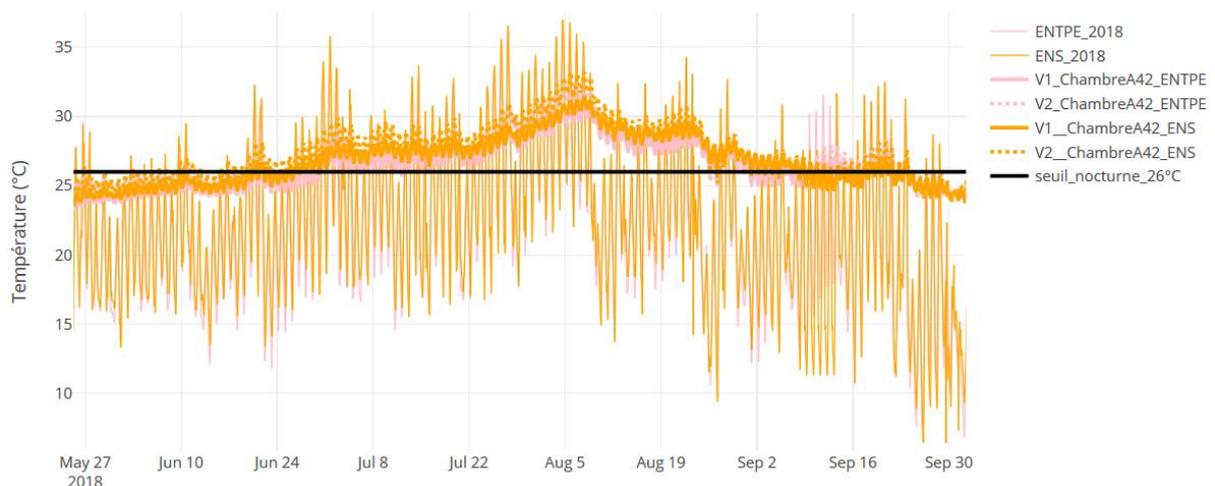


Figure IV. 33 - Evolutions des températures opératives de la chambre du T2 (A42) pour la météo péri-urbaine ENTPE 2018 et urbaine ENS 2018, pour les modes constructifs V1 et V2, en période estivale.

En s'inspirant du tracé *bubbles chart* des canicules (chapitre 2), de nouveaux *bubbles chart* d'ambiance intérieure sont expérimentés en guise que critère sanitaire, centrés sur la période nocturne des vagues de chaleur qui sont les plus problématiques du point de vue de la santé (Laaidi Karine et al., 2012) Figure

IV. 34. Les graphiques sont construits de la manière suivante : l'abscisse transcrit le nombre de nuits consécutives où la température opérative de la chambre n'est pas descendue sous 28°C. Ce seuil de 28°C a été choisi car il est plus adapté au climat lyonnais comparé au seuil de 26°C proposé par l'association anglaise CIBSE ; l'ordonnée traduit l'intensité maximale en exprimant la température nocturne maximale atteinte durant la vague de chaleur nocturne ; enfin, la sévérité est imagée par la dimension des bulles dont l'aire représente le produit de l'intensité moyenne et de la durée (nombre de nuits consécutives).

L'examen des bulles ainsi tracées nous montre que si les durées et intensités maximales des vagues de chaleur nocturnes sont plus élevées pour le mode V2, les écarts observés entre météo urbaine et péri-urbaine sont très similaires pour les 2 modes constructifs V1 et V2 : en milieu urbain, les vagues de chaleur internes durent environ 14 jours de plus et l'intensité maximale est accrue de 0,7°C. Ces observations prouvent l'importance de prendre en compte la surchauffe urbaine en donnée d'entrée météo, notamment dans l'analyse des risques sanitaires relatifs au sommeil. Par ailleurs, cette analyse permet de faire ressortir l'importance de la dynamique des vagues de chaleur. Leur durée est un paramètre critique pour qualifier leur dangerosité.

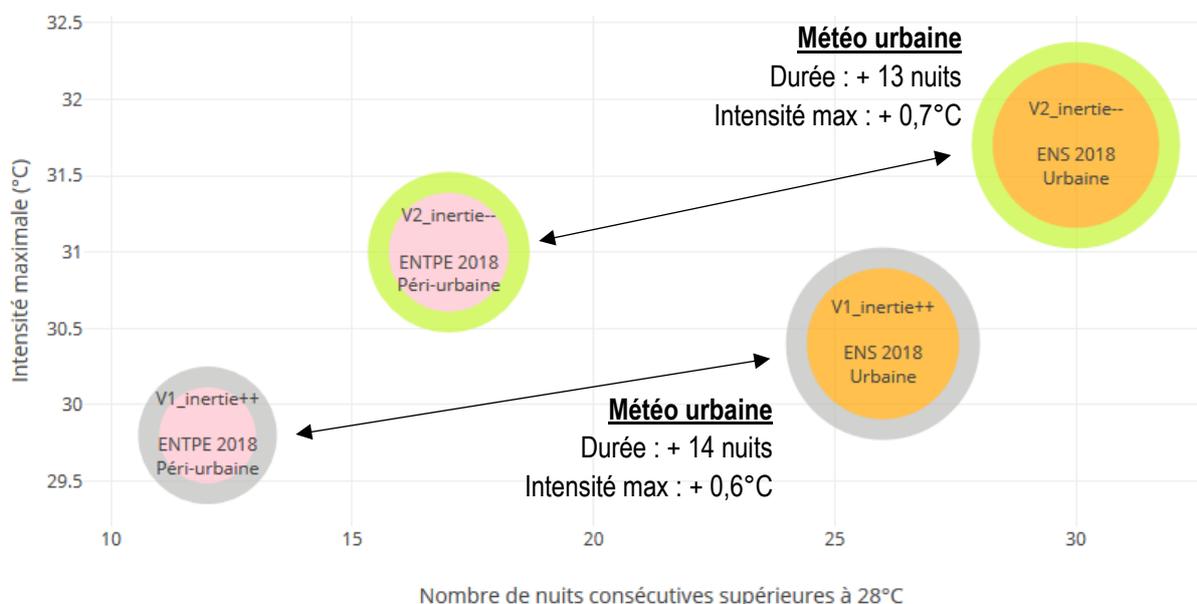


Figure IV. 34 - Vague d'inconfort nocturne de la chambre du T2 (A42) pour la météo péri-urbaine ENTPE 2018 et urbaine ENS 2018, pour les modes constructifs V1 et V2.

IV.4.4 Axe 3 : Aléas climatiques & Niveaux de conception

Cet axe de recherche part de la réflexion suivante : si le climat est de plus en plus chaud et que les besoins en chauffage se réduisent, certains concepteurs pourraient être tentés de diminuer les niveaux d'isolation pour économiser de la matière et réduire les coûts (matière et main d'œuvre). Cette réflexion soulève les questionnements suivants : Est-ce que le fait de moins isoler les bâtiments peut avoir un effet contre-productif pour le confort d'été ? Autrement dit, quel est l'impact des transferts par conduction en été, sur les températures opératives intérieures ? Pour y répondre, les simulations sont effectuées avec la donnée météo de 2003 pour la variante V1 avec différents niveaux de conception (cf. partie IV.1.4),

ainsi que pour une variante supplémentaire « RT2012 » en ITI. Les résultats de confort d'été sont résumés dans le Tableau IV. 6.

		Variante Béton V1														
Commentaires	Infiltrations Q4 en m ³ /h/m ² façade	METEO ENTPE 2003	Séjour (T4 A43)						Chambre (T2 A42)							
			Tmax °C	>26	>28	>32	EN15251 Cat II	Givoni 1m/s	EN15251 + Givoni 1m/s	Tmax °C	>26	>28	>32	EN15251 Cat II	Givoni 1m/s	EN15251 + Givoni 1m/s
			Nombre d'heures d'inconfort en occupation						Nombre d'heures d'inconfort en occupation							
ITI _niveau Standard	1	Variante RT2012_perf1	32,9	465	362	20	72	116	58	32,6	778	564	8	19	137	8
ITE _niveau Standard	1	V1_perf1	32,5	474	354	11	49	102	35	32,1	796	523	1	4	123	4
ITE _niveau Performant	0,8	V1_perf2	32,6	500	375	14	73	105	49	32,2	817	579	1	8	132	7
ITE _niveau Performant	1	V1_perf2	32,5	478	354	10	50	100	35	32,1	801	523	1	4	123	4
ITE _niveau Très performant	0,4	V1_perf3	32,7	538	390	17	98	112	63	32,3	853	639	3	30	141	16
ITE _niveau Très performant	1	V1_perf3	32,5	481	361	10	51	100	35	32,1	807	532	1	3	123	3

Tableau IV. 6 - Confort d'été pour le mode constructif V1 et 3 niveaux de conception, ainsi que pour une variante RT2012 en ITI, pour la météo extrême d'Après-demain.

En première remarque, les niveaux de conception performant et très performant n'offrent pas un meilleur confort d'été que le niveau standard en ITI, et même moins de confort que le niveau standard ITE. Ceci est principalement dû aux écarts de performances de perméabilité à l'air. En effet, dans la simulation numérique, les infiltrations d'air créent du rafraîchissement par renouvellement d'air nocturne. Les niveaux performant et très performant ont été relancés pour un taux d'infiltrations identiques au niveau standard et un Q4 de 1 m³/h/m²façade. A taux d'infiltration équivalent, ces nouveaux résultats montrent un confort d'été quasi identique en configuration ITE pour les niveaux standard, performant et très performant. Il semblerait donc qu'une conductance thermique de paroi en ITE de $U_{\text{paroi}} = 0.25 / 0.20 / 0.15 \text{ W/m}^2/\text{K}$, n'a quasiment pas d'influence sur le confort en été.

La variante RT2012 ITI comporte plus d'inconfort avec un surplus de 23 heures selon le critère EN12251 + GIVONI, ou de 10 heures de dépassement de 32°C, pour le cas du séjour traversant du T4. Ces différences (légères) représentent les heures d'inconfort extrême (et potentiellement des risques sanitaires) qui sont logiquement plus importantes dans la variante en ITI qui se coupe de l'inertie des murs. Si l'on s'intéresse au seuil de dépassement de 28°C, les écarts ne sont pas très élevés voire nuls. Ceci s'explique du fait que même en configuration ITI, le séjour et la chambre bénéficient de l'inertie du plancher, et surtout de celle du plafond qui est primordiale étant donné que la chaleur monte et va réchauffer en premier cette surface. Le plafond, qui plus est, est une surface essentielle pour le confort du fait qu'elle est grandement visible et échange donc largement par rayonnement infrarouge. C'est pourquoi les faux plafonds, qui en camouflant les réseaux qui circulent au plafond camouflent aussi l'inertie des dalles et devraient être évités au maximum.

Si la variante RT2012 en ITI est peu éloignée des autres simulations en ITE, c'est du fait que les différences interviennent principalement sur les niveaux d'isolations. En réalité, les projets de bâtiments conçus pour respecter tout juste la RT2012 sont réalisés avec des budgets serrés qui, pour le cas des ouvertures, poussent souvent à des menuiseries et des volets roulants PVC. Ces mêmes volets roulants, une fois baissés, pour occulter le soleil ou pour éviter les infractions, ne laissent quasiment plus circuler l'air pour ventiler le logement et donner la possibilité aux occupants de gérer leur confort. Contrairement au brise soleil orientable (BSO) qui tout en occultant le rayonnement solaire, peut laisser entrer la lumière naturelle et l'air neuf extérieur.

Variante Béton V1

Bâtiment complet

	Infiltrations Q4 en m ³ /h/m ² façade	METEO ENTPE 2003	BESOINS DE CHAUFFAGE	
			kWh	kWh/m ² SDP
ITI _ niveau Standard	1	Variante RT2012_perf1	160217	40,4
ITE _ niveau Standard	1	V1_perf1	127834	32,2
ITE _ niveau Performant	0,8	V1_perf2	86149	21,7
ITE _ niveau Performant	1	V1_perf2	111317	28,0
ITE _ niveau Très performant	0,4	V1_perf3	73969	18,6
ITE _ niveau Très performant	1	V1_perf3	106050	26,7

Tableau IV. 7 - Estimation des besoins de chauffage en hiver pour le mode constructif V1.

Enfin un bâtiment est aussi conçu pour fonctionner l'hiver et a des besoins de chauffage qu'il est important de minimiser dans nos climats régionaux. Le Tableau IV. 7 présente les besoins de chauffage estimés en fonction des différents niveaux de conception. A U_{paroi} équivalent, le simple fait de passer de la configuration ITI à ITE accorde un gain de plus de 8 kWh/m²SDP en besoin de chauffage. Ces optimisations mènent à une économie de plus de 22 kWh/m²SDP pour la conception très performante. Ces réductions de besoin de chauffage sont données pour des calculs réalisés avec la météo d'Après-demain (2003) qui a un hiver avec une température en moyenne supérieure (environ +1°C, Annexe IV. 8) à celle de la normale 1961-1990 qui est une période considérée comme froide et donc souvent utilisée pour la conception d'hiver. Les différences de besoins de chauffage seraient d'autant plus importantes en utilisant ce jeu de données 1961-1990.

IV.4.5 Axe 4 : Aléas climatiques & Modes constructifs

IV.4.5.1 L'inertie pour lutter contre les pics de chaleur

Tout au long de ce chapitre, les études présentées ont été réalisées suivant 2 modes constructifs, la variante V1 en ITE béton caractérisée par une forte inertie et la variante V2 ITR bois avec une faible inertie. Elles ont permis d'évaluer l'influence des différentes données météo sur le confort d'été : globalement, des niveaux d'inconfort moins importants ont été rencontrés pour la variante à forte inertie, en raison de pics de chaleur lissés. Ces résultats tendraient à promouvoir l'usage du béton dans les bâtiments. Néanmoins, la conception d'un bâtiment ne se réduisant pas simplement aux enjeux de confort, mais devant aussi considérer d'autres paramètres environnementaux (bilan carbone, santé, éclairage naturel, etc...), d'autres alternatives de conception sont proposées. Les constructions bois en sont une, même si elles pâtissent d'un manque d'inertie. Cette dernière peut être apportée par des matériaux comme la brique de terre crue utilisées en parement intérieur ou en cloisonnement. Une simulation simplifiée de cette solution technique a été effectuée uniquement sur les deux zones d'intérêt. Les résultats de confort d'été sont présentés dans le Tableau IV. 8. Par rapport aux résultats en cloisons légères, l'utilisation de la brique de terre crue en cloisonnement apporte une inertie suffisante pour assurer le confort dans le séjour et la chambre.

Propriétés thermiques de la terre crue : (Source : Thèse Théo Vinceslas (Vinceslas, 2019))

Conductivité (W/m²/K)	0,72
Chaleur spécifique (J/kg/K)	840
Densité (kg/m³)	1920

Variante Bois V2

METEO ENS 2018	Séjour (T4 A43)							Chambre (T2 A42)						
	Tmax °C	>26	>28	>32	EN15251 Cat II	Givoni 1m/s	EN15251 + Givoni 1m/s	Tmax °C	>26	>28	>32	EN15251 Cat II	Givoni 1m/s	EN15251 + Givoni 1m/s
	Nombre d'heures d'inconfort en occupation							Nombre d'heures d'inconfort en occupation						
Cloisons légères _ modèle standard CFT	31,7	431	137	0	11	4	0	32,0	785	213	1	21	18	1
Cloisons lourdes _ modèle standard CFT (Briques de terre crue)	29,3	116	24	0	0	0	0	29,6	196	54	0	0	0	0

Tableau IV. 8 - Indicateur de confort d'été pour le mode constructif V2 incluant des cloisons légères (en verte) ou lourdes (en marron) pour la météo urbaine de 2018.

IV.4.5.2 Le confort des matériaux hygroscopiques

Au-delà de l'inertie thermique, la brique de terre crue est un matériau également hygroscopique, c'est-à-dire capable de stocker de l'humidité et de l'échanger avec son environnement. Le moteur de calcul d'EnergyPlus propose d'évaluer les échanges hygrothermiques au travers de deux modèles : un modèle complexe de transfert couplés de chaleur et d'humidité HAMT et un modèle simplifié EMPD (Annexe IV. 9) qui traite le stockage / déstockage de l'humidité en surface des matériaux. Ce second modèle est testé sur les deux zones d'intérêt. Son utilisation requiert de définir un certain nombre de données dans le modèle, comme la profondeur effective de pénétration de l'humidité, le facteur de résistance à la diffusion de vapeur ou encore des coefficients a, b, c, d relatifs à l'isotherme de sorption. Ici, l'ensemble des données est issu des travaux de thèse de Théo Vincelas menés au laboratoire IRDL.

Propriétés hygrométriques de la terre crue :

Facteur de résistance à la vapeur 10

Pour la reconstruction de la courbe de sorption, le modèle EMPD utilise des coefficients listés Figure IV. 35.

Général	
Terre crue_thèse_Theo Vincelas	
Catégorie	<Tout>
Méthode de simulation de transfert de l'humid...	1-EMPD (Effective
EMPD (Effective Moisture Penetration Depth)	
	19.5897433118
Coefficient a	.12
Coefficient b	6
Coefficient c	.05
Coefficient d	.5
Profondeur effective d'humidité (m)	.01714386
(m)	.06
(m)	0
(m)	0

Figure IV. 35 - Saisie Design Builder, caractéristiques de stockage de l'humidité pour la brique.

Les résultats de cette simulation sont présentés dans le Tableau IV. 9 et comparés à ceux obtenus précédemment sans prise en compte des échanges d'humidité. Dans le cadre de notre étude, la simulation effectuée avec le modèle EMPD n'offre pas plus de confort en été sur le séjour ou la chambre. Parfois, le confort est même légèrement dégradé avec des températures sensiblement plus élevées avec

ce modèle EMPD comparé au modèle standard CFT. Cette observation est en accord les résultats de Goffart et al. (Goffart, Rabouille, et Mendes, 2017) pour une construction en briques et un climat chaud et humide.

Variante Bois V2

METEO ENS 2018	Séjour (T4 A43)						Chambre (T2 A42)							
	Tmax °C	>26	>28	>32	EN15251 Cat II	Givoni 1m/s	EN15251 + Givoni 1m/s	Tmax °C	>26	>28	>32	EN15251 Cat II	Givoni 1m/s	EN15251 + Givoni 1m/s
	Nombre d'heures d'inconfort en occupation						Nombre d'heures d'inconfort en occupation							
Cloisons légères _ modèle standard CFT	31,7	431	137	0	11	4	0	32,0	785	213	1	21	18	1
Cloisons lourdes _ modèle standard CFT (Briques de terre crue)	29,3	116	24	0	0	0	0	29,6	196	54	0	0	0	0
Cloisons lourdes _ modèle EMPD (Briques de terre crue)	29,8	132	36	0	0	0	0	30,1	232	75	0	0	0	0

Tableau IV. 9 - Indicateur de confort d'été pour le mode constructif V2 incluant des cloisons légères (en verte) ou lourdes (en marron) pour la météo urbaine de 2018, le modèle EMPD

Une analyse plus spécifique est menée sur le diagramme de Givoni (Figure IV. 36) pour le séjour du T4. Ce graphique regroupe les résultats de la variante V2 faiblement inertielle, de la variante V2 avec du cloisonnement en brique de terre crue résolue soit avec un modèle thermique, soit un modèle hygrothermique. L'apport de l'inertie au niveau des cloisons se traduit par un abaissement de plus de 2°C des températures les plus extrêmes, et donc d'une amélioration des conditions de confort. La prise en compte des transferts hydriques se traduit également par une légère diminution du nombre d'heures d'inconfort d'une part et d'une plus faible variation de l'humidité relative d'autre part. Ces résultats sont en accord avec ceux observés dans le projet « Tâche 2.1: Inertie hygroscopique globale » porté par le CSTB pour prendre en compte l'inertie hygroscopique dans les méthodes de calcul réglementaire (Cosnier, 2017). Toutefois, il convient de préciser que ces résultats ont été obtenus à partir d'une étude préliminaire qui mériterait d'être approfondie.

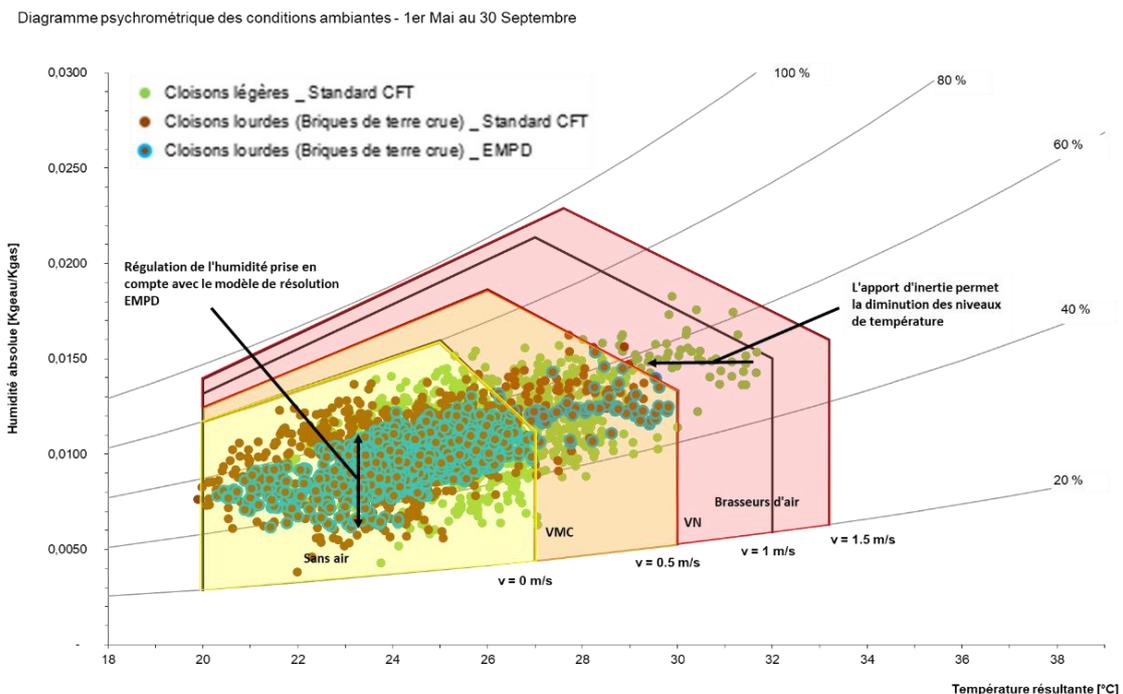


Figure IV. 36 - Confort selon GIVONI sur le séjour du T4 (A43), pour la météo urbaine ENS 2018, le mode constructif bois V2 avec du cloisonnement léger et lourd, et pour les modèles standard et EMPD.

IV.5 Conclusion du chapitre 4

Dans ce chapitre, les notions de confort d'été et de risques sanitaires ont été ciblées pour discuter de l'impact des données météo choisies en études STD lors de la conception de bâtiments de logements. Les extrêmes des météo réelles comparés aux météo fictives ont bien été identifiés aux travers des différentes méthodes de caractérisation du confort, adaptées aux bâtiments de logements non climatisés tels que l'indicateur de GIVONI ou de la norme EN15251. Concernant les risques sanitaires en ambiances intérieures liés aux coups de chaleur, peu de méthodes d'évaluations existent pour aider les concepteurs à proposer des bâtiments adaptés et viables pour les 50 prochaines années. Une représentation *bubbles chart* pour l'étude des « risques sanitaires nocturnes », affichée lors dans l'axe 3, est une perspective qui est proposée dans cette thèse. Elle est inspirée des représentations d'épisodes caniculaires (chapitre 2) faites par les météorologues. Dans la Figure IV. 37, cette représentation est donnée pour l'évaluation de l'impact sanitaire à l'intérieur des logements pour toutes les météo, d'Aujourd'hui - Demain - Après-demain, pour le mode V2 uniquement.

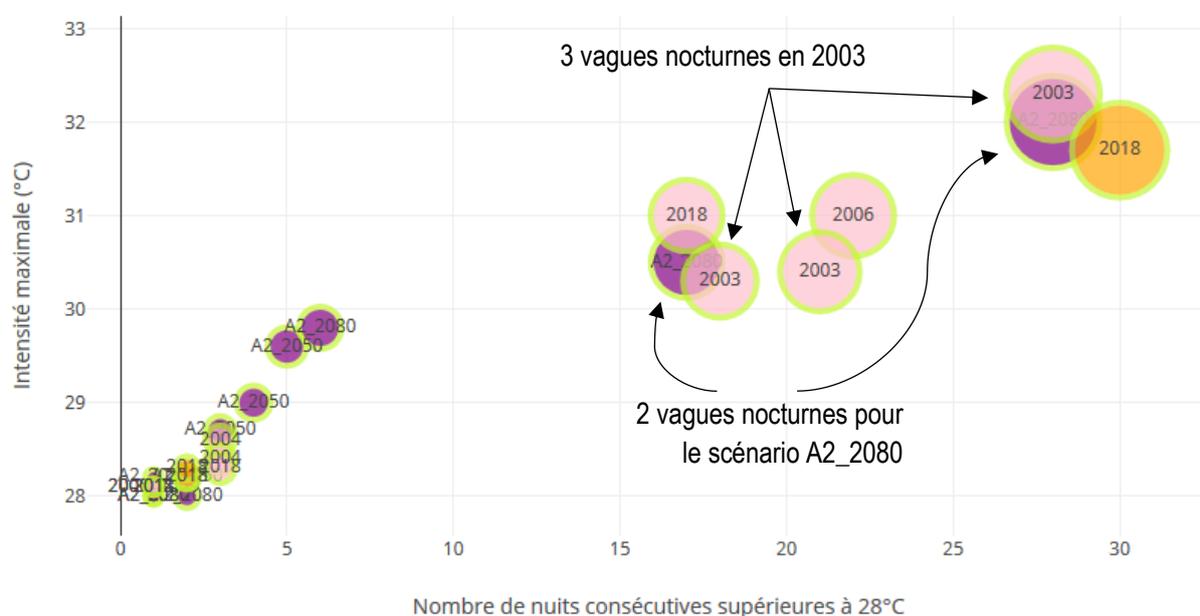


Figure IV. 37 - Vagues d'inconfort nocturne de la chambre du T2 (A42) pour toutes les météo (Aujourd'hui, Demain, et Après-demain), pour le mode V2

Les résultats illustrés dans la Figure IV. 37 illustre une fois de plus que lorsque l'on souhaite qualifier les risques sanitaires sur un local (ici la chambre), le choix du fichier météo a un impact important. Les années de météo réelles 2006, 2018, et 2003, soit les météo de Demain et d'Après-demain, enregistrent au minimum une vague de chaleur nocturne supérieure à 15 nuits consécutives. Pour les années fictives, seul le scénario A2_2080 (Après-demain) dépasse les 15 nuits consécutives où la température reste supérieure à 28°C. Ce graphique est un argument supplémentaire pour dire que l'utilisation de données météo réelles paraît plus pertinente lorsqu'on étudie le confort d'été en STD.

Enfin il est nécessaire de rappeler que ces indicateurs doivent aider les concepteurs à orienter leurs choix, mais ils sont loin d'exprimer une vérité absolue du confort. La notion de confort est difficile à encapsuler dans des critères ou indicateurs qui ne tiendront jamais compte de la multitude de paramètres qui font

qu'on se sent bien, ou moins bien, ou pas bien du tout, dans un espace donné. En effet, pour reprendre l'exemple cité dans le guide de l'ICEB, une personne exposée en plein soleil sur la plage lors de ces vacances d'été serait dans une configuration certainement très inconfortable suivant un indicateur purement physique, alors qu'elle-même recherche cette sensation de farnienté et de repos sous la chaleur associé aux plaisirs des vacances. Le stress, la fatigue, la santé, et la perception de conditions imposées sans possibilité d'agir dessus sont autant de paramètres qui ont leur influence sur la perception de confort du tout un chacun.

Sur des approches sociologiques, centrées sur l'être humain et les études comportementales, certains étudient le confort différemment. Pour exemple, la métropole du GrandLyon a missionné Malou Allagnat, via une thèse CIFRE, sur le sujet suivant : Les Grand Lyonnais face au changement climatique : analyse des potentialités d'adaptation à travers les savoirs et pratiques des habitants. Des premiers résultats ont exposé des différences en termes de stratégie d'adaptation aux vagues de chaleur, différences visibles par quartier où le niveau social varie. Ainsi, sans tomber dans la généralisation, pour le quartier réputé aisé du 6^{ème} arrondissement lyonnais certains citadins racontaient qu'ils avaient pour habitude de partir se rafraichir à la montagne les week-ends d'été. Quand d'autres habitants, du quartier populaire voisin de la Guillotière (3^{ème} arrondissement), expliquaient leur principe de « climatisation africaine », soit le fait de faire une machine à laver puis d'étendre le linge humide devant un ventilateur mobile pour orienter un courant d'air frais lors des vagues de chaleur. Un autre commentaire évoquait quant à lui le fait de changer complètement les fonctionnalités des pièces d'un même logement, en fonction de l'orientation de celles-ci et de la période de l'année. Cette remarque pourrait être une idée prise en compte par les concepteurs de bâtiments pour favoriser cette modularité du logement en fonction des saisons.

TROISIEME PARTIE

Utilisation des modèles climatiques urbains pour renseigner les données météo en simulation thermique du bâtiment

La première partie de la thèse a mis en évidence les limites des fichiers météo moyennés pour représenter le plus fidèlement possible le changement climatique et la surchauffe urbaine. Aussi, une méthodologie a été proposée pour sélectionner des fichiers météo mesurés caractérisant les climats d'Aujourd'hui, de Demain, et d'Après-demain d'une part et le climat urbain d'autre part. Ces diverses données météo ont été utilisées dans la seconde partie de la thèse pour effectuer des STD d'un bâtiment de logement collectif. Les résultats ont souligné l'importance de la donnée météo sur la prédiction des performances énergétiques, mais surtout du confort. Ces observations sont valables tant pour deux modes constructifs que pour différents niveaux de performance de l'enveloppe du bâtiment.

Par conséquent, il est légitime de vouloir transposer cette démarche pour n'importe quelle autre ville que Lyon. Or, toutes les villes ne bénéficient pas d'une ressource aussi abondante de données météo en accès libre. La sélection de fichiers météo représentatifs du changement climatique pourrait se faire soit au travers d'une analyse préliminaire de données météo disponibles sur Infoclimat, soit à l'aide des analyses déjà proposées par Météo France. Une fois les fichiers sélectionnés, les données horaires peuvent être achetées directement à Météo France à hauteur de 376 € pour une année et par paramètre, soit environ 4500€ pour la température, l'humidité, les vitesses et directions de vent, et le rayonnement solaire des météo d'Aujourd'hui, Demain ou Après-demain. Pour l'identification d'un fichier météo pour représenter la surchauffe urbaine, il faudrait disposer de stations météo urbaines. Si elles existent, ces stations ne fournissent pas nécessairement tous les paramètres météorologiques ; si elles n'existent pas, leur déploiement serait coûteux et ne fournirait des données qu'après au moins une année de service. Une alternative consiste alors en l'utilisation des outils numériques de la climatologie urbaine pour produire des données climatiques locales à partir des données péri-urbaines mesurées par Météo France. Cette alternative est testée dans cette troisième partie de la thèse. Pour cela, un état de l'art préliminaire des outils numériques du climat urbain et de leur lien avec les outils STD est proposé dans le Chapitre 5. Le Chapitre 6 vise à tester l'utilisation couplée des outils CitySim et CIM le cas d'étude de Confluence à Lyon

V CHAPITRE 5 Chainages et couplages de modèles climatiques urbains et d'outils de STD : ETAT DE L'ART

V.1	REVIEW - HOW BUILDING ENERGY MODELS TAKE THE LOCAL CLIMATE INTO ACCOUNT IN AN URBAN CONTEXT	148
V.2	CONCLUSIONS DU CHAPITRE 5.....	168

Les outils de climatologie urbaine sont développés depuis le début des années 2000. Complexes et pas toujours conviviaux, ils restent à ce jour essentiellement utilisés dans les laboratoires, réservés pour l'instant à un nombre restreint d'experts. Ce chapitre étudie les chainages ou couplages entre les modèles de climat urbain (MCU) et les STD. Nous présentons ici l'article de synthèse « How Building Energy Models take the local climate into account in an urban context » publié dans la revue « Renewable and Sustainable Energy Review » (Lauzet et al., 2019), dans lequel à la suite d'un état de l'art des outils de STD (similaire à celui présenté en chapitre 3), un état de l'art des outils de MCU a été réalisé.

Nous voulons ici mettre en avant 2 parties de l'article : la première et la troisième.

La première partie de cet article fait une présentation des outils de climatologie urbaine avec leurs échelles de travail, à savoir l'échelle urbaine, quartier, ou plus précisément une rue unique. Dans cette partie, nous faisons ressortir les sorties climatiques des modèles qui peuvent être d'intérêt pour la thermique du bâtiment.

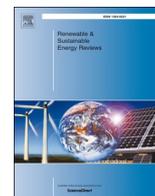
La deuxième partie fait un état de l'art des outils de STD analogue à celui du Chapitre 3 pour exposer les capacités des outils STD. Le point d'intérêt est qu'elle insiste sur la manière de représenter les sollicitations extérieures et les liens avec le climat urbain.

Enfin, la troisième partie analyse huit chainages ou couplages entre outils MCU et STD. Ces huit solutions donnent une bonne vision d'ensemble de ce qu'il est possible de faire aujourd'hui dans cette communication inter-échelle, de l'ilot urbain vers le bâtiment. Deux angles d'analyse sont plus particulièrement approfondis :

- Dans quel cadre d'analyse ces couplages sont-ils utilisables (impact ICU, impact des solutions d'adaptation, etc.) ?
- Quels sont les phénomènes pris en compte dans le couplage ?

Par ailleurs cette analyse critique expose aussi les capacités des chainages ou couplages au regard des échelles spatio-temporelles qu'elles sont en mesure de simuler. Aussi, chaque couple MCU + STD est classé suivant la catégorie chainage ou couplage. Le chainage décrivant un lien unidirectionnel de l'outil MCU vers la STD, et le couplage évoquant la rétroaction des résultats STD sur la simulation MCU pour le pas de temps suivant.

V.1 Review - How Building Energy Models take the local climate into account in an urban context



How building energy models take the local climate into account in an urban context – A review

Nicolas Lauzet^{a,b,*}, Auline Rodler^{c,d}, Marjorie Musy^{d,e}, Marie-Hélène Azam^{d,e}, Sihem Guernouti^{d,e}, Dasaraden Mauree^f, Thibaut Colinart^b

^a TRIBU, Environmental and Sustainable Development Consulting Agency, 69003 Lyon, France

^b Univ. Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, F-56100, Lorient, France

^c Ensa Nantes, CRENAU UMR CNRS/ECN/MCC 1563, F-44200, Nantes, France

^d Cerema, Equipe-Projet BPE, F-44000, Nantes, France

^e Univ. Nantes, CNRS UMR 6183, GeM, F-44000, Nantes, France

^f Solar Energy and Building Physics Laboratory, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, CH-1015, Switzerland

ARTICLE INFO

Keywords:

Urban climate modeling
Building energy model
Coupling/chaining simulation tools

ABSTRACT

The urban context is often simplified or neglected in Building Energy Models (BEMs) due to the difficulties of taking accurately into account all the heat fluxes emanating from the environment. Oversimplifying the urban context can impact the accuracy of the BEM predictions. Nevertheless, several approaches can be used to allow for the impact of the urban environment on the dynamic behavior of a building, its heating and cooling demands, and thermal comfort. This state of the art review provides a critical overview of the different methods currently used to take into account the urban microclimate in building design simulations. First, both the microclimate and building models are presented, focusing on their assumptions and capabilities. Second, a few examples of coupling, performed between both modeling scales are analyzed. Last, the discussion highlights the differences obtained between simulations that take the urban context into consideration and those that simplify or neglect urban heat fluxes. The remaining scientific obstacles to a more effective consideration of the urban context impacting the BEMs are indicated.

1. Introduction

1.1. Context

In Europe, buildings are responsible of about 40% of final energy consumption [1]. In the framework developed with new energy policies, the building sector is urged to improve energy performance: new construction should move towards Nearly Zero Energy Buildings (NZEB), while efficient retrofit should be done on the existing building stock. To meet these objectives, Building Energy Models (BEM) are powerful tools to evaluate various technical solutions and opportunities.

In their review, Fouquier et al. [2] listed three approaches for predicting building energy performance: “white box”, “black box”, and “grey box”. The first is based on physical models for evaluating thermal dynamics and energy behavior on components or whole buildings. This approach is currently the most widespread as highlighted by the hundreds of software tools available [3]. The second uses statistical

techniques to estimate heating or cooling needs of buildings. The third approach, called hybrid method, uses both physical and statistical techniques.

BEM require inputs like geometrical and construction data, usage schedule and occupancy or meteorological data in order to calculate heat and mass flows in and around buildings. Particularly, six heat fluxes may be considered on buildings’ external surface:

- The convective heat flux at the external surface: it depends on both the near-wall air velocity and local variations in outside air temperature [4].
- The solar radiation exchange: it depends on the shading, the optical characteristics of the building’s surfaces and of the surrounding ones [5].
- The Long-Wave (LW) radiation exchange with the sky and surrounding surfaces: it depends on form factors, temperature and emissivity of the building’s surfaces and of the surrounding ones [6].
- Heat losses due to ventilation and air infiltration: they depend on

* Corresponding author. TRIBU, 103 avenue de Saxe, 69003, Lyon, France.

E-mail address: lyon@tribu-concevoirdurable.fr (N. Lauzet).

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109390>

Received 4 February 2019; Received in revised form 9 August 2019; Accepted 11 September 2019

1364-0321/ © 2019 Published by Elsevier Ltd.

the flow rate driven by the gradient of pressure on the building's facades as a result of wind velocity and local variations in outside temperature [7]. Inlet air humidity brought by ventilation can also have an impact on air conditioning latent heat load [8].

- Thermal conduction through walls: internal or external insulation lead to different internal and external surface temperatures, thus also influencing the exchanges between the indoor and outdoor environments.
- Latent heat fluxes due to hygrothermal transfers: similar to heat transfer, moisture transfer may occur through the wall and depends on internal and external relative humidity.

These fluxes are usually evaluated for stand-alone buildings by using weather datasets including air temperature and relative humidity, wind velocity and direction and solar radiation at least. Nowadays, numerous datasets are available for multiple regions worldwide in viable format (TRY, TMY, etc.), even if they are provided for reference weather stations, that are located outside the cities.

In urban context, the local microclimate and the heat fluxes exchanged between a building and its environment are different [9]. For instance, the geometrical environment is more complex: on the one hand, surrounding buildings cause shadowing effects which reduce solar gains during the daytime; on the other hand, the sky view factor is decreased which limits the radiative cooling to the sky. In addition, solar and infrared interreflections are increasing with neighboring buildings' surfaces. Because of urban morphology, local wind speeds are lower and airflows around buildings are modified. Last, Urban Heat Island (UHI) effect results in higher air temperatures.

All the above-mentioned phenomena influence the prediction of buildings energy performance [10–17] and may be one of the causes explaining the gap between targeted and measured buildings performances [18–21]. Therefore, it is relevant to explore methods that account for the local microclimate and the effect of neighboring buildings when conducting energy simulations.

1.2. Previous reviews and overview of this paper

To date, numerous reviews have been conducted at the building or urban scale.

BEM are usually classified into top-down and bottom-up approaches [22]. The second approach being more widespread in the building community, other reviews classified them according to the methodology: engineering methods, statistical methods, artificial intelligence models, machine learning and hybrid methods [23–25].

In recent years, the scientific knowledge on urban climates has improved at all scales of interest: from the street (micro) scale through the neighborhood (local) to the city and regional (meso) scale [26–29]. Therefore, previous reviews have covered recently aspects of the field of Urban Climate Modeling (UCM) [30–32]. In 2007, Kanda [30] presented a short overview of simulation techniques and distinguished “simple” urban canopy models from CFD models. Later, Lun et al. [31] classified various tools into mesoscale meteorological models, microclimate models, building models and human thermal models, for urban climate studies. In the framework of an international project, Grimmond et al. [32] compared 33 urban land-surface models in terms of accuracy and complexity. Since microclimate models are composed of CFD, radiation transfer and heat conduction models, some state-of-the-art focus rather on one of these three subcategories [6,33,34].

In the last 5 years, previous reviews have covered also hybrid modeling approaches between the building scale and the city scale; the most relevant are summarized below.

Allegrini et al. [35] reviewed modeling approaches that address district-level energy systems, namely district energy systems, renewable energy generation and urban microclimate as it relates to energy demands. The authors highlighted the possibilities of twenty tools in a simple comprehensive matrix.

Anderson et al. [36] proposed a broad overview of main research area at building and urban scale. They argued that the interaction between both scales should be considered in particularly to account for induced impacts in life cycle assessment studies.

Reinhart and Cerezo Davila [37] reviewed bottom-up urban building energy models (UBEM). Their review focuses on the energy performance of neighborhoods (several dozens to thousands of buildings). After discussing the validity of UBEM, the authors underlined that uncertainty and the definition of level of investigation remain the main challenges.

Li et al. [38,38] listed top-down and, more in detail, bottom-up approaches for implementing urban-scale building energy models (UBEM). In addition, they discussed the recent advances in the integration of geospatial techniques in UBEM. They noted that there are still challenging issues associated with model preparation and calibration.

Frayssinet et al. [39] reviewed existing computational approaches to estimate heating and cooling energy demand of buildings from individual building in urban environment to city scale. The authors suggested that finding relevant physical and mathematical simplifications and implementing efficient numerical and computational techniques are crucial issues for urban energy micro-simulation.

Sola et al. [40] limited their review only on Urban-Scale Energy Modeling (USEM) (at the district or city level). They focused their work not only on building energy demand modeling, but also building energy supply modeling and energy transportation models (even if the methods on how to couple these models are not discussed).

Castaldo and Pisello [41] proposed an extensive overview of BEM possibilities and questioned on how to simulate buildings in realistic dense urban environments. In their conclusions, the authors call for extending multiscale simulation approaches between BEM and UCM.

These previous reviews focused mainly on modeling of energy demand of several buildings in urban level. The general consensus is that physically-based bottom-up methods seem to be the most interesting for catching the physical phenomenon in spite of computational cost and uncertainties. These methods rely on the modeling of stand-alone buildings in built environment. Unfortunately, only a general overview of the last point is given in the previous reviews. Our review aims to address this topic through a more focused and detailed examination. Particularly, we detail the heat fluxes exchanged between a building and its environment, how they are taken into account at both modeling scales, and how the coupling attempts have managed to represent these fluxes.

The aim of this paper is twofold. First, Section 2 and Section 3 give an overview of the kind of local data provided by UCMs (variables, spatial and temporal discretization) and of the different ways BEMs take fluxes into account at the building's external surface, respectively. Second, through the analysis of eight examples of coupling or chaining attempted in research works in Section 4, we show what kind of strategies has already been carried out, analyze the encountered difficulties, the capacities of the resulting tools and how these attempts enhanced our understanding of the physical phenomena occurring between these scales. In the discussion (Section 5), we analyze the issues that must be addressed, especially in terms of the spatial and temporal description of the local climate and buildings, but also arising from the assumptions that are made in the physical modeling of the microclimate or of the building. This could bring to new developments for the use of BEM directly coupled with UCM.

2. Urban Climate Modeling

UCM is usually performed at different scales related to the land surface represented and the resolution at which balance equations are written [26]. At the mesoscale, a whole city and its surroundings (suburban and rural areas) can be examined over a zone of several kilometers. At the local scale, a district is extracted from its urban

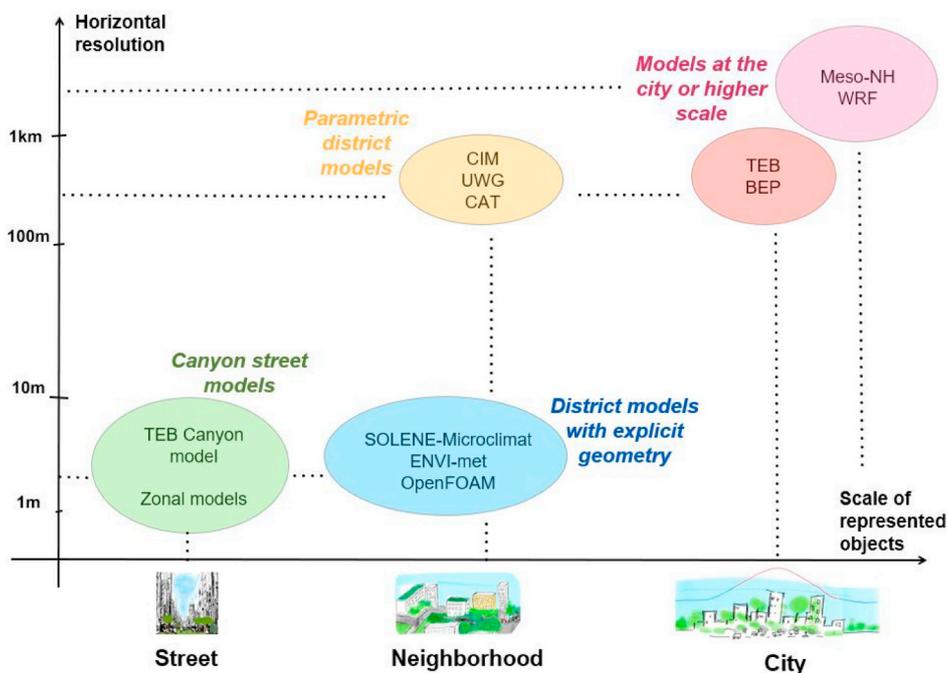


Fig. 1. Classification of UCMs in terms of their spatial study scales and resolution.

context, and climate solicitations are specified for an area whose dimensions range from hundred meters to a few kilometers. This scale allows for the representation of the meteorological phenomena in the urban canopy layer (UCL). Building forms, materials, natural surfaces, etc. can be considered explicitly or through mean parameters (rugosity, albedo, etc.). At the microscale, an urban zone of a few meters or a hundred meters is examined, and physical processes can be computed in more detail (~ 1 m). In Fig. 1, we classify the models detailed in the paper, using two criteria: spatial scale of the represented areas (in terms of urban scale) and the horizontal resolution (the horizontal size of the mesh elements used in the model). These spatial scales are also closely linked to the temporal scale.

2.1. City-scale models

The impact of urban areas can be examined at the city scale to estimate meteorological patterns. The domain for such models usually extends both horizontally (beyond the urban areas) and vertically (above the urban boundary layer) [42]. The local characteristics are hence parameterized, as the low horizontal resolution of the horizontal grid cells does not allow for an explicit representation of the urban areas. The results are obtained for homogeneous cells, the dimension of which is generally more than 200 m. At this scale, it is, for example, worth analyzing the interactions between the urban surface and the urban boundary layer in the development of the UHI over a city [43].

2.1.1. MESO-NH & TEB

The MESO-NH model [44] is a non-hydrostatic mesoscale model that has been applied in many studies of climate change impacts at city scale [45–47]. A comprehensive surface model, SURFEX [48], is integrated and includes the Town Energy Balance (TEB) model. TEB is a single layer urban canopy model [49] that incorporates multiple urban parameterizations. In MESO-NH, a city is discretized, and at each grid point, TEB shows the average characteristics of the local environment as a single urban canyon composed of a ground-based surface bordered by two flat-roof buildings of same height. The urban environment is thus described based on four distinct elements that compose the urban canyons: *roof*, *wall*, and for the ground-based surfaces, a combination of impervious and natural covers referred to as *road* and *garden*,

respectively. It can be highlighted that recent development of the models included the integration of trees [50]. For each urban facet, the model computes a radiation budget and a surface energy balance. It also resolves an equation of the temperature evolution with a single surface temperature associated with each facet. For natural soils and vegetation, the radiative and energy exchanges with the atmosphere, and the hydrological and thermal processes in the ground are parameterized with the interaction soil–biosphere–atmosphere model (ISBA) [51]. Such a representation, based on the canyon analogy, has the advantage of taking into account the urban context and the location of the site in the city. It provides mean microclimatic values (temperature in the canopy, wall roof and soil surface temperatures, net radiative fluxes, wind velocity) for the cell, but not the accurate value for a building depending of the other surfaces arrangement. TEB can also be run alone with 1D meteorological forcing [52] (see section 2.3).

2.1.2. Weather research and forecast model & BEP

The Weather Research and Forecast (WRF) model [53,54] integrates three urban schemes [55]. The first one is the SLAB model that does not include the canopy parameters [56]. The second one is the Urban Canopy Model (UCM) [57,58] with properties similar to the TEB model. The last one, the Building Effect Parameterization (BEP) [59], is integrated into WRF. The BEP is a multi-layered canopy model that provides direct interactions with the planetary boundary layer (PBL). It includes the vertical and horizontal surface impacts on the momentum, temperature, and turbulent kinetic energy (TKE). A turbulent scheme based on [60] is also integrated into WRF to include a source TKE term that also uses modified turbulent length scales. A BEM has also been introduced to improve the representation of the buildings and to include anthropogenic heat fluxes [61,62]. Additionally, CIM has also been recently integrated in WRF to improve the computation of high resolution vertical profiles within the urban grid cells.

2.2. District scale models

At the district scale, we distinguish two families of models. The first one brings together models that do not represent the urban shapes explicitly but use parameters that translate their impact. They produce homogeneous data for the district examined. The second one includes

models that use the geometrical representation of the district and mesh it so that they explicitly resolve the governing equation for the inter-exchanges.

2.2.1. Parametric models

For parametric models, the climate characteristics are assumed to be constant in the UCL, in terms of the urban shapes, surfaces, materials and vegetation, etc.

- UWG and CAT

The Urban Weather Generator (UWG) [63], and the Canyon Air Temperature (CAT) models [64], start from one point of measurement outside of the city exposed to the same mesoscale climatic conditions, such as an operational measure station at an airport or standardized weather files [65].

The UWG is based on energy conservation principles and is a bottom-up building stock model. It uses input parameters that describe urban morphology, geometry, and surface materials. The UWG has four coupled modules: the rural station model (the forcing temperature), the vertical diffusion model, the urban boundary layer model, and the urban canopy and BEM. This chain of models makes possible translating rural temperatures into urbanized ones for a specific site in the city. It can be extended for simulations at the city scale. From the UWG [66], have developed the spatial urban weather generator (SUWG), which computes (horizontally) a 2D field for the temperature above the UCL and takes into account wind advection and height of the boundary layer depending on the weather type.

The CAT model can be used to simulate the air temperature in a specific site of a city. However, due to the lack of advection processes, it cannot be used to simulate regional/city-scale UHI.

- CIM

The Canopy Interface Model (CIM) is a 1D meteorological model [67] that can be either coupled with a 3D meteorological model (such as the WRF [54,68]) or used in an offline mode as a stand-alone module [11,69]. In such a case, the meteorological variables used as boundary conditions for the top cell of the column are usually taken from a climatic dataset. The district or block geometrical characteristics (building characteristics, street widths, and number of cells where buildings are present) are also given as input to the model. The CIM stands out from other canopy models by its ability to show different building sizes in the x or y -direction, and it can also calculate an adaptive mixing length along the z -axis based on the density in each cell. The CIM solves a diffusion equation derived from the Navier-Stokes equation reduced to one-dimension and calculates high-resolution vertical profiles of meteorological variables (wind speed, wind direction, and air temperature). It includes a 1.5-order turbulent closure scheme and resolves locally the turbulent kinetic energy by considering the obstacles present in the canopy, which is usually not the case in other canopy models [67].

2.2.2. Explicit models

An explicit 3D shape of the area of interest is modeled in these UCMS. The urban surfaces and the surrounding air volumes are meshed, which provides a detailed representation of the microclimatic variables around the buildings.

- ENVI-met

ENVI-met [70,71] is a widely used tool that includes air flow, heat and moisture exchanges, and vegetation. The scene representation is pixelated with a typical horizontal resolution ranging from 0.5 to 5 m. The aerualic flow is resolved using a computational fluid dynamics (CFD) simulation. Only the absorbed and reflected shortwave (SW)

radiative flux densities are calculated (inter-reflections are not included). Longwave (LW) radiation and conduction in walls has recently been added using a simplified scheme (including the mean temperature of walls and soil and fixed view factors) [72]. The surface-plant-air interactions model is very detailed and documented to assess the effects of green architecture visions on local comfort conditions. The typical simulation period is 24–48 h with a time step of 1–5 s.

- SOLENE-Microclimat

SOLENE-Microclimat is the result of the coupling of two tools, Code-Saturne [73] (a CFD open source code developed by EDF) and SOLENE (a radiative tool [74]), to which different modules have been added to represent conventional built elements (conduction in paved soil, building thermal models) as well as natural elements and climate adaptation solutions (trees, natural soil, green roofs and walls, water ponds, pavement watering). Because of a flexible geometry representation, all kinds of geometry aspects can be handled. The canopy is meshed to run CFD simulation and the lower boundary of this mesh corresponds to the surface mesh used by SOLENE and the building model. At each time step, the absorbed solar radiation of each facet is computed as the result of the direct and diffuse solar radiation received by the facet directly from both the sun and the sky, plus reflections from all other facets in view, minus the reflected flux away from the surface. To link the different fluxes, a thermal model incorporates LW radiation, conduction and storage in built surfaces. The LW radiation is calculated from surface temperatures using the radiosity method [75,76]. For one building, energy balance can be applied; it is partitioned according to its floors, and the choice is given to assess the energy needed to maintain comfort conditions or to evaluate comfort using the adaptive comfort model. Conduction is represented by a 1D detailed finite difference model [77]. For the other buildings (in which balance is not calculated), the indoor temperature is imposed, and the conduction model is a lumped-capacitance R2C one [78]. As a result, outdoor air temperature and humidity, wind velocity, and surface temperatures can be calculated in the mesh so that the impact on the local climate characteristics of the planning can be evaluated, together with more integrated indexes such as comfort indexes (MRT, PET, UTCI). Indoor comfort conditions or building energy demands can be assessed for the building for which energy balance is calculated.

2.3. Street models

The street scale is the lowest scale at which the local climate is examined. The street defines a confined air volume bordered by walls, in which the solar trapping effect and airflow regimes can easily be defined. As seen in section 2.1.1, the canyon model on which TEB is based can be used alone to study a particular street [50].

Bozonnet [79] proposes a zonal model of a canyon street including airflow and heat transfer (radiation, convection, conduction). Solar radiation is the only driving force in the street air movement. The value of such an approach is to show the interaction between the street and the buildings and to take into account the impact of cooling loads on the air temperature within the canyon [79]. This kind of model has also recently been developed by Liang et al. [80] with the aim of assembling several canyons and linking the local climate with the energy balance of buildings.

2.4. Discussions

The list of tools presented in this section is not meant to be exhaustive; other tools can be used to calculate fluxes above a district, such as Lazer-F [81], or energy needs at the district scale, such as EnviBatE [82].

Table 1 summarizes the different physical processes taken into account in the models presented for each scale.

Table 1
Summarizing of climatic tools features.

Scale	Tools	Air temperature	Wind velocity	LW Radiation	SW Radiation
City	MESO-NH + TEB	mean in a 200*200 m array	mean in a 200*200 m array	mean per surface type in a 200*200 m array, considering all surfaces temperatures + Sky radiation	mean per surface type in a 200*200 m array, considering inter-reflections
Neighborhood	WRF + BEP ENVi-met	value at the center of the grid cell Locally around the building	value at the center of the grid cell Locally around the building	BEP- values for each facade orientation On all building facets, calculating incoming sky radiation and using mean temperature of wall, ground and vegetation	BEP- values for each facade orientation On all building facets, but only incident radiation minus reflected one.
Street	SOLENE-Microclimat UWG/CAT CIM TEB (canyon) Zonal models	Locally around the building mean for a location in the city mean for a location in the city Vertically in the street Calculated in each cell of the zonal partition of the canyon	Locally around the building mean for a location in the city mean for a location in the city Vertically in the street A velocity vector at each interface between zones	On all building facets, considering inter-reflections + Sky radiation same as TEB same as BEP Mean per facet (each side of the street is a facet), taking into account all surface temperatures + Sky radiation Bozonnet [79]: a simplified SW radiation model considering inter-reflections	On all building facets, considering inter-reflections same as TEB same as BEP Mean per facet (each side of the street is a facet) considering inter-reflections Bozonnet [79]: a simplified LW radiation model considering inter-reflections

3. Building energy modeling

The first building energy simulation programs appeared in the 1960s (DOE-2 or BLAST in the U.S.). As they were designed in the days of mainframe computers, expanding their capabilities further became difficult, time-consuming, and prohibitively expensive. Next, significant advances in analysis and computational methods and power occurred, providing an opportunity for significant improvement of these tools. Then, in the 1990s, models such as EnergyPlus (U.S.) [83] or Comfie (France) [84] appeared, and some of them were sold to software companies in the 2000s. Since the 2010s, these numerical tools have often been used to help decision makers for building design projects.

BEMs are still improving, taking more phenomena into account, to propose a better representation of the complex reality. In this paper, the potential, the assumptions, and the accuracy level are detailed for the following widespread models: TRNSYS [85], Design Builder, Pleiades [84], EnergyPlus [83], BuildSysPro [86], CitySim [87], and Virtual Environment. Since Design Builder uses EnergyPlus as a calculation model and facilitates simulation with its user-friendly interface, the capabilities of EnergyPlus and Design Builder are deemed to be the same; hence, they are examined as one software (the last version of Design Builder V5 allows people to load their own EnergyPlus model). Although CitySim [87] is not primarily used at the building scale, we included it in our analysis as there are not many BEMs working at the district scale. Before exploring the BEMs, we can already differentiate BuildSysPro and EnergyPlus from the others as they are mostly used in research. Even if the others are also used in research projects, they are first adapted to be convenient and user friendly for engineers working in a consulting agency. Tittlein [88] classifies the dynamic BEMs into two categories: the “monolithic” software tools and the modular ones. Pleiades, in the first category, does a good job for building envelope design. In the second category, BuildSysPro, TRNSYS, and EnergyPlus, with all their modules, can offer coupled studies as for example between a building and a specific Heating Ventilation and Air-Conditioning (HVAC) system. As specified in the introduction section, we only focus on the way BEMs take into account local climate conditions.

The following subsections show the comparisons of BEMs regarding the different fluxes, summarized in tables: conductive heat transfer, solar radiations, infrared radiations, flux linked to aeraulic systems, and hygrometry.

3.1. Heat transfer by conduction in the building envelope

In the BEMs, the 1D transient heat conduction through walls, floors and roofs are modeled using computational transfer function (CTF), finite difference (FD), finite element (FE) methods or model order reduction techniques. For the CTF case, the Direct Root-Finding (DRF), State-Space (SS) and Frequency-Domain Regression (FDR) approaches are used to determine the CTF coefficients. In TRNSYS, the DRF approach is found, whereas EnergyPlus uses the SS one. Both can cause errors that increase depending on the reciprocal of the product of the Fourier number and the thermo-structural characteristics of the building. In other words, for small time steps (inferior to 15 min), the more the building is insulated and inertial, the bigger are the errors. With the FDR approach, the simulation error is always inferior to 1% (Delcroix et al. [89]). However, compared to DRF and SS approaches, the FDR one is time consuming. Additionally, when considering the computational resources, the CTF solving method is faster than the FD one, but the finite difference gives better accuracy results for short time steps simulation [90]. Pleiades, Virtual Environment, and EnergyPlus use one dimensional FD method [84,91,92]. In Pleiades, the model is reduced by modal analysis in order to improve calculation times [84]. CitySim uses a simplified method by making an analogy with an electrical circuit with resistance and capacitance, which offers a good compromise between simplicity, data requirements, and computational time [93].

Table 2
Methods used to solve conductive heat transfer through the walls.

BEM	Transfer function	Finite Difference	Finite Element	Model Order Reduction	Simplified models
TRNSYS PLEIADES	Heat transfer: Z- transfer function [89]			Heat transfer: Finite Difference model reduced by modal analysis [84] Can be used	
BuildSysPro EnergyPlus	Can be used Heat transfer: CFT response factor.	ThermalHeat Transfer (modelica library) For phase change material or variable thermal conductivity:	Can be used Heat and Moisture Transfer (HAMT) model [83]		
DesignBuilder Virtual Environment CitySim	Moisture transfer: Effective Moisture Penetration Depth (EMPD) model	Crank-Nicholson semi-implicit or Euler implicit scheme [92]. Euler implicit scheme [91]			Resistance-Capacitance model

An interesting option for coupling 1D thermal and moisture transfer is available in EnergyPlus: the Heat and Moisture Transfer (HAMT) Model [83]. It uses the FE method. However, the HAMT option is about 100 times more time consuming for simulation than the standard one, the CTF [16] (Table 2).

3.2. Solar radiation

Solar radiations plays a major role in the building energy balance and indoor comfort. In temperate climates, maximizing the solar gains in winter and minimizing them in summer is the biggest challenge for all building design projects. Therefore, it is important to know how the BEMs take this phenomenon into account. Solar radiation is divided into three components: direct, diffuse, and inter-reflection.

3.2.1. Direct, diffuse SW incoming radiation

All BEMs take the direct and diffuse part of solar radiation into consideration, and most of them take into account the shading of neighboring buildings. A sky-view factor can be calculated to obtain a more precise computation of the incoming solar radiation. Other far masking effects from distant obstruction, such as topography, can sometimes be included.

The direct and diffuse SW incident flux on a component (e.g. wall, window) is either partly absorbed and/or partly transmitted, depending on the type of surface. The transmitted part is then distributed over the interior building surfaces either by solar tracking [88,94] or through a weighted method. Different weighted methods can then be used: it can be affected directly to the floor, or spread by geometrical parameter of the surface (i.e. the surface area ratio).

3.2.2. SW radiation: inter-reflection

Calculating solar inter-reflection between building surfaces and the surrounding ones requires geometrical simulation and the knowledge of surfaces albedo. It is the reason why the BEMs commonly take into account only the reflection from the soil in a unidirectional way (i.e. a part of the solar flux received by the soil, which is reflected towards the building wall). The ground plane is considered to be unobstructed, the shadowing of the ground by the building itself or by other obstructions is ignored. Design Builder provides a “reflection option”. In this case, building surfaces reflect solar radiation onto another section (and vice-versa). The building surfaces are assumed to be reflecting diffusely if they are opaque and specularly if they are windows or glass doors. The shadowing of the ground is taken into account if the reflection option is used. CitySim takes a slightly different approach. A surface energy balance is conducted for each of the surfaces in the model, thereby accounting for both the inter-reflection and the shadowing between the buildings (Table 3).

3.3. Infrared radiation

Two bodies at different temperatures and in co-visibility with each other tend to exchange energy by LW radiation (infrared) in order to reach an equilibrium. These exchanges occur inside and outside the building. When studying them, the difficulty is that all surrounding surfaces must be taken into account, including the sky. The exchanges will be calculated between each surface of the building and all the others, the temperature and emissivity of which must be known. Moreover, in these calculations, the surface temperature appears with an exponent 4, which complexifies calculations. Infrared calculations thus require the thermal calculation of a larger system to be performed and introduce non-linear terms, so that simplifications have been proposed. First, exchanges between urban surfaces are commonly neglected, external building surfaces are assumed to be at the same temperature, and so at the thermal equilibrium. Then, only exchanges with the sky are taken into account.

Table 3
Ways BEMs take solar radiation into account.

BEM	Direct	Diffuse	Inter-reflection	Inside: Solar radiation incidence
TRNSYS	x	x	Only with the soil	Weighted method
PLEIADES	x	x	Only with the soil	Surface area ratio
BuildSysPro	x	x	With the soil in base, but can include the others urban surfaces by external calculation (not available in the opensource model)	Any weighted method can be parameterized
DesignBuilder/EnergyPlus	x	x	In base: With the soil Option: with building surfaces	Weighted method
Virtual Environment [91]	x	x	Only with the soil	Solar tracking
CitySim [91]	x	x	With the soil and with external building surfaces	Weighted method

- Infrared exchanges with the sky included in convection

The simplest way to consider this infrared exchange is to linearize it, to estimate sky temperature as a function of air temperature depending on sky type (clear or covered), thus making it possible to aggregate this transfer with the external convective one by increasing the convective heat transfer coefficient (CHTC) by a constant value. This is what is done in the Pleiades and Virtual Environment software.

- Infrared exchanges with the sky

In EnergyPlus, building facades are assumed to be at the same temperature; hence, there is no LW radiation between them. The exchanges occur with the sky and the ground using the view factors calculated between surfaces and the sky (SVF).

- Infrared exchanges with the sky and between built surfaces

BuildSysPro and CitySim are the only programs capable of simulating the infrared radiations between building facades [67,87,95], using view factors (Table 4).

3.4. Aeraulic flows

Aeraulic flows impacts several terms in the energy balance of the simulated building. Wind speed and direction as well as the local thermal gradient change the CHTC. Air pressure at the facade level causes infiltrations of fresh external air inside the building through openings (case of natural ventilation) and envelope defects (air permeability).

3.4.1. Convection

CHTCs are commonly assumed to be a constant, or just depending on the facade inclination, horizontal or vertical [96]. They can also be calculated using wind speed (forced convection), and/or from surface-air temperature (natural convection). However, in these two cases, as BEMs cannot calculate near wall values of wind speed or air temperature, these values are taken from weather data and do not take local features into account. Regarding wind speed, the weather station velocity can be resettled, considering site characteristics and wind speed calculated at any height using these adapted profiles. It is not the case for temperatures for which no method exists (Table 5).

Table 4
IR calculation options taken by the different BEMs.

BEM	Included in the convective coefficient	Only with sky	Whole infrared calculation
TRNSYS		x	TRNSYS is a program with large modularity so this calculation might be implemented
PLEIADES	x		
BuildSysPro	Can be included		A module has been developed (not available in the opensource model)
DesignBuilder/EnergyPlus	Can be included	x	EnergyPlus is open source model; hence this calculation may be implemented
Virtual Environment		x	The LW radiation received from the ground is estimated
CitySim			x

3.4.2. Infiltration and ventilation

To assess wind pressure and then infiltration flows, BEMs use pressure coefficients that vary depending on the exposure of the surface to the wind (upwind or downwind). These coefficients are taken from tables of the Air Infiltration and Ventilation Center [97], and wind speed can be adjusted to take into account the height of the surface and site rugosity [98]. Ventilation flows are calculated in the same way in the case of natural ventilation and resulting heat fluxes calculation uses outdoor temperature from the weather station. It is the same for the calculation of flows driven by buoyancy forces (Table 6).

3.5. Hygrometry

In a comfort study, the advantages of using hygroscopic materials has been experienced on site. It is through the numerical calculation at the design stage that such materials could be highlighted and then appear in the building project. In most of the BEMs, hygrometry is not very well integrated in the calculations. Often, the relative humidity of the air from the weather file is considered in post processing for thermal comfort studies (Givoni [99] diagram, ISO 7730 norm). Nevertheless, some tools such as EnergyPlus give a choice of many solving options and one of them allows for moisture transfer through a wall: the Heat And Moisture Transfer (HAMT) finite solution. This calculation combining both heat and moisture transfers could give evidence of the utility of specific materials able to regulate hygrometry inside a building.

3.6. Vegetation

Vegetated walls can be represented in building thermal simulation. The process can be very simple (i.e. changing the albedo of the surface), or the representation can be more complete and involve the evapotranspiration of the vegetation. These phenomena impact the surface temperature due to the solar absorption level for the first case or due to the latent energy consumed for evapotranspiration for the second. However, the vegetation representation rarely influences the level of the relative humidity of the air in the BEMs, although it has been shown it can have an impact on latent cooling loads [8]. An evapotranspiration model has also been recently included in CitySim to represent natural surfaces and trees [100,101].

Table 5
Calculation of the external heat convection coefficient.

BEM	Constant	Natural convection (function of the temperature gradient)	Forced convection (function of the wind speed)	LW radiation exchanges taken into account
TRNSYS	x	Can be implemented	Can be implemented	Can be implemented
PLEIADES	x			x
BuildSysPro	x	x	x	Can be included
DesignBuilder/EnergyPlus	With "CIBSE"	With "Adaptive Convection Algorithm" or "Simple Combined"	With "Adaptive Convection Algorithm"	Can be included with "Simple Combined"
Virtual Environment	x		x	
CitySim		x	x	

Table 6
Calculation of infiltration and natural ventilation.

BEM	Constant (Simple method)	Flows rate equations	Computational Fluid Dynamics CFD
TRNSYS	x	TRNFLOW model	
PLEIADES	x	x (based on CONTAM model)	
BuildSysPro	x	Can be included	Can be included
DesignBuilder/EnergyPlus	x	x	x (SIMPLER algorithm)
Virtual Environment	x	MacroFlo model	MicroFlo model
CitySim	x		

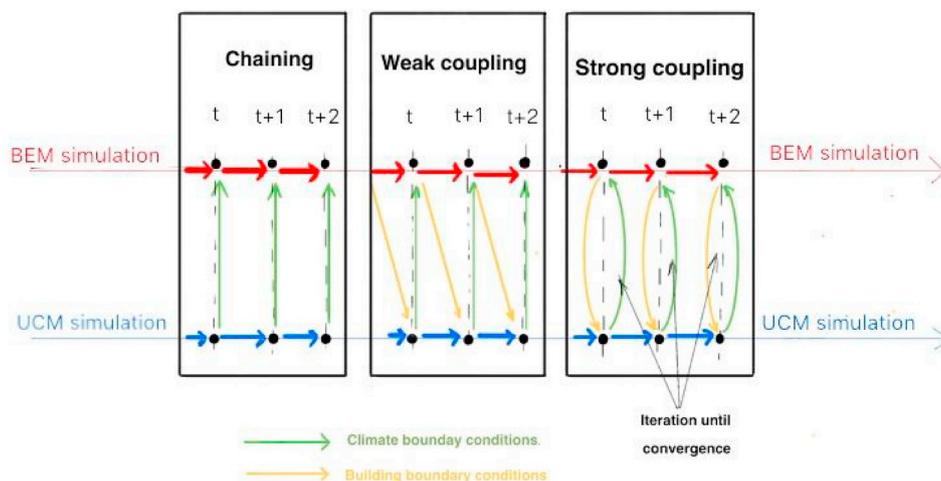


Fig. 2. Sketch to introduce coupling and chaining methods.

3.7. Discussion

This section comparing BEMs shows how, with more or less accuracy, every flux is taken into consideration in the tools. These BEMs have been developed mostly about one decade before UCMs; hence, they are adapted to integrate external climatic solicitations with the available data at that time, i. e. weather data at mesoscale. Nowadays, the development of UCMs gives new perspectives to introduce the urban climate or even urban microclimate in BEMs. Temperature, humidity, and air speed are taken as one homogeneous value for the whole building envelope; hence the output data from the UCMs can be easily transferred to BEMs through a "new local climatic file". On the other hand, for the radiation solicitations such as solar rays or infrared exchanges, the link between UCMs and BEMs is complicated. In BEMs, global radiation data are taken from the weather file, and then a radiation calculation is performed to attribute those fluxes to the different external building surfaces such as walls or windows. Even for modular BEMs with good flexibility (TRNSYS, EnergyPlus, BuilSysPro), it can be difficult to match the geometries of both the UCM and BEM tools to give the possibility of integrating the radiation flux for each building envelope part.

4. Coupling or chaining UCMs and BEMs

After searching for published papers describing the chaining or coupling of UCMs and BEMs, we selected a set of eight projects ([11,102–108]). The selection was made so as to represent a range of UCMs and BEMs as large as possible, using the information we could extract from the publications in order to have an accurate understanding of the interaction between the UCMs and the BEMs. All the information was obtained from the cited publications, cross-checked with the information provided on the UCM and BEM tools, and sometimes checked by contacting the authors.

This section presents a non-exhaustive set of UCM and BEM coupling or chaining published attempts. Our aim is to highlight the particularities of each one as well as their main limitations. Then, we give a global overview of these chaining or coupling attempts in terms of impacts on the BEM results, simulation time period capabilities, and the main locks that have appeared.

To consider the local climate in a building energy simulation, chaining or coupling strategies are adopted to link UCM and BEM software. Coupling strategies show strong coupling or weak coupling. For strong coupling, both UCM and BEM solvers are running at the same time to converge to a consistent result and go through the next

time step simulation (Fig. 2). For weak coupling, solvers of the UCM and BEM tools are running but in an iterative way to go ahead to the next time step simulation (Fig. 2). Coupling strategies allow feedback regarding building use on the local climate, in particular the anthropogenic emissions released outside due to air-conditioning or heating systems (such as heat pumps). In strong and weak coupling methods, UCM and BEM simulations have an impact on each other. Finally, the chaining method involve making a whole UCM simulation for the study period and providing the results into the weather files used in a BEM tool (Fig. 2); it thus involves one-way communication from the UCM to the BEM, without feedback.

All the weather data used by the BEMs are found in mesoclimatic files. Theoretically, they could be modified, using information resulting from the UCMs, to obtain a better representation of the surrounding climatic conditions for a study case. Depending on the kind of UCM used, the local climate information is more or less aggregated to specify the temperature and humidity of the outside air and the wind velocity without changing the climatic file format. Concerning radiation exchanges (SW and LW), explicit geometry tools are needed to determine the data all around the building, that can be used in a BEM if it can integrate such heterogeneity.

In the following section, we present and analyze practical examples of these strategies, as well as attempts that include the simplified representation of the direct surroundings through canyon models. The chaining or coupling strategies are summarized in Fig. 3 and detailed in the following sections.

Table 7
UWG + TRNSYS.

Phenomenon	Treatment
Long wave	TRNSYS configuration
Short wave	TRNSYS configuration
Convection	TRNSYS configuration with local air temperature and relative humidity
Ventilation and infiltrations	TRNSYS configuration with local air temperature, fixed air flow rate

4.1. Chaining strategies

4.1.1. UWG and TRNSYS

Aim and method: Palme et al. [102] present a methodology for considering the urban heat island (UHI) to enhance a building performance simulation. The method is applied to four different residential building types (two-story family housing, semi-detached house of two floors, block of apartments of five floors and tall building of twenty floors). The urban weather files are generated by using the UWG software for numerous urban tissue categories (UTCs). In this case, UTCs are classified according to their morphological characteristics, i.e. the built-up area, the green area, and the facade to site area ratio. Then, a building performance simulation is performed for each building type with TRNSYS using the generated weather files. In this work, the UCM is a global parametric model and the used BEM is a detailed multizone model.

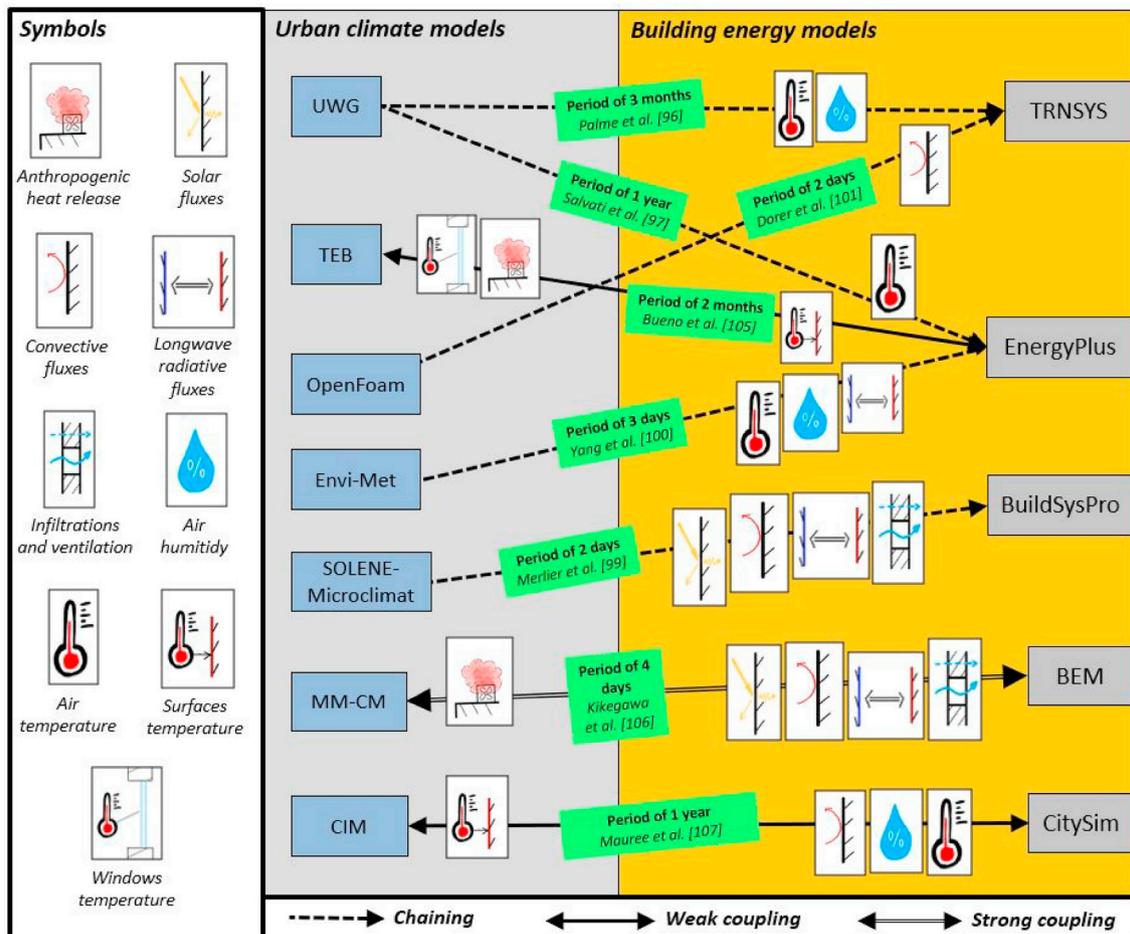


Fig. 3. Different coupling and chaining projects.

Analysis of the coupling: In this case, the chaining is quite simple as it involves modifying only part of the input weather files for the BEM without changing specific parameters of the model such as CHTC. (Table 7). Even if the building model is quite detailed only a unique outdoor air temperature can be used for the whole building. This is independent of the coupling method used as it is proper to the BEM (here Trnsys).

Capabilities and limits: As a parametric model, the UWG can rebuild hourly weather data with homogeneous values over the study zone. Long simulation periods are possible; the study presents 3 months of simulation.

As the UWG has an implicit representation of the study case, radiation solicitations are not calculated which is a drawback. So, this coupling allows to consider air temperature due to UHI but not the complete impact of urban forms and materials. Thus, the obtained results, particularly the impact of the size and orientation of buildings, should be put into perspective as the environment is only represented through the air temperature. Taking into account the solar radiation reduction due to urban form would decrease this effect as shown in the next coupling strategy (Salvati et al. [103]). To that end, it would have been possible to consider the advanced capabilities of TRNSYS such as the calculation of local short wave radiation to better represent the surrounding environment and urban surfaces, still with the limits related to TRNSYS and described above. However, this would require to explicit the building environment, what is, in the case of the study conducted by Palme et al. [102], somewhat contradictory to the generalization toward which the authors tend.

One can also note that there is no feedback from the BEM to the UCM to take into account the thermal loads due to cooling systems.

However, bearing in mind the above-mentioned limitations as well as those mentioned by the authors, this chaining method could be extended to study the impact of adaptation strategies on buildings' energy consumption at the urban scale.

4.1.2. UWG and EnergyPlus

Aim and method: Salvati et al. [103] seek to investigate the direct and indirect effect of urban morphology on buildings energy performance in the Mediterranean climate, by means of the use of the global parametric UCM UWG and the detailed multizone BEM EnergyPlus. The improvements include local outdoor air temperature and radiation. A sensitivity analysis was carried out on typical realistic urban forms and buildings within these urban forms in order to quantify how these two changes modify the building energy demand.

Analysis of the coupling:UWG calculates hourly values of urban air temperature from the data measured at an operational weather station located outside the city. This calculated temperature is then used at the whole building scale. In addition, the SW received by walls and road is calculated by assuming an average urban canyon orientation. The LW radiation between walls, road and the sky is computed by linearization of the Stefan–Boltzmann equation. To conclude, the chaining consists in modifying the input weather files (outdoor temperature and radiation) for the BEM without changing specific parameters of the model Table 8. Here again, there is no feedback from the BEM to the UCM to take into account the thermal loads due to cooling systems.

Capabilities and limits:As for the first example, the UWG uses a

long time simulation period; in this case, one year is studied. This is valuable in terms of next estimating the heating needs, which are usually expressed over a whole year. Concerning thermal comfort, the number of uncomfortable hours is often provided from early May to late September, namely over a five 5 months period.

As stated previously, without an explicit 3D geometry of the zone examined, the UWG cannot simulate radiations; in this case, an alternative methodology is proposed by estimating a ratio of incoming shortwaves from an averaged urban canyon orientation. The paper demonstrates that this is crucial when willing to asses the impact of urban environment on buildings' energy consumption.

It remains that the urban environment effect is averaged on the building which does not allow detailing spatially the impacts within the building, which is a limit for the use of the coupling for comfort assessment purposes.

With the previous limitations, this chaining method could be used to improve the consideration of the built environment in buildings' design process but it will not allow an accurate assessment of the impact of a specific climate adaptation strategy at the neighborhood scale.

4.1.3. SOLENE-microclimat and BuildSysPro

Aim and method: Merlier et al. [104] develop a methodology aiming at modeling the local thermo-aeraulic environment of buildings and studying the relative effects of radiative, convective, thermal and pressure conditions on their thermal behavior. The microclimate tool used is the explicit 3D model SOLENE-Microclimat and is then linked to the BEM BuildSysPro. In order to show the uncertainties related to the use of default boundary conditions in usual dynamic building energy studies different simulations have been launched:

- a default simulation taking the Meteorom weather file but with no surrounding environment;
- a simulation considering the boundary conditions given by SOLENE-Microclimat for a single isolated building;
- a simulation where SOLENE-Microclimat is applied to buildings arranged in plots and provides the fluxes obtained for the central building that are used in BuildSysPro.

Analysis of the coupling: This chaining method uses the output of SOLENE-Microclimat directly as input to BuildSysPro, but there is no feedback to the SOLENE-Microclimat model. The different heat fluxes calculated by SOLENE-Microclimat and used by BuildSysPro are described in Table 9. As SOLENE-Microclimat uses a detailed triangular meshing for solar radiative exchanges, a mean solar radiation is calculated for each wall element in BuildSysPro. Mean heat flows are taken by each wall and depend on the convective heat transfer coefficient. This latter is calculated by using the wind speed calculated by SOLENE-Microclimat with Equation (1):

$$CHTC = 4 \cdot v_{air} + 4 \tag{1}$$

with v_{air} the wind speed.

As in the previous examples, there is no feedback from the BEM to the UCM to take into account the thermal loads due to cooling systems.

Capabilities and limits: The high meshing level of SOLENE-Microclimat (characteristic length of 2 m) is time consuming for the calculation, which leads to short study periods (2 days are simulated in this example, using an hourly time step).

Table 8
UWG + EnergyPlus.

Phenomenon	Treatment
Long wave	EnergyPlus configuration
Short wave	EnergyPlus configuration with ratio applied to incoming solar flux
Convection	EnergyPlus configuration with local temperature from UWG
Ventilation and infiltrations	EnergyPlus configuration with a fixed rate of 2 vol/h

Table 9
SOLENE-Microclimat + BuildSysPro.

SOLENE-Microclimat + BuildSysPro	
Long wave	All LW exchanges (with the sky and urban scene) are calculated by SOLENE as input to BuildSysPro.
Short wave	SW provided from SOLENE-Microclimat: incident solar radiation on building facades and the shadowing effects of adjacent obstructions are calculated
Convection	CHTCs are calculated using the wind speed from SOLENE-Microclimat and Equation (1) from the French Regulation
Infiltrations and ventilation	Infiltrations are modeled assuming a homogeneous wall permeability (K) and a power law for infiltrated air flow rates: $Q_P = K \Delta P^n$. The external pressure is computed using default pressure coefficient values and the building height. For the ventilation, the air temperature of the weather file is considered.

In this case, all fluxes are modified so as to take the local context into account. However, the main limitation is the need to average local data because BuildSysPro can include only one value per facet so that the spatial detail capacity of the UCM is not completely used. This is limiting to carry out detailed inside thermal comfort assessments.

With the previously underlined limitations, this chaining method could be used to improve the consideration of the built environment in buildings' design process, including the impact of specific climate adaptation strategies at the neighborhood scale. However, due to the calculation time, a focus on specific conditions such as heat waves is required.

4.1.4. ENVI-met and EnergyPlus

Aim and method: Yang et al. [105] present a method for the quantitative analysis of building energy performance under any given urban contexts. The authors linked EnergyPlus with the explicit 3D micro-climate simulation tool ENVI-met. A case study is presented to show the impact of microclimatic boundary conditions on an individual building performance.

Analysis of the coupling: An initial simulation was performed in ENVI-met to obtain microclimatic parameters, which were averaged and used in a modified weather file for an EnergyPlus simulation. One of the assumptions in EnergyPlus is that the surface temperatures of ground and obstructions are the same as the outdoor air temperature: therefore, the authors had to replace the original ground/obstruction surface temperature (equal to the outdoor air temperature) in EnergyPlus with the mean temperature of all neighboring surfaces calculated by ENVI-met. The incident solar radiation is directly calculated by EnergyPlus taking the masks into consideration. There are therefore no inter-reflections. Finally, the convective flow, infiltration, and humidity were calculated by ENVI-met and modified in EnergyPlus. The different heat fluxes calculated and used as input to EnergyPlus are summarized in Table 10.

Capabilities and limits: As in the previous case, the high precision of ENVI-met describing explicitly the study area leads to short study periods; in this case, 3 days are simulated.

One of the major limits is that inter-reflections are not taken into account in the SW radiations calculated thanks to EnergyPlus. However, it would have been the same using the output from ENVI-met.

Table 10
ENVI-met + EnergyPlus.

ENVI-met + EnergyPlus	
Long wave	LW exchanges between the surfaces of the urban scene and those of the building are calculated by replacing the outdoor neighboring surface temperature in EnergyPlus with the mean of surface temperatures calculated in ENVI-met. As there is no actuator in EnergyPlus to override the thermal radiative heat flux, the authors combine the actual LW radiative flux at the building external surfaces into the component of convection heat transfer using the same procedure as considering the actual outside air temperature.
Short wave	The incident solar radiation on building facades and the shadowing effects of adjacent obstructions are calculated by EnergyPlus, but the average ground reflectance and tree transmittance determined by ENVI-met are used for the EnergyPlus simulation.
Convection	Since the outside air temperature can not be changed in the current version of EnergyPlus (only if modifying the EnergyPlus source code), a workaround is implemented by modifying the CHTC in order to integrate the simulated air temperature by ENVI-met.
Infiltrations and ventilation	The specific humidity and air temperature along the whole building simulated by ENVI-met are averaged. The average specific humidity is converted to dew point temperature and relative humidity. The original air temperature, dew point temperature, and relative humidity of the EnergyPlus weather file are replaced by the calculated mean values.

Moreover, as for the previous case, the averaging of the heat fluxes transferred to the BEM limits the assessment of the impact of a local adaptation solutions. On the other hand, in ENVI-met an averaging of surface temperatures is already performed when calculating the infrared exchanges. Hence, this kind of study is already of limited accuracy when using ENVI-met. To conclude, concerning the air temperature and the relative humidity, ENVI-met often gives too precise results to be directly used in EnergyPlus, which is why an average is calculated. Concerning radiations, the solution adopted by the authors could be discussed if the output proposed by EnergyPlus would have been more accurate, but as previously explained, here it certainly does not add to the degradation of the results accuracy. Nevertheless, the method could be used to improve the consideration of the built environment in buildings' design process. It is less adapted to assess the impact of a climate adaption solution that would be placed especially to optimize its effect (for example a specifically treated surface just in front of a building). In addition, due to the calculation time, a focus on specific conditions such as heat waves is required.

4.1.5. OpenFoam (CFD) + TRNSYS

Aim and method: Dorer et al. [106] analyze the impact of the urban microclimate and in particular the UHI on the space heating and cooling energy demand for typical office buildings in street canyon configurations. Therefore, the open source CFD software package Openfoam which is a district model with explicit geometry (OpenFoam, 2012 [109]) is chained to TRNSYS 17.0.

Analysis of the coupling: The convective heat fluxes and data are transferred to the BEM, either through CHTC or by directly coupling CFD and BEM for street canyon case modeling [106]. CFD simulations are performed using the RANS models of the open source CFD software package OpenFoam (OpenFoam, 2012 [109]). The UHI intensity is approximated by using results of the BUBBLE project [110]. A diurnal rural-urban temperature is generated for each month. For this study, TRNSYS 17.0 (TRNSYS 17.0, 2010) [111] is employed. For the external radiation fluxes, the authors use the TRNSYS 3D radiation model that has been developed to assess reflections within interior cells. To this end, they view the building surrounding spaces as an atrium with an open ceiling, so that finally, the shadowing by the neighboring buildings and the SW and LW radiation exchanges between the different

Table 11
OpenFoam (CFD) + TRNSYS.

OpenFoam (CFD) + TRNSYS	
Long wave	LW radiation between the building and its surroundings is dealt with through the use of the TRNSYS 3D radiation model using a fictive atrium representing the street.
Short wave	Same as LW.
Convection	Convection aspects of the urban microclimate are modeled using the results of OpenFoam (CFD), and the data are transferred to BEM. The air temperature used can take the UHI intensity into account if a previous model from the BUBBLE project is used.
Infiltrations and ventilation	Not detailed in the paper.

buildings are taken into consideration. The SW diffuse and LW radiations are determined using Gebhart factors (view factors, corrected to include the effect of multiple reflections). The different heat fluxes calculated and used as input to TRNSYS are summarized in Table 11.

Besides this paper that mainly demonstrates the above-mentioned coupling for canyon streets, another chaining project is proposed, using OpenFoam for convection fluxes and CitySim for radiation exchanges to produce boundary conditions for TRNSYS. The first solution implies the use of several tools to prepare input data for BEM. OpenFoam estimates the CHTC, the UHI model from the BUBBLE project is used for the temperature calculations, and radiation fluxes are simulated from the TRNSYS 3D radiation model. The second solution replaces the model for radiation estimations by using CitySim.

Capabilities and limits: Whatever the solution adopted, because CFD calculations are time consuming, these chaining processes have been set for a short period of 2 days.

Both solutions seem to offer relatively complicated processes where different climatic solicitations provided by different tools lead to no interactions between the phenomena investigated, which could give inconsistent results.

One of the major limitations of these chaining solutions is that UHI intensities are approximated based on measured data. These data are valid for the city of Basel but if wanting to replicate this method on another city, the UHI intensity would not be correct anymore. A second one is that the method is restricted to buildings located in street canyon.

To conclude, when disposing of UHI data, the method could be used to improve the consideration of the built environment in the case of buildings inserted in canyon streets, as well as to assess the impact of a climate adaption solution applied to the street.

4.2. Coupling strategies

4.2.1. TEB and EnergyPlus

Aim and method: The aim of the study of Bueno et al. [107] has been to analyze how the outdoor air temperature is impacted by waste heat emissions with a realistic definition of HVAC systems which allows a broader analysis of the two-way interactions between the energy performance of buildings and the urban climate around the buildings. Therefore EnergyPlus (with a monozonal representation of the building) and the district model with explicit geometry TEB are used.

Analysis of the coupling: The coupled scheme EnergyPlus – TEB proposed here is a weak coupling. The iterative coupling process starts from a preliminary average-oriented canyon using TEB simulation and

off-line meteorological forcing information [49]. The wall and roof temperatures and the urban canyon climate conditions calculated by TEB are supplied as boundary conditions to the EnergyPlus simulation; external convection and radiation exchanges are thus by-passed. One of the reason for this choice is that EnergyPlus simplifies the calculation of LW radiation between building surfaces and the surrounding ones, assuming that the latter are at the outdoor air temperature, which is a strong assumption. Similarly, the calculation of convective heat flux and SW radiation differs in the two tools, so that transferring surface temperature avoids inconsistencies that would have appeared because of different flux calculation in the tools. EnergyPlus then proceeds to the building energy balance, taking into account HVAC and windows temperature and return it to TEB. TEB does not deal with transmission through windows, internal heat gains, air infiltration, and the calculation of cooling loads. The latter are used in a new iteration of TEB, which uses the window temperatures calculated by EnergyPlus in its outdoor energy balance according to the glazing ratio of building facades. This process is repeated until a convergence criterion is satisfied, reached when the average canyon temperature difference between iterations is below 0.05°C. Surrounding buildings are represented by shadowing surfaces within the average-oriented canyon in TEB. In order to match with the representation of a canyon street, which does not mesh facades vertically and uses an average oriented street, the building in EnergyPlus is monozonal and rotated by 45°C with respect to the north–south axis. This example illustrates the complete coupling regarding the main phenomenon (Table 12). However, it is worth noting that it is simplified as TEB and EnergyPlus rely on homogeneous conditions per floor.

Capabilities and limits: It is worth noting that the results of this coupling strategy have been confronted to experimental measurements, which showed that both TEB and EnergyPlus consistently overpredict exterior wall temperatures in winter but the general simulation results are satisfactory: a root mean square error (RMSE) between 0.3 and 1.3 K for facade temperatures and a RMSE smaller than 1 K for air temperatures.

Simulation are run over a long simulation period (2 months are coupled), allowing to carry out seasonal studies. Indeed, the coupling gives more interaction between the physical phenomena than the chaining method, but leads to more time-consuming computation.

The study focuses mainly upon the impact of the building onto the urban microclimate. Thus, the building model is really simple with only one thermal zone. Moreover, the district being represented through the canyon street analogy in TEB, radiation fluxes estimations transferred

Table 12
TEB + EnergyPlus.

Phenomenon	Treatment
Long wave	LW exchanges are calculated in TEB and the external surface temperatures are used in EnergyPlus as boundary conditions.
Short wave	The solar radiation received by the four vertical surfaces are calculated from the one received by the average-oriented canyon in TEB. The paper does not explain whether and how the solar flux is transmitted through windows to the indoor surfaces.
Convection	The convection heat flux is calculated in TEB using Wall CHTC (Masson 2000 [49]) and transferred to EnergyPlus through the external surface temperature
Ventilation and infiltrations	The paper estimates the impact of the building HVAC system on the canyon energy balance, but does not explain whether the canyon air temperature is taken into account as an inlet temperature for this flux (air flow rates are fixed so that we know that air velocity is not used).

to the BEM are approximated. For these reasons, to carry out analyses focused on buildings' energy consumption with this coupling strategy, it would be necessary to assess these strong assumptions. It also limits the ability to perform studies related to people vulnerability within buildings, as comfort conditions can vary strongly depending on the considered storey. However, with further developments, the building representation could be multizonal in EnergyPlus so that to represent a typical building of the district.

It would certainly be too complicated to extrapolate the coupling of TEB and EnergyPlus performed at the street scale as presented in the analyzed paper, to developments at the city scale. A simplified monozonal BEM has been integrated to TEB so that to improve the consideration of buildings operation in urban climate simulations. TEB can now also be used to assess the impact of global urban adaptation strategies on buildings energy consumption at the city scale [112], still with the limitation that have been above-mentioned.

However, the coupling, as presented can be used at the street/district scale to assess the impact of building operation on local climate.

4.2.2. Urban canopy parametrization and BEM

Aim and method: This paper studies the increase of energy consumption due to the artificial air-conditioning of buildings in summer. Kikegawa et al. [108] developed a numerical simulation system that can express the city-block-scale interaction between summertime outdoor thermal conditions and cooling energy demands in the urban canopies. Therefore, a new one-dimensional urban canopy meteorological model coupled with a simple sub-model for the building energy analysis is developed. The BEM is a box-type heat budget model in which the building is treated with a monozonal approach. The urban canopy model comes from a meso-scale meteorological model.

Analysis of the coupling: Kikegawa et al. [108] coupled a BEM to a UCM, which is itself chained with a mesoscale atmospheric model (MM). The UCM and BEM are bi-directionally exchanging, and it seems to be a strong coupling, as both tools solve the physical problem at the same time. In this approach the feedback between the urban local climate and the building energy balance can be taken into account. The interaction between summertime outdoor thermal conditions and cooling energy demands in the urban canopy is calculated for the district scale. The UCM is a vertical one-dimensional model. It can compute the temporal variations of air temperature, humidity and wind velocity in the UCL. The UCM includes the effects of SW and LW radiations (whereas LW radiation is neglected in the mesoscale meteorological model) and the effects of building drag and anthropogenic heat release. In the BEM, the two components of the cooling loads (sensible and latent) are calculated separately. The energy released in the atmosphere is calculated in terms of the heat pump coefficient of performance. All heat fluxes are summarized in Table 13.

Capabilities and limits: In this paper, the method has been run on a short period (4 days) but the simplicity of the UCM (compared to models using explicit geometries as (SOLENE-Microclimat or ENVI-met) that offer more precise spatial results) suggests that it could be applied to longer periods. However, the large link scales, as three models communicate (mesoscale, microscale, and building scale) could also lead in intensive computations. Then, the method results were compared to data acquired within the Ootemachi area, a central business district in Tokyo, which leads the author to consider that it reasonably

reproduces the temporal variations of the outdoor air temperature and the indoor thermal environment under summer-day conditions.

However, according to the authors, the simulation system needs to be tested to urban districts with different conditions such as a residential area. There is also a need to expand its applicability to winter urban canopies.

This coupling is focused on urban microclimate estimation taking into account the buildings' operation and particularly its consequences in terms of heat released outside by the air conditioning system in summer. As in the previous example, the building model is quite simple as it considers a monozone approach which prevents its use for application aiming at studying the impact of local strategies on a specific building. On the contrary, an up-scaling could be performed so that to integrate the anthropogenic fluxes in the UCM.

4.2.3. Canopy Interface Model and CitySim

Aim and method: The goal of this coupling was to compute enhanced boundary conditions for both the parametric district model (Canopy Interface Model (CIM)) and the building model (CitySim), so that to provide an annual estimation of the energy demand at the district scale taking into account local climate phenomenon.

Analysis of the coupling: Mauree et al. [11] coupled the Canopy Interface Model (CIM) and CitySim (see Table 14). The simulation takes place in three steps. First, a simulation with CitySim is performed with the standard typical meteorological year data file to obtain the surface temperatures. Using the surface temperatures from CitySim. The density and height of the obstacles in the canopy being estimated using a methodology proposed by Mauree et al. [67], the CIM is then used to simulate the flow in the column module and to recalculate high resolution vertical profiles of meteorological variables, such as the air temperature and the wind speed. Finally, CitySim is provided with localized meteorological data to simulate the energy demand. The modification of the variables influences the computation of the CHTC and the calculation of the LW radiation.

Capabilities and limits: This example focuses on the energy needs of several buildings through CitySim tool which has an explicit geometry of the study area allowing for radiation exchanges. It estimates flux exchanges at the external envelop surfaces of buildings and at the ground surface. Combined with the CIM that calculated air temperature and wind speed at local scale, this coupling seems interesting to generate hourly microclimate data (air temperature and wind speed from CIM, SW and LW radiations from CitySim) and this for one year.

A comparison of the outside air temperature and the wind speed was performed over the year 2015 and gave good agreement with measurements.

The limit of this coupling strategy is that it is not a two-way coupling between CitySim and CIM. Thermal loads due to systems operation are not taken into account in CIM. This coupling project is more adapted to the calculation of energy consumption in an urban district than to design of a specific building taking into account its environment. To illustrate the first kind of applications, it has been used to downscale climate data [113] and to design urban energy systems [114]. For the second kind of applications, CitySim has been coupled with EnergyPlus recently [13]. Moreover, as CIM is a large scale model its meshing is not adapted to consider the impact of local adaptation strategies, the radiative impacts of which would be considered in CitySim.

Table 13
Urban canopy parametrization + BEM.

Phenomenon	Treatment
Long wave	The re-emission of LW from the building and ground surfaces is allowed for.
Short wave	The shading effect and reflection of SW radiation are incorporated.
Convection	Convection exchanges are viewed on either windows or walls.
Ventilation and infiltrations	The heat flux from ventilation is taken into account in the BEM and the heat released by the HVAC system is returned to the canopy model taking into account the COP of the HVAC.

Table 14
Canopy Interface Model + CitySim.

Phenomenon	Treatment
Long wave	The re-emission of LW from the building and ground surfaces is taken into consideration. It is influenced by the local computation of the air temperature.
Short wave	The shading effect and the reflection of SW radiation are taken into consideration.
Convection	Convective exchanges are considered on either windows or walls. The modification of the wind speed, air temperature and surface temperatures significantly influences these exchanges.
Ventilation and infiltrations	No information.

4.3. Discussion

In this part, we first give as synthesis of the capabilities and limitations of the methods presented above. Second, we discuss the impact of coupling UCMs to BEMs as our interest relies in knowing whether the chaining and coupling strategies can improve forecasting building thermal behavior. The benefits of this coupling can be monitored in terms of cooling and heating energy demands differences, but also in terms of indoor air temperature and comfort. Then, we examine the simulated period during which these chaining or coupling strategies have been performed. Finally, we discuss how BEMs are adapted or not to the integration of local climate heat fluxes and we compare these strategies with integrated ones that involve either expanding the BEMs to the outdoor calculation or modeling building energy balance within UCMs.

4.3.1. Synthesis of the capabilities and limitations of the studied methods with regards to potential applications

As developed above, the chaining and coupling strategies have been developed to address different issues. They are also limited due to the options retained by the developers related to the UCM, BEM and the way they proceed to articulate the tools. In Table 15, an overview of these capabilities and limitations, in terms of applications is given. Here we detail what we mean for those different applications:

- Impact of buildings' operation on UC: the heat fluxes transferred from the BEM to the UCM includes the heat released by cooling systems so that urban climate calculations take into account these anthropogenic fluxes;
- Impact of UHI and adaptation strategies on buildings' energy demand at a large scale: the chaining or coupling allows assessing the impact of UHI (air temperature) on the estimation of the building energy demand of a building stock (at the block, district or city scale);
- Impact of UHI on a building energy demand: the chaining or coupling allows assessing accurately the impact of UHI (local air temperature) on the estimation of the energy demand of a specific building;
- Impact of local thermal phenomenon on a building energy demand: the chaining or coupling allows assessing accurately the impact of strategies such as adjacent green or cool surfaces on the estimation of the energy demand (or indoor comfort conditions) of a specific building.

4.3.2. Impact of coupling or chaining on the building thermal behavior

For all types of chaining or coupling projects, the urban climate impact on the building energy behavior has been assessed. We find that the urban climate has an impact on several outputs of the BEMs. The main findings are detailed below.

Using parametric models to produce local climate data [103], confirm the effect of urban morphology on the UHI intensity and then on the building energy balance. Warmer outdoor temperatures lead to an average increase of total energy demand from 10% to 35%, depending on different urban densities. At the same time, the incident radiation reduction due to urban obstruction is desirable in Mediterranean climate;

it induces a reduction of the annual energy demand up to the 19% compared to an unobstructed environment. Therefore, relevant errors may occur if the contribution of urban morphology to energy demand is neglected, approximately 89% for space heating and 131% for space cooling calculations. With another parametric model [102], results indicate that when the UHI effect is incorporated, an increase in heating or cooling energy demand between 15% and 200% can be expected.

Using district explicit models, Merlier et al. [104] show that even for an isolated building case, taking into account the surrounding environment instead of only considering outdoor conditions derived from typical weather files may modify results by 1.3°C for the indoor temperature, mainly because of LW radiative exchanges with soil. These account for an increase of the mean indoor air mean temperature by 2.05°C, while aerualic effects (ventilation and infiltration) decrease the mean indoor air temperature by 0.12°C and convection increases it by 0.07°C.

As in the previous study, Evins et al. [115] combine the effect of adding a new ground model and surrounding building model on the LW exchanges in EnergyPlus. The authors observe an increase in surface temperatures by an average of 1.9°C, with a maximum change of 6.1°C. The annual heating load decreases by 18%, and the cooling load increases by 19% due to the introduction of local LW exchanges.

Also working with an explicit district model, Yang et al. [105] show that the sensible cooling load is very sensitive to the different options that can be taken to represent or not the built environment. First, taking into account solar masks (but no UCM chaining) has a major effect, decreasing cooling loads considerably (−18.6%) and increasing heating ones slightly (+0.8%). Second, when considering local climate simulation (with trees), cooling loads increase (+10.2%) while heating ones decrease (−0.5%) due to the UHI effect. Taking into account the effect of greenery is noticeable, but not as important as in the previous options. Infiltrations are shown to be the major phenomena in summer and infrared exchanges in winter. The local microclimate is also shown to influence the mean indoor air temperature in free running conditions, with a difference that reaches 2.1°C when neglecting the microclimate boundary conditions.

Chaining a parametric model and a district explicit model to a BEM, Yi and Peng [116] show the importance of outdoor and indoor coupled assessment at microclimate level to deploy passive design features adapted to climate change. The aim of this study was twofold: first, to take into account the outdoor microclimate, and second, to take climate change projections into account (but no change in urban context) on indoor environmental performance simulations. Therefore, different tools were used: CCWorldWeatherGen to generate recent (2012) or future microclimate change (2050), ENVI-met to produce the local boundary conditions for the building, and DesignBuilder to simulate the building thermal behavior. Results show that for a meteorological air temperature in 2050 that is increased by about 1.7°C compared to 2012, the indoor thermal conditions increase by about 1.8°C. The authors show that the proposed simulation framework can be used to assess the ability of a passive building adaptive device to reduce the indoor air temperature in both 2012 and 2050 cases, by about 1.2°C, and 1.4°C respectively.

Working on a canyon street model, Dorer et al. [106] show that the space cooling demand for the stand-alone buildings is much lower than

Table 15
Synthesis of the capabilities and limitations of the studied methods with regards to potential applications.

Chaining/Coupling method	Impact of buildings' operation on UC	Impact of buildings' operation energy demand at a large scale	Impact of UHI and adaptation strategies on buildings' energy demand	Impact of UHI on a building energy demand	Impact of local thermal phenomenon on a building energy demand
UWG + TRNSYS	No BEM to UCM feedback	Developed for that purpose but only integrates the impact of air temperature changes	Limited due to the building monozonal approach	Not appropriate	Not appropriate
UWG + EnergyPlus	Not the scope	Not the scope	Developed for that purpose	Limited due to the average of fluxes on the building's envelop	Limited due to the average of fluxes on the building's envelop
Solene-Microclimat + BuildSysPro	Not the scope	Not the scope	Included	Developed for that purpose but limited due to the average of fluxes on the building's envelop	Developed for that purpose but limited due to the average of fluxes on the building's envelop
Envi-met + EnergyPlus	Not the scope	Not the scope	Developed for that purpose	Developed for that purpose	Limited due to the absence of inter-reflections and the average of fluxes on the building's envelop
OpenFoam + TRNSYS	Not the scope	Not the scope	At the street canyon scale	Limited due to the building monozonal approach	Limited to buildings inserted in a street canyon
TEB + EnergyPlus	Developed for that purpose	Not the scope	Limited due to the building monozonal approach	Limited due to the building monozonal approach	Limited due to the building monozonal approach
UCP + BEM	Developed for that purpose	Not the scope	Limited due to the building monozonal approach	Limited due to the building monozonal approach	Limited due to the building monozonal approach
CIM + CitySim	No BEM to UCM feedback	Developed for that purpose and includes radiative phenomenon	Possible by chaining EnergyPlus	Possible by chaining EnergyPlus	Possible by chaining EnergyPlus

that for the buildings situated in the street canyons. For wider street canyons, the cooling demand is higher, because more solar and thermal radiation is entrapped, mainly due to multiple reflections. In narrow street canyons, the cooling demand is lower because less solar radiation enters the street canyon.

At the city scale, Bueno et al. [117] show the impact of a realistic definition of HVAC systems on waste heat emissions and outdoor air temperatures. The study shows that waste heat emissions can raise outdoor air temperature between 0.8 K for residential neighborhoods and 2.8 K for commercial neighborhoods in summer, under possible future scenarios in which air conditioning is widely used.

These results show that it is important to take into account the local configuration of all the fluxes, including LW radiation which is the most poorly treated in both BEMs and UCMs.

4.3.3. Simulation period

Building energy simulation is usually performed by using as entry the weather conditions of an entire year. The long period needed for this kind of calculation is the main obstacle when aiming to account for outdoor impacts more successfully.

Very few chaining projects simulate a period of a few months or one year. Salvati et al. [103] simulate a one year sensitivity analysis of the building energy demand to the air temperature increase. Mauree et al. [11,113] Perera et al. [114] also conduct a yearly analysis of the impact of urban climate on both energy demand and energy systems. Bueno et al. [117] simulate a period of two months, based on a monthly-average diurnal cycle of urban canyon air temperature. Palme et al. [102] simulate a three month period.

Most of the coupling or chaining projects presented above are based on a simulation period of a few days or a week. For example, Kikegawa et al. [108] simulate four days, and similarly Yang et al. [105] simulate three days. Finally, Merlier et al. [104], Dorer et al. [106] simulate two days (Fig. 3).

All those chaining projects have been undertaken with an hourly time step and inputs varying at the same frequency. Very few pull down the time step although Evins et al. [115] simulate only one day with 6 min time step.

To synthesize, the chaining or coupling projects involving CFD are realized only for two or three days (Fig. 3), because these CFD projects are computationally time consuming. There is still a technological hurdle on how to reduce computation while increasing the simulation period. The only tools used for annual simulations are the parametric tools (section 2.2.1 UWG and CAT and 2.2.1 CIM).

4.3.4. Are BEMs adapted to the integration of local climate heat fluxes? The remaining technological locks

In this section, we discuss the three main locks related to the construction of BEMs:

- the physical modeling and assumptions on which BEMs are built does not allow all the fluxes to be dealt with similarly, which leads developers to adopt complicated alternative solutions;
- building scale description is not the same in BEMs and UCMs, so that the detailed information from the UCMs is often lost, or it can be lacking for some building elements such as windows;
- the retro-action of buildings on the local climate is rarely taken into account.

Most of the authors do not consider all urban local fluxes simultaneously, and the heat fluxes are only partially corrected. For example, some authors do not alter the configuration of LW exchanges of their BEM [102,103]; instead, they alter the convective exchanges and the ventilation by introducing local air temperature. For the same authors [103], however, the wind velocity is not locally calculated, and therefore the convective heat flux is only partially corrected owing to the local air temperature. It is worth noting that the local relative humidity

is usually not introduced. Few authors take it into account [102]. Other authors focus on the importance of local LW exchanges with the ground and the surrounding buildings, but introduce neither local SW and convective exchanges nor local infiltration [115].

Some authors need to introduce patches or a workaround in the BEM to enable these tools to allow for local urban heat fluxes or parameters. For example, Yang et al. [105] introduce a modification of the equation of the CHTC so as to include the local outside air temperature variations, which cannot be modified directly in the used version of EnergyPlus.

The level of detail of the BEMs and the UCMs is not the same. For example, Palme et al. [102], Salvati et al. [103] modify the input weather file so as to account for the local climate. This same file, however, is used as a boundary condition for all the walls and roofs of the building, regardless of their elevation or orientation, which may be a strong simplification. Other chaining methods that involve a detailed UCM need to process the outputs of the UCM first. For example, for Yang et al. [105], the microclimate data of the grid cells within a linking unit are averaged, and then the average value is passed to the corresponding surfaces of the EnergyPlus model. Other authors adopt a similar strategy [104]: as the SOLENE-Microclimat tool uses a detailed triangular meshing for solar radiation exchanges, a mean solar radiation needs to be calculated for each wall element in BuildSysPro. The interface between UCM and BEM models, namely the building envelope, can be very differently represented in each model, thus creating inconsistencies between tools: the ENVI-met model and the EnergyPlus model use a different method to mesh the geometries, especially for the sloped roofs and the facades. The ENVI-met model uses a Cartesian mesh that is not adapted to tilted surfaces; the TEB model does not have transparent surfaces within its canyon but has to provide transmitted solar fluxes to EnergyPlus.

Some authors do take all the local urban heat fluxes as input in the BEM, but they do not introduce feedback from the BEM to the UCM [104,105], which can introduce an error due to the difference in assumed and actual temperatures [115]. This error can be pulled down for shorter time steps, as temperatures will not change dramatically. However, hourly time steps are often adopted, as seen in the above section.

4.3.5. Other strategies

The above-mentioned reasons certainly explain why some authors aiming to take the local urban context into account do not propose complex chaining or coupling processes. Two other ways are explored: developing external functions in BEMs or developing BEMs in UCMs.

Introducing some patches or modifying some equations in the BEM is the strategy chosen by Vallati et al. [15] who model a street canyon in TRNSYS as an internal zone with an open air ceiling that is an atrium. Djedjig et al. [118] also develop a new module in TRNSYS so as to include the canyon street confinement effect.

Several modifications to EnergyPlus are proposed by Evins et al. [115]) because EnergyPlus posits that the ground and the obstructions to the building (i.e. the urban scene) are at the same temperature as the air. View factors and linearized radiation heat transfer coefficients are calculated for the ground, the exterior building surfaces and the sky. The incident total LW radiation can finally account for the exchanges with the ground, the sky and the obstructions (i.e. the urban scene considered at a single surface temperature). The modifications proposed in the paper improve the exterior LW radiation, including a ground temperature and other urban surfaces at a different temperature.

The option taken in TRNSYS is the development of a new module based on TEB called TEB-Type 201. Ali-Toudert and Böttcher [119] describe the module and show its user-friendliness. A sensitivity study reports the climatic conditions of a canyon (study area) regarding several parameters related to the urban context (i.e. plan density, roof surfaces/total), human activity (anthropogenic heat), building

construction (thermal insulation of walls and roofs, thermal inertia) and surface properties (albedo). A total of 729 simulations over a period of one year have been conducted for this study; they demonstrate the potential of extensive calculations of TEB-Type 201. An outlook is given to work on the feedback of TRNSYS which could be integrated in TEB-Type 201.

Some UCMs include BEMs directly. The building energy balance is integrated into the equation set, so that the coupling can be stronger, and there is no inconsistency regarding meshing or time step. However, in these cases the building energy balance is often rougher and provides fewer options for different kinds of building simulations compared to the BEM offer. Such a coupling was provided for example by Krpo et al. [61], and Salamanca et al. [62] with the integration of a Building Energy Model in the WRF-BEP model. The BEM included in TEB is monozonal [117], and those included in SOLENE-Microclimat [77] or LASER/F [81] can have only one air node per floor.

5. Conclusion and outlooks

This paper has presented and analyzed different proposals for chaining a UCM and a BEM, following a description of the main BEMs and UCMs. This study thus provides a baseline knowledge for researchers who aim to develop a coupling or chaining, starting from a BEM or UCM point of view. Although the issue was not the focus of this study, the analyses can also be useful for UCM developers who intend to take into account the effects of buildings.

The first conclusion from the analysis of eight coupling or chaining attempts is that all chaining or coupling projects have shown that BEMs are very sensitive to the climate, whether to estimate heating, cooling demand, or indoor comfort conditions. Previous studies have shown that 15%-89% of energy for heating is neglected if the urban context and climate are not considered, 131%-200% for space cooling and several degrees for indoor air temperature for non air-conditioned spaces in summer. Thus, performing more accurate coupling is a crucial issue in building energy modeling. However, this kind of chaining or coupling between UCMs and BEMs is only attempted in research projects, certainly because to date, UCMs are not commonly used in consulting agencies.

Most of the presented works use the uni-directional chaining method: outputs from UCMs are used as inputs to the BEMs but no feedback from the BEMs to the UCMs is provided, and no iterative process is proposed to enhance the chaining. Hence, the local climate cannot take into account the impact of buildings retro-action. This is a minor issue in low density districts but not in very dense areas [79]. Some recent studies have, however, tried to provide new methods to integrate these feedbacks [113,114].

This state of the art review has shown that three major issues need to be addressed:

a) Most chaining strategies presented in this paper are partial as most of the BEMs have not been designed to include all heat fluxes stemming from the urban context. The most difficult to integrate is the LW radiation heat flux which is often merged with the convection heat flux. Moreover, LW fluxes can be produced only by UCMs that run at the neighborhood or street scale and use an explicit geometrical model, which implies a very computer intensive process.

b) BEMs have not been developed to take spatially variable boundary conditions on the facades into account. Therefore, a workaround is often adopted to include some local mean climatic parameters. In so doing, the advantage of having performed an urban climate simulation is not fully used, which can increase numerical and modeling errors.

c) As for the spatial scale, the time scales considered are often barely compatible. In particular, explicit district UCMs, which would produce detailed inputs for the BEMs, cannot be run over a year. This kind of coupling can be run only over a several day period to verify the building thermal behavior for extreme conditions.

In the future, the chaining between BEMs and UCMs needs to be generalized to increase BEM accuracy. To improve this chaining, the present analysis shows that BEM developers should add to their models the possibility of considering all external fluxes separately and in particular LW radiation. They should also attempt to force external surface temperatures or fluxes directly. They should split the external faces of the building into several surfaces, with a minimum of one per internal zone and per floor, to which different boundary conditions can be attributed (including different air temperatures, humidity, CHTC, etc.). From the UCM point of view, intermediate solutions must be found so as to produce all the local data for external flux calculations over a year. Current, parametric models can cover the period of one year, but they do not provide all fluxes. In contrast, explicit models provide all fluxes but cannot be run over such a period. Moreover, better integration of buildings is also needed in UCMs, so as to take into account their action on the climate. More effective representation of buildings will modify the UHI intensity assessment [112]. However, as the goals are not the same, and as the data will not be available to describe all the buildings in the areas under investigation, specific consideration needs to be given to determine the best adapted description depending on the UCM spatial scale.

Collaboration between urban climatologists and building physics scientists is thus to be encouraged with a view converging towards better integration of simplified BEMs within UCMs and better coupling of UCMs and BEMs in order to use realistic urban conditions for bioclimatic efficient building design [120].

In this review, except for TRNSYS, no commercial BEM tool (PLEIADES, DesignBuilder, Virtual Environment) used by the engineering consultants was included in the chaining or coupling projects analyzed. Buildings are still designed and verified as if they were in rural areas. As cities are densifying, it is necessary to bring these advances to the market and to develop these kinds of couplings (even if imperfect) for commercial tools.

Acknowledgements

The authors are very grateful for the strong support for the research carried out at the TRIBU consulting agency, the CEREMA, and the laboratories IRDL and LESO-PB. This research has been partly financed by the French association ANRT and of the Swiss Competence Center for Energy Research SCCER FEED&D of the Swiss Innovation Agency Innosuisse.

Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript

BEM	Building Energy Model
LW	Long Wave radiation
CFD	Computational Fluid Dynamics
RMSE	Root Mean Square Error
CHTC	Convective Heat Transfer Coefficients
SVF	Sky View Factor
CTF	Computational Transfer Function
SS	State-Space
DRF	Direct Root-Finding
SW	Short Wave radiation
FD	Finite Difference
TKE	Turbulent Kinetic Energy
FDR	Frequency-Domain Regression
UCL:	Urban Canopy Layer
FE	Finite Element
UCM	Urban Climate Model
HAMT	Heat and Moisture Transfer
UCP	Urban Canopy Parametrization
HVAC	Heating, Ventilation and Air-Conditioning

References

- [1] Recast E. Directive 2010/31/eu of the european parliament and of the council of 19 may 2010 on the energy performance of buildings (recast). Official Journal of the European Union 2010;18:2010.
- [2] Fouquier A, Robert S, Suard F, Stéphan L, Jay A. State of the art in building modelling and energy performances prediction: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;23:272–88.
- [3] Crawley DB, Hand JW, Kummert M, Griffith BT. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Build Environ* 2008;43:661–73.
- [4] Allegrini J, Dorer V, Carmeliet J. Influence of the urban microclimate in street canyons on the energy demand for space cooling and heating of buildings. *Energy Build* 2012;55:823–32.
- [5] Wan KK, Cheung K, Liu D, Lam JC. Impact of modelled global solar radiation on simulated building heating and cooling loads. *Energy Convers Manag* 2009;50:662–7.
- [6] Gros A, Bozonnet E, Inard C. Modelling the radiative exchanges in urban areas: a review. *Adv Build Energy Res* 2011;5:163–206.
- [7] Nabinger S, Persily A. Impacts of airtightening retrofits on ventilation rates and energy consumption in a manufactured home. *Energy Build* 2011;43:3059–67.
- [8] Bouyer J, Inard C, Musy M. Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context. *Energy Build* 2011;43:1549–59.
- [9] Santamouris M. *Energy and climate in the urban built environment*. Routledge; 2013.
- [10] Mavrogianni A, Davies M, Batty M, Belcher S, Bohnenstengel S, Carruthers D, Chalabi Z, Croxford B, Demanuele C, Evans S, et al. The comfort, energy and health implications of london's urban heat island. *Build Serv Eng Technol* 2011;32:35–52.
- [11] Mauree D, Coccolo S, Kaempf J, Scartezzini J-L. Multi-scale modelling to evaluate building energy consumption at the neighbourhood scale. *PLoS One* 2017;12:e0183437.
- [12] Mirzaei PA, Haghghat F. Approaches to study urban heat island—abilities and limitations. *Build Environ* 2010;45:2192–201.
- [13] Miller C, Thomas D, Kämpf J, Schlueter A. Urban and building multiscale co-simulation: case study implementations on two university campuses. *J Build Perform Simul* 2018;11:309–21.
- [14] Lauzet N, Morille B, Leduc T, Musy M. What is the required level of details to represent the impact of the built environment on energy demand? *Procedia Environ Sci* 2017;38:611–8.
- [15] Vallati A, Mauri L, Colucci C. Impact of shortwave multiple reflections in an urban street canyon on building thermal energy demands. *Energy Build* 2018;174:77–84.
- [16] Goffart J, Rabouille M, Mendes N. Uncertainty and sensitivity analysis applied to hydrothermal simulation of a brick building in a hot and humid climate. *J Build Perform Simul* 2017;10:37–57.
- [17] Santamouris M. On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings. *Energy Build* 2014;82:100–13.
- [18] ADEME. Performances réelles des bâtiments - retours d'expériences - enseignements des campagnes de suivi et d'évaluation de 14 opérations instrumentées par l'ADEME en Rhône-Alpes, Technical Report. VILLE ET AMÉNAGEMENT DURABLE; 2016.
- [19] Spitz C, Mora L, Wurtz E, Jay A. Practical application of uncertainty analysis and sensitivity analysis on an experimental house. *Energy and Buildings*; 2012.
- [20] Cesaratto PG, De Carli M. A measuring campaign of thermal conductance in situ and possible impacts on net energy demand in buildings. *Energy and Buildings*; 2013.
- [21] Johnston D, Miles-Shenton D, Farmer D. Quantifying the domestic building fabric 'performance gap'. *Build Serv Eng Technol* 2015;36:614–27.
- [22] Zhao H-x, Magoulès F. A review on the prediction of building energy consumption. *Renew Sustain Energy Rev* 2012;16:3586–92.
- [23] Kavgić M, Mavrogianni A, Mumović D, Summerfield A, Stevanović Z, Djurović-Petrović M. A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector. *Build Environ* 2010;45:1683–97.
- [24] Swan LG, Ugursal VI. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: a review of modeling techniques. *Renew Sustain Energy Rev* 2009;13:1819–35.
- [25] Fumo N. A review on the basics of building energy estimation. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;31:53–60.
- [26] Oke T. *Boundary layer climates*. 2nd Methuen; 1987. p. 289p. 548.
- [27] Grimmond C, Roth M, Oke T, Au Y, Best M, Betts R, Carmichael G, Cleugh H, Dabberdt W, Emmanuel R, Freitas E, Fortuniak K, Hanna S, Klein P, Kalkstein L, Liu C, Nickson A, Pearlmuter D, Sailor D, Voogt J. Climate and more sustainable cities: climate information for improved planning and management of cities (Producers/Capabilities perspective). *Procedia Environ Sci* 2010;1:247–74.
- [28] Stewart ID, Oke TR. Local climate zones for urban temperature studies. *American Meteorological Society*; 2012.
- [29] Arnfield AJ. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int J Climatol* 2003;23:1–26.
- [30] Kanda M. Progress in urban meteorology: a review. *J Meteorol Soc Japan Ser II* 2007;85:363–83.
- [31] Lun I, Mochida A, Ooka R. Progress in numerical modelling for urban thermal environment studies. *Adv Build Energy Res* 2009;3:147–88.
- [32] Grimmond CSB, Blackett M, Best M, Barlow J, Baik J, Belcher S, Bohnenstengel S, Calmet I, Chen F, Dandou A, et al. The international urban energy balance models comparison project: first results from phase I. *J app meteorol climatol* 2010;49:1268–92.

- [33] Toparlar Y, Blocken B, Maiheu B, Van Heijst G. A review on the CFD analysis of urban microclimate. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;80:1613–40.
- [34] Garuma GF. Review of urban surface parameterizations for numerical climate models. *Urban Clim* 2018;24:830–51.
- [35] Allegri J, Orehounig K, Mavromatidis G, Ruesch F, Dorer V, Evins R. A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;52:1391–404.
- [36] Anderson JE, Wulfhorst G, Lang W. Energy analysis of the built environment—a review and outlook. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;44:149–58.
- [37] Reinhart CF, Cerezo Davila C. Urban building energy modeling – a review of a nascent field. *Build Environ* 2016;97:196–202.
- [38] Li W, Zhou Y, Cetin K, Eom J, Wang Y, Chen G, Zhang X. Modeling urban building energy use: a review of modeling approaches and procedures. *Energy* 2017;141:2445–57.
- [39] Frayssinet L, Merlier L, Kuznik F, Hubert JL, Milliez M, Roux JJ. Modeling the heating and cooling energy demand of urban buildings at city scale. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 2018.
- [40] Sola A, Corchero C, Salom J, Sanmarti M. Simulation tools to build urban-scale energy models: a review. *Energies* 2018;11:3269.
- [41] Castaldo VL, Pisello AL. Uses of dynamic simulation to predict thermal-energy performance of buildings and districts: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy Environ* 2018;7:e269.
- [42] Oke TR, Mills G, Christen A, Voogt JA. *Urban climates*. Cambridge University Press; 2017.
- [43] Lemonsu A, Masson V. Simulation of a summer urban breeze over Paris. *Boundary-Layer Meteorol* 2002;104:463–90.
- [44] Lac C, Chaboureaud P, Masson V, Pinty P, Tulet P, Escobar J, Leriche M, Barthe C, Aouizerats B, Augros C, et al. Overview of the meso-nh model version 5.4 and its applications. *Geoscientific Model Development Discussions*; 2017. p. 1929–69.
- [45] Broadbent AM, Coutts AM, Tapper NJ, Demuzere M. The cooling effect of irrigation on urban microclimate during heatwave conditions. *Urban Clim* 2018;23:309–29.
- [46] Daniel M, Lemonsu A, Viguie V. Role of watering practices in large-scale urban planning strategies to face the heat-wave risk in future climate. *Urban Climate*; 2016.
- [47] Pigeon G, Zibouche K, Bueno B, Le Bras J, Masson V. Improving the capabilities of the town energy balance model with up-to-date building energy simulation algorithms: an application to a set of representative buildings in Paris. *Energy Build* 2014;76:1–14.
- [48] Le Moigne P, Boone A, Calvet J, Decharme B, Faroux S, Gibelin A, Lebeaupin C, Mahfouf J, Martin E, Masson V, et al. *Surfex scientific documentation*. Toulouse, France: Note de centre (CNRM/GMME), Météo-France; 2009.
- [49] Masson V. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorol* 2000;94:357–97.
- [50] Redon EC, Lemonsu A, Masson V, Morille B, Musy M. Implementation of street trees within the solar radiative exchange parameterization of teb in surfex v8.0. *Geosci Model Dev (GMD)* 2017;10:385–411.
- [51] Noilhan J, Planton S. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon Weather Rev* 1989;117:536–49.
- [52] de Munck C, Lemonsu A, Masson V, Le Bras J, Bonhomme M. Evaluating the impacts of greening scenarios on thermal comfort and energy and water consumptions for adapting Paris city to climate change. *Urban Clim* 2018;23:260–86.
- [53] Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Barker DM, Wang W, Powers JG. A description of the advanced research WRF version 2, Technical Report. National Center For Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Microscale Meteorology Div; 2005.
- [54] Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Barker DM, Wang W, Powers JG. A description of the advanced research wrf version 2. NCAR tech. Note. 2005. [Citeseer].
- [55] Chen F, Kusaka H, Bornstein R, Ching J, Grimmond C, Grossman-Clarke S, Loridan T, Manning KW, Martilli A, Miao S, et al. The integrated wrf/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *Int J Climatol* 2011;31:273–88.
- [56] Z. Liu, D. Barker, Radiance assimilation in wrf-var: implementation and initial results, in: 7th WRF users workshop, Citeseer, pp. 19–22.
- [57] Kusaka H, Kondo H, Kikigawa Y, Kimura F. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab models. *Boundary-Layer Meteorol* 2001;101:329–58.
- [58] Kusaka H, Kimura F. Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: impact on urban heat island simulation for an idealized case. *J Meteorol Soc Japan Ser II* 2004;82:67–80.
- [59] Martilli A, Clappier A, Rotach MW. An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models. *Boundary-Layer Meteorol* 2002;104:261–304.
- [60] Bougeault P, Lacarrere P. Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model. *Mon Weather Rev* 1989;117:1872–90.
- [61] Krpo A, Salamanca F, Martilli A, Clappier A. On the impact of anthropogenic heat fluxes on the urban boundary layer: a two-dimensional numerical study. *Boundary-Layer Meteorol* 2010;136:105–27.
- [62] Salamanca F, Krpo A, Martilli A, Clappier A. A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations—part I. formulation, verification, and sensitivity analysis of the model. *Theor Appl Climatol* 2010;99:331.
- [63] Bueno B, Norford L, Hidalgo J, Pigeon G. The urban weather generator. *J Build Perform Simul* 2013;6:269–81.
- [64] Erell E, Williamson T. Simulating air temperature in an urban street canyon in all weather conditions using measured data at a reference meteorological station. *Int J Climatol* 2006;26:1671–94.
- [65] Remund J. Quality of meteorom version 6.0. Europe 2008;6:389.
- [66] Le Bras J, Masson V. A fast and spatialized urban weather generator for long-term urban studies at the city-scale. *Front Earth Sci* 2015;3:27.
- [67] Mauree D, Blond N, Kohler M, Clappier A. On the coherence in the boundary layer: development of a canopy interface model. *Front Earth Sci* 2017;4:109.
- [68] Mauree D, Blond N, Clappier A. Multi-scale modeling of the urban meteorology: integration of a new canopy model in the wrf model. *Urban Clim* 2018;26:60–75.
- [69] N. Lauzet, D. Mauree, T. Colinart, M. Musy, Construction d'un fichier micro-climatique urbain utilisable en STD, p. 8. IBPSA Conference, Bordeaux (France).
- [70] Huttner S. Further development and application of the 3d microclimate simulation envi-met. Germany: Mainz University; 2012.
- [71] Bruse M, Fleer H. Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environ Model Softw* 1998;13:373–84.
- [72] S. Huttner, M. Bruse, Numerical modeling of the urban climate—a preview on envi-met 4.0, in: 7th international conference on urban climate ICUC-7, yokohama, Japan, vol. 29.
- [73] EDF. Code_saturne web site. 2018 <https://www.code-saturne.org/cms/documentation>.
- [74] Miguet F, Groleau D. A daylight simulation tool for urban and architectural spaces—application to transmitted direct and diffuse light through glazing. *Build Environ* 2002;37:833–43.
- [75] Hénon A, Mestayer PG, Groleau D, Voogt J. High resolution thermo-radiative modeling of an urban fragment in marseilles city center during the ubl-escompte campaign. *Build Environ* 2011;46:1747–64.
- [76] Hénon A, Mestayer PG, Lagouarde J-P, Voogt JA. An urban neighborhood temperature and energy study from the capitul experiment with the solene model. *Theor Appl Climatol* 2012;110:177–96.
- [77] Rodler A, Guernouti S, Musy M, Bouyer J. Thermal behaviour of a building in its environment: modelling, experimentation, and comparison. *Energy Build* 2018;168:19–34.
- [78] Musy M, Malys L, Morille B, Inard C. The use of solene-microclimat model to assess adaptation strategies at the district scale. *Urban Clim* 2015;14:213–23. Cooling Heat Islands.
- [79] Bozonnet E. Urban microclimates impact on the building energy demand - street canyon case, Theses. Université de la Rochelle; 2005.
- [80] Liang W, Huang J, Jones P, Wang Q, Hang J. A zonal model for assessing street canyon air temperature of high-density cities. *Build Environ* 2018;132:160–9.
- [81] Kastendeuch PP, Najjar G, Colin J. Thermo-radiative simulation of an urban district with laser/f. *Urban Clim* 2017;21:43–65.
- [82] Gros A, Bozonnet E, Inard C, Musy M. Simulation tools to assess microclimate and building energy – a case study on the design of a new district, Energy and Buildings 114. 2016. p. 112–22. [SI: Countermeasures to Urban Heat Island].
- [83] Crawley DB, Lawrie LK, Winkelmann FC, Buhl WF, Huang YJ, Pedersen CO, Strand RK, Liesen RJ, Fisher DE, Witte MJ, et al. Energyplus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy Build* 2001;33:319–31.
- [84] Peuportier B, Sommerieux IB. Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings. *Int J Sol Energy* 1990;8:109–20.
- [85] Klein SA. Trnsys-a transient simulation program. *Ashrae Trans* 1976;82:623.
- [86] G. Plessis, A. Kaemmerlen, A. Lindsay, Buildsyspro: a modelica library for modelling buildings and energy systems, in: Proceedings of the 10 th international modelica conference; march 10-12; 2014; Lund; Sweden, vol. 96, Linköping University Electronic Press, pp. 1161–1169.
- [87] D. Robinson, F. Haldi, J. Kämpf, P. Leroux, D. Perez, A. Rasheed, U. Wilke, Citysim: comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning, in: Proc. Building simulation, pp. 1614–1627.
- [88] Tittlein P. Simulation environments adapted to the study of energy behaviour of low-consumption buildings. Theses, Université de Savoie; 2008.
- [89] Delcroix B, Kummert M, Daoud A, Hiller M. Improved conduction transfer function coefficients generation in trnsys multizone building model. Proceedings of 13th conference of international building performance simulation association. Chambéry, France; 2013. August 26e28.
- [90] Mazzarella L, Pasini M. CTF vs FD based numerical methods: accuracy, stability and computational time's comparison. *Energy Procedia* 2015;78:2620–5.
- [91] Solutions IE. Apachesim calculation methods. *IES Virtual Environ* 2018;6:75.
- [92] Pedersen CO. Advanced zone simulation in energyplus: incorporation of variable properties and phase change material (pcm) capability. in: Building simulation 1341–1345..
- [93] Kämpf JH. On the modelling and optimisation of urban energy fluxes. 2009.
- [94] Rodler A, Virgone J, Roux J-J, Hubert J. Development and validation of a three dimensional thermal transient numerical model with sun patch: application to a low energy cell. *Energy and Buildings*; 2015.
- [95] Ribault C, Bouquerel M, Brun A, Schumann M, Rusaouën G, Wurtz E. Assessing tools relevance for energy simulation at the urban scale: towards decision-support tools for urban design and densification. *Energy Procedia* 2017;122:871–6. CISBAT 2017 International Conference Future Buildings and Districts – Energy Efficiency from Nano to Urban Scale.
- [96] Mirsadeghi M, Costola D, Blocken B, Hensen JL. Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: implementation and uncertainty. *Appl Therm Eng* 2013;56:134–51.
- [97] Liddament MW. Air infiltration calculation techniques: an applications guide. UK: Air infiltration and ventilation centre Berkshire; 1986.
- [98] Trocmé M. Assisting low energy consumption building design Phd thesis École Nationale Supérieure des Mines de Paris; 2009
- [99] Givoni B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy Build*

- 1992;18:11–23.
- [100] Upadhyay G, Mauree D, Kämpf JH, Scartezzini J-L. Evapotranspiration model to evaluate the cooling potential in urban areas—a case study in Switzerland. 14th international conference of the international building performance simulation association. EPFL-CONF; 2015. 214838.
- [101] Coccolo S, Kämpf J, Mauree D, Scartezzini J-L. Cooling potential of greening in the urban environment, a step further towards practice. *Sustain Cities Soc* 2018;38:543–59.
- [102] Palme M, Inostroza L, Villacreses G, Lobato A, Carrasco C. Urban weather data and building models for the inclusion of the urban heat island effect in building performance simulation. *Data in Brief* 2017;14:671–5.
- [103] A. Salvati, H. Coch Roura, C. Cecere, Urban morphology and energy performance: the direct and indirect contribution in mediterranean climate, in: PLEA 2015 architecture in (R) evolution—31st international PLEA conference—bologna 9-11 september, building green futures, pp. 1–8.
- [104] L. Merlier, L. Frayssinet, F. Kuznik, G. Rusaouën, K. Johannes, J.-L. Hubert, M. Milliez, Analysis of the (urban) microclimate effects on the building energy behaviour, in: Presented at the proceedings of the 15th IBPSA conference [San Francisco].
- [105] Yang X, Zhao L, Bruse M, Meng Q. An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments. *Energy Build* 2012;54:243–251..
- [106] Dorer V, Allegrini J, Orehoung K, Moonen P, Upadhyay G, Kämpf J, Carmeliet J. Modelling the urban microclimate and its impact on the energy demand of buildings and building clusters. *Proceedings of BS* 2013;2013:3483–9.
- [107] Bueno B, Norford L, Pigeon G, Britter R. Combining a detailed building energy model with a physically-based urban canopy model. *Boundary-Layer Meteorol* 2011;140:471–89.
- [108] Kikegawa Y, Genchi Y, Yoshikado H, Kondo H. Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings' energy-demands. *Appl Energy* 2003;76:449–66.
- [109] Openfoam. Openfoam web. 2018.
- [110] Rotach MW, Vogt R, Bernhofer C, Batchvarova E, Christen A, Clappier A, Feddersen B, Gryning S-E, Martucci G, Mayer H, Mitev V, Oke TR, Parlow E, Richner H, Roth M, Roulet Y-A, Ruffieux D, Salmund JA, Schatzmann M, Voogt JA. Bubble – an urban boundary layer meteorology project. *Theor Appl Climatol* 2005;81:231–61.
- [111] TRNSYS. *Trnsys* 2018;18 web.
- [112] De Munck C, Pigeon G, Masson V, Meunier F, Bousquet P, Tréméac B, Merchat M, Poef P, Marchadier C. How much can air conditioning increase air temperatures for a city like paris, France? *Int J Climatol* 2013;33:210–27.
- [113] Mauree D, Coccolo S, Perera ATD, Nik V, Scartezzini J-L, Naboni E. A new framework to evaluate urban design using urban microclimatic modeling in future climatic conditions. *Sustainability* 2018;10:1134.
- [114] Perera A, Coccolo S, Scartezzini J-L, Mauree D. Quantifying the impact of urban climate by extending the boundaries of urban energy system modeling. *Appl Energy* 2018;222:847–60.
- [115] Evins R, Dorer V, Carmeliet J. Simulating external longwave radiation exchange for buildings. *Energy Build* 2014;75(06):472–82.
- [116] Yi CY, Peng C. Microclimate change outdoor and indoor coupled simulation for passive building adaptation design. *Procedia Comput Sci* 2014;32:691–8.
- [117] Bueno B, Pigeon G, Norford LK, Zibouche K, Marchadier C. Development and evaluation of a building energy model integrated in the TEB scheme. *Geosci Model Dev (GMD)* 2012;5:433–48.
- [118] Djedjig R, Bozonnet E, Belarbi R. Modeling green wall interactions with street canyons for building energy simulation in urban context. *Urban Clim* 2016;16:75–85.
- [119] Ali-Toudert F, Böttcher S. Urban microclimate prediction prior to dynamic building energy modelling using the teb model as embedded component in trnsys. *Theor Appl Climatol* 2018;134:1413–28.
- [120] Mauree D, Naboni E, Coccolo S, Perera A, Scartezzini J-L. A review of assessment methods for the urban environment and its energy sustainability to guarantee climate adaptation of future cities. *Renew Sustain Energy Rev* 2019;12:733–46.

V.2 Conclusions du chapitre 5

Cet article fournit un socle de connaissance concernant les outils de MCU, de STD, et des liens envisageables entre les deux. Un constat commun aux 8 exemples de couples MCU + STD présentés est que les chainages ne sont que partiels et ne concernent pas toutes les variables climatiques. Le phénomène le plus complexe à prendre en compte semble être les échanges par rayonnement GLO. Cette donnée d'échange GLO peut être calculée pour l'enveloppe extérieure des bâtiments par les MCU qui travaillent à une échelle micro. Cependant, nous avons vu dans le Chapitre 3 que les échanges infrarouges sont souvent inexistantes dans les modèles thermiques et bâtiment et donc moyennés et intégrés au flux convectif. Il en est de même pour une grande partie des sollicitations, qui issues de MCU pourraient être détaillées sur les façades mais ne pourront être intégrées avec tant de détail dans les modélisations du bâtiment. Il est regrettable d'agréger et de moyenniser cette donnée détaillée, mais les modèles de STD ont été développés à une période où cette précision n'existait pas.

A partir du travail bibliographique présenté dans cet article, il a été possible de classer les possibilités des outils numériques permettant la représentation du climat urbain par rapport aux variables et phénomènes climatiques qu'ils permettent de calculer. Elles sont illustrées dans le Tableau V. 1 - Synthèse des caractéristiques des outils de climatologie urbaine.. Les sollicitations climatiques sont décomposées suivant la température d'air, l'humidité relative, l'aéroulque, et les rayonnements solaire et infrarouge.

FAMILLES D'OUTILS	OUTILS	Phénomènes physiques caractérisant le Microclimat Urbain					Echelle d'étude		Commentaire
		Température d'air	Humidité relative	Solaire	Infrarouge	Aéroulque	Spatiale	Temporelle	
Atmosphériques	SOLENE-Microclimat	X	X	X	X	X	Ilot urbain environ 20 hectares	Simulation sur quelques jours (2 ou 3)	Outil Open Source Résultats détaillés, discrétisés sur l'ilot urbain
	ENVI-met	X	X	X	X	X	Ilot urbain environ 20 hectares	Simulation sur quelques jours (2 ou 3)	Outil propriétaire Résultats détaillés, discrétisés sur l'ilot urbain
Paramétriques	TEB (Town Energy Budget)	X	X	X	X	X	Ville entière ou quartier	Simulation sur l'année entière	Résultats simplifiés, homogènes sur l'ilot urbain
	UWG (Urban Weather Generator)	X	X				Ville entière ou quartier	Simulation sur l'année entière	Résultats simplifiés, homogènes sur l'ilot urbain
	CIM (Canopy Interface Model)	X	X			X	Ville entière ou quartier	Simulation sur l'année entière	Résultats simplifiés, homogènes sur l'ilot urbain
Radiatifs	CitySim	(Température de surface)		X	X		Ville entière ou quartier	Simulation sur l'année entière	Résultats détaillés, discrétisés sur l'ilot urbain

Tableau V. 1 - Synthèse des caractéristiques des outils de climatologie urbaine.

Certains modèles climatiques urbains proposent une reconstruction totale et détaillée du microclimat urbain, en tenant compte de toutes les sollicitations météorologiques (températures, humidité relative, etc...). Cependant, pour ces outils détaillés, comme SOLENE-Microclimat et ENVI-met, la résolution d'équations de mécanique des fluides sont complexes et nécessitent des temps de calcul importants. De ce fait, ces études se limitent à quelques jours seulement. A l'inverse, des outils paramétriques permettent de recréer un fichier météo à l'échelle micro au pas de temps horaire et sur une année complète qui peut être utilisé directement en STD. TEB est un de ces outils proposé en code open source par Météo France. Toutefois, son appropriation reste difficile et son usage est plutôt réservé aux experts de Météo France. Ces derniers utilisent par ailleurs TEB comme un « module urbain » du modèle climatique Meso-NH travaillant à l'échelle mésoclimatique.

Un second outil est UWG, code open source également. Cependant, les derniers développements ont glissé vers des sujets de recherche légèrement différents (la modélisation de la lumière naturelle en ambiance intérieure).

Finalement, le choix s'est porté sur le couplage entre deux outils que sont CitySim et CIM. CitySim est un logiciel de rayonnement intégrant un module de thermique du bâtiment. Il dispose d'une interface graphique conviviale qui simplifie la prise en main de l'outil et la licence est gracieusement ouverte pour 1 an pour les projets orientés recherche. CIM est un logiciel « simplifié » de mécanique des fluides urbaine, dont la volonté du développeur, Dasaraden Mauree, est de vouloir favoriser son usage par d'autres. Ces deux outils sont actuellement développés au sein du même laboratoire (Laboratoire d'énergie solaire et physique du bâtiment LESO-PB à l'EPFL de Lausanne), donnant ainsi des garanties sur leur interopérabilité. Enfin, leur couplage a déjà été réalisé dans la littérature (Mauree, Coccolo, et al., 2017). Ce couplage est éprouvé pour le cas d'étude de Confluence à Lyon dans le Chapitre 6.

VI CHAPITRE 6 CONSTRUCTION D'UN FICHER MICROCLIMATIQUE URBAIN UTILISABLE EN STD

VI.1	ETUDES NUMERIQUES : PROPOSITION D'UN CHAINAGE LOGICIELS	173
VI.2	CREATION D'UNE MAQUETTE 3D DE LA SCENE URBAINE	174
VI.2.1	A partir d'une maquette 3D graphique	174
VI.2.2	A partir de bases de données ouvertes de type SIG	176
VI.3	MODELISATION DES TEMPERATURES DES SURFACES URBAINES A L'AIDE DE CITYSIM	178
VI.3.1	Description de l'outil CitySim.....	178
VI.3.1.1	<i>Modèle de thermique du bâtiment</i>	<i>178</i>
VI.3.1.2	<i>Modèle de rayonnement solaire et infrarouge.....</i>	<i>179</i>
VI.3.2	Application au quartier de Lyon Confluence.....	179
VI.3.2.1	<i>Création de la maquette numérique CitySim et saisie des caractéristiques</i>	<i>179</i>
VI.3.2.2	<i>Premiers résultats de températures de surfaces</i>	<i>181</i>
VI.3.3	Évaluation du modèle détaillé de thermique des bâtiments de CitySim	182
VI.3.3.1	<i>Présentation du modèle détaillé de thermique des bâtiments de CitySim</i>	<i>182</i>
VI.3.3.2	<i>Application sur un cas test de 3 bâtiments.....</i>	<i>182</i>
VI.3.4	Export des résultats CitySim vers CIM.....	187
VI.4	MODELISATION DES TEMPERATURES D'AIR ET DES VITESSES ET DIRECTIONS DE VENT A L'AIDE DE CIM.....	188
VI.4.1	Description de l'outil CIM	188
VI.4.2	Application au quartier de Lyon Confluence.....	189
VI.4.2.1	<i>Présentation des versions de chainage testées.....</i>	<i>189</i>
VI.4.3	Comparaison des données simulées par le chainage CitySim +CIM aux mesures.....	191
VI.5	CONCLUSIONS DU CHAPITRE 6.....	195

Les chapitres 3 et 5 étaient l'occasion de faire une revue non exhaustive des outils numériques climatiques dédiés à différentes échelles urbaines et des logiciels STD appliqués à l'évaluation des performances des bâtiments. La présentation de ces outils ainsi que de leurs chainages ou couplages réalisés à ce jour dans le cadre de projets de recherche, démontre le partage d'une volonté de lier les climats urbains à la conception bioclimatique des bâtiments et illustre les possibilités qu'offrent actuellement les outils disponibles. Ce lien, théoriquement à double sens, avec le microclimat urbain qui sollicite le bâtiment et ce dernier qui modifie son propre environnement (morphologie, typologie, activités) et crée de fait une rétroaction sur son microclimat, peut être représenté d'une manière plus ou moins complète comme détaillé précédemment.

Ainsi, de nombreux projets de recherche s'attaquent à cette problématique avec pour certains la volonté de produire des outils directement utilisables en conception, comme cela a été le cas du projet ANR MERUBBI (Méthodes d'exploitation des ressources utiles du bâtiment bioclimatique dans son îlot) entre 2014 et 2018 (<https://anr.fr/Projet-ANR-13-VBDU-0007>).

Rappelons que les ambitions de ce projet de thèse sont de prendre en compte, lors de la conception du bâtiment, les surchauffes climatiques prospectives (changement climatique) et urbaines (îlot de chaleur et microclimat urbain). La prospection sur le climat futur peut se faire au travers des scénarios du GIEC et du modèle de génération fictive de météo de METEONORM, ou via des années réelles chaudes qu'on risque de retrouver fréquemment dans le futur (voir méthodologie proposée en chapitre 2). En ce qui concerne la considération de la surchauffe urbaine en phase de conception bioclimatique de bâtiments, elle peut être induite via des mesures météorologiques venant de stations urbaines. Cette solution est cependant peu utilisée, car peu de données météo de qualité sont accessibles. Pourtant un nombre important de mesures existent, au travers les Gestion Technique de Bâtiment GTB notamment, ou pour d'autres domaines que celui du bâtiment. Une autre solution pour prendre en compte la surchauffe urbaine et les sollicitations locales liées à l'environnement construit est envisageable. Il s'agit d'utiliser les résultats de sortie des logiciels de climat urbain qui ont l'objectif de redéfinir un fichier météo échelle méso en fichier météo échelle micro. Nous avons vu dans le chapitre 5 précédent, que les phénomènes qui peuvent être pris en compte dépendent du modèle utilisé.

Avant de présenter la démarche testée il est nécessaire de rappeler que les développements mis en place dans cette thèse CIFRE doivent considérer la « réalité opérationnelle ». Cela implique donc de tenir compte du temps à passer pour une étude, de la disponibilité des données et de leur qualité (type open data, Bdtopo), ainsi que de l'adaptabilité des outils à un bureau d'études (capacité de calcul limitées des ordinateurs, outils logiciels conviviaux, inter-opérables, etc...).

En croisant les problématiques du bureau d'études et les réponses actuelles en termes d'outils de simulation, nous avons décidé d'explorer le chaînage CitySim (Walter et Kämpf, 2015) + CIM (Mauree, 2014) (Mauree, Blond, et al., 2017) pour reconstruire un fichier météo annuel de données horaires à l'échelle d'un îlot urbain du quartier de Lyon Confluence, ceci en partant de données météo péri-urbaines. Le cas d'étude reste le même que sur l'ensemble de la thèse, ainsi, c'est la météo du quartier de Lyon CONFLUENCE qui va être simulée à partir du fichier de la station METEO FRANCE pour l'année 2013. Ce type de fichier microclimatique, fournissant des données heure par heure sur une année complète, pourra être utilisé en STD.

Pour commencer, nous intégrerons uniquement les composantes température et vitesse de l'air dans notre prise en compte du microclimat urbain lors de la phase de conception bioclimatique d'un projet.

VI.1 Etudes numériques : proposition d'un chaînage logiciels

La démarche de construction d'un fichier météorologique local est basée sur le chaînage CitySim + CIM et se fait en trois temps (Figure VI. 1) :

- Création d'une maquette 3D de la scène urbaine ;
- Évaluation des températures des surfaces urbaines à l'aide de CitySim ;
- Évaluation des températures moyennes d'air et des vitesses et directions moyennes de vent de la scène urbaine à l'aide de CIM.

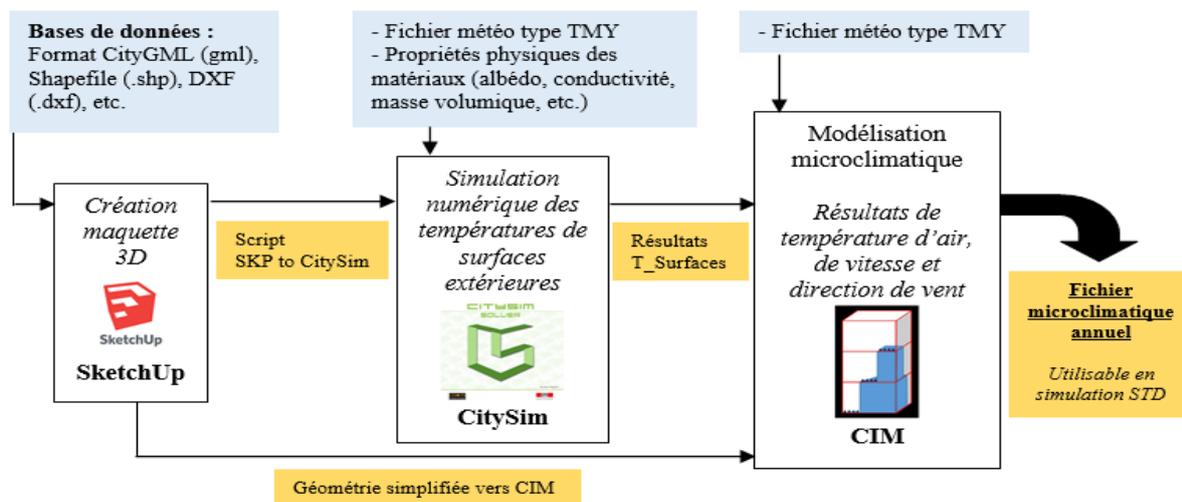


Figure VI. 1 - Démarche de construction d'un fichier microclimatique horaire pour l'année.

Ici, le quartier de Lyon Confluence est délimité par les frontières naturelles que sont la Saône et le Rhône d'une part et par le Cours Suchet et le quai Antoine Riboud d'autre part, ce qui représente une zone de 54 hectares d'environ 800 x 700 m (Figure VI. 2) autour du bâtiment J1a étudié en Chapitre 4.

Par ailleurs, cette démarche s'appuiera sur les données mesurées par METEO FRANCE afin de reconstruire une donnée météo estimée pour le quartier Lyon Confluence (Figure VI. 3). Ces estimations seront à valider avec les mesures météorologiques faites sur place lors de l'étude ICU de TRIBU (présentées en chapitre 2). Compte tenu de leur abondance et de leur qualité, les données de 2013 sont retenues pour cette étude.

Les sections qui suivent s'attachent à décrire en détail chacune des étapes du chaînage CitySim + CIM.



Figure VI. 2 - Délimitations du cas d'étude de Confluence et localisation de la station météo urbaine.



Figure VI. 3 - Principe de la reconstruction des données météorologiques de METEO France (zone péri-urbaine) vers celles de Lyon CONFLUENCE (zone urbaine).

VI.2 Création d'une maquette 3D de la scène urbaine

VI.2.1 A partir d'une maquette 3D graphique

Une maquette 3D permettant de représenter explicitement les typologies et morphologies d'un îlot urbain est requise dans les outils Citysim et CIM. Pour notre cas d'étude, l'aménageur *SPL Lyon Confluence* possède une maquette 3D modélisée sous SketchUp (logiciel propriétaire disposant d'une version gratuite, « SketchUp Make »). Celle-ci apporte un rendu graphique qualitatif de la zone de la Confluence et de son environnement proche. (Figure VI. 4). Cependant, elle n'est pas utilisable en modélisation numérique, car trop détaillée. En effet, elle contient des faces internes aux bâtiments qui sont mal gérées

par l'outil de calcul CitySim. De plus, des erreurs de connexions entre faces laissant un jour ou une intersection sont fréquemment rencontrées, ce qui gêne la définition du maillage et de la surface de l'enveloppe thermique des bâtiments. Enfin, les détails de représentation graphique doivent être maîtrisés afin d'éviter des temps de simulation trop importants, le maillage étant à affiner uniquement aux endroits où l'on souhaite de la précision dans les résultats.

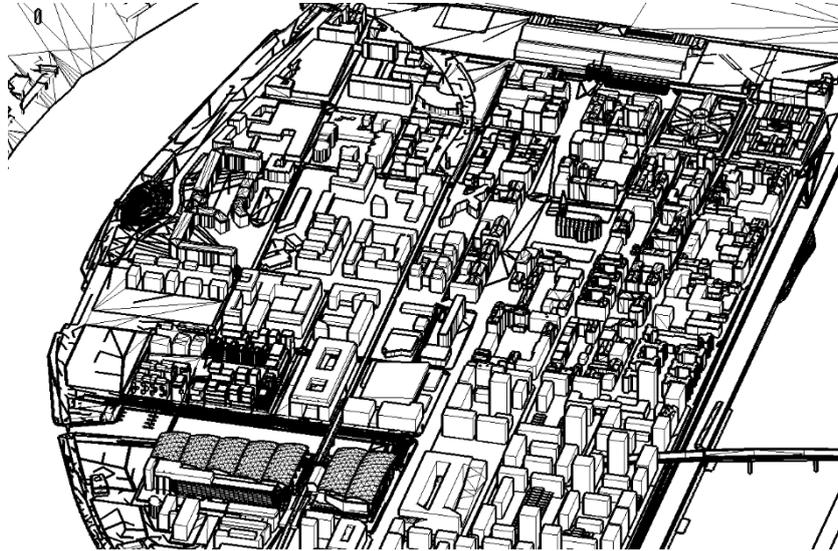


Figure VI. 4 - Maquette SketchUp graphique de Lyon Confluence fournie par l'aménageur SPL Lyon Confluence.

Compte tenu de ces éléments, un premier travail de nettoyage (Figure VI. 5) a été opéré pour simplifier la maquette 3D initiale et permettre son export vers l'étape suivante, à savoir la modélisation CitySim. Cette première version de maquette est nommée Confluence3D_V1 dans la suite du chapitre. A noter que le bâtiment coloré en jaune est le bâtiment J1a, le cas d'étude de logements collectifs du Chapitre 4.

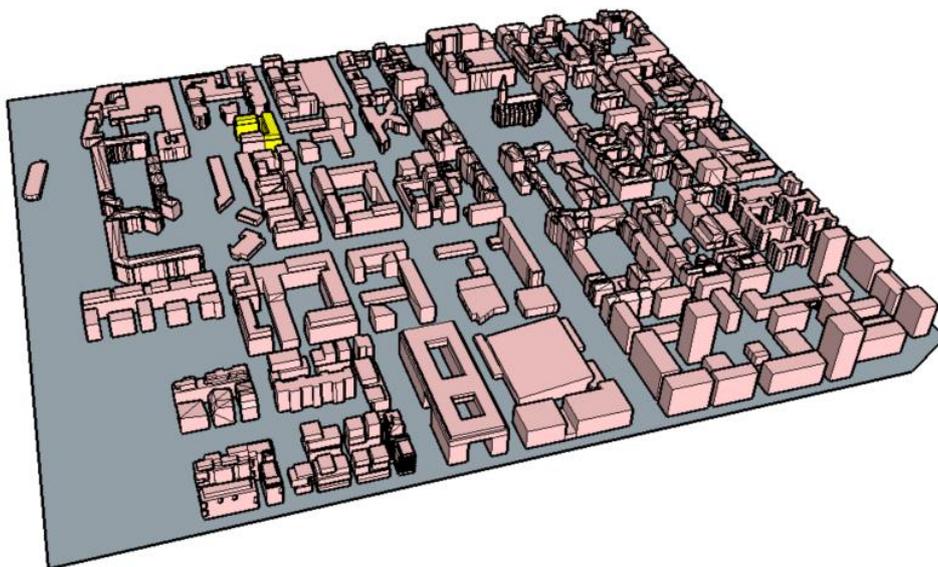


Figure VI. 5 - Première version de la maquette 3D nommée Confluence3D_V1.

Au final, cet exemple montre qu'il est important de différencier maquette 3D graphique (d'illustration) et maquette 3D de simulation numérique conçue pour du calcul : cette dernière doit être rigoureuse du point de vue connexion des faces, et adéquate du point de vue des échelles ; compte tenu du travail de post-traitement requis, les maquettes 3D graphiques ne sont pas appropriées pour ce travail.

VI.2.2 A partir de bases de données ouvertes de type SIG

« Une donnée ouverte est une donnée qui peut être librement utilisée, réutilisée et redistribuée par quiconque – sujette seulement, au plus, à une exigence d'attribution et de partage à l'identique. »
(Source : Open Définition _ <https://opendefinition.org>).

Une version 2 de la maquette 3D a été créée avec l'utilisation de deux bases de données ouvertes (Annexe VI. 1) mises à disposition par la métropole du GRAND LYON. La première est une base de données CityGML (City Geography Markup Language) qui est un format libre et standardisé de représentation 3D des constructions urbaines. Dans cette base de données, une ville est modélisée sous la forme d'un ensemble d'objets urbains qualifiés selon leur rôle dans l'espace urbain. Ces objets peuvent notamment être le relief du terrain, les bâtiments, la végétation ou encore l'occupation des sols. Pour représenter ces objets, le standard CityGML prévoit cinq niveaux de détails (ou Level of Detail LOD) allant de 0 à 4 qui permettent de représenter la ville avec plus ou moins de finesse et de détails et de travailler à différentes échelles. Un exemple de ces LOD pour les bâtiments est proposé sur la Figure VI. 6.

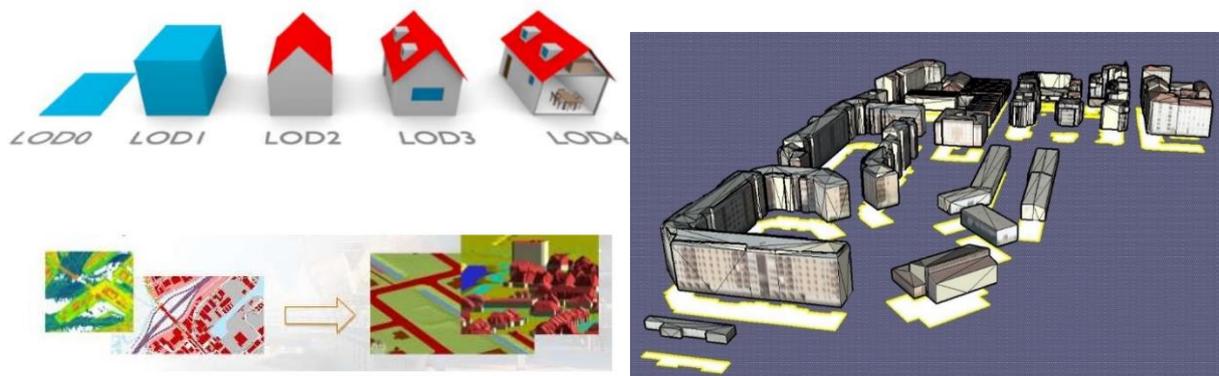


Figure VI. 6 - Échelles de projets et Level Of Detail (LOD) du CityGML, et exemple de bâtiments de Lyon Confluence.

Le GRAND LYON a construit ses bases de données CityGML de 2012 à l'aide de l'outil RhinoCity avec un LOD 2 pour les bâtiments. Les informations contenues dans cette base de données ont été importées sans difficulté notable sous SketchUp à l'aide du plugin CityEditor. Pour les bâtiments construits après 2012, le GRAND LYON fournit également une base de données en format CityGML dans une couche appelée « bâtiments remarquables ». Ceux-ci sont représentés en LOD 4 et sont donc trop détaillés pour les modélisations CitySim. Il est théoriquement possible de supprimer les informations de type LOD 4 pour ne conserver que celle de LOD 0, 1, et 2. Cependant, dans notre cas d'étude, le plugin CityEditor n'a pas permis d'obtenir une maquette de LOD 2. Ce blocage peut venir soit d'un défaut du plugin, soit d'un manque de rigueur lors de la construction de la donnée CityGML. En effet, tous les éléments graphiques doivent être classés dans les différents LODs auxquels ils appartiennent. Si par exemple les

façades et pentes de toit, qui sont théoriquement des informations de type LOD 2, ont été classées en LOD 4, elles ne seront plus visibles après le traitement de simplification de la maquette du LOD 4 vers le LOD 2 (Annexe VI. 2). Cette dernière remarque montre que si l'utilisation de base de données CityGML est prometteuse pour la construction d'une maquette 3D, cela n'est possible qu'à la condition de respecter les règles standards de construction de la donnée CityGML.

Pour pallier ces difficultés concernant les manques de la base CityGML, une seconde base de données au format Shapefile (ou « fichier de formes ») a été utilisée. Ce type de base de données contient deux informations liées à chaque bâtiment : leur empreinte au sol rassemblée dans un fichier SHP (Figure VI. 7) et un attribut « élévation » contenu dans un fichier DBF. Pour ce cas d'étude, le logiciel QGIS a été utilisé pour visualiser des bases de données SHP, découper la zone d'intérêt et exporter la 2D des bâtiments de Lyon Confluence construits après 2012 vers SketchUp en vue d'y extruder les empreintes bâtiments suivant l'attribut « élévation » de la table attributaire (fichier DBF). Ainsi, le modèle 3D créé est simple, mais suffisamment détaillé pour les modélisations CitySim.

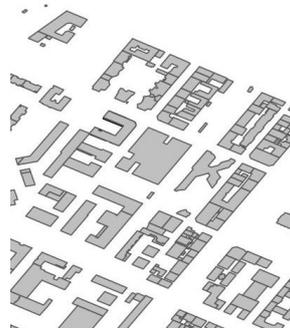


Figure VI. 7 - Extrait du fichier Shapefile SHP des empreintes au sol des bâtiments de Lyon Confluence.

Au final, une seconde version de maquette, nommée Confluence3D_V2 dans la suite du chapitre, a été construite à partir de la base de données CityGML pour les bâtiments datant d'avant 2012 (bâtiments texturés sur la Figure VI. 8) et de la base de données au format Shapefile pour les bâtiments construits après 2012 (bâtiments colorisés en rose sur la même Figure VI. 8).

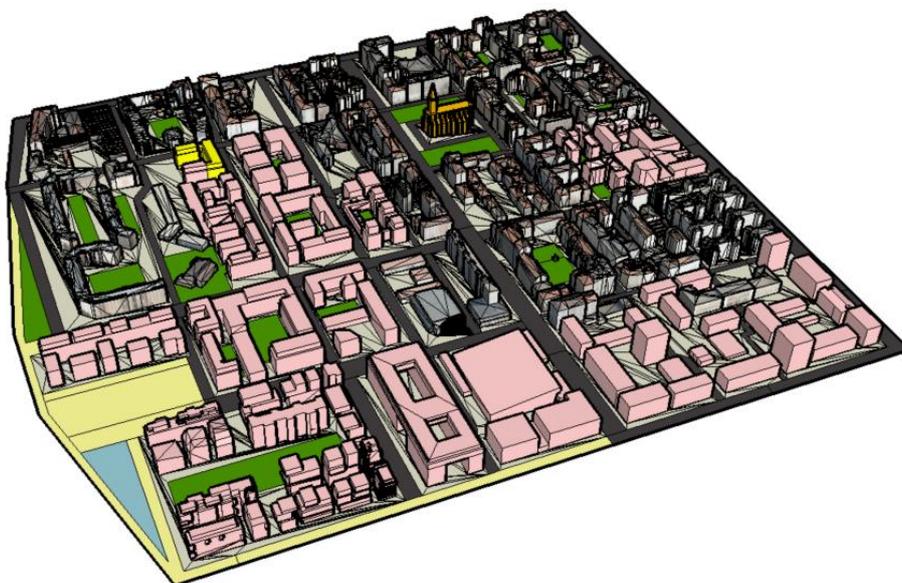


Figure VI. 8 - Seconde version de la maquette 3D nommée Confluence3D_V1.

Enfin, la différenciation des typologies des surfaces de sols extérieurs (asphaltes, pavées, stabilisées, pelouses...) a été faite à la main d'après la vue aérienne de Géoportail (www.geoportail.gouv.fr). Cette dernière étape de construction de la maquette 3D pourrait être améliorée grâce à la télédétection de photos aériennes pour différencier les typologies de surfaces ou à un enrichissement des bases de données.

VI.3 Modélisation des températures des surfaces urbaines à l'aide de CitySim

VI.3.1 Description de l'outil CitySim

CitySim est un logiciel de simulation des flux énergétiques en milieu urbain développé au sein du laboratoire d'énergie solaire et physique du bâtiment (LESO-PB) de l'EPFL de Lausanne (<https://www.epfl.ch/labs/leso/transfer/software/citysim/>). Il permet de simuler la demande en énergie des bâtiments d'une scène urbaine, de faire des études de faisabilité énergétiques à partir de sources renouvelables solaires en environnement urbain, mais plus généralement d'aider les aménageurs à concevoir des espaces urbains dans le but de favoriser les énergies renouvelables et limiter les impacts carbone.

Ce logiciel est basé sur trois modèles, dont le détail est donné ci-après : un modèle de radiativité pour les échanges radiatifs solaires et infrarouges entre les surfaces extérieures, un modèle de thermique du bâtiment basé sur une analogie électrique (Figure VI. 9) et un modèle d'évapotranspiration pour les surfaces végétalisées et les arbres. Ces modèles sont résolus à partir de CitySim Solver, un programme intégré dans CitySim en lignes de commande. Pour lancer les simulations, il est nécessaire de spécifier en entrée :

- La représentation 3D des bâtiments au niveau de la scène urbaine,
- Les propriétés thermo-physiques des bâtiments via un fichier XML,
- Les fichiers météo et d'horizons (respectivement aux formats CLI et HOR).

Si CitySim est un logiciel open source, la société Kaemco commercialise une interface utilisateur graphique plus conviviale. Actuellement, les projets de recherche peuvent bénéficier d'une année de licence gratuite.

VI.3.1.1 Modèle de thermique du bâtiment

Le schéma électrique équivalent du modèle de thermique du bâtiment utilisé dans CitySim est présenté sur la Figure VI. 9. Pour une meilleure lisibilité du schéma, le bilan énergétique du toit n'est pas représenté, ce dernier étant équivalent au nœud de paroi. Le modèle de conduction thermique utilisé pour les parois, le plancher et la toiture est un modèle « 2RC », soit 2 résistances et une seule capacité thermique. Le modèle 2RC décrit un nœud de température dans la paroi θ_w auquel est rattaché une capacité thermique équivalente C_w , estimée via une moyenne pondérée à toutes les couches (parement extérieur, isolation...). Il en est de même pour les 2 résistances équivalentes qu'on retrouve entre la température de paroi et la température de surface extérieure K_{w1} , puis entre la température de paroi et la température de surface extérieure K_{w2} . Ce modèle simple de thermique de bâtiment a passé avec succès les BESTEST présentés dans le Chapitre 3. Il est implémenté par défaut dans CitySim.

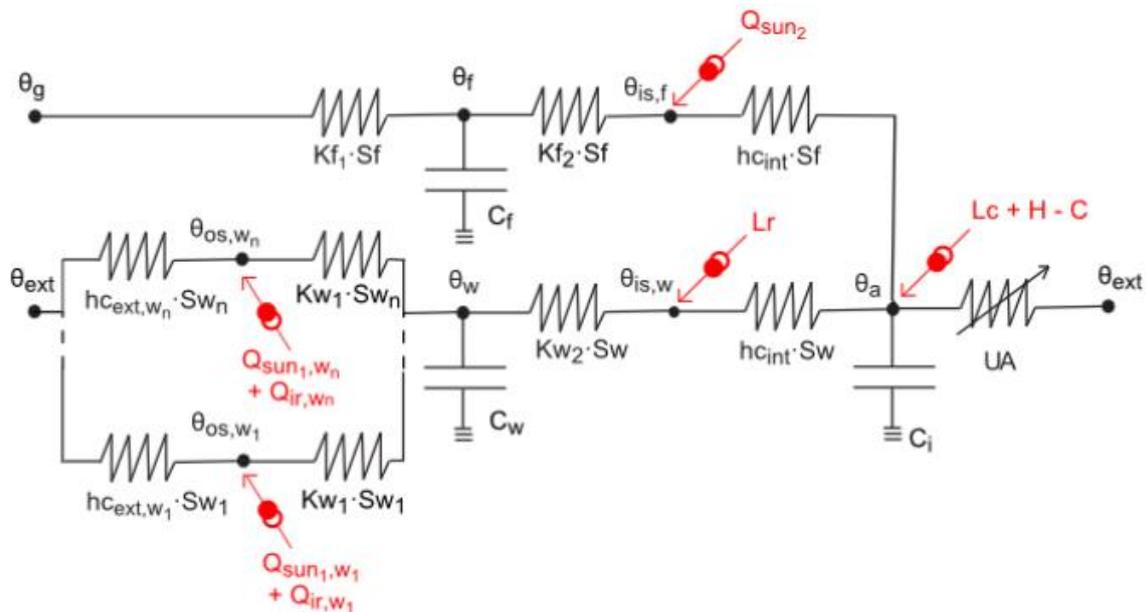


Figure VI. 9 - Schéma électrique équivalent du modèle de thermique du bâtiment de CitySim, le nœud de calcul du toit n'est pas représenté (équivalent au nœud de paroi) (Walter et Kämpf, 2015).

VI.3.1.2 Modèle de rayonnement solaire et infrarouge

Les rayonnements solaires et infrarouges sont calculés sur l'ensemble de la scène urbaine via la méthode de radiosité simplifiée. C'est la même méthode qui est utilisée dans SUNtool, le modèle qui a été remplacé par CitySIM. Robinson et al. (Robinson et Stone, 2005) ont présenté cette méthode lors de la conférence IBPSA de 2005. Ce modèle rapide en temps de calcul a été validé via une comparaison à la méthode de lancer de rayon. Ainsi, dans CitySim les rayonnements solaires directs, diffus, et inter-réfléchis (un rebond seulement) sont calculés via la connaissance de la géométrie 3D du quartier et le calcul des facteurs de forme. L'estimation des échanges infrarouges est possible du fait de la simulation des températures de surfaces de la scène urbaine (enveloppes des bâtiments, sol, et arbres). Dans les résultats de CitySim, outre les flux mentionnés ci-dessus, nous accédons donc également aux températures de toutes les surfaces urbaines.

VI.3.2 Application au quartier de Lyon Confluence

VI.3.2.1 Création de la maquette numérique CitySim et saisie des caractéristiques

CitySim se base sur une géométrie 3D de la scène urbaine pour calculer le rayonnement solaire et infrarouge. L'outil offre la possibilité d'un import direct à partir d'un fichier aux formats CityGML, DXF, ou STL. Un plugin SketchUp fourni lors du téléchargement du logiciel permet de différencier les surfaces (via des calques dans SketchUp) de la maquette 3D selon leur nature :

- #WALL #FLOOR #ROOF - relatives à la thermique du bâtiment
- #SURFACE - relatives aux masques solaires (sans calculer de thermique)
- #GROUND - relatives aux surfaces de sol (végétalisées ou non)
- #TREE - relatives aux surfaces d'arbres

La Figure VI. 10 ci-dessous illustre la maquette CitySim importée depuis le format DXF et créée à partir du plugin SketchUp et du modèle 3D présenté Figure VI. 8.

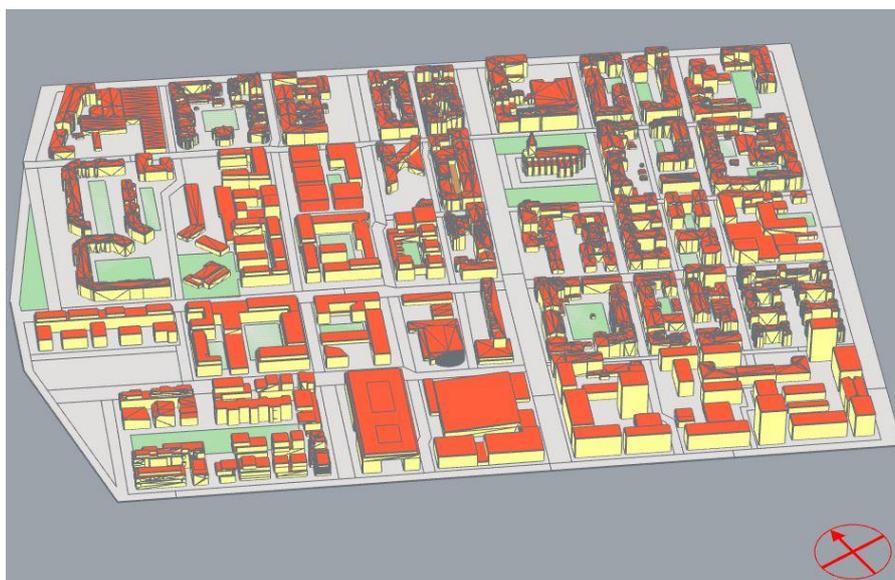


Figure VI. 10 - Maquette CitySim du quartier de Confluence à Lyon.

La seconde étape consiste en un travail de saisie pour caractériser les différentes typologies de surfaces et définir les scénarii de STD tels que l'occupation, la ventilation, etc... Cette saisie peut s'effectuer en partie sur l'interface graphique et de façon complète via le fichier XML relatif à la simulation. Pour ce projet, 5 types de surfaces extérieures ont été différenciées. Leurs propriétés radiatives, à savoir l'albédo et l'émissivité, sont définies dans le Tableau VI. 1.

Surfaces	Albédo	Emissivité
Asphalte	0,1	0,9
Béton clair, pavés	0,25	0,9
Pelouse	0,3	0,9
Sol stabilisé	0,5	0,9
Façades et toits bâtiments	0,2	0,9

Tableau VI. 1 - Albédos et émissivité des surfaces extérieures de la scène urbaine.

Idéalement, la saisie des bâtiments devrait se faire individuellement. Cependant, ce travail se révélerait fastidieux compte tenu du nombre important de bâtiments présents dans la scène urbaine (plus d'une centaine). En conséquence, une première simplification a consisté en la distinction de deux grandes catégories de bâtiments : ceux construits avant et après 2012, en lien avec la disponibilité des données CityGML. Les premiers sont considérés comme ayant une isolation par l'intérieur (ITI) avec un niveau de performance RT2005 et les seconds une isolation par l'extérieur (ITE). En revanche, le mode constructif retenu est le même, avec des murs et toitures béton. Les compositions de parois des bâtiments ainsi que les propriétés thermiques des matériaux utilisés sont disponibles en Annexe VI. 3 et les données renseignées dans CitySim sont présentées dans le Tableau VI. 2. Enfin, une seconde hypothèse simplificatrice a consisté à agréger les bâtiments d'une même catégorie en une seule zone thermique. Cette hypothèse peut paraître excessive : dès lors que les multiples orientations des bâtiments soumises à différentes sollicitations interagiront avec une seule zone thermique, les évolutions de la température

intérieure θ_a n'a pas de signification physique. Cependant, celle-ci ne variera qu'entre 20°C (température de consigne en hiver) et 28°C (température limite en été). De plus, l'interaction entre les températures intérieures θ_a et les températures de surfaces extérieures $\theta_{os,wn}$ est faible compte tenu des niveaux d'isolation de l'enveloppe. En conséquence, on suppose que cette hypothèse a un effet limité sur la qualité de la prédiction des grandeurs d'intérêt de ce calcul que sont les températures de surfaces extérieures $\theta_{os,wn}$.

	Type d'isolation	U_{mur}	U_{toit}	$U_{plancher\ bas}$	U_w	g
		W/(m ² .K)	W/(m ² .K)	W/(m ² .K)	W/(m ² .K)	-
Bâtiments avant 2012	Intérieure	0,4	0,3	0,7	2,0	0,8
Bâtiments après 2012	Extérieure	0,17	0,10	0,20	1,4	0,6

Tableau VI. 2 - Niveaux et mode d'isolation des bâtiments selon l'année de construction.

Pour finir, le fichier météo CLI (Format CitySim) utilisé pour les simulations est l'année réelle 2013 mesurée à la station METEO FRANCE. Cette année a été retenue car c'est la plus complète au niveau des données météorologiques mesurées à Confluence lors de l'étude ICU réalisée par TRIBU (étude présentée en chapitre 2).

VI.3.2.2 Premiers résultats de températures de surfaces

Une première simulation a été effectuée sur chaque heure de l'année pour une maquette composée de 49170 faces. Cette simulation est réalisée en 30h avec un ordinateur portable ayant un processeur Intel CORE i7. La Figure VI. 11 illustre un exemple de cartographie de températures de surfaces estimées au le 2 juillet 2013 à midi à Lyon Confluence. On constate que les températures de surfaces s'élèvent à plus de 60°C sur certaines surfaces bitumées et toitures, du fait que ces surfaces sont peu masquées et du fait d'une très forte absorption de l'énergie solaire (albédo faible).

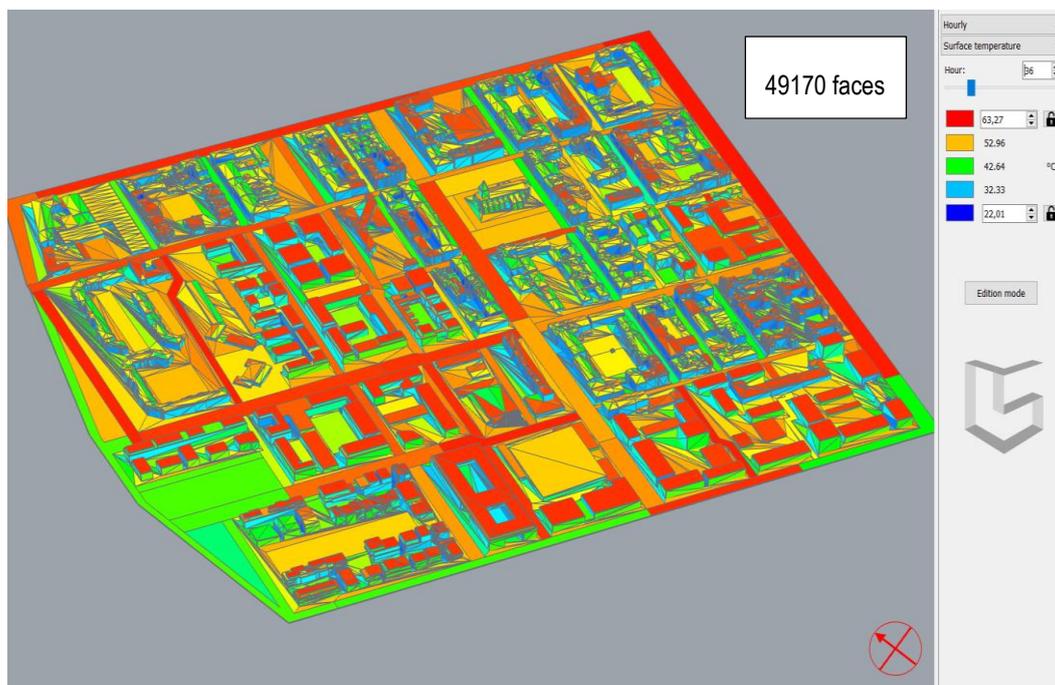


Figure VI. 11 - Cartographie des températures de surfaces simulées sous CitySim avec la maquette Confluence3D_V2 au 2 juillet 2013 à midi à Lyon Confluence.

Lorsqu'on observe les résultats cartographiés pour différentes heures de la journée et de la nuit, malgré le mode constructif lourd béton en ITI qui caractérise une inertie importante, on constate une réponse rapide des températures de surfaces au rayonnement solaire, et aucun déphasage thermique notamment la nuit. Une première explication tient dans le fait que le modèle ne contient pas de capacité thermique sur le nœud de surface extérieure, ce qui le rend très sensible aux sollicitations extérieures : apports solaires en journée et pertes par rayonnement infrarouge avec la voûte céleste et par convection la nuit. Ainsi, la température de surface augmente rapidement vers des niveaux élevés en journée avec le soleil, et diminue relativement vite ensuite quand ce dernier disparaît. C'est un phénomène qui avait aussi été décrit par Hénon dans sa thèse (Hénon, 2008), lors de la confrontation des estimations de température de surface issues de SOLENE-Microclimat à des données d'IRT (image températures de surfaces par télédétection) sur Toulouse et le modèle avait été modifié afin de prendre en compte la capacité de stockage du matériau dans sa couche superficielle. Une possibilité pour pallier cette limite consiste en l'utilisation d'un modèle détaillé de thermique des bâtiments sous CitySim.

VI.3.3 Évaluation du modèle détaillé de thermique des bâtiments de CitySim

VI.3.3.1 Présentation du modèle détaillé de thermique des bâtiments de CitySim

Le modèle détaillé (noté MD) de thermique des bâtiments de CitySim est toujours basé sur un modèle 2RC mais affecté à chaque couche qui compose la paroi, plutôt qu'un modèle 2RC affecté à la paroi complète (appelé modèle simple, noté MS). Une illustration de ce modèle est proposée sur la Figure VI. 12. Ce modèle était implémenté dans une précédente version de CitySim. Avec un terme capacitif attribué à chaque couche, la température de surface devrait être calculée de manière plus précise. Ainsi, ce modèle devrait permettre de distinguer des évolutions de la température de surface différentes suivant le mode d'isolation ITE ou ITI. Avec l'inertie placée vers l'extérieur en configuration ITI, les bâtiments construits avant 2012 devraient avoir une température de surface plus importante les nuits d'été que les bâtiments en ITE.

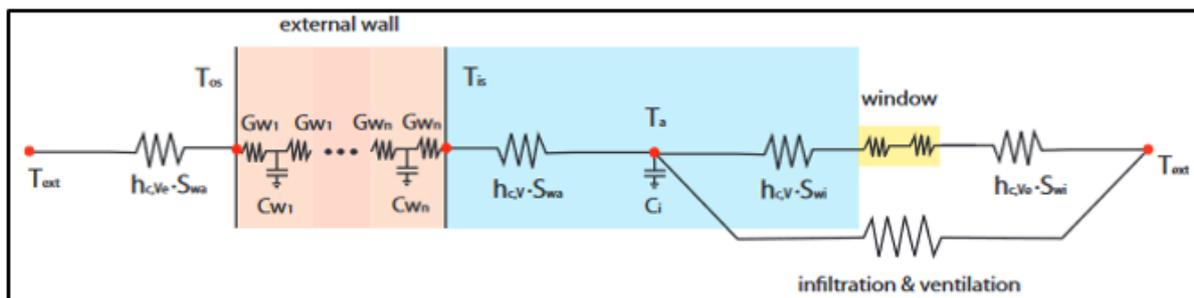


Figure VI. 12 - Modèle détaillé 2RC par couche composant la paroi (Kämpf, 2009).

VI.3.3.2 Application sur un cas test de 3 bâtiments

Afin de limiter les temps de calcul, un premier test de ce modèle est effectué sur uniquement 3 bâtiments de la scène urbaine (Figure VI. 13), le plus petit étant celui qui accueillait la balise de mesures météorologiques sur son toit entre 2013 et 2015 lors de l'étude ICU de Lyon Confluence. Ces 3 bâtiments sont successivement testés en configuration ITI et ITE, ainsi que pour les modèles de résolution MS et MD.

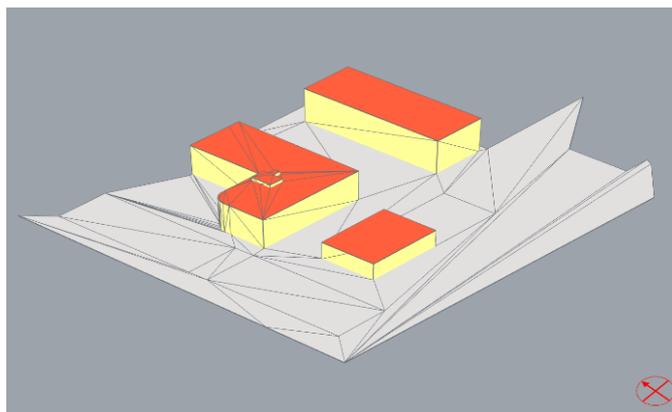


Figure VI. 13 - Cas test de 3 bâtiments à Confluence pour l'évaluation du modèle détaillé (MD) de thermique de bâtiment de CitySim.

La Figure VI. 14 expose les résultats de températures de surfaces au 20 juin 2013 à midi, calculées par le MS et le MD. On observe que la température de surface est la même pour toutes les orientations de paroi pour le MD, ce qui n'est pas le cas pour le MS. Ceci s'explique par le fait que le MS est construit de manière à détailler les températures de surface extérieures alors que le MD moyenne cette dernière sur l'ensemble des orientations. On remarque également que la température de la toiture est de 74°C d'après le MD et de 60°C pour l'estimation du MS.

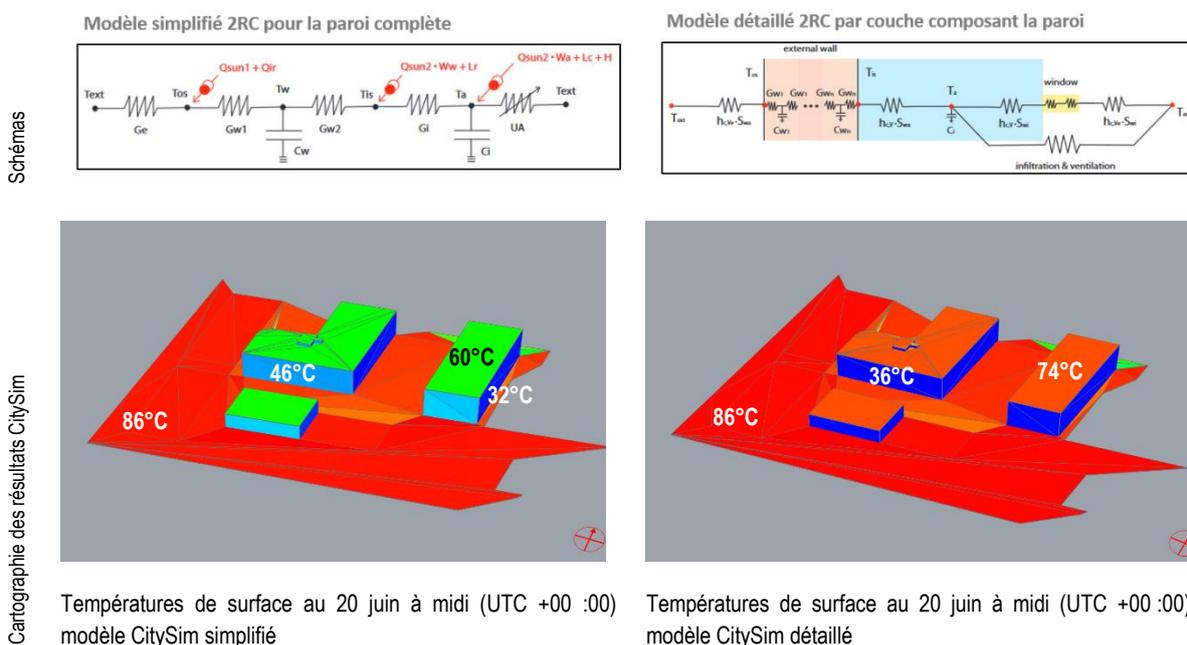


Figure VI. 14 - Comparaison des températures de surfaces simulées pour le cas test sous CitySim au 20 juin 2013 à midi avec les modèles simple (MS) et détaillé (MD) de thermique du bâtiment.

La Figure VI. 15 permet d'analyser, sur la première semaine de juillet, les évolutions de température de surfaces orientées sud suivant le modèle de paroi et le mode d'isolation. Comparons d'abord l'évolution des températures entre le MD et le MS. Que l'on soit en ITE ou en ITI, les températures de surfaces extérieures calculées avec le MD présentent une réponse plus précoce et mais atteignent des

températures plus faibles que celles calculées avec le MS. Les écarts sur le refroidissement en fin de journée et les températures nocturnes sont moins importants.

L'élévation de la température plus précoce dans le cas du MD s'explique par le fait que la température affichée pour le MD n'est pas à proprement parler celle d'une façade sud mais une température de surface moyenne représentant toutes les orientations. Elle intègre ainsi celle des orientations Est exposées dès le matin au rayonnement solaire. La valeur maximale plus faible à midi s'explique de la même manière, cette température intégrant notamment celle des façades nord et ouest qui n'ont pas du tout vu le soleil.

Si on compare maintenant ITI et ITE pour un même modèle. On vérifie bien que dans le cas de l'ITI, pour lequel la masse thermique (l'inertie) des enveloppes bâties est située vers l'extérieur, les températures de surface extérieure maximales sont plus faibles que la configuration ITE, quel que soit le modèle utilisé. Les différences peuvent être conséquentes, notamment en journée fortement ensoleillée. Pour exemple, au 6 juillet midi, les façades sud isolée par ITE sont environ à +25°C par rapport à celle en ITI selon l'estimation par MS et +8°C selon le MD. Inversement, la nuit la température de surface est plus élevée pour les parois ITI, illustrant le rôle de l'inertie lors des échanges avec l'environnement extérieur. On vérifie bien que l'ITE sera défavorable à l'environnement thermique extérieur de jour, mais plus favorable en fin de journée et la nuit.

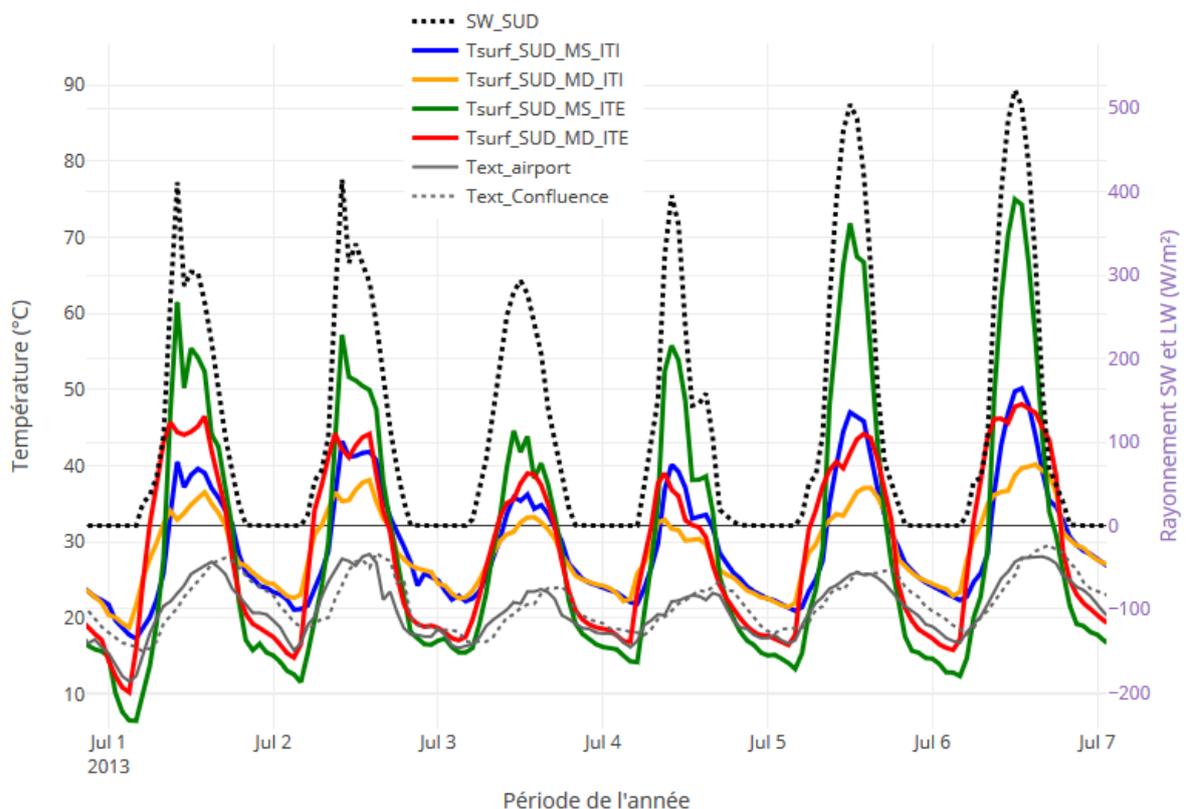


Figure VI. 15 - Comparaison des évolutions des températures de surfaces orientées sud de bâtiments ITI et ITE simulées sous CitySim sur la première semaine de juillet 2013 avec les modèles simple (MS) et détaillé (MD) de thermique du bâtiment.

La Figure VI. 16 représente la distribution statistique annuelle des températures de surfaces orientées Sud. Le constat évoquant une température surfacique plus extrême en configuration ITE et MS est vérifié.

Aussi, l'inertie ITI orientée vers l'extérieur est visible, traduit par des températures moins extrêmes qu'en ITE, mais plus chaude selon la valeur de la médiane.

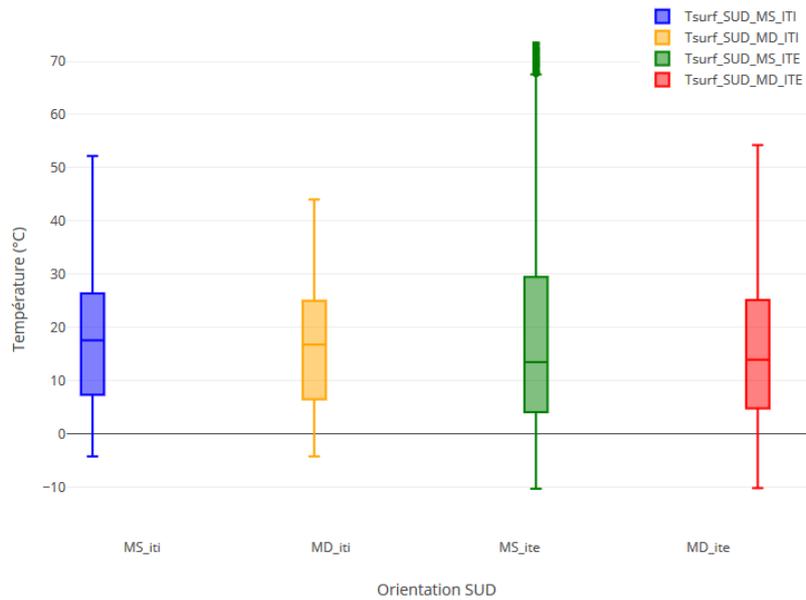


Figure VI. 16 - Comparaison des distributions statistiques annuelles des températures de surfaces orientées sud de bâtiments ITI et ITE simulées sous CitySim sur la première semaine de juillet 2013 avec les modèles simple (MS) et détaillé (MD) de thermique du bâtiment.

Au final, le modèle détaillé offre théoriquement la possibilité de mieux répartir l'inertie thermique des parois suivant les couches qui la composent, et donc de mieux différencier ITI et ITE. Cependant, l'homogénéisation de la température de surface à toutes les orientations est une hypothèse forte, et ne nous permet pas de vérifier l'amélioration apportée sur la dynamique d'une journée. Une solution plus satisfaisante pourrait être de remplacer le modèle 2RC du MS par un modèle R2C, comme cela est utilisé dans l'outil SOLENE-Microclimat (Figure VI. 17) (Malys, 2012). Ce modèle R2C affecte un terme capacitif sur les nœuds de calcul surfaciques (intérieur et extérieur). Cela offre la possibilité de répartir la capacité thermique équivalente du mur plus vers l'intérieur ou vers l'extérieur, suivant les configurations ITI ou ITE, en d'autres mots, suivant la résistance thermique des couches qui composent la paroi.

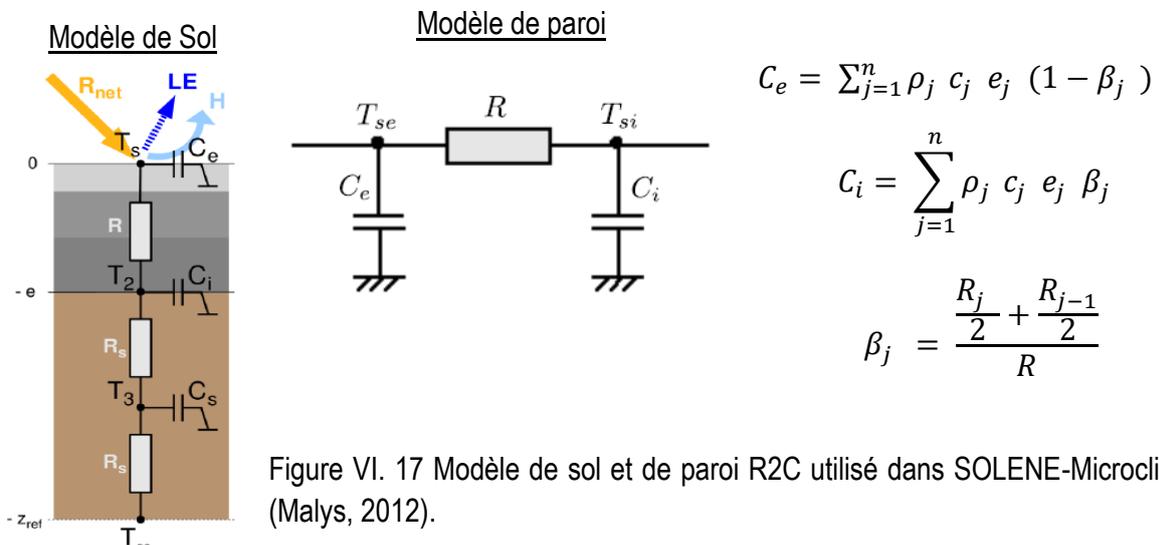


Figure VI. 17 Modèle de sol et de paroi R2C utilisé dans SOLENE-Microclimat (Malys, 2012).

Application sur la scène urbaine de Confluence

Pour finir la comparaison entre MS et MD, les simulations sont lancées sur le quartier complet de Confluence. La Figure VI. 18 est une cartographie des températures de surfaces de Confluence le 2 juillet 2013 à midi obtenue à l'aide du modèle MD. On observe des différences entre les températures de surfaces des bâtiments ITE (typologie après 2012, environ à 39°C) et celle des bâtiments ITI (typologie avant 2012, environ à 27°C). Les températures maximums sont atteintes sur les routes bitumées par rapport à leurs fortes absorptions du rayonnement solaire.

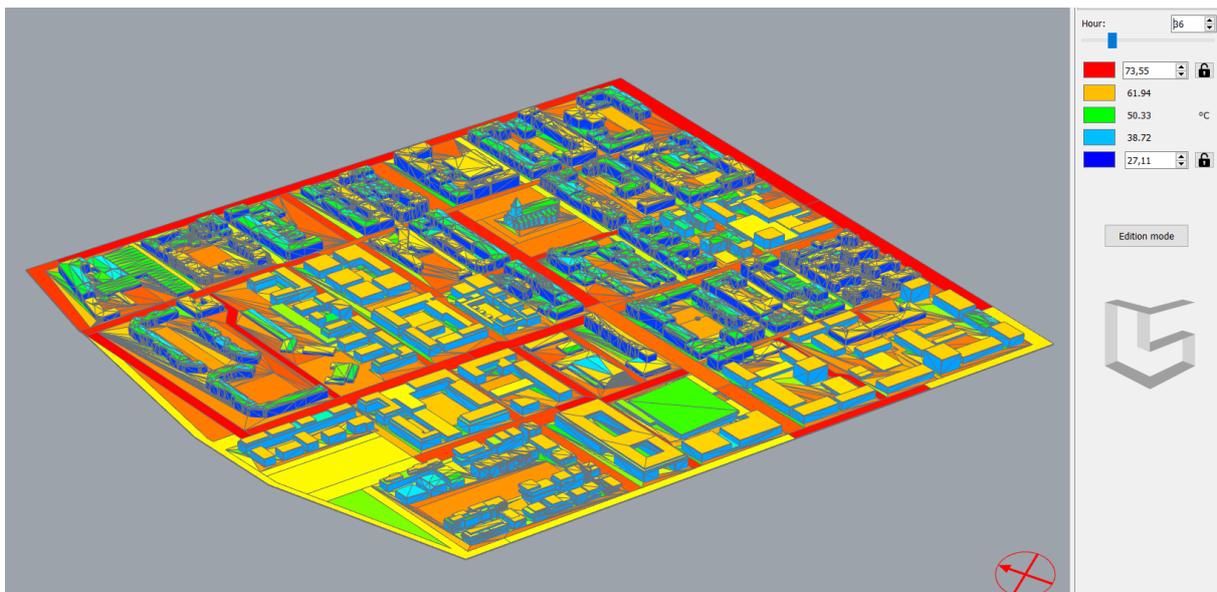


Figure VI. 18 - Cartographie des températures de surfaces simulées sous CitySim avec la maquette Confluence3D_V2 au 2 juillet 2013 à midi à Lyon Confluence avec le modèle détaillé de thermique du bâtiment

La Figure VI. 19 trace l'évolution des températures de surface moyennes des toits et des façades orientées Sud avec les deux modèles. Plusieurs constats peuvent être faits :

- Avec le MD, les températures des toits et façades sont très similaires, ce qui n'est pas le cas avec le MS ;
- Les températures prédites par le MD présentent des évolutions moins amples que celles prédites par le MS, en particulier pour les journées fortement ensoleillées et les toitures.

Plus de la moitié des bâtiments rencontrés dans la scène urbaine sont des bâtiments ITI, le MD prend mieux en compte l'inertie externe de ces bâtiments, ce qui explique ces différences.

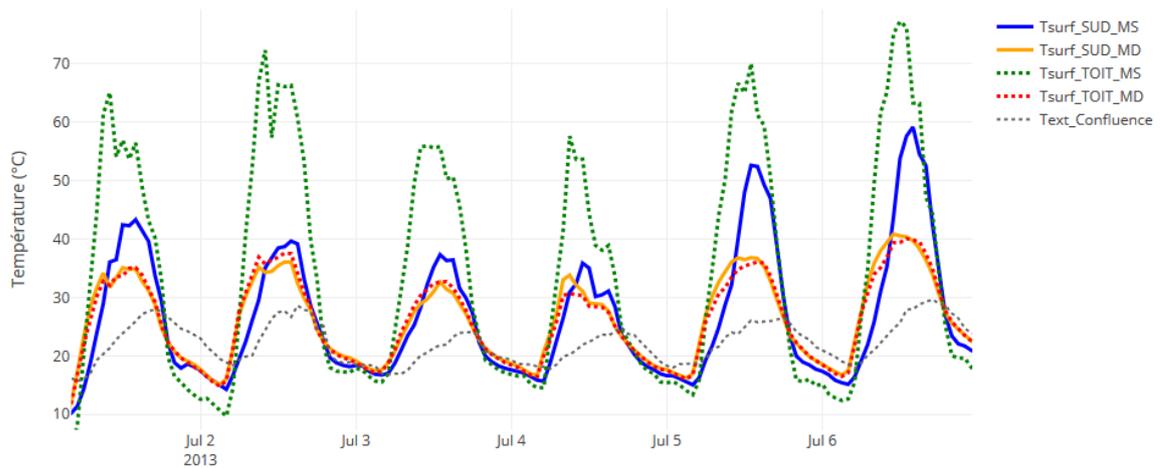


Figure VI. 19 - Comparaison des évolutions des températures de surfaces, orientées sud et de toiture, simulées sous CitySim sur la première semaine de juillet 2013 avec les modèles simple (MS) et détaillé (MD) de thermique du bâtiment.

VI.3.4 Export des résultats CitySim vers CIM

Dans notre chainage pour obtenir des températures urbaines pour la simulation thermique du bâtiment, les températures de surface de CitySim sont utilisées en conditions limites dans l'outil CIM. Pour cela, elles sont moyennées (pondérées par les surfaces) et différenciées pour les 4 orientations et le toit. La Figure VI. 20 indique comment l'orientation de toutes les façades ont été classées (suivant quels angles). Notons que pour le MD, cette opération n'a pas d'impact car les températures de façades ont déjà été moyennées.

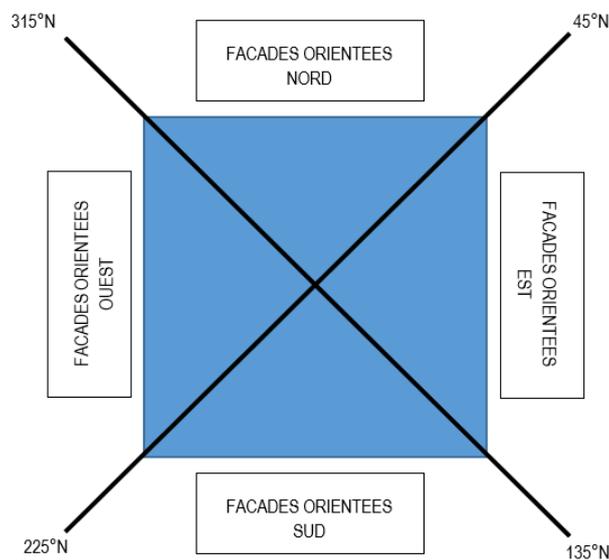


Figure VI. 20 - Classification des orientations de façades pour l'export vers CIM.

La Figure VI. 21 donne un exemple de post-traitement de températures de surfaces moyennées par orientations, d'après des résultats issus du MS.

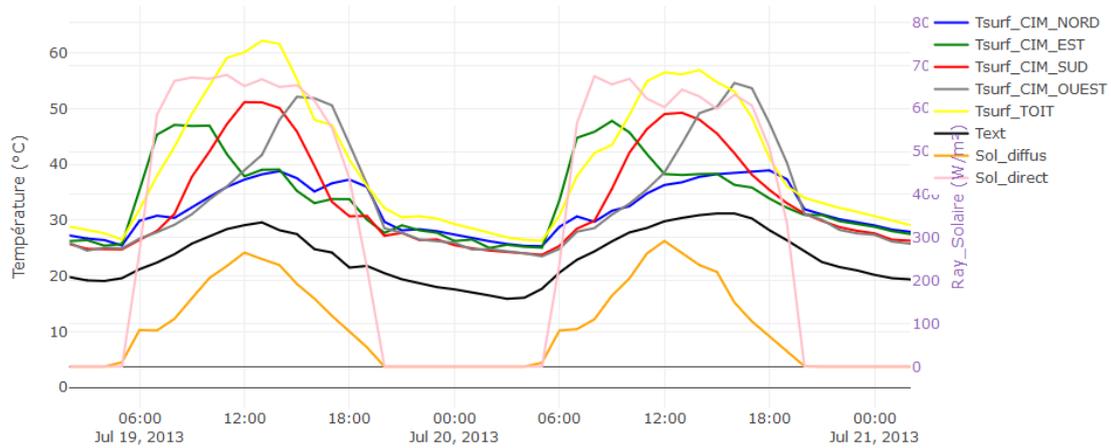


Figure VI. 21 - Evolutions des températures de surfaces par orientation entre le 19 et 21 juin 2013 avant export vers CIM.

VI.4 Modélisation des températures d'air et des vitesses et directions de vent à l'aide de CIM

VI.4.1 Description de l'outil CIM

Canopy Interface Model (noté CIM) est un modèle de canopée urbaine développé actuellement par Dasaraden Mauree à l'EPFL (Lausanne) (Mauree, 2014). Cet outil a pour objectif de faire l'interface entre des modèles méso-échelles de calcul du climat urbain et des modèles micro-échelles de besoin énergétique du bâtiment.

Il est basé sur la résolution de deux modèles de transfert 1D sur des mailles de calcul de 3m de hauteur pour la température et le vent et d'un modèle pour le calcul de l'énergie cinétique turbulente (Figure VI. 22). Cette approche simplifiée de modélisation permet de s'affranchir de la coûteuse résolution d'équations de mécanique des fluides. In fine, la modélisation avec CIM permet ainsi d'évaluer pour chaque heure de l'année une température d'air, une vitesse et une direction du vent, toutes trois supposées homogènes dans chaque maille. Dernièrement, le calcul de l'humidité relative a été intégré dans CIM.

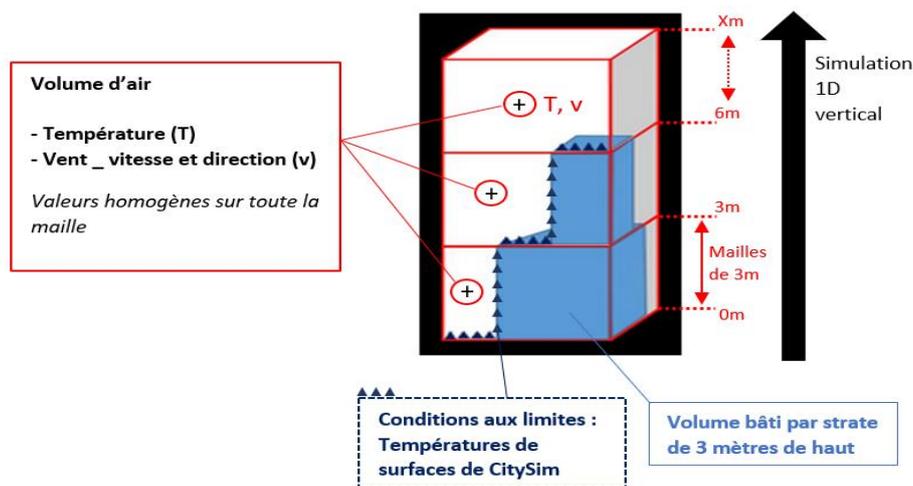


Figure VI. 22 - Principe de modélisation de CIM (Mauree, Blond, et al., 2017).

Pour effectuer une simulation avec CIM, il faut construire une maquette CIM ce qui consiste à identifier la surface bâtie incluse dans chacune des mailles de 3 m. Dans un second temps, il faut attribuer les températures de surfaces pour évaluer les échanges convectifs. Ces dernières sont issues du calcul de CitySim.

Le chaînage CitySim + CIM a déjà été testé sur un cas d'étude de l'EPFL (Mauree, Coccolo, et al., 2017) pour reconstruire les conditions de température et de vent tous les 3 m de haut (jusqu'à 30 m) à partir d'une donnée météo mesurée sur site à 2 m. La nouveauté de notre expérimentation réside dans le fait que nous souhaitons ici partir d'un fichier météo issu d'une station péri-urbaine et reconstruire cette donnée en fonction de la morphologie et typologie du quartier pour créer un fichier microclimatique urbain. Sur site, l'étude est toujours verticale avec un nœud de calcul tous les 3 mètres de haut, mais la donnée d'origine vient d'un autre site de mesure situé à environ 10 km, il y a aussi un paramètre de translation horizontale. On part d'une station météo péri-urbaine (METEO FRANCE), pour déterminer une météo échelle micro, en ville à Lyon Confluence.

VI.4.2 Application au quartier de Lyon Confluence

VI.4.2.1 Présentation des versions de chaînage testées

Un schéma explicatif détaillé de la méthode du chaînage CitySim + CIM est proposé en Annexe VI. 4. Quatre versions du chaînage ont été testées au cours du développement de la méthode (Tableau VI. 3). Les changements apportés d'une variante à l'autre sont mis en évidence par un cadre vert.

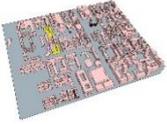
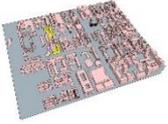
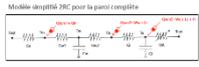
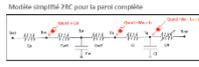
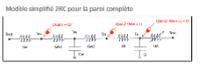
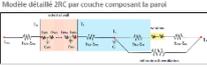
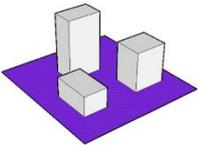
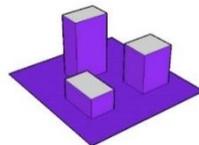
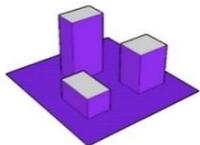
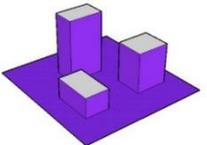
Chronologie des variantes	S1	S2	S3	S4
Nom de la variante	V1_ground_MS	V1_all_MS	V2_all_MS	V2_all_MD
Données géométriques	Maquette SketchUp Confluence  Confluence_V1	3D Maquette SketchUp Confluence SPL  Confluence_V1	3D CityGML Shapefile  Confluence_V2	CityGML Shapefile  Confluence_V2
Nombre de faces de la maquette	9249	9249	49170	49170
Période simulées	1 année	1 année	2 mois (Janvier et Juillet)	1 semaine (Du 1 au 7 juillet)
Temps de simulations	2 heures (Intel CORE i7 et 8Go de RAM)	2 heures (Intel CORE i7 et 8Go de RAM)	6 heures (Intel CORE i7 et 8Go de RAM)	32 heures (Intel CORE i7 et 8Go de RAM)
Modèle de résolution CitySim	Modèle simplifié [MS] 	Modèle simplifié [MS] 	Modèle simplifié [MS] 	Modèle détaillé [MD] 
Conditions limites CIM	Tsurf CitySim « Ground » 	Tsurf CitySim « Ground & Walls » 	Tsurf CitySim « Ground & Walls » 	Tsurf CitySim « Ground & Walls » 
Accumulation CIM	$T_{CIM}^k = f(T_{TMY}^k)$	$T_{CIM}^k = f(T_{TMY}^k)$	$T_{CIM}^k = f(T_{TMY}^k \& T_{CIM}^{k-1})$	$T_{CIM}^k = f(T_{TMY}^k \& T_{CIM}^{k-1})$

Tableau VI. 3 - Variantes testées pour le chaînage CitySim + CIM.

La première variante **S1** « **V1_ground_MS** » se base sur la maquette Confluence3D_V1 et sur les températures de sol prédites à l'aide du modèle de paroi simplifié de CitySim. Par ailleurs, CIM ne prend pas en compte le pas de temps $t-1$ dans son calcul à l'instant t .

La seconde variante **S2** « **V1_all_MS** » considère des conditions limites de températures de surfaces plus détaillées, avec l'estimation des températures de surfaces des façades par orientation. Pour des raisons techniques concernant l'outil numérique CIM, les températures de toit ne sont pas intégrées ici.

Pour la troisième variante **S3** « **V2_all_MS** », la maquette Confluence3D_V1 est remplacée par la version détaillée Confluence3D_V2. Également, l'historique du pas de temps précédent est maintenant prise en compte.

Enfin la dernière variante **S4** « **V2_all_MD** » a été l'occasion de tester les températures de surface prédites par le modèle détaillé de paroi de CitySim.

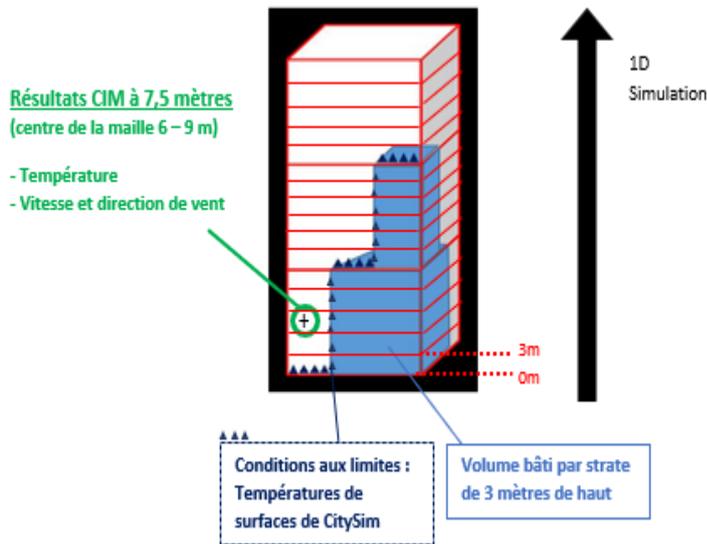
Il y a un double changement entre les deux premières variantes S1 & S2, et les deux dernières S3 & S4 : changement de maquette 3D et changement de méthode de calcul dans CIM avec la prise en compte du pas de temps précédent dans les calculs. Au final, les deux premières variantes S1 & S2 ont été utiles pour « défricher » le projet de simulation multi-échelle, leurs résultats sont néanmoins présentés afin d'afficher les évolutions du chainage CitySim + CIM.

Notons que les variantes S1 et S2 ont pu aisément être simulées sur l'année complète puisqu'elles utilisent la maquette Confluence3D_V1 et ses 9249 faces. Le passage à la maquette Confluence3D_V2 avec le détail de ses 49170 faces a allongé considérablement les temps de calcul. La variante S3 a donc été simulée pour les mois de janvier et de juillet. Enfin, l'utilisation du modèle de paroi détaillé nous a contraint à raccourcir à nouveau la simulation à une semaine, la première du mois de juillet.

VI.4.3 Comparaison des données simulées par le chainage CitySim +CIM aux mesures

Les résultats de simulations du chainage CitySim + CIM suivant les quatre variantes sont comparés et confrontés aux données expérimentales qui ont été acquises lors de la campagne de mesure pour l'étude de l'ICU de Lyon Confluence lors de l'année 2013 par la société TRIBU. Comme les mesures de Lyon CONFLUENCE et de la station METEO FRANCE sont effectuées respectivement à 8 m et 10 m, la maille de calcul CIM comprise entre 6 et 9 m est retenue dans l'analyse qui suit (*Figure VI. 23*).

T_CIM à 7,5 m



T_Confluence à 8 m



T_Bron à 10 m



Figure VI. 23 - Hauteurs des capteurs de mesures météorologiques et du nœud de calcul choisi dans CIM.

La comparaison des distributions statiques des températures horaires des variantes S1, S2, S3 et des mesures Confluence (zone urbaine cible) et Bron (zone péri-urbaine, donnée météo initiale) est faite pour les mois de janvier (Annexe VI. 5) et juillet 2013 Figure VI. 24. L'analyse avec la variante S4 est réalisée uniquement sur la première semaine de juillet Figure VI. 25. Que ce soit pour le mois complet Figure VI. 24, ou pour la première semaine de juillet Figure VI. 25, les améliorations apportées successivement dans chaque variante ont permis de resserrer la distribution statistique des températures et de la faire tendre vers la cible « Text_Confluence ». Néanmoins, des différences persistent même pour les résultats de simulation S4 « T_CIM_V2_MD ».

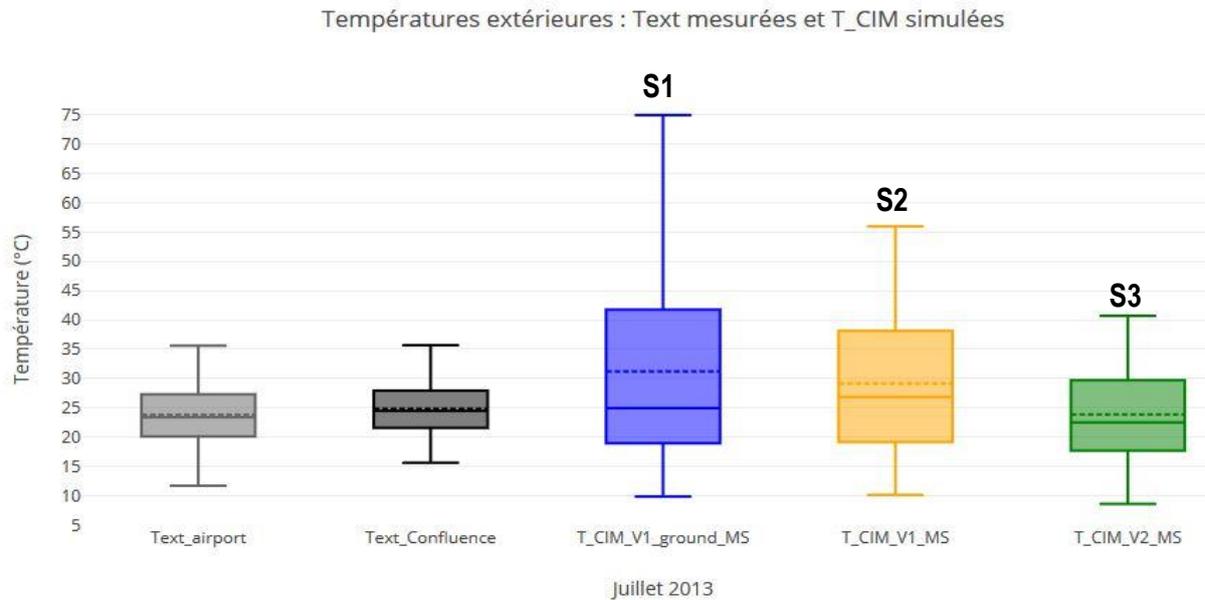


Figure VI. 24 - Distributions statistiques des températures d'air mesurées et simulées avec les variantes V1, V2 et V3 pour le mois de juillet 2013

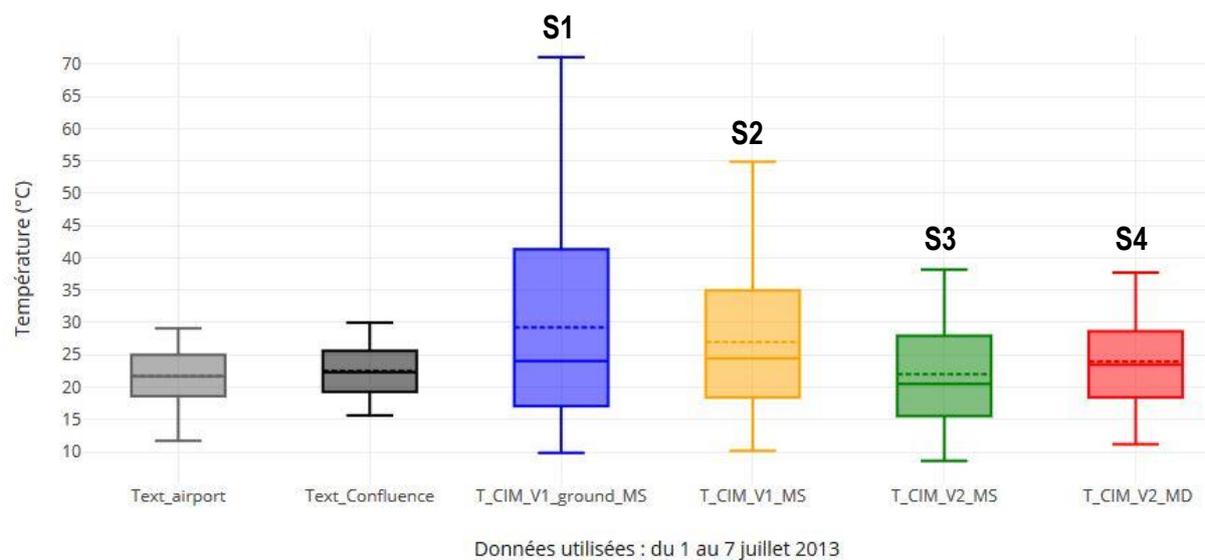


Figure VI. 25 - Distributions statistiques des températures d'air mesurées et simulées avec les variantes V1, V2, V3 et V4 pour la première semaine du mois de juillet 2013.

La Figure VI. 26 montre l'évolution temporelle des températures d'air simulées et mesurées pour la première semaine du mois de juillet 2013. On retrouve ici le même constat que sur les distributions statistiques, la progression des variantes permet de se rapprocher des niveaux de température visés « Text_Confluence », cependant les niveaux de températures simulés sont trop importants, de +8°C à +40°C suivant les variantes lors du 6 juillet. De plus, le déphasage thermique que devrait engendrer l'inertie de la ville n'est jamais visible.

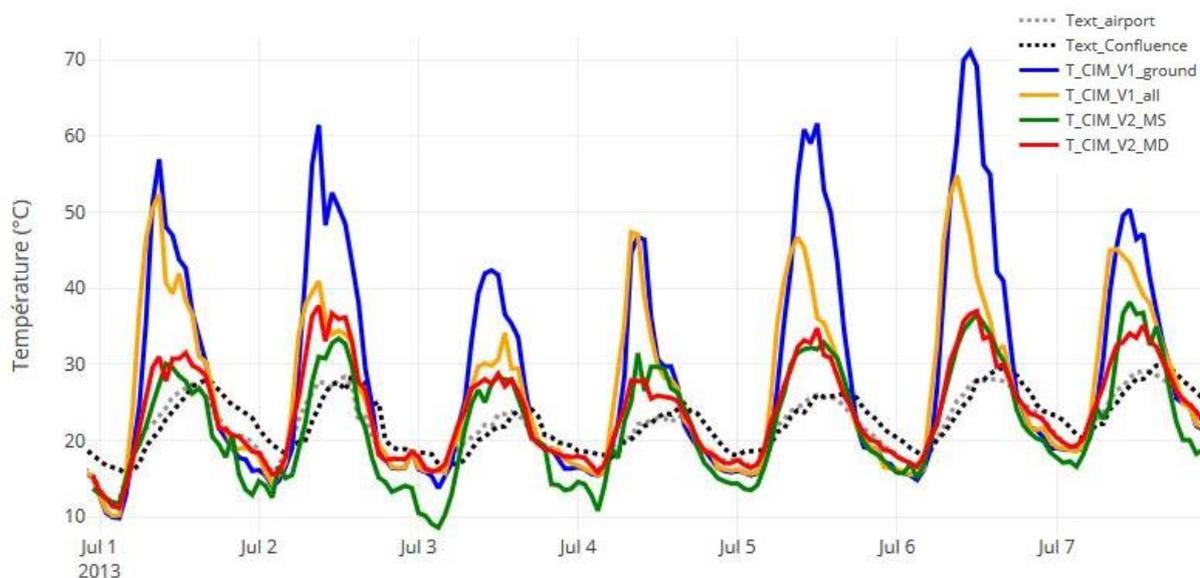


Figure VI. 26 - Évolution des températures d'air simulées et mesurées pour la première semaine du mois de juillet 2013.

Outre la température d'air, la vitesse de vent est aussi une sollicitation météorologique recalculée dans CIM. Les résultats de la variante S3 sont présentés sous forme de distributions statistiques sur la Figure VI. 27 et comparés aux données de vent pour les stations Météo France et Confluence pour le mois de juillet 2013. Contrairement à la donnée température, la donnée simulée du vent (Vent_CitySim_CIM) est mieux reconstruite pour le chainage. La médiane des mesures de Confluence est à 0,9 m/s, celle de Météo France en zone péri-urbaine est à 2,5 m/s, et est réduite à 1,5 m/s après simulation. Le chainage CitySim + CIM permet de se rapprocher des caractéristiques de vent à l'échelle d'une zone urbaine caractérisée par une rugosité plus importante qu'en milieu péri-urbain.

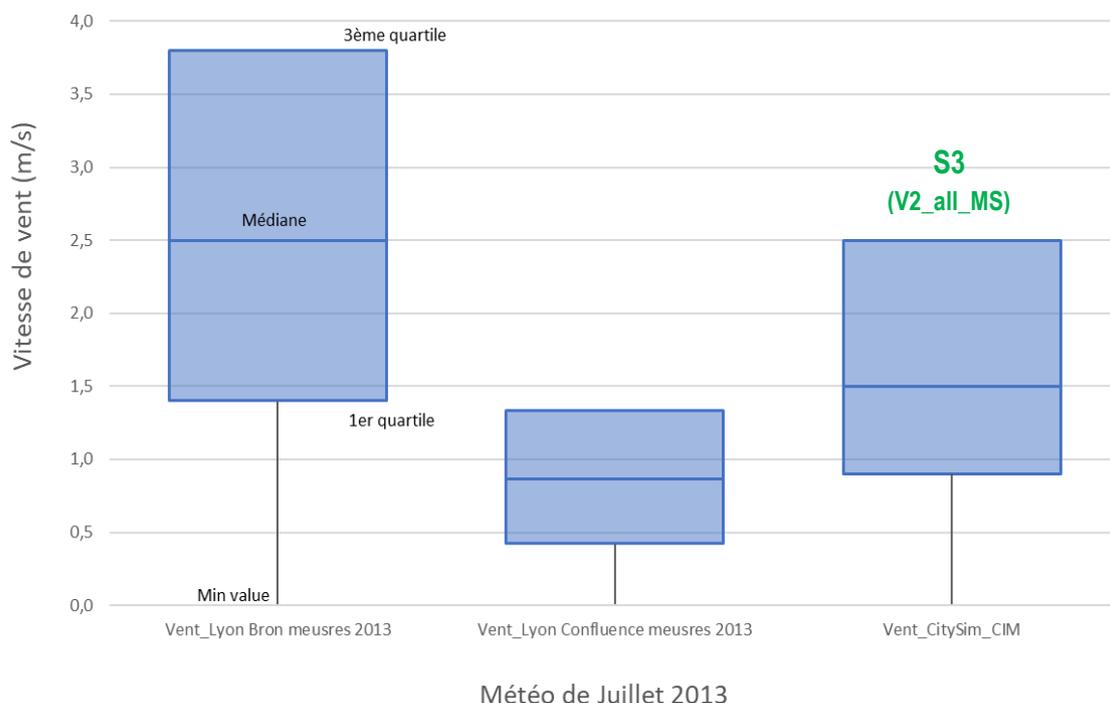


Figure VI. 27 - Distributions statistiques des vitesses de vent mesurées et simulées avec la variante V3 pour le mois de juillet 2013.

VI.5 Conclusions du Chapitre 6

En vue de recréer de la donnée microclimatique urbaine utilisable en entrée STD, le chainage d'outils CitySim + CIM a été expérimenté sur le cas d'étude de Lyon Confluence.

La première étape de ce chainage a consisté la création d'une maquette 3D de la scène urbaine. Si des données libres étaient déjà disponibles pour créer cette maquette, elles ne sont pas toujours bien construites, ni adaptées et nécessitent parfois des retraitements longs et fastidieux.

La seconde étape a visé à déterminer les températures des surfaces à l'aide de l'outil CitySim. Les résultats ont montré une sensibilité au niveau de discrétisation du modèle thermique des enveloppes de bâtiment. Un modèle simple ne permet pas de traduire l'inertie de la ville sur l'enveloppe ; en revanche, une distinction entre les orientations de surface est possible, ce que n'autorise pas le modèle détaillé.

Enfin, la dernière étape a permis d'estimer les moyennes des températures d'air et des vitesses de vent à l'échelle de la scène urbaine à l'aide de CIM. Les 4 variantes de simulation testées ont convergé progressivement vers les valeurs expérimentales, sans pour autant atteindre les intervalles de confiance, en particulier en journée ensoleillée. De plus, les résultats n'ont pas permis de représenter le déphasage thermique avec les données péri-urbaine due à l'inertie qui caractérise la zone urbaine.

Par conséquent, des développements sont encore nécessaires pour améliorer les résultats. Malheureusement, nous n'avons pas de mesures de températures de surfaces sur le site, qui nous auraient permis de pousser plus en avant la comparaison et de voir si le défaut de déphasage vient du modèle thermique des parois ou du modèle atmosphérique.

Nous avons repris les résultats de thèse de Laurent Malys (Malys, 2012) portant sur les températures de surface de toit calculées avec SOLENE-Microclimat Figure VI. 28. La Figure VI. 28, présente des températures d'air extérieur mesurées sur le site étudié, de surface de toit calculées et mesurées, et d'air intérieur. On remarque que la température de surface de toit, sollicitée par le rayonnement solaire, n'est pas en phase avec la température d'air. Elle refroidit dès qu'elle n'est plus sollicitée par le soleil.

L'idée de commencer par un calcul des températures de surfaces d'une scène urbaine pour ensuite évaluer son impact sur la température d'air semble pertinente, en revanche, il est nécessaire auparavant de valider toute la chaîne de modélisation avec un regard plus attentif sur les températures de surface extérieures. En effet, dans le cas de la modélisation de surfaces de parking, Azam (Azam et al., 2018) montre que pour bien représenter les variations de ces températures, les modèles doivent être très précis non seulement sur la conduction, mais aussi bien représenter les phénomènes convectifs.

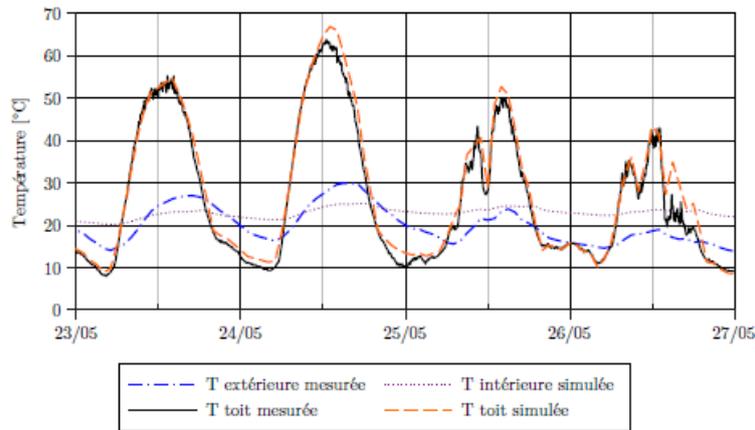


Figure VI. 28 - Évolution des températures d'air extérieur, intérieur, et de surface de toit, mesures et simulation, réalisées avec SOLENE-Microclimat dans la thèse de Laurent Malys (Malys, 2012).

Compte tenu de ces résultats mitigés, nous n'avons pas poursuivi plus avant le chainage vers l'outils de simulation thermique dynamique. A noter cependant, que dans le chainage envisagé, seules les reconstructions des sollicitations de température d'air, et de vitesse et direction de vent ont été faites. Les données de rayonnements solaire et infrarouge sont prises en compte dans CitySim mais aucune passerelle entre ces données et les entrées STD n'a été développée. Enfin, concernant la donnée humidité relative, celle-ci n'était pas implémentée dans CIM au lancement des tests, mais l'a été depuis. Néanmoins, l'humidité relative n'a pas été étudiée pour plus de simplicité dans cette expérimentation.

CONCLUSIONS GENERALES

La première partie de la thèse s'est concentrée sur la notion de climat et de données météo, avec l'étude des climats futurs, des vagues de chaleur, et des surchauffes urbaines.

La façon dont les fichiers météo sont conçus pour les études de STD a été décrite dans le chapitre 1. Le fait d'utiliser un fichier représentatif du climat moyen des 10 ou 30 dernières années paraît cohérent pour estimer des besoins annuels de chauffage. En revanche, des réserves sont émises pour les études qui concernent le confort thermique et les risques sanitaires d'été car ces fichiers moyennés écrêtent les extrêmes météorologiques et sous-estiment les périodes critiques de chaleur nommées canicules. Or, ces aléas climatiques vont, selon les prévisions, s'intensifier dans les prochaines années et décennies. Ce réchauffement global du climat, cumulé à la surchauffe urbaine, alerte les concepteurs du bâtiment qui désirent effectuer les meilleurs choix dans leurs projets actuels afin d'offrir un bâtiment sobre. L'objectif est de constituer une enveloppe permettant au bâtiment de bien répondre aux conditions climatiques de Demain et d'Après-demain qu'il va rencontrer. Les concepteurs sont également conscients des enjeux sanitaires que représentent les périodes de canicule, qui sont accentuées en ville par l'effet d'îlot de chaleur urbain comme montré pour l'épisode d'août 2018 et les comparaisons des données météo ENTPE (péri-urbaines) et ENS (urbaines).

Une méthodologie pour la définition d'années réelles représentatives des conditions climatiques futures de Demain et d'Après-demain a été proposée en chapitre 2. Elle consiste à sélectionner, aux regards des prévisions du GIEC, les années vécues sur un site donné via des indicateurs généraux (cumul de dépassement de seuil à 28°C, ou Box plot de températures moyennes estivales), et des indicateurs ponctuels tels que les canicules. Cette méthode a pu être mise en place grâce aux 24 dernières années de mesures du site de l'ENTPE à Lyon, néanmoins cette idée peut être reprise dans son principe, et est transposable à l'échelle de la métropole française, ou tout autre région possédant de la donnée. Les données visualisables sur la plateforme Infoclimat, ou sur l'outil de Météo France « ClimatHD » (<http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd>) notamment pour les prospections sur les canicules, peuvent être utilisées pour alimenter (en données d'entrée) la méthode.

La deuxième partie de la thèse s'est focalisée sur l'utilisation de la STD en phase de conception d'enveloppe d'un projet de construction et de l'impact de la donnée météo choisie sur cette STD.

Le Chapitre 3 a permis de présenter des outils STD parmi les plus utilisés, leur manière d'appréhender les échanges entre environnement et bâtiment d'études, et les limites des validations des codes de calculs, réalisées sur des cas d'études théoriques. Également, une introduction aux analyses de sensibilité et d'incertitudes est faite. Ces STD tentent de représenter les phénomènes physiques rencontrés en réalité avec des modèles de plus en plus détaillés mais doivent nécessairement passer par des simplifications et autres hypothèses qui induisent des biais. Ces biais se retrouvent à divers niveaux : sur les valeurs de propriétés des matériaux, sur les comportements des occupants (traduits le plus souvent comme des scénarii fixes), ...et sur le fichier météo utilisé.

Ainsi le chapitre 4 a repris les interrogations concernant les fichiers météo discutés en première partie en resserrant l'étude sur l'impact du choix du fichier météo sur la conception thermique d'un bâtiment de

logements. La question posée était d'évaluer, pour un projet donné, les différentes conclusions relatives au confort d'été et aux risques sanitaires. Pour ce faire, le cas d'étude concret de logements collectifs J1a implanté à Lyon dans le quartier de Confluence a été étudié sous le logiciel STD Design Builder.

Une analyse préliminaire a mis en avant la pertinence d'utiliser des fichiers météo d'années réelles en études de confort d'été STD plutôt que des fichiers moyennés pas suffisamment extrêmes. Un premier axe de recherche, concernant le changement climatique et les prospections pour le futur, a montré des différences de résultats de confort importantes suivant les météo d'Aujourd'hui, de Demain, ou d'Après-demain. Dans un second axe de recherche, l'impact des surchauffes des zones thermiques intérieures dû au contexte urbain a été largement mis en évidence via l'année (chaude) de 2018 et les météo urbaines (ENS) et péri-urbaines (ENTPE).

Les résultats de STD ont été analysés d'après plusieurs critères de confort, comme les cumuls de dépassement de seuil, ou d'autres utilisables pour les bâtiments de logements non équipés de climatisation, à savoir, GIVONI (zone de confort en fonction de vitesse de déplacement d'air) ou la norme EN15251 (confort adaptatif). Un chainage des critères EN15251 + GIVONI a également été proposé. Lors des épisodes caniculaires, nous avons vu que le sujet du confort d'été pouvait se transformer en enjeux sanitaires pour les personnes les plus vulnérables.

A ce jour, peu d'indicateurs semblent exister pour évaluer ces risques, hormis le Heat index, plutôt construit pour des sollicitations météo extérieures. Ce dernier a cependant été testé en ambiance intérieure et des niveaux critiques ont été détectés en période de canicule. Enfin, pour reprendre les tracés bubbles chart des caractérisations de canicules, un tracé bubbles chart intérieur a également été proposé et expérimenté en tant qu'indicateur pour représenter des vagues de chaleur internes nocturnes (nuits consécutives supérieures à 28°C) utilisables pour évaluer la qualité de conception des chambres.

Enfin la troisième et dernière partie de ce manuscrit a été l'occasion de se pencher sur les outils numériques de climatologie urbaine, qui, comme les outils STD avant eux, sont encore au stade de développement en laboratoire et donc réservés à un nombre d'utilisateurs experts très restreint.

Le chapitre 5, sur la base d'un article de review publié dans la revue « Renewable & Sustainable Energy Reviews », a présenté une étude bibliographique concernant les outils de climatologie urbaine et les chainages, couplages, tentés avec les logiciels STD.

Les conclusions de cet article de review nous ont menés vers le chapitre 6 et le test du chainage des outils développés à l'EPFL : CitySim + CIM, et une collaboration avec Dasaraden Mauree, le développeur de CIM. La méthode de chainage est intéressante car elle part de l'utilisation de bases de données open data pour la construction géométrique de la maquette 3D, puis les étapes successives s'enchaînent bien entre les outils qui jouissent d'une bonne interopérabilité. Des premiers résultats ont prouvé que ce chainage est techniquement possible. Des développements sont cependant encore nécessaires pour traduire l'inertie et le déphasage thermique des zones urbaines, en vue d'obtenir un fichier météo reconstruit à micro échelle qui soit utilisable en STD.

PERSPECTIVES

Les perspectives de ces recherches issues d'une thèse Cifre sont à la fois opérationnelles et scientifiques.

D'un point de vue opérationnel, les propositions faites au cours du chapitre 2 pour la définition d'années réelles représentatives du climat futur, ou celles du chapitre 4 concernant l'analyse multicritère du confort d'été et des risques sanitaires devraient être consolidées, via un protocole initié lors de cette thèse, sur d'autres projets.

La mesure météo en ville est un moyen pratique et sûr d'avoir de la donnée représentative des conditions urbaines. Si beaucoup de capteurs sont installés en ville, notamment par les GTB (Gestion Technique des Bâtiments), les données ne sont que trop rarement exploitées. La quantité de données pourrait-elle compenser sa moins bonne qualité relativement à des stations dédiées à la mesure météo? Le développement de réseaux urbains de stations météo permettrait d'avoir des informations pour les modèles de thermique du bâtiment, mais aussi pour d'autres sujets, comme le confort en espace extérieur, ou plus éloigné, les alertes allergènes pour cause de pollen (qui est précoce en ville du fait de la surchauffe et des fleuraisons hâtives), et autres pics de pollution d'air, etc.

L'open data a permis de réaliser une grande partie de cette thèse et questionne l'accès libre en général des données produites pour l'espace urbain. Rendre la donnée météo accessible paraît essentiel, ceci pourrait aider, ou inspirer d'autres personnes pour de nouveaux projets. Enfin, toujours dans l'esprit open data, les informations concernant la construction de la ville ont été utilisées en chapitre 6 lors de la simulation du microclimat urbain via CitySim + CIM. Continuer à créer de la donnée informative en ce sens, avec pourquoi pas les typologies, et les albédos des surfaces qui composent la ville...aiderait à la saisie sur les modèles de microclimat urbain.

De façon plus générale, ce travail de thèse Cifre est le fruit d'une collaboration entre entreprise et laboratoires, qui ont mutualisé des savoirs et de compétences. Face à l'urgence climatique actuelle, la recherche académique et les acteurs opérationnels doivent communiquer et collaborer pour converger au plus vite vers des solutions validées scientifiquement et expérimentées sur le terrain.

A travers cette thèse Cifre, ce lien, a permis non seulement d'apporter à l'entreprise des éléments de connaissances, des éléments d'évaluation de ses pratiques, mais aussi de répondre en partie aux questions de recherche qu'elle se posait. Ce travail collaboratif a également permis de produire une contribution à la recherche académique en démontrant l'impact du choix de météo sur la conception, en proposant des indicateurs pour mieux prendre en compte le confort et le risque sanitaire d'été dans les bâtiments et en faisant progresser un couplage d'outils microclimatiques.

Des perspectives scientifiques émergent de ce manuscrit. Les propositions faites dans le chapitre 2 pourraient s'asseoir sur des méthodologies d'analyse statistique plus travaillées, avec des critères différents : par exemple retrouver des années représentatives en fonction d'un nombre de vagues de chaleur ou de leur durée. Celles du chapitre 4 concernant le critère de confort mixte EN15251 + GIVONI, ou l'idée de vague de chaleur nocturne (via tracé bubbles chart en ambiance intérieure) devraient être

éprouvées scientifiquement pour voir comment elles peuvent être validées expérimentalement notamment afin d'être plus tard utilisées en conception frugale de bâtiments.

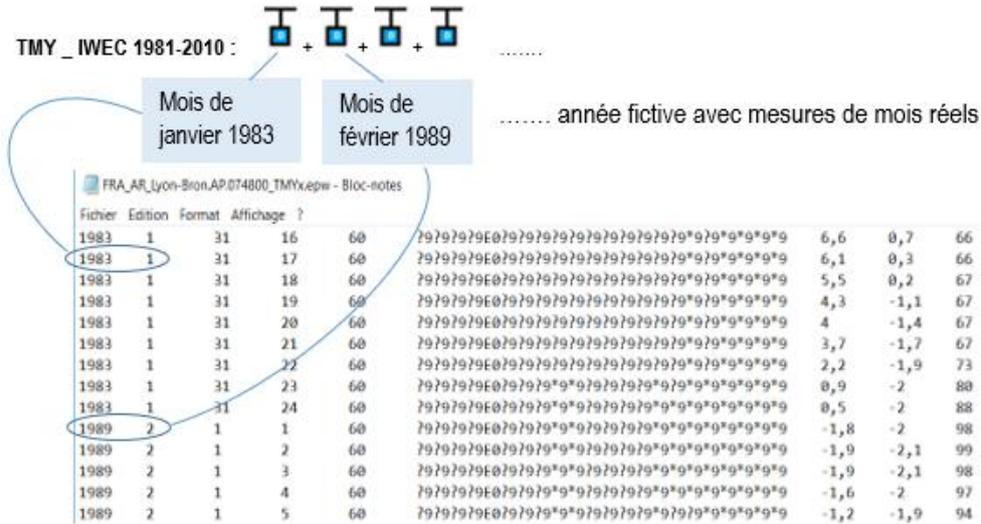
Du point de vue du couplage des outils microclimatiques et de la thermique du bâtiment, nous avons vu qu'il reste beaucoup de progrès à faire, concernant la validation de Citysim à cet effet. Cet outil, tourné vers le bilan thermique du bâtiment n'a pas été évalué pour sa capacité à bien représenter les températures de surfaces extérieures.

Enfin un élément trop rapidement regardé dans ce projet de thèse est l'apport des matériaux hygroscopiques pour le confort et la régulation de l'humidité des pièces. Réussir à prouver par le calcul les qualités de ces types de matériaux pourrait aider les concepteurs à les utiliser dans les projets réels de bâtiment. Ainsi un protocole de recherche pourrait-il être mis en œuvre en lien avec les bâtiments déjà construits avec ces matériaux « ancestraux » pouvant être une réponse à nos futurs climats ?

ANNEXES

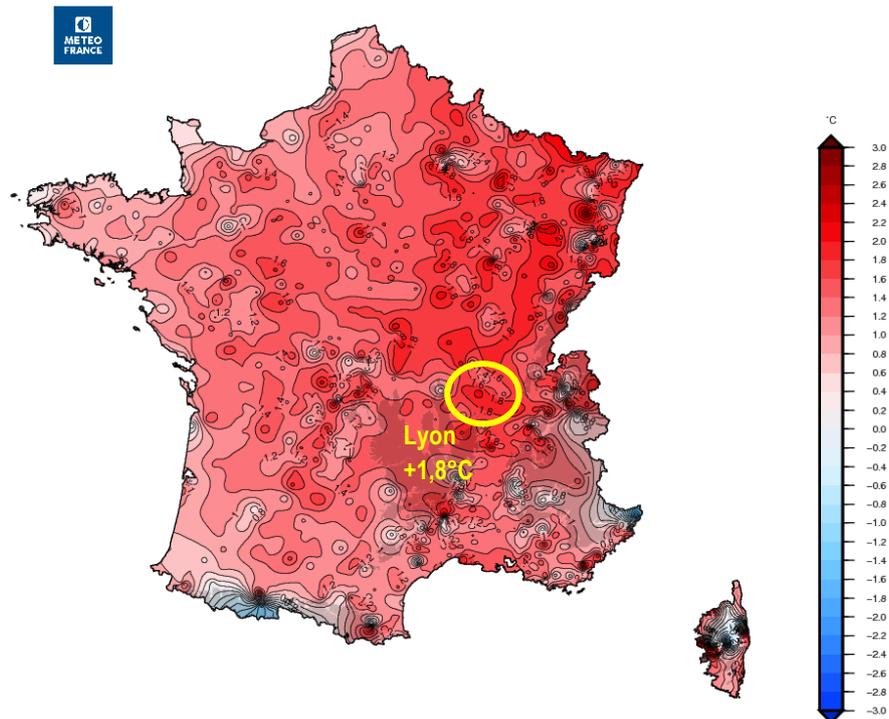
Annexe chapitre 1

Annexe I. 1 - Exemple de fichier météo TMY_IWEC - Normales 1981-2010 à Lyon (Station METEO FRANCE).



Annexe chapitre 2

Annexe II. 1 - Ecart à la moyenne annuelle de référence 1981-2010 de la température moyenne sur 2018. (Données Météo France).



Annexes chapitre 4

Annexe IV. 1 - Scénarii d'occupation pour la STD.

Heures	Pourcentage d'occupation			
	Séjour	Cuisine	Chambre	Logement entier
00h à 07h	0%	0%	100%	100%
07h à 08h	50%	50%	0%	100%
08h à 12h	0%	0%	0%	0%
12h à 13h	0%	100%	0%	100%
13h à 19h	0%	0%	0%	0%
19h à 22h	50%	50%	0%	100%
22h à 24h	0%	0%	100%	100%
Scénarios Design Builder	J1A-occup- séjour	J1A-occup- cuisine	J1A-occup- chambre	J1A-occup- logement

Annexe IV. 2 - Scénarii d'apports internes, par local.

Heures	Chambre		Chambre Double		Séjour		Cuisine	
	Machines	Eclairage	Machines	Eclairage	Machines	Eclairage	Machines	Eclairage
00 – 06h	3 W	0	3 W	0	5 W	0	30 W	0
06 – 07h	3 W	2,5 W/m ²	3 W	2,5 W/m ²	5 W	0	30 W	0
07 – 08h	3 W	0	3 W	0	5 W	0	180 W	1,5 W/m ²
08 – 12h	3 W	0	3 W	0	5 W	0	30 W	0
12 – 13h	3 W	0	3 W	0	5 W	0	330 W	0
13 – 17h	3 W	0	3 W	0	5 W	0	30 W	0
17 – 19h	3 W	0	3 W	0	50 W	0	30 W	0
19 – 20h	3 W	0	3 W	0	50 W	2,5 W/m ²	790 W	4 W/m ²
20 – 21h	3 W	0	3 W	0	50 W	2,5 W/m ²	30 W	4 W/m ²
21 – 22h	3 W	0	3 W	0	50 W	2,5 W/m ²	600 W	4 W/m ²
22 – 23h	3 W	2,5 W/m ²	3 W	5 W/m ²	50 W	0	30 W	0
23 – 00h	3 W	0	3 W	0	5 W	0	30 W	0

Annexe IV. 3 - Scénarii d'apports internes, par logement.

Heures	T2		T3		T4	
	Machines	Eclairage	Machines	Eclairage	Machines	Eclairage
00 – 06h	38 W	0,0 W/m ²	41 W	0 W/m ²	44 W	0 W/m ²
06 – 07h	38 W	2,5 W/m ²	41 W	5 W/m ²	44 W	7,5 W/m ²
07 – 08h	188 W	1,5 W/m ²	191 W	1,5 W/m ²	194 W	1,5 W/m ²
08 – 12h	38 W	0 W/m ²	41 W	0 W/m ²	44 W	0 W/m ²
12 – 13h	338 W	5 W/m ²	341 W	5 W/m ²	344 W	5 W/m ²
13 – 17h	38 W	0 W/m ²	41 W	0 W/m ²	44 W	0 W/m ²
17 – 19h	83 W	0 W/m ²	86 W	0 W/m ²	89 W	0 W/m ²
19 – 20h	843 W	3 W/m ²	846 W	3 W/m ²	849 W	3 W/m ²
20 – 21h	83 W	3 W/m ²	86 W	3 W/m ²	89 W	3 W/m ²
21 – 22h	653 W	3 W/m ²	656 W	3 W/m ²	659 W	3,0 W/m ²
22 – 23h	83 W	5 W/m ²	86 W	7,5 W/m ²	89 W	10,0 W/m ²
23 – 00h	38 W	0 W/m ²	41 W	0	44 W	0,0 W/m ²

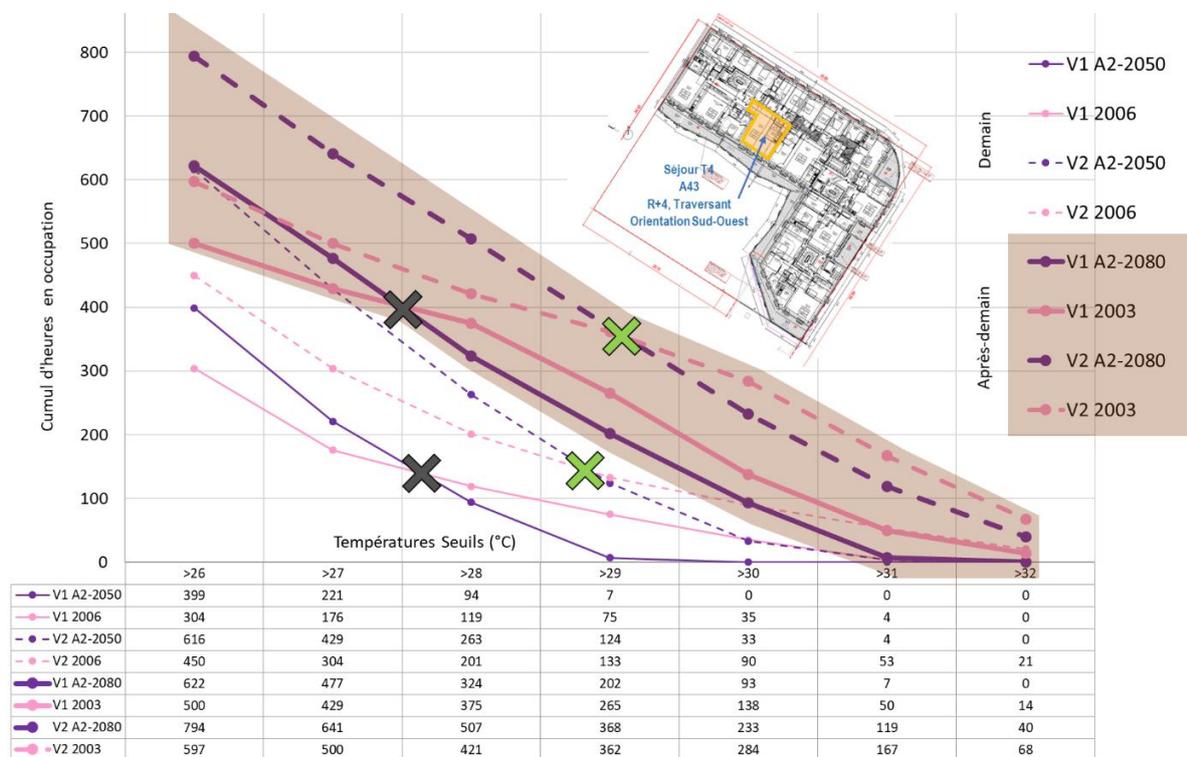
Annexe IV. 4 - Propriétés thermiques du mode constructif V1.

VARIANTE V1							
ITE Béton (Non biosourcé) _ MACROCOMPOSANTS							
Description	Eléments	Matériaux/descriptif	Conductivité thermique λ (W/m/K)	Chaleur massique cp (J/kg/K)	Masse volumique ρ (kg/m3)	Epaisseurs (mm)	Coefficient de déperdition thermique U (W/m²/K)
Paroi Extérieure _ ITE Béton _ Opération: Logements passifs à Ceyrat (63)							
CLASSIQUE NON BIOSOURCE							
Structure béton, isolation extérieure en PSE, enduit ciment							
	Revêtement extérieur	Enduit type Crépi Initex 2.0, Finition talochée fin	1,4	650	2100	20	
Couche extérieure	Isolation extérieure	Plaques de polystyrène graphité, Polygraphy de chez La Seigneurie, collé et chevillé, chevilles rosaces recouvertes d'une pastille isolante.	0,032	1400	15	Standard	125 0,25
		Fixation: 7 chevilles/m²				Performant	155 0,20
Couche centrale	Elément structurel	Mur en béton armé C25/30, densité de ferrailage = 3%	2,3	1000	2300	210	0,15
Couche intérieure	Revêtement intérieur	Enduit plâtre + Peinture acrylique Satinée	0,33	840	950	200	
						3	
Toiture _ ITE béton _ Opération: Logements passifs à Ceyrat (63)							
CLASSIQUE NON BIOSOURCE							
	Revetement extérieur	Protection rapportée, "meuble" par gravillons	1,4	650	2100	60	-
Couche extérieure	Isolation extérieure	Etanchéité	-	-	-		-
		Etanchéité bi-couche élastomère Elastophène Flam, Sopralene Flam de chez Soprema					
		Panneau de mousse polyuréthane 2*120mm pose en deux lits à joints décalés Effigreen Duo + de chez Efisol	0,023	1400	31	Standard	150 0,15
						Performant	180 0,13
						Très performant	240 0,10
Couche centrale	Etanchéité	Pare-vapeur, type Elastophène 25, soudé en adhérence	-	-	-		-
	Dalle	béton armé	2,3	1000	2300	220	-
Couche intérieure	Revêtement Plafond	Enduit plâtre + Peinture acrylique Satinée	0,33	840	950	3	-
Plancher Bas _ Sur terre plein _ opération: Ilôt bois Strasbourg (PEBIOS)							
CLASSIQUE NON BIOSOURCE							
	Isolation sous dalle	Polystyrène extrudé	0,029	1450	35	Standard	100 0,30
Couche extérieure						Performant	120 0,25
						Très performant	160 0,18
Couche centrale	Dalle	béton armé	2,3	1000	2300	220	
Couche intérieure	Revêtement Sol	Linoléum	0,19	1400	1400	3	
Plancher Intermédiaire _ béton _ opération: Logements lycée de Bègles (PEBIOS)							
CLASSIQUE NON BIOSOURCE							
	Revêtement Plafond	Enduit plâtre + Peinture acrylique Satinée	0,33	840	950	3	
	Dalle	béton armé	2,3	1000	2300	220	
Couche centrale							
Couche intérieure	Revêtement Sol	Linoléum	0,19	1400	1400	3	
Cloisons _ Plaques de plâtre _ opération: Logements Pixericourt (PEBIOS)							
CLASSIQUE NON BIOSOURCE							
	Parement	Plaque de plâtre + Peinture acrylique Satinée	0,33	840	950	13	
Cloisons	Isolation	Laine de verre	0,032	1400	15		45
		Plaques de plâtre + Peinture acrylique Satinée	0,33	840	950		13

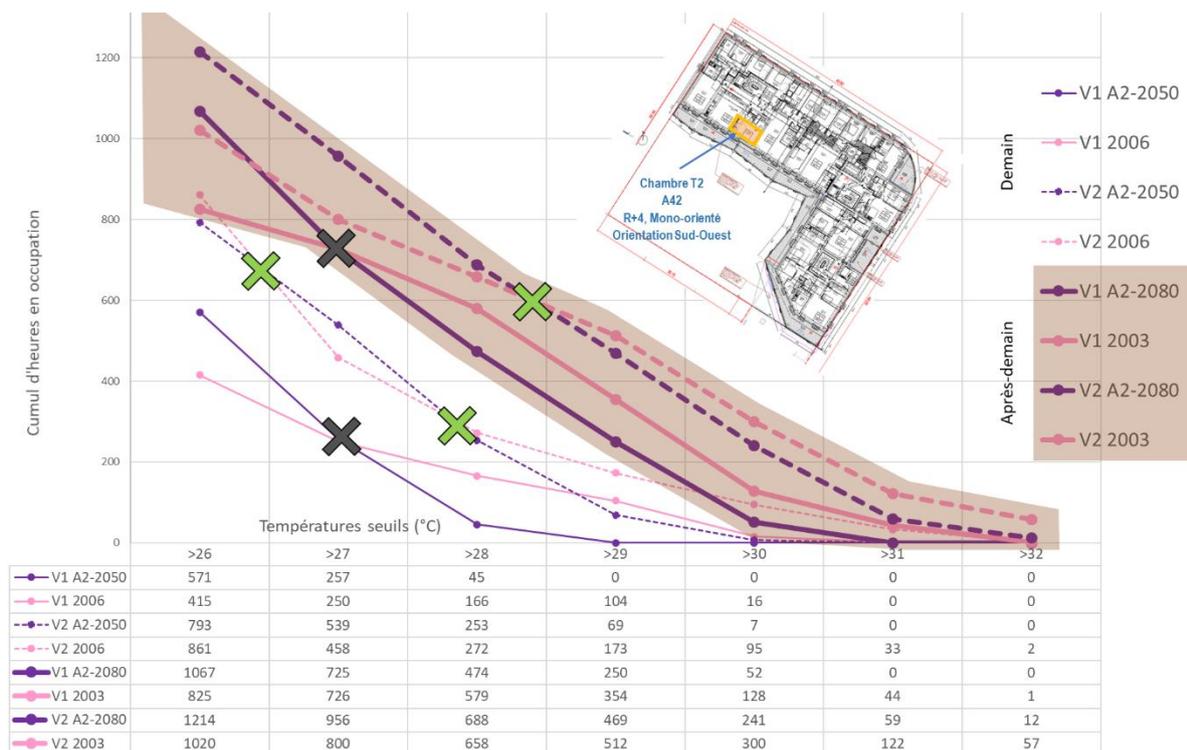
Annexe IV. 5 - Propriétés thermiques du mode constructif V2.

VARIANTE V2							
ITR Bois (Biosourcé) _ MACROCOMPOSANTS							
Description	Eléments	Matériaux/descriptif	Conductivité thermique λ (W/m/K)	Chaleur massique cp (J/kg/K)	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Epaisseurs (mm)	Coefficient de déperdition thermique U (W/m ² /K)
Paroi Extérieure _ ITR _ Structure bois _ MOB _ Opération: Logements Pixericourt							
BIOSOURCES INNOVANT							
Ossature bois, fibre de bois et bardage bois							
Couche extérieure	Revêtement extérieur	Bardage en lame de bois mélèze	0,15	1600	550		20
	Support de revêtement extérieur	Lattage vertical de section 22x50mm (lame d'air 22mm)	0,15	1600	550		22
	Elément d'étanchéité	Film pare-pluie en polypropylène					
Couche centrale	Isolation extérieure	panneau de fibre de bois haute densité woodfibre insulation materials produced in the wet process, PAVATEX SA	0,048	2100	240		35
	Elément de contreventement	panneau OSB	0,13	1880	650		12
	Elément structurel	Ossature verticale bois de hauteur d'étage de section 160/50mm	0,15	1600	550		160
	Elément structurel	Ossature horizontale bois sur la longueur d'étage de section 160/50mm	0,15	1600	550		160
	Elément de remplissage	Laine de bois en panneau	0,038	2100	50		160
Couche intérieure	Isolation intérieure	Laine de bois en panneau	0,038	2100	50	Performant Très performant	- 60
	Elément d'étanchéité	Film pare-vapeur en polyéthylène					0,20 0,25
	Support de revêtement	lambourrage bois de section 27x50mm	0,15	1600	550		27
	Support de revêtement	Plaque de plâtre Placoplatre® BA13	0,33	840	950		13
Toiture _ ITE béton _ Opération: Résidence Jules Ferry (PEBIOS)							
BIOSOURCE INNOVANT							
Couche extérieure	Revetement extérieur	Protection rapportée, "meuble" par gravillons	1,4	650	2100		60
	Etanchéité	Membrane d'étanchéité PVC	-	-	-		-
	Elément caisson	panneau OSB	0,13	1880	650		12
Couche centrale	Isolation	Ouate de cellulose en vrac	0,042	1900	32	Performant Très performant	320 400
	Structure	Solives bois massif épicea 60*100mm	0,15	1600	550		100
Couche intérieure	Elément d'étanchéité	Film pare-vapeur en polyéthylène	-	-	-		-
	Plafond	Panneau bois lamellé-croisé CLT	0,15	1600	550		160
Plancher Bas _ Sur terre plein _ opération: Ilôt bois Strasbourg (PEBIOS)							
CLASSIQUE NON BIOSOURCE							
Couche extérieure	Isolation sous dalle	Polystyrène extrudé	0,029	1450	35	Performant Très performant	120 160
Couche centrale	Dalle	béton armé	2,3	1000	2300		220
Couche intérieure	Revêtement Sol	Linoléum	0,19	1400	1400		3
Plancher Intermédiaire _ béton _ opération: Logements Pixericourt (PEBIOS)							
BIOSOURCE INNOVANT							
Couche extérieure	Revêtement Plafond	Plaque plâtre + Peinture acrylique Satinée	0,33	840	950		13
	Elément de remplissage	Suspentes mateliques	0,038	2100	50		220
Couche centrale	Structure	Solives bois massif épicea 60*100mm	0,15	1600	550		220
	Elément support	panneau contreplaqué	0,13	1880	650		20
Couche intérieure	Elément acoustique	Sous couche d'isolation acoustique en fibre de verre	0,044	1400	70		30
	Elément support	Chape humide flotante	1,2	1100	1600		50
	Revêtement Sol	Caoutchouc	0,19	1400	1400		2
Cloisons _ Plaques de plâtre _ laine de bois							
BIOSOURCES							
Cloisons	Parement	Plaque de plâtre + Peinture acrylique Satinée	0,33	840	950		13
	Isolation	Laine de bois en panneau	0,038	2100	50		160
	Parement	Plaques de plâtre + Peinture acrylique Satinée	0,33	840	950		13

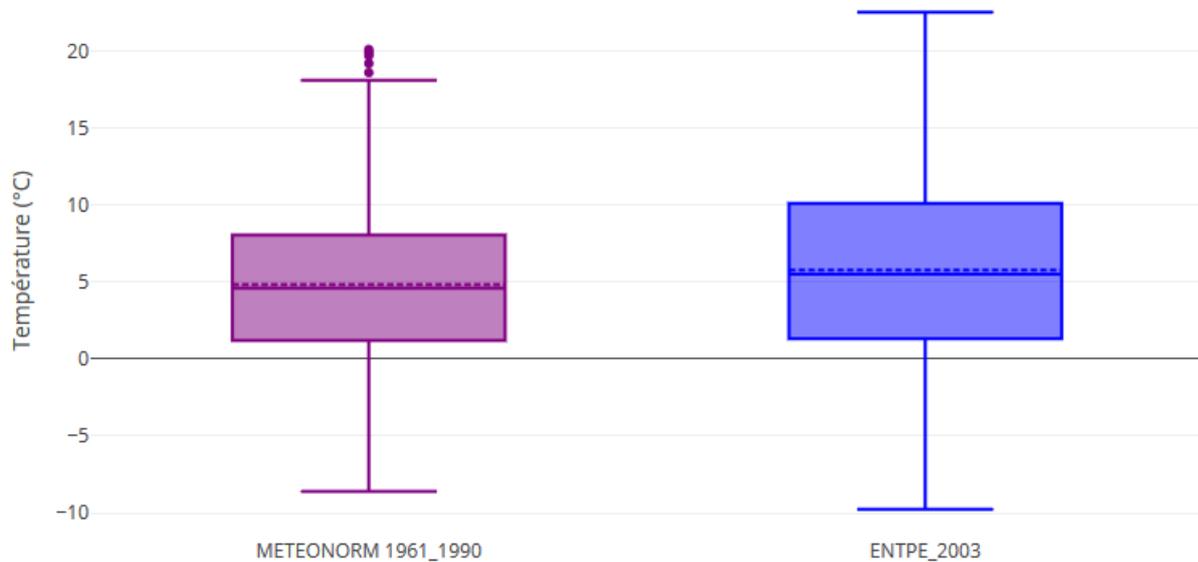
Annexe IV. 6 - Cumul annuel de dépassement de seuils sur le séjour du T4 (A43) pour les météo de demain et d'après-demain pour les données METEONORM et ENTPE, pour les modes constructifs V1 et V2.



Annexe IV. 7 - Cumul annuel de dépassement de seuils sur la chambre du T2 (A42) pour les météo de demain et d'après-demain pour les données METEONORM et ENTPE, pour les modes constructifs V1 et V2.



Annexe IV. 8 - Box plot – Distribution statistique des températures extérieures d'hiver de METEONORM 1961-1990 et de l'année 2003.



Annexe IV. 9 - Les 4 modèles EnergyPlus pour la résolution des transferts thermiques par conduction.

Editer Options de calcul

Options de calcul

Général Options Résultats Gestionnaire de simulation

Options de calcul

Méthode de simulation: 1-EnergyPlus

Nombre de pas par heure: 2

Température de contrôle: 1-Température d'air

Solaire

Inclure tous les bâtiments dans les calculs d'ombre

Inclure ombrage des zones exclues dans la simulation

Modéliser les réflexions et masque des réflexions solaires du sol

Distribution solaire: 2-Extérieur complet

Méthode de calcul des ombres: 1-Moyenne en fréquence sur les jour

Intervalle de recalcul d'ombrage (jours): 20

Algorithme de modélisation du ciel diffus: 1-Modélisation ciel diffus simple

Avancé

Solution Générale

Algorithme de solution: 4-Elément fini Chaleur et Humidité combinée (HAMT)

Autoriser les constructions à outrepasser individuellement

Paramètres Différence Finie

Procédé de différence finie: 5-Fonction de Transfert Conduction Profondeur de Pénétration d'Humidité (EPMD)

Constante de discrétisation de l'espace: 1,000

Facteur de relaxation: 1,000

Critère de convergence de température de surface interne: 0.0020

Ventilation Naturelle

Maximum d'itérations: 1000

Tolérance absolue de convergence du flux d'air (kg/s): 0.000001000

Tolérance relative de convergence du flux d'air: 0.000100000

Convection

Algorithme de convection intérieur: 6-TARP

Algorithme de convection extérieur: 6-DOE-2

Mise en température

Nombre de jours de pré-calcul minimum: 6

Ne pas afficher cette fenêtre la prochaine fois

Aide

Info Données

Options de calcul

Ces options sont aussi accessibles depuis la fenêtre de dialogue des Options du modèle.

Nombre de pas par heure

En général, accroître le nombre de pas de temps améliore la précision mais ralentit la simulation et engendre plus de données si les données de simulation sont demandées à un intervalle infra-horaire).

Distribution Solaire

La distribution solaire devrait être généralement choisie à 'Extérieure complète' car ceci offre un compromis entre précision et versatilité.

Notez que l'option 'Intérieure et extérieure complète' ne fonctionne qu'avec les zones à forme convexe (zones dont les surfaces peuvent être prises en compte dans les calculs des ombres des bâtiments du site soient prises en compte dans la simulation).

Aide Annuler OK

Annexes chapitre 6

Annexe VI. 1 - L'open Data.

L'open data sont des données numériques dites ouvertes. La définition de « donnée ouverte » est un sujet de discussion, mais la plus répandue est celle donnée par l'Open Définition (<https://opendefinition.org>): « Une donnée ouverte est une donnée qui peut être librement utilisée, réutilisée et redistribuée par quiconque – sujette seulement, au plus, à une exigence d'attribution et de partage à l'identique. »

L'origine des données ouvertes peut être publique ou privée et elle est en général produite par une collectivité, un service public ou une entreprise. Elle est diffusée de manière structurée selon une méthode et une licence ouverte garantissant son libre accès et sa réutilisation par tous, sans restriction technique, juridique ou financière. L'ouverture des données est à la fois un mouvement philosophique, sociétal et technologique, qui s'inscrit dans une tendance qui considère l'information publique comme un bien commun. Les données ouvertes peuvent avoir des applications multiples et insoupçonnées. Comme il est expliqué dans « The Open Data Handbook », leur force est qu'elles peuvent être exploitées par quiconque, le nombre possible d'applications est presque infini, libre à la communauté d'en imaginer l'usage.



Figure – Carte libre du monde, gérée de manière participative, OpenStreetMap

OpenStreetMap est un bel exemple d'open data, un projet de cartographie qui a pour but de constituer une base de données géographiques libre du monde, créée par tout individu souhaitant participer à enrichir la carte suivant un standard défini.

Ces dernières années, les communes et métropoles ouvrent leurs bases de données caractérisant leurs territoires afin de pouvoir travailler plus simplement avec les prestataires extérieurs. Ces prestataires vendent désormais leurs savoirs faire en termes de gestion et post-traitement qui font ressortir les informations et tendances de jeux de données conséquents. Les outils SIG (pour Système d'Information Géographique) sont un bel exemple d'utilisation et de post-traitement de grandes quantités de données. Ils permettent de cartographier des informations ou des résultats d'éventuels calculs. Au niveau de l'aménagement des villes, les informations de typologies et morphologies du tissu urbain sont visualisables sous SIG pour peu que les données aient été créées. La métropole du GRANDLYON s'est lancée dans l'open data et propose un panel varié de données sur les thèmes de l'occupation des sols,

du transport, de l'économie... et bien d'autres encore. Certains jeux de données sont intéressants pour ceux qui souhaitent caractériser la morphologie d'un îlot urbain. Ainsi, une base de données CityGML de 2012 représente la 3D des bâtiments de la métropole, également « une couche » (terme SIG) au format shapefile (.shp) met à disposition les empreintes au sol des bâtiments qui sont aussi renseignées d'un attribut « élévation ».

Annexe VI. 2 - Fichier type CityGML, définition d'un bâtiment.

```

=====CityGML Building module =====
-->
- <!--
=====
-->
- <xs:complexType name="AbstractBuildingType" abstract="true">
  - <xs:annotation>
    - <xs:documentation>
      Type describing the thematic and geometric attributes and the associations of buildings. It is an abstract type, only its subclasses Building and Buildi
      hierarchy between _AbstractBuildings of arbitrary depth may be specified. In such an hierarchy, top elements are Buildings, while all other elements
      inconsistencies occur (for example, if the geometry of a Building does not correspond to the geometries of its parts, or if the roof type of a Building i
      names, external references, and generalization relations.
    </xs:documentation>
  </xs:annotation>
  - <xs:complexContent>
    - <xs:extension base="core:AbstractSiteType">
      - <xs:sequence>
        - <xs:annotation>
          - <xs:documentation>
            The name will be represented by gml:name (inherited from _GML) . list order for storeyHeightsAboveground: first floor, second floor,... list
            building is just a collection of surfaces bounding a solid, but not a topologically clean solid boundary necessary for GML3 solid boundaries.
          </xs:documentation>
        </xs:annotation>
        <xs:element name="class" type="gml:CodeType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="function" type="gml:CodeType" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded"/>
        <xs:element name="usage" type="gml:CodeType" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded"/>
        <xs:element name="yearOfConstruction" type="xs:gYear" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="yearOfDemolition" type="xs:gYear" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="roofType" type="gml:CodeType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="measuredHeight" type="gml:LengthType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="storeysAboveGround" type="xs:nonNegativeInteger" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="storeysBelowGround" type="xs:nonNegativeInteger" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="storeyHeightsAboveGround" type="gml:MeasureOrNullListType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="storeyHeightsBelowGround" type="gml:MeasureOrNullListType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="lod0FootPrint" type="gml:MultiSurfacePropertyType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="lod0RoofEdge" type="gml:MultiSurfacePropertyType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="lod1Solid" type="gml:SolidPropertyType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="lod1MultiSurface" type="gml:MultiSurfacePropertyType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="lod1TerrainIntersection" type="gml:MultiCurvePropertyType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="lod2Solid" type="gml:SolidPropertyType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="lod2MultiSurface" type="gml:MultiSurfacePropertyType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="lod2MultiCurve" type="gml:MultiCurvePropertyType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="lod2TerrainIntersection" type="gml:MultiCurvePropertyType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="outerBuildingInstallation" type="BuildingInstallationPropertyType" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded"/>
        <xs:element name="interiorBuildingInstallation" type="IntBuildingInstallationPropertyType" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded"/>
        <xs:element name="boundedBy" type="BoundarySurfacePropertyType" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded"/>
        <xs:element name="lod3Solid" type="gml:SolidPropertyType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="lod3MultiSurface" type="gml:MultiSurfacePropertyType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="lod3MultiCurve" type="gml:MultiCurvePropertyType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="lod3TerrainIntersection" type="gml:MultiCurvePropertyType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="lod4Solid" type="gml:SolidPropertyType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="lod4MultiSurface" type="gml:MultiSurfacePropertyType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="lod4MultiCurve" type="gml:MultiCurvePropertyType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="lod4TerrainIntersection" type="gml:MultiCurvePropertyType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="interiorRoom" type="InteriorRoomPropertyType" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded"/>
        <xs:element name="consistsOfBuildingPart" type="BuildingPartPropertyType" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded"/>
        <xs:element name="address" type="core:AddressPropertyType" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded"/>
        <xs:element ref="_GenericApplicationPropertyOfAbstractBuilding" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded"/>

```

Eléments LOD 0

Eléments LOD 1

Eléments LOD 2

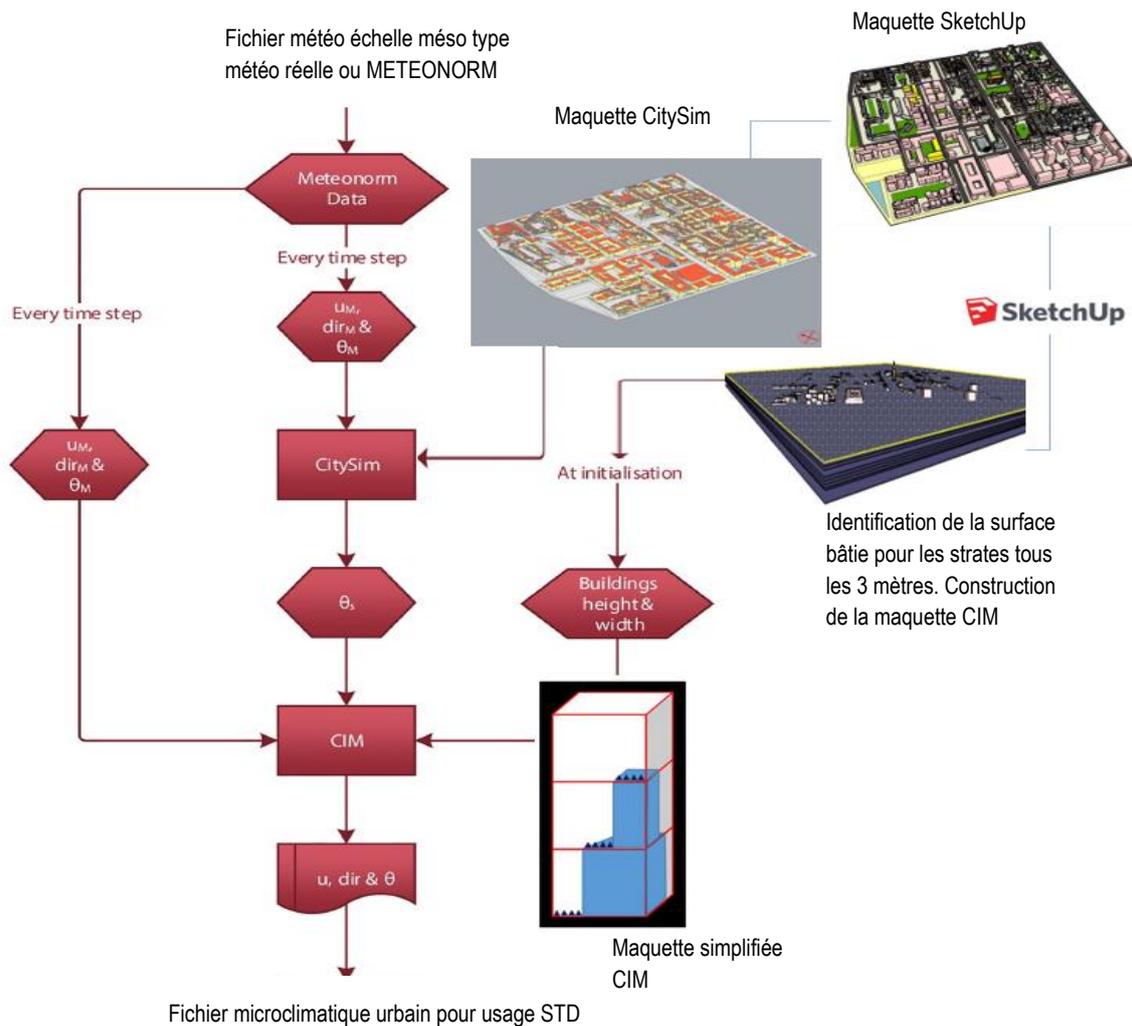
Eléments LOD 3

Eléments LOD 4

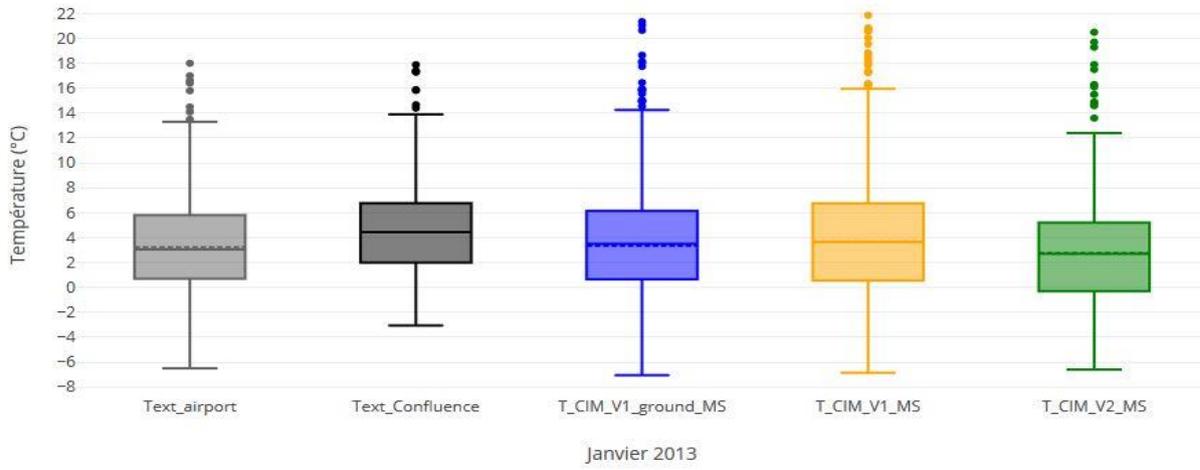
Annexe VI. 3 - Compositions des parois des bâtiments et du sol dans les simulations CitySim.

ISOLATION	PAROIS	ALBEDO	COMPOSITION	Propriétés thermiques		
				Conductivity [W/m/K]	cp [J/kg/K]	Density [kg/m3]
ITI Buildings before 2012	ROOF	0,2	Béton (20cm) Laine de verre (13cm) Enduit ciment (1,5cm)	Conductivity="2.0000"	Cp="1000"	Density="2200"
	WALL	0,2	Béton (20cm) Laine de verre (10cm) Isolation XPS (5cm)	Conductivity="0.0400"	Cp="1000"	Density="30"
	FLOOR	/	Dalle Béton (20cm) Chape ciment (5cm) Carrelage (5mm)	Conductivity="0.5000"	Cp="1000"	Density="1300"
			Graviers (5cm)	Conductivity="2.0000"	Cp="1000"	Density="2200"
			Polyuréthane (23cm)	Conductivity="0.0400"	Cp="1000"	Density="60"
			Béton (20cm)	Conductivity="0.0300"	Cp="1400"	Density="50"
ITE Buildings after 2012	ROOF	0,2	Béton (20cm) Enduit ciment (1,5cm) Isolation PSE (20cm)	Conductivity="2.3000"	Cp="1000"	Density="2300"
	WALL	0,2	Béton (20cm) Isolation XPS (15cm)	Conductivity="0.8500"	Cp="1000"	Density="1200"
	FLOOR	/	Dalle Béton (20cm) Chape ciment (5cm) Carrelage (5mm)	Conductivity="1.3000"	Cp="839"	Density="2300"
			Layer Thickness="3.855"	Conductivity="1.4800"	Cp="1100"	Density="2400"
			Layer Thickness="0.1000"	Conductivity="0.0230"	Cp="1300"	Density="35"
			Layer Thickness="0.0200"	Conductivity="2.0000"	Cp="1000"	Density="2200"
Ground		0,25	Layer Thickness="0.1000"	Conductivity="0.5000"	Cp="1000"	Density="1300"
			Layer Thickness="0.0200"	Conductivity="0.0320"	Cp="600"	Density="120"
			Layer Thickness="0.0250"	Conductivity="2.0000"	Cp="1000"	Density="2200"
				Conductivity="0.0300"	Cp="1400"	Density="50"

Annexe VI. 4 – Schéma de principe détaillé de la méthode de chaînage CitySim + CIM



Annexe VI. 5 - Distributions statistiques des températures d'air simulées et mesurées pour le mois de janvier 2013.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AICV. « GU02 AIR INFILTRATION CALCULATION TECHNIQUES.pdf ». [s.l.] : [s.n.], 1986. Disponible sur : <

https://www.aivc.org/sites/default/files/members_area/medias/pdf/Guides/GU02%20AIR%20INFILTRATION%20CALCULATION%20TECHNIQUES.PDF > (consulté le 20 octobre 2019)

Azam M.-H., Morille B., Bernard J., Musy M., Rodriguez F. « A new urban soil model for SOLENE-microclimat: Review, sensitivity analysis and validation on a car park ». *Urban Clim.* [En ligne]. 1 juin 2018. Vol. 24, p. 728-746. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.08.010> >

Bernard J. *Geographic and weather signature of the spatial and temporal air temperature variations within an urban area* [En ligne]. Theses. [s.l.] : Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2017. Disponible sur : < <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01449935> > (consulté le 20 octobre 2019)

Bontemps S. « Validation expérimentale de modèles : application aux bâtiments basse consommation ». 2016. p. 209.

Bornarel, Brindel Beth, Brisedou, Bussolino. « guide_bio_tech_confort_d_ete_passif.pdf ». [s.l.] : [s.n.], 2014. Disponible sur : < https://www.asso-iceb.org/wp-content/uploads/2014/04/guide_bio_tech_confort_d_ete_passif.pdf > (consulté le 20 octobre 2019)

Bouyer J. *Modélisation et simulation des microclimats urbains : étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments* [En ligne]. [s.l.] : Nantes, 2009. Disponible sur : < <http://www.theses.fr/2009NANT2035> > (consulté le 24 octobre 2016)

Bouyer J., Inard C., Musy M. « Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context ». *Energy Build.* [En ligne]. juillet 2011. Vol. 43, n°7, p. 1549-1559. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.02.010> >

Brager G. S., De Dear R. J. « Thermal adaptation in the built environment: a literature review ». *Energy Build.* [En ligne]. février 1998. Vol. 27, n°1, p. 83-96. Disponible sur : < [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00053-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00053-4) >

Brun A., Spitz C., Wurtz E., Mora L. « BEHAVIOURAL COMPARISON OF SOME PREDICTIVE TOOLS USED IN A LOW-ENERGY BUILDING ». 2009. p. 6.

Buonomano. « Energies | Free Full-Text | Code-to-Code Validation and Application of a Dynamic Simulation Tool for the Building Energy Performance Analysis | HTML ». [s.l.] : [s.n.], 2016. Disponible sur : < <https://www.mdpi.com/1996-1073/9/4/301/htm> > (consulté le 28 août 2019)

Chesné L. *Vers une nouvelle méthodologie de conception des bâtiments, basée sur leurs performances bioclimatiques* [En ligne]. [s.l.] : Lyon, INSA, 2012. Disponible sur : < <http://www.theses.fr/2012ISAL0092> > (consulté le 24 octobre 2016)

Cosnier M. « theb_t2.1_intertie_hygrosopique_2017.pdf ». [s.l.] : [s.n.], 2017. Disponible sur : < https://www.codifab.fr/sites/default/files/theb_t2.1_intertie_hygrosopique_2017.pdf > (consulté le 20 octobre 2019)

Crawley D. B. « Which Weather Data Should You Use for Energy Simulations of Co ». 1993. p. 18.

Daradjian Q. « Prédiction des performances énergétiques des bâtiments avec prise en compte du comportement des usagers ». 2018. p. 249.

Delcroix B., Kummert M., Daoud A., Hiller M. D. E. « CONDUCTION TRANSFER FUNCTIONS IN TRNSYS MULTIZONE BUILDING MODEL: CURRENT IMPLEMENTATION, LIMITATIONS AND POSSIBLE IMPROVEMENTS ». *IBPSA-USA J.* 2012. Vol. 5, n°1, p. 219-226.

Eames M. « An update of the UK's design summer years: Probabilistic design summer years for enhanced overheating risk analysis in building design ». *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* [En ligne]. septembre 2016. Vol. 37, n°5, p. 503-522. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1177/0143624416631131> >

EnergyPlus. « Documentation | EnergyPlus ». [s.l.] : [s.n.], 2019. Disponible sur : < <https://energyplus.net/documentation> > (consulté le 20 octobre 2019)

EnergyPlus. « EnergyPlus 8.3.0-b45b06b780 Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-2011 ». 2011. p. 58.

Givoni B. « Comfort, climate analysis and building design guidelines ». *Energy Build.* [En ligne]. janvier 1992. Vol. 18, n°1, p. 11-23. Disponible sur : < [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(92\)90047-K](https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90047-K) >

Godard A. « Changement climatique et effet de serre additionnel d'origine anthropique : un débat parfois obscur // Climate change and greenhouse effect: the anthropogenic involvement in debate ». *Ann. Géographie* [En ligne]. 2001. Vol. 110, n°617, p. 79-89. Disponible sur : < <https://doi.org/10.3406/geo.2001.1803> >

Goffart J. *Impact of the variability of weather data on a low energy house. Application of sensitivity analysis for correlated temporal inputs.* [En ligne]. Theses. [s.l.] : Université Grenoble Alpes, 2013. Disponible sur : < <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00982150> > (consulté le 14 février 2017)

Goffart J., Rabouille M., Mendes N. « Uncertainty and sensitivity analysis applied to hygrothermal simulation of a brick building in a hot and humid climate ». *J. Build. Perform. Simul.* [En ligne]. 2 janvier 2017. Vol. 10, n°1, p. 37-57. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1080/19401493.2015.1112430> >

Goffart J., Woloszyn M. « RBD-FAST: une méthode d'analyse de sensibilité rapide et rigoureuse pour la garantie de performance énergétique ». 2018. p. 9.

GrandLyon. « PLAN CLIMAT AIR ÉNERGIE TERRITORIAL 2030 ». [s.l.] : [s.n.], 2019. Disponible sur : < https://www.grandlyon.com/fileadmin/user_upload/media/pdf/grands-projets/concertation-reglementaire/20190524_projet-pcaet.pdf > (consulté le 20 octobre 2019)

Guyon G. « ROLE OF THE MODEL USER IN RESULTS OBTAINED FROM SIMULATION SOFTWARE PROGRAM ». 1997. p. 8.

Hénon A. *Températures mesurées, modélisées, et observées par télédétection infrarouge, dans la canopée urbaine : modélisation aéro-thermo-radiative des flux de chaleur urbains* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], 2008. Disponible sur : < <http://www.theses.fr/139472665> > (consulté le 20 octobre 2019)

IES. « IES <Virtual Environment> User Guides ». [s.l.] : [s.n.], 2019. Disponible sur : < <http://www.iesve.com/downloads/help/ve64/> > (consulté le 20 octobre 2019)

Joseph D., Braga D., Roccia J.-P., Gengembre É., Thuillier A., Ladevie B., Beziau J.-J. « Calcul des flux solaires pour le Bâtiment par méthode de Ray-Tracing ». 2013. p. 6.

Jouzel J. « Le climat de la France au XXI^e siècle - Volume 4 - Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer ». [s.l.] : [s.n.], 2014. Disponible sur : < <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/144000543/index.shtml> > (consulté le 20 octobre 2019)

Kämpf J. H. « On the modelling and optimisation of urban energy fluxes ». In : *Infoscience* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], 2009. Disponible sur : < <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-4548> > (consulté le 20 octobre 2019)

Laaidi Karine, Zeghnoun Abdelkrim, Dousset Bénédicte, Bretin Philippe, Vandentorren Stéphanie, Giraudet Emmanuel, Beaudeau Pascal. « The Impact of Heat Islands on Mortality in Paris during the August 2003 Heat Wave ». *Environ. Health Perspect.* [En ligne]. 1 février 2012. Vol. 120, n°2, p. 254-259. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1289/ehp.1103532> >

Lapray K., Leroy M., Marie H., Brossier J., Lasne P.-A., Giraud S., Pradels M., Hamadou H. « Direction régionale Auvergne-Rhône-Alpes 10 rue des Émeraudes 69006 Lyon ». 2018. p. 60.

Lauzet N., Rodler A., Musy M., Azam M.-H., Guernouti S., Mauree D., Colinart T. « How building energy models take the local climate into account in an urban context – A review ». *Renew. Sustain. Energy Rev.* [En ligne]. 1 décembre 2019. Vol. 116, p. 109390. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109390> >

Malys L. *Evaluation des impacts directs et indirects des façades et des toitures végétales sur le comportement thermique des bâtiments*. Thèse de doctorat. France : École centrale de Nantes, 2012. 238 p.

Marija T., Michael W., Jan H. « Comparison of co-simulation approaches for building and HVAC/R system simulation ». *Proc. 10th IBPSA Build. Simul. Conf.* 3 septembre 2007. p. 1418-1425.

Mauree D. « Développement d'un modèle météorologique multi-échelle pour améliorer la modélisation du climat urbain ». [s.l.] : [s.n.], 2014. Disponible sur : < <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01002270/document> > (consulté le 20 octobre 2019)

Mauree D., Blond N., Kohler M., Clappier A. « On the Coherence in the Boundary Layer: Development of a Canopy Interface Model ». *Front. Earth Sci.* [En ligne]. 2017. Vol. 4,. Disponible sur : < <https://doi.org/10.3389/feart.2016.00109> > (consulté le 23 mars 2017)

Mauree D., Coccolo S., Kaempf J., Scartezzini J.-L. « Data To Reproduce "Cim-Citysim Coupling" On The Epfl Campus ». In : *Infoscience* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], 2017. Disponible sur : < <https://infoscience.epfl.ch/record/253147> > (consulté le 20 octobre 2019)

Mazzarella L., Pasini M. « CTF vs FD Based Numerical Methods: Accuracy, Stability and Computational Time's Comparison ». *Energy Procedia* [En ligne]. novembre 2015. Vol. 78, p. 2620-2625. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.324> >

McDowell T. P., Bradley D. E., Hiller M., Lam J., Merk J., Keilholz W. « TRNSYS 18: The Continued Evolution of the Software ». 2018.

Meteonorm. *METEONORM version 7.3 _ Handbook part II: Theory*. 2018.

Mills G. « Luke Howard and The Climate of London ». *Weather* [En ligne]. juin 2008. Vol. 63, n°6, p. 153-157. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1002/wea.195> >

Mirsadeghi M., Cóstola D., Blocken B., Hensen J. L. M. « Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: Implementation and uncertainty ». *Appl. Therm. Eng.* [En ligne]. 1 juillet 2013. Vol. 56, n°1, p. 134-151. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.03.003> >

Munaretto F. *Étude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments* [En ligne]. phdthesis. [s.l.] : Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2014. Disponible sur : < <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-01068784/document> > (consulté le 14 février 2017)

Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., Voogt J. A. *Urban Climates.pdf*. 2017.

Parsons K. « Maintaining health, comfort and productivity in heat waves ». *Glob. Health Action* [En ligne]. 11 novembre 2009. Vol. 2, n°1, p. 2057. Disponible sur : < <https://doi.org/10.3402/gha.v2i0.2057> >

Pellegrino M., Simonetti M., Chiesa G. « Reducing thermal discomfort and energy consumption of Indian residential buildings: Model validation by in-field measurements and simulation of low-cost interventions ». *Energy Build.* [En ligne]. 1 février 2016. Vol. 113, p. 145-158. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.015> >

Pernigotto G., Prada A., Cóstola D., Gasparella A., Hensen J. L. M. « Multi-year and reference year weather data for building energy labelling in north Italy climates ». *Energy Build.* [En ligne]. avril 2014. Vol. 72, p. 62-72. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.012> >

Peuportier B. « Bancs d'essais de logiciels de simulation thermique. » In : *Journ. Thématique IBPSA Fr.-SFT 2005 Outil Simul. Thermo-Aéraul. Bâtim.* [s.l.] : [s.n.], 2005.

Plessis G., Kaemmerlen A., Lindsay A. « BuildSysPro: a Modelica library for modelling buildings and energy systems ». In : *Proc. 10 Th Int. Model. Conf. March 10-12 2014 Lund Swed.* [s.l.] : Linköping University Electronic Press, 2014. p. 1161–1169.

RE2020_GE6.

« [ge6_conventions_d_utilisation_du_batiment_pour_le_calcul_energetique_rapport_final.pdf](http://www.batiment-energiecarbone.fr/IMG/pdf/ge6_conventions_d_utilisation_du_batiment_pour_le_calcul_energetique_rapport_final.pdf) ». [s.l.] : [s.n.], 2019. Disponible sur : < http://www.batiment-energiecarbone.fr/IMG/pdf/ge6_conventions_d_utilisation_du_batiment_pour_le_calcul_energetique_rapport_final.pdf > (consulté le 16 octobre 2019)

Recht T., Munaretto F., Schalbart P., Peuportier B. « Analyse de la fiabilité de COMFIE par comparaison à des mesures. Application à un bâtiment passif ». 20 mai 2014. Disponible sur : < <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01461407> > (consulté le 20 octobre 2019)

Rey A., Tomi M. « Notice : Rey (Alain, dir.), « Dictionnaire historique de la langue française » - Langue-fr.net ». [s.l.] : [s.n.], 1998. Disponible sur : < <http://www.langue-fr.net/Notice-Rey-Alain-dir-Dictionnaire-historique-de-la-langue-francaise> > (consulté le 20 octobre 2019)

Robinson D., Haldi F, Kämpf J., Leroux P., Perez D., Rasheed A., Wilke U. « CITYSIM: COMPREHENSIVE MICRO-SIMULATION OF RESOURCE FLOWS FOR SUSTAINABLE URBAN PLANNING ». 2009. p. 8.

Robinson D., Haldi Frédéric, Kämpf J., Leroux P., Perez D., Rasheed A., Wilke U. « CitySim: Comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning ». In : *Proc Build. Simul.* [s.l.] : [s.n.], 2009. p. 1614–1627.

Robinson D., Stone. « A simplified radiosity algorithm for general urban radiation exchange - D Robinson, A Stone, 2005 ». [s.l.] : [s.n.], 2005. Disponible sur : < <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1191/0143624405bt133oa> > (consulté le 20 octobre 2019)

Sobol' M. « Sensitivity Estimates for Nonlinear Mathematical Models ». 1993. p. 8.

Soubeyroux, Schneider, Ouzeau. *RECENSEMENT DES VAGUES DE CHALEUR EN FRANCE À DIFFÉRENTES ÉCHELLES SPATIALES ET ÉVOLUTION EN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE*. 2015.

Spitz C. *Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments* [En ligne]. phdthesis. [s.l.] : Université Grenoble Alpes, 2012. Disponible sur : < <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00768506/document> > (consulté le 25 novembre 2016)

Stefanoiu A. M., Woloszyn M., Wurtz E., Jay A. « COMPARAISON MESURES – SIMULATIONS ET ANALYSE DE SENSIBILITE ». 2014. p. 9.

Tittlein P. « Environnements de simulation adaptés à l'étude du comportement énergétique des bâtiments basse consommation ». 2012. p. 221.

Vinceslas T. *Caractérisation d'éco-matériaux terre-chaivre en prenant en compte la variabilité des ressources disponibles localement*. [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], 2019. Disponible sur : < <http://www.theses.fr/s163971> > (consulté le 20 octobre 2019)

Virk D., Eames M. « CIBSE Weather Files 2016 release: Technical Briefing and Testing ». 2016. p. 24.

Wagner V. « ÉVOLUTION DES VAGUES DE CHALEUR ET DE LA MORTALITÉ ASSOCIÉE EN FRANCE, 2004-2014 / EVOLUTION OF HEAT WAVES AND ASSOCIATED MORTALITY IN FRANCE, 2004-2014 ». 2018. p. 6.

Walter E., Kämpf J. H. « A verification of CitySim results using the BESTEST and monitored consumption values ». *Proc. 2nd Build. Simul. Appl. Conf.* 2015. p. 215-222.

Woloszyn M., Rode C. « Tools for performance simulation of heat, air and moisture conditions of whole buildings ». *Build. Simul.* [En ligne]. mars 2008. Vol. 1, n°1, p. 5-24. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1007/s12273-008-8106-z> >

Yang J., Fu H., Qin M. « Evaluation of Different Thermal Models in EnergyPlus for Calculating Moisture Effects on Building Energy Consumption in Different Climate Conditions ». *Procedia Eng.* [En ligne]. 31 décembre 2015. Vol. 121, p. 1635-1641. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.194> >

Zwally H. J., Abdalati W., Herring T., Larson K., Saba J., Steffen K. « Surface Melt-Induced Acceleration of Greenland Ice-Sheet Flow ». *Science* [En ligne]. 12 juillet 2002. Vol. 297, n°5579, p. 218-222. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1126/science.1072708> >

Titre : Prise en compte cumulée du CHANGEMENT CLIMATIQUE et des SURCHAUFFES URBAINES en phase amont de CONCEPTION FRUGALE DES BÂTIMENTS centrée sur le CONFORT DES OCCUPANTS. Des propositions méthodologiques.

Mots clés : Changement climatique, Surchauffe urbaine, Météo annuelle réelle, Conception frugale, Confort d'été, Modélisation multi-échelles.

Résumé : Alors que les prévisions climatiques du GIEC sont de plus en plus avancées et que les phénomènes relatifs à l'îlot de Chaleur Urbain (ICU) sont de mieux en mieux cernés, les uns et les autres ne sont toujours pas pris en compte dans la conception actuelle des bâtiments.

- Comment prendre en compte le changement climatique à l'échelle globale et les surchauffes urbaines en phase de conception des bâtiments ?

- Quels sont les impacts sur la thermique des bâtiments ? Quels critères de confort pour orienter les choix des concepteurs motivés par la frugalité ?

La première partie de ce mémoire présente comment la thermique du bâtiment « voit » le climat. Actuellement, les bureaux d'études utilisent des météo moyennées sur 10 ou 30 ans de mesures qui donnent un fichier météo représentatif du climat d'une zone, mais qui suppriment les conditions extrêmes comme les vagues de chaleur. Ces dernières constituent et constitueront pourtant de plus en plus des risques sanitaires pour les personnes vulnérables.

Une méthodologie est proposée pour choisir une année météorologique réelle en la repositionnant par rapport aux prévisions climatiques du GIEC.

En deuxième partie du manuscrit, l'influence du type de fichier météo utilisé sur les résultats de simulation thermique dynamique (STD) est étudiée sur un bâtiment de logements collectifs situé dans le quartier Confluence à Lyon. Cette étude est centrée sur l'analyse du confort d'été qui est l'enjeu majeur pour l'adaptation aux aléas climatiques. Cette partie contient également des propositions méthodologiques pour l'analyse des risques sanitaires en ambiances intérieures lors des événements extrêmes de canicules.

Enfin en troisième et dernière partie, nous étudions la possibilité d'utiliser les résultats des outils de microclimatologie urbaine en entrée météo des modèles STD. Une expérimentation de chaînage entre les outils CitySim et CIM, développés à l'EPFL de Lausanne, est menée sur le même quartier Confluence à Lyon

Title : Cumulative consideration of CLIMATE CHANGE and URBAN WARMING for FRUGAL BUILDING DESIGN centered on the COMFORT OF OCCUPANTS. Methodological proposals.

Keywords : Climate change, Urban warming, Real weather year, Frugal design, Summer comfort, Multi-scale modelling.

Abstract : While the IPCC's climate forecasts are more and more advanced and the phenomena related to the Urban Heat Island (UHI) are well understood, both are still not taken into account in the design of current buildings.

- How to take into account the global warming and urban overheating in buildings' design?

- What are the impacts on the thermal behavior of buildings? What comfort criteria can be proposed to guide the choices of designers motivated by frugality?

The first part of this manuscript presents how the building "sees" the climate. Currently, consulting agencies use averages over 10 or 30 years of measurements that give a weather file representative of the climate of an area, but which remove extreme conditions such as heat waves. However, these are and will increasingly constitute health risks for vulnerable people. A methodology is proposed to choose a real weather

year by repositioning it in relation to the IPCC climate forecast.

In the second, the influence of the type of weather file used for buildings simulation on the comfort results is studied for a residential building located in the Confluence district in Lyon. This study focuses on the analysis of summer comfort, which is the major issue for adaptation to current and future climates. This part also contains methodological proposals for the analysis of health risks in indoor environments during extreme heatwave events.

Finally, in the third and last part, we study the possibility of using the results of a urban microclimate tool to produce weather input for the building energy models. A chaining experiment between the CitySim and CIM tools, developed at EPFL Lausanne, is conducted on the same Confluence district in Lyon.