



HAL
open science

Evaluer les performances des bâtiments urbains passifs face aux canicules à venir

Adrien Toesca

► **To cite this version:**

Adrien Toesca. Evaluer les performances des bâtiments urbains passifs face aux canicules à venir. Thermique [physics.class-ph]. Université Claude Bernard - Lyon I, 2023. Français. NNT : 2023LYO10054 . tel-04544326

HAL Id: tel-04544326

<https://theses.hal.science/tel-04544326v1>

Submitted on 12 Apr 2024

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 DE
L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1**

**Ecole Doctorale N° 162
Mécanique, Énergétique, Génie civil, Acoustique**

Discipline : Énergétique

Soutenue publiquement le 05/04/2023, par :
Adrien TOESCA

**Evaluer les performances des bâtiments
urbains passifs face aux canicules à venir**

Devant le jury composé de :

CIUPERCA Gabriela
DAVID Damien
DUBREUIL Vincent
JOHANNES Kéryn
LUSSAULT Michel
MACHARD Anaïs
MORA Laurent
WOLOSZYN Monika

Maître de conférences HDR
Maître de conférences
Professeur
Maître de conférences HDR
Professeur
Ingénieure de Recherche
Professeur
Professeure

UCBL1
UCBL1
Université de Rennes
UCBL1
ENS
CSTB
Université de Bordeaux
Université SMB

Examinatrice
Examineur
Président
Directeur de thèse
Co-Directeur de thèse
Examinatrice
Rapporteur
Rapporteure

Résumé

Dans le contexte du réchauffement climatique, les événements climatiques extrêmes tels que les canicules seront plus longs, plus fréquents et plus intenses. Ces canicules sont amplifiées en ville par le phénomène d'îlot de chaleur urbain et risquent d'impacter une majorité de la population mondiale puisque plus de la moitié des humains sur Terre vivent dans des zones urbaines, avec une augmentation au cours des dernières décennies. Par ailleurs, en Europe les bâtiments résidentiels sont actuellement très peu équipés de systèmes de climatisation et les avantages sociaux d'une augmentation du taux de pénétration des systèmes de climatisation sont discutables. Une majorité d'humain risque donc d'être vulnérable face aux canicules à venir.

Ce constat révèle la nécessité de répondre à la problématique suivante : comment évaluer les performances des bâtiments résidentiels urbains passifs pendant les canicules attendues durant les décennies à venir ?

Cette thèse a consisté à définir les différents éléments d'un protocole d'évaluation permettant de répondre à cette problématique.

Tout d'abord des outils de simulations pertinents ont été définis. Ces outils ont été confrontés avec des mesures in-situ réalisées à Lyon pendant l'été 2020. La confrontation révèle que les outils modélisent avec précision les ambiances thermiques intérieures des bâtiments résidentiels urbains passifs.

Ensuite une méthodologie a été développée pour constituer des jeux de données météorologiques de canicules, qui soient représentatifs de la diversité des canicules que pourraient subir les bâtiments durant les décennies à venir.

Des travaux de recensement bibliographiques ont été menés afin d'identifier des indicateurs pertinents pour évaluer la sensation de chaleur dans les ambiances intérieures des bâtiments.

Pour finir, le protocole d'évaluation a été testé pour 4 cas d'étude situés dans la ville de Lyon. Les résultats montrent que les performances des bâtiments sont variées vis-à-vis de la diversité des canicules à venir. Certaines canicules sont problématiques puisqu'elles entraînent des sensations thermiques extrêmes à l'intérieur des bâtiments. Pour d'autres canicules, les bâtiments testés sont toujours capables d'offrir des ambiances intérieures saines.

Abstract

In the context of global warming, extreme weather events such as heatwaves will be longer, more frequent and more intense. These heatwaves are amplified in cities by the urban heat island phenomenon and are likely to affect a majority of the world's population since more than half of the world's people live in urban areas, with an increase in recent decades. Furthermore, residential buildings in Europe are currently very poorly equipped with air conditioning systems and the social benefits of increasing the penetration rate of air conditioning systems are questionable. A majority of people are therefore likely to be vulnerable to future heat waves.

This observation reveals the need to address the following problem: how to assess the performance of passive urban residential buildings during the heatwaves expected in the coming decades?

This thesis consisted in defining the different elements of an evaluation protocol to answer this problem.

First of all, relevant simulation tools were defined. These tools were compared with in-situ measurements carried out in Lyon during the summer of 2020. The comparison reveals that the tools accurately model the indoor thermal environments of passive urban residential buildings.

A methodology was then developed to create heatwave meteorological data sets that are representative of the diversity of heatwaves that buildings could experience in the coming decades.

Bibliographic research was carried out to identify relevant indicators for assessing the sensation of heat in the indoor environment of buildings.

Finally, the evaluation protocol was tested for 4 case studies located in the city of Lyon. The results show that building performances are varied with respect to the diversity of future heatwaves. Some heatwaves are problematic as they lead to extreme thermal sensations inside the buildings. For other heatwaves, the buildings tested are still able to provide healthy indoor environments.

Table des matières

Résumé	3
Abstract	4
Table des matières	5
Nomenclature et abréviations	10
Liste des figures	12
Liste des tableaux	17
I. Contexte et enjeux	19
I.1 Bâtiments et réchauffement climatique	20
I.1.1 Atténuation	20
I.1.2 Adaptation	21
I.2 Performances des bâtiments en période de canicule	22
I.2.1 Population de bâtiments visés	22
I.2.2 Formulation de la problématique – Plans du manuscrit	22
II. Modèle de simulation adapté	25
II.1 Introduction	26
II.2 Exigences du modèle et outils existants	26
II.2.1 Spécificités du comportement thermique des bâtiments passifs dans des conditions estivales	26
II.2.2 Effet du tissu urbain sur les sollicitations thermiques extérieures	27
II.2.2.1 Les phénomènes thermo-aérauliques à l'échelle de la ville	28
II.2.2.2 Les phénomènes thermo-aérauliques à l'échelle du quartier	28
II.2.3 Limites des chaînes d'outils de simulation thermique urbaine existantes	30
II.3 Description du modèle	30
II.4 Campagne de mesure	33
II.4.1 Mesures in-situ	33
II.4.2 Cas d'étude	34

II.4.3	Stratégie de mesures.....	36
II.4.4	Capteurs et emplacements des capteurs	38
II.4.5	Dates de la campagne de simulation	38
II.5	Résultats des mesures.....	39
II.5.1	Températures extérieures	39
II.5.2	Températures intérieures et ouvertures	40
II.5.3	Interprétation du comportement d'ouverture des fenêtres.....	42
II.6	Résultats des simulations – précision du modèle.....	43
II.6.1	Précision des prédictions d’UWG.....	43
II.6.2	Prévisions de la température intérieure	46
II.6.1	Humidité de l'air	51
II.7	Discussion	52
II.7.1	Pertinence de l'UTTC.....	52
II.7.2	Paramètres clés de la simulation	53
II.7.2.1	Hauteur de couche limite urbaine nocturne	53
II.7.2.2	Scénarios d’ouverture	55
II.7.3	Mesures requises pour l'étalonnage du modèle.....	56
II.8	Conclusion.....	56
III.	Fichiers météorologiques des canicules à venir.....	59
III.1	Introduction.....	60
III.2	Etat de l’art sur la production de données météorologiques de canicules futures	60
III.3	Vue d’ensemble de la méthodologie proposée	63
III.4	Détail de la méthodologie	65
III.4.1	Étape 1 : Collecte des données de projection climatique	65
III.4.1.1	Objectifs et méthode	65

III.4.1.2	Application.....	66
III.4.2	Étape 2 : Identification des canicules	67
III.4.2.1	Objectifs et méthode	67
III.4.2.2	Application/illustration	67
III.4.3	Observation des canicules identifiées.....	68
III.4.4	Étape 3 : Caractérisation des canicules.....	71
III.4.4.1	Objectifs et méthode	71
III.4.4.2	Application/illustration	75
III.4.4.3	Comparaison des résultats de la méthode avec une analyse en composantes principales	77
III.4.5	Etape 4 : Sélection des canicules.....	79
III.4.5.1	Objectifs et méthode	79
III.4.5.2	Application/illustration	80
III.4.5.3	Validité de la sélection des clusters	82
III.5	Utilisation possible de la méthodologie	83
III.6	Conclusion	84
IV.	Les indicateurs de performances d'un bâtiment passif.....	87
IV.1	Introduction.....	88
IV.2	Indicateurs de sensation thermique instantanés	88
IV.2.1	Critères de sélection.....	89
IV.2.2	Indicateur basé sur l'environnement thermique (ou direct).....	90
IV.2.3	Indicateurs de confort adaptatif	92
IV.2.4	Indicateurs rationnels.....	93
IV.2.5	Synthèse et sélection des indicateurs.....	95
IV.3	Intégration spatiale et temporelle des indicateurs de confort.....	97
IV.3.1	Critères de sélection des méthodes d'intégration	97

IV.3.2	Prérequis : modèles de présence d’occupants dans les locaux	97
IV.3.3	Prérequis : valeurs seuils et catégories de confort.....	98
IV.3.4	Prérequis : mesure de l’inconfort instantané	99
IV.3.5	Méthodes d’intégration purement temporelle (local unique)	99
IV.3.5.1	Indice cumulatif d’inconfort	100
IV.3.5.2	Pourcentage hors de la gamme (Percentage Out of Range, POR).....	101
IV.3.5.3	Inconfort moyen (Average Discomfort, AD)	103
IV.3.5.4	Valeur maximum de l’indicateur instantané (Maximum Discomfort, MD).....	103
IV.3.5.5	Synthèse des méthodes d’intégration temporelle.....	103
IV.3.6	Intégration spatio-temporelle (plusieurs locaux).....	105
IV.3.6.1	Agrégation spatiale préalable.....	105
IV.3.6.2	Agrégation spatiale postérieure.....	105
IV.3.6.3	Agrégation spatiale combinée.....	105
IV.3.6.4	Synthèse des méthodes d’intégration spatiales	105
IV.4	Synthèse - Stratégie adoptée	106
IV.4.1	Synthèse.....	106
IV.4.2	Stratégie adoptée	106
V.	Etude de la performance des bâtiments face aux canicules futures.....	109
V.1	Introduction	110
V.2	Synthèse : protocole d’évaluation complet	110
V.2.1	Modèle de comportement thermique de bâtiment (Simulation Tool)	111
V.2.1	Les canicules (Weather Inputs) – Période de simulation	112
V.2.2	Indicateurs de performances (Post Processing).....	112
V.2.3	Modélisation des occupants.....	113
V.3	Cas d’étude.....	113

V.4 Résultats	114
V.4.1 Description des résultats de simulation par cas d'étude	114
V.4.1.1 Bâtiment des Canuts	115
V.4.1.2 Autres cas d'étude	116
V.4.2 Comparaison des performances des différents cas d'étude	116
V.4.2.1 Nombre de jours d'inconfort (<i>NJCI</i>).....	116
V.4.2.2 Sensation moyenne et maximale.....	119
V.4.2.3 Distributions de SET agrégées spatialement.....	120
V.5 Conclusion.....	122
Conclusion générale	124
Remerciements	128
Annexes	129
Bibliographie.....	161

Nomenclature et abréviations

Nomenclature

Symbole	Nom	Unité
T	Température	°C
Δ	Amplitude	-
δ	Difference	-
$\bar{\quad}$	Moyenne	-
%	Pourcentage	%
ε	Erreur	-

Indices	Nom
o	Extérieur
i	Intérieur
urb	Urbain
rur	Rural
UHI	Ilot de chaleur Urbain
$night$	Nuit
$meas$	Mesuré
sim	Simulé
ubl	Couche limite urbaine

Abréviations

ACP	Analyse en Composante Principale
ACV	Analyse du Cycle de Vie
AFN	AirFlow Network (Réseau d'écoulement de l'air)
AMC	Analyse de Matrice de Corrélation
BEM	Building Energy Model (Modèle énergétique du bâtiment)
CF	Climate and Forecast
CFD	Computational Fluid Dynamics (Dynamique des fluides numérique)
CIBSE	Chartered Institution of Building Services Engineers (Institut agréé des ingénieurs des services du bâtiment)
CORDEX	COordinate Regional Downscaling Experiment (Expérience de réduction d'échelle régionale coordonnée)
DH	Degré Heure
DMT	Daily Mean Temperature (Température Moyenne Journalière)
DSM	District Scale Model
DRY	Design Reference Year
DSY	Design Summer Year
EHF	Excess Heat Factor
FTMY	Future Typical Meteorological Year

GCM	Global Circulation Model
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
HSI	Heat Stress Index
HWE	Heat Wave Event
HWMI	HeatWave Magnitude Index
IBM	Indicateur Bio Météorologique
ICU	Ilot de Chaleur Urbain
IWEC	International Weather for Energy Calculation
MET	Metabolic Equivalent of Task
MMM	Micro Meteorological Model
PC	Principal Component
PPD	Percentage of People Dissatisfied
PET	Physiological Equivalent Temperature
PHS	Physiological Heat Strain
PMV	Predictive Mean Vote
POR	Percentage Out of Range
RCM	Regional Circulation Model
RE2020	Règlementation Environnementale 2020
RSWY	Reference Summer Weather Year
SET	Standard Equivalent Temperature
SRY	Summer Reference Year
TEB	Town Energy Balance
THY	Typical Hot Year
TMY	Typical Meteorological Year
TRY	Typical Reference Year
UBL	Urban Boundary Layer (Couche limite urbaine)
UTCI	Universal Thermal Climate Index
UTTC	Urban Thermal Tool Chain

Liste des figures

Figure I-1 : Eléments d'un protocole d'évaluation des performances des bâtiments	23
Figure II-1: Effets urbains modélisés par la chaîne d'outils thermiques urbains	31
Figure II-2 : Transfert d'information au sein de l'UTTC.....	33
Figure II-3: Environnement urbain autour des bâtiments étudiés (le rectangle bleu correspond à l'appartement étudié), plans des appartements et emplacement des capteurs (Google Maps 2022)..	34
Figure II-4 : Emplacement des cas d'étude et de la station de Météo France de Lyon Bron (Google Maps 2022).....	35
Figure II-5: Transfert d'informations au sein de l'UTTC, y compris les catégories de mesures (les zones bleues indiquent les données d'entrées de la simulation mesurées ou relevées ; les zones rouges indiquent les mesures employées pour évaluer la précision de la chaîne d'outils de simulation).....	36
Figure II-6: Les résultats des mesures de la température de l'air extérieur sont présentés dans les graphiques du haut (les mesures urbaines sont indiquées par des lignes bleues et les mesures rurales obtenues de Météo-France sont indiquées en vert, et les jours de canicule sont identifiés par des rectangles gris), et l'amplitude de l'îlot de chaleur urbain δUHI est présentée dans le graphique du bas (lignes bleues)	39
Figure II-7: Température mesurée de l'air intérieur, période d'absence (rectangles gris), état d'ouverture continue des fenêtres (rectangles marrons en pointillés) et schéma d'ouverture quotidienne des fenêtres (rectangles orange en pointillés) (courbes du haut), niveaux de bruit et pourcentage de fenêtres ouvertes (courbes du bas) pour chaque appartement étudié.....	41
Figure II-8: Matrice de corrélation (coefficient de corrélation standard de Pearson) pour l'interprétation des comportements d'ouverture des fenêtres. $\%wop$: Pourcentage d'ouverture des fenêtres ; LA : niveau de bruit extérieur ; TO : température de l'air extérieur ; Ti : température moyenne de l'air intérieur (tracé avec la fonction <code>seaborn.heatmap()</code> de la bibliothèque <code>seaborn</code> en Python).	43
Figure II-9: Température de l'air extérieur dans tous les cas d'étude de juillet à septembre (graphique du haut) (simulations urbaines (rouge), mesures urbaines (bleu) et mesures rurales (vert)) et δUHI dans le graphique du bas (valeurs δUHI mesurées (lignes bleues) et simulées (lignes orange))	44
Figure II-10: Focus sur la température de l'air extérieur (graphique du haut) dans toutes les études de cas du 15 au 22 août (simulations urbaines (rouge), mesures urbaines (bleu) et mesures rurales (vert)) et δUHI dans le graphique du bas (valeurs δUHI mesurées (lignes bleues) et simulées (lignes orange)).	44
Figure II-11: Distribution de l'erreur de la température extérieure entre les prédictions et les mesures de l'UWG pendant la nuit ϵ_o , $urbTnight$ (lignes pleines) et distribution de l'UHI mesuré pendant la nuit δUHI_{night} (lignes pointillées).	45
Figure II-12: Températures de l'air simulées (rouge) et mesurées (bleu) dans le salon et température de l'air extérieur (bleu clair) de juillet à septembre.....	47

Figure II-13: Zoom sur les températures simulées [UTTC complète (ligne continue rouge), sans UrbaWind (ligne pointillée bleue), sans UWG (ligne pointillée verte), et seulement avec EnergyPlus en considérant le coefficient de pression standard et les valeurs du fichier météo rural (ligne pointillée jaune)] et mesurées (bleu) dans le salon et la température extérieure (bleu clair) du 12 au 19 septembre.	48
Figure II-14: Distribution de l'erreur de température entre les prédictions de simulation et les valeurs de température mesurées (εiT) pour chaque pièce dans chaque cas d'étude [UTTC complet (ligne continue rouge), sans UrbaWind (ligne pointillée bleue), sans UWG (ligne pointillée verte), et uniquement avec EnergyPlus sur la base du coefficient de pression standard et des valeurs du fichier météo rural (ligne pointillée jaune)].	49
Figure II-15: Humidités spécifiques de l'air simulées [UTTC complet (ligne continue rouge), sans UrbaWind (ligne pointillée bleue), sans UWG (ligne pointillée verte), et seulement avec EnergyPlus basé sur le coefficient de pression standard et les valeurs du fichier météo rural (ligne pointillée jaune)] et mesurées (bleu) dans les salons et humidités spécifiques de l'air extérieur urbain (ligne bleue claire) et rural (ligne verte) mesurées du 12 au 19 septembre.	51
Figure II-16 : Effet de saturation dans un appartement très exposé au vent (appartement A).....	53
Figure II-17: Distribution de l'erreur de température extérieure entre les prédictions de l'UWG et les mesures pendant la nuit $\varepsilon o, urbT_{nuit}$ [les lignes pleines indiquent la paramétrisation finale de l'UWG ($hubl, night = 30 m$), et les lignes en pointillés indiquent une hauteur de couche limite urbaine de $hubl, night = 150 m$].	54
Figure II-18 : l'UBL selon (Oke et al. 2017) (à gauche), et tel que modélisé dans UWG (à droite).	54
Figure II-19: Distribution de l'erreur de température du salon entre les prédictions de la simulation et les valeurs de température mesurées εiT pour chaque appartement en fonction des différents scénarios de stores [les lignes pleines indiquent la paramétrisation finale de l'UTTC (scénarios de store construit sur la base des entretiens), et les lignes en pointillés indiquent les résultats avec les scénarios de stores standard].	55
Figure III-1: Plan de la méthodologie	64
Figure III-2: Nombre annuel de canicules détectées pour chaque période de 15 ans avec le scénario RCP4.5 en bleu et le scénario RCP8.5 en orange. La moyenne de chaque boxplot est représentée par un triangle violet. Les moustaches représentent les 5 ^{ème} et 95 ^{ème} percentiles.	69
Figure III-3: La température moyenne des canicules détectées pour chaque période de 15 ans avec le scénario RCP 4,5 en bleu et le scénario RCP 8,5 en orange. La moyenne de chaque boxplot est représentée par un triangle violet. Les moustaches représentent les 5 ^{ème} et 95 ^{ème} percentiles.	69
Figure III-4: Durée des canicules détectées pour chaque période de 15 ans avec le scénario RCP 4,5 en bleu et le scénario RCP 8,5 en orange. La moyenne de chaque boxplot est représentée par un triangle violet. Les moustaches représentent les 5 ^{ème} et 9 ^{ème} percentiles.	70
Figure III-5 : Probabilité qu'un jour de l'année soit caniculaire (pour le rcp 4.5 à gauche et pour le rcp8.5 à droite). Les courbes représentent différentes périodes temporelles. Les lignes pleines représentent les canicules futures, les lignes pointillées les canicules historiques.	71
Figure III-6: Espace de caractérisation proposé par Ouzeau et al. (2016) pour les canicules détectées avec la méthode "IBM" pour le scénario RCP 4.5 dans la localisation de l'aéroport de Lyon Saint-	

Exupéry. Les prédictions météorologiques de tous les modèles sont mélangées dans cette figure. La barre de couleur indique l'année de chaque canicule. La taille de la bulle représente l'intensité globale de la canicule. 72

Figure III-7: Potentiel de refroidissement (par évaporation en haut à gauche, par protection directe contre le rayonnement en bas à gauche, par rayonnement thermique nocturne en haut à droite et par ventilation naturelle en bas à droite) 74

Figure III-8: Matrice de corrélation (en valeurs absolues) entre les différents indicateurs de canicule. Les corrélations fortes sont indiquées en rouge, et les faibles en bleu. Les rectangles noirs représentent les groupes d'indicateurs fortement corrélés. Les noms des groupes sont donnés en bas de la figure. Les rectangles en pointillés représentent les groupes non significatifs. 75

Figure III-9: Histogrammes des indicateurs indépendants pour l'ensemble de données de canicules identifiées 77

Figure III-10 : Schématisation des deux méthodes de sélection de canicules représentatives dans une projection de l'espace de caractérisation en deux dimensions. 80

Figure III-11 : dendrogramme de l'ensemble de données sur les canicules dans l'espace de caractérisation (à gauche). Distance euclidienne en fonction du nombre de clusters (à droite). Les lignes rouges pointillées montrent le nombre de clusters sélectionnés et la distance euclidienne associée. 81

Figure III-12 : schéma pour le calcul du silhouette score : les traits rouges représentent les distances de dissimilarité entre le point i et les autres points du même cluster. Les traits bleus représentent les distances de dissimilarité entre le point i et les points du cluster le plus proche (ici le cluster B) 82

Figure III-13: Score de silhouette pour chaque canicule de l'ensemble de données. La ligne pointillée verticale rouge indique la moyenne du score de silhouette. Le nombre à droite de chaque groupe indique la valeur moyenne du score de silhouette pour chaque groupe. 83

Figure III-14: Dispersion d'un indicateur de performance d'un bâtiment en raison de la variabilité des canicules (gauche) et frontière entre canicules problématiques et non problématiques (droite) dans une projection 2D de l'espace de caractérisation. 84

Figure IV-1: Schéma d'explication des degrés heures 101

Figure IV-2: Schéma explicatif du calcul de l'indicateur POR dans le cas de l'utilisation du PMV102

Figure IV-3 : schéma d'illustration du calcul de l'exceedance (Borgeson et Brager 2011) 103

Figure IV-4 : représentation schématique des indicateurs développés : *TIEM* (ligne horizontale bleue), *SETmax* (étoile rouge) et *NJCI* (zone orangée). 107

Figure V-1 : Eléments du protocole 110

Figure V-2 : protocole d'évaluation des performances d'un bâtiment urbain passif face aux canicules à venir 111

Figure V-3 : Schéma d'explication du calcul de la vitesse d'air dans une pièce rectangulaire. Deux configurations extrêmes de tubes de courant. 111

Figure V-4 : Environnement urbain autour des bâtiments étudiés (le rectangle bleu correspond à l'appartement étudié), plans des appartements et emplacement des capteurs (Google Maps 2022) 114

Figure V-5 : Indicateurs de performances pour les 4 bâtiments et les 8 canicules. Les barres bleues : nombre de jour supérieur aux seuils, points rouges : valeurs SET_{max} , triangles violets : valeurs de TIEM.	115
Figure V-6 : NJCI en jours (Nombres de jours consécutifs avec des valeurs de SET supérieures aux seuils) pour les quatre cas d'étude et les huit canicules représentatives.	117
Figure V-7 : Valeurs de $TIEM$ (à gauche) et SET_{max} (à droite) pour les quatre cas d'étude et les huit canicules représentatives.....	119
Figure V-8 : distribution des valeurs de SET_t (série temporelle des moyennes spatiales de SET pondérées par l'occupation) pour les quatre cas d'étude et les huit canicules représentatives.	121
Figure V-9 : protocole d'évaluation des performances des bâtiments urbains passifs en période de canicule.....	124
Figure A-10 : Ajustement du profil de vent de EnergyPlus	133
Figure A-11 : tableur permettant de calculer les coefficients à modifier pour créer un profil de vitesse artificiel dans EnergyPlus.....	134
Figure A-12 : Exemple de morceau d'IDF à ajouter pour modifier les profils de vitesse de vent ..	135
Figure A-13 : Plan de l'appartement de la période Canut.....	136
Figure A-14 : plan de l'appartement de la période Industrielle	137
Figure A-15 : Plan de l'appartement de la période Reconstruction	137
Figure A-16 : Plan de l'appartement de la période Contemporaine.....	138
Figure A-17: Secteur angulaire pour le calcul de la direction du vent.....	142
Figure A-18 : Distribution des températures moyennes journalières de la ville de Lyon (station météo Lyon-Bron) sur la période historique de 1976 à 2005.....	147
Figure A-19 : Exemple de détection de canicule avec la méthode de Ouzeau et al. (2016).....	148
Figure A-20 : Exemple de détection de canicule avec la méthode de Pascal et al. (2006).....	148
Figure A-21 : Exemple de détection de canicules avec la méthode de Nairn et Fawcett (2014).....	149
Figure A-22 : Exemple de détection de vague de chaleur avec la méthode de Russo et al. (2014).150	
Figure A-23 : Schéma du bilan thermique du corps humain dans son environnement.....	151
Figure A-24: Evolution temporelle de la moyenne spatiale de SET pondérée par l'occupation pour la canicule 1 pour les quatre cas d'étude.....	157
Figure A-25: Evolution temporelle de la moyenne spatiale de SET pondérée par l'occupation pour la canicule 2 pour les quatre cas d'étude.....	157
Figure A-26: Evolution temporelle de la moyenne spatiale de SET pondérée par l'occupation pour la canicule 3 pour les quatre cas d'étude.....	158
Figure A-27: Evolution temporelle de la moyenne spatiale de SET pondérée par l'occupation pour la canicule 4 pour les quatre cas d'étude.....	158
Figure A-28 : Evolution temporelle de la moyenne spatiale de SET pondérée par l'occupation pour la canicule 5 pour les quatre cas d'étude.....	159

Figure A-29 : Evolution temporelle de la moyenne spatiale de SET pondérée par l'occupation pour la canicule 6 pour les quatre cas d'étude..... 159

Figure A-30 : Evolution temporelle de la moyenne spatiale de SET pondérée par l'occupation pour la canicule 7 pour les quatre cas d'étude..... 160

Figure A-31 : Evolution temporelle de la moyenne spatiale de SET pondérée par l'occupation pour la canicule 8 pour les quatre cas d'étude..... 160

Liste des tableaux

Tableau II-1 : caractéristiques des cas d'étude.....	35
Tableau II-2: Paramètres de simulation utilisés pour calculer l'UHI avec UWG	37
Tableau II-3: Caractéristiques des capteurs	38
Tableau II-4: Résumé des statistiques sur les mesures et les prévisions de la température extérieure	46
Tableau II-5: Statistiques des erreurs de prédiction de la température intérieure sur la période du 9 Juillet au 30 Septembre (à partir du 29 Juillet pour la période Canut et jusqu'au 30 Aout pour la période Industrielle)	50
Tableau III-1: Information générale sur le cas d'étude : Aéroport de Lyon Saint-Exupéry	64
Tableau III-2: Ensemble minimal de variables utilisé pour filtrer les projections climatiques utilisables pour les simulations	66
Tableau III-3: Liste des résultats des projections climatiques collectées pour cette étude.	67
Tableau III-4: Nombre annuel moyen, température de l'air moyenne, durée des canicules et nombre total de canicules identifiées pour chaque méthode de détection.....	68
Tableau III-5: Premier groupe d'indicateurs de la série étendue d'indicateurs.....	73
Tableau III-6: Liste des indicateurs indépendants et valeurs des 5 ^{ème} et 95 ^{ème} percentiles. La dernière colonne indique les indicateurs significatifs.	77
Tableau III-7: Composition des composantes principales de l'ACP	78
Tableau III-8: Valeurs de l'ensemble minimal de canicules dans l'espace de caractérisation des canicules	81
Tableau IV-1 : Définition de niveaux de risques associés à l'Heat Index	91
Tableau IV-2 : plage de confort associée aux valeurs de l'humidex	92
Tableau IV-3 : sensation thermique associée aux valeurs de l'humidex	92
Tableau IV-4 : Confort et sensation thermique en fonction de la valeur du HSI (Epstein et Moran 2006).....	94
Tableau IV-5 : synthèse de certains indicateurs de température équivalente.....	95
Tableau IV-6 : Echelle de sensation thermique de la SET (Gonzalez, Nishi, et Gagge 1974).....	95
Tableau IV-7 : synthèse des indicateurs de sensation thermique instantané.....	96
Tableau IV-8: définition des catégories de confort selon l'EN 15251 et l'ISO 7730.....	98
Tableau IV-9 : définition des catégories de confort selon l'ASHRAE 55.....	99
Tableau IV-10 : synthèse des méthodes d'intégration purement temporelles.....	104
Tableau V-1 : Valeurs de l'ensemble minimal de canicules dans l'espace de caractérisation des canicules	112
Tableau V-2 : caractéristiques des cas d'étude	114

Tableau A-3 : Valeurs des paramètres α et δ selon le site	132
Tableau A-4: données de projections météo collectées dans CORDEX.....	139
Tableau A-5: Grandeur nécessaire pour produire un fichier météo au format EPW	139
Tableau A-6: Formule pour calculer wd à partir des 4 secteurs angulaires.....	142
Tableau A-7: Spectre du rayonnement solaire $i_0 \lambda k$ en $[(W / m^2) / nm]$, discrétisé sur les valeurs de longueur d'onde λk , avec $k \in 0 ; N - 1$	144
Tableau A-8: Coefficient de turbidité β	145
Tableau A-9 : Métabolisme énergétique (Annexe B de la norme ISO7730).....	153
Tableau A-10 : Isolement thermique de combinaisons vestimentaires types (Annexe C norme ISO 7730)	154
Tableau A-11 : synthèse de l'influence des paramètres de base.....	156

Chapitre I

Contexte et enjeux

I.1 Bâtiments et réchauffement climatique

Selon le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (Field et al. 2012), il y a deux grands principes pour faire face aux changements climatiques : l'atténuation et l'adaptation. Cette première partie décrit comment ces deux principes se traduisent dans le secteur du bâtiment.

I.1.1 Atténuation

L'atténuation des changements climatiques vise à limiter ces changements, et donc principalement à réduire les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) causées par le secteur du bâtiment. Ce secteur peut être un levier important de l'atténuation puisqu'il est responsable de plus de 40 % de la consommation d'énergie dans le monde et d'un tiers des émissions mondiales de GES (Nielsen et al. 2016), et de 36% des émissions de GES à l'échelle européenne (Jiménez-Pulido, Jiménez-Rivero, et García-Navarro 2022). Les émissions de GES de ce secteur arrivent à différentes phases de la vie des bâtiments : lors de leur production, de leur construction, de leur rénovation, de leur exploitation, incluant les émissions liées à leurs consommations énergétiques et à leur maintenance, et de leur démolition, incluant notamment les émissions dues du traitement des déchets. Pour réduire les émissions de GES dans le secteur du bâtiment, il est possible d'agir sur chacune de ces phases de vie.

Jusque récemment, l'essentiel des études visant à évaluer les impacts des bâtiments sur leur environnement se concentraient sur une étape de leur cycle de vie : l'exploitation des bâtiments, et sur un type de dommage environnemental : la consommation d'énergie des bâtiments. Cette consommation d'énergie pouvait être traduite en émission équivalente de gaz à effet de serre. Par exemple (Panagiotidou, Aye, et Rismanchi 2021) ont réalisé des études afin d'optimiser la rénovation d'un bâtiment en essayant de minimiser les émissions de GES dû à la phase d'exploitation.

Afin d'aller plus loin et d'intégrer également les émissions de GES des matériaux utilisées pour la construction ou la rénovation des bâtiments dans l'évaluation de leurs impacts environnementaux, des outils d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) ont progressivement été élaborés pour le secteur du bâtiment. Par exemple, (Pushkar, Becker, et Katz 2005) ont mis en place une méthodologie permettant de prendre en compte l'ensemble de la vie du bâtiment en réalisant une ACV. (Motuzienė et al. 2016) ont étudié différentes solutions de rénovation d'un bâtiment en utilisant une approche multicritère comprenant une ACV et une analyse énergétique et économique.

Les enjeux de réduction des émissions de GES des bâtiments ont été intégrés par les dirigeants politiques et les administrations publiques, avec notamment la création de réglementations encourageant le développement d'approches énergétiques durables, contribuant ainsi à la réduction de l'empreinte carbone anthropique (María Calama-González, Suárez, et Luis León-Rodríguez 2022). En France, les émissions de GES des constructions neuves doivent être calculées avec des outils d'ACV et ne doivent pas dépasser les seuils maximaux fixés par la nouvelle réglementation environnementale (RE2020). Les émissions de GES comprennent d'une part les impacts associés aux composants du bâtiment (matériaux de constructions, systèmes de chauffage, ventilation...) et d'autre part les impacts associés aux consommations d'énergie (Ministère de la transition écologique 2021a).

Ces nouvelles directives permettent de construire et rénover les bâtiments en essayant de réduire les impacts sur les changements climatiques. Mais les changements climatiques ayant déjà des impacts visibles, qui risquent de s'amplifier dans les décennies à venir, il faut également prendre des mesures pour s'adapter à ces changements.

I.1.2 Adaptation

Dans l'adaptation, l'objectif n'est pas de réduire les causes du changements climatiques, mais de faire en sorte que la société puisse s'adapter à ces changements.

Un bâtiment, selon sa localisation, peut avoir à faire face à différents risques naturels tels que les séismes, les inondations, les tempêtes, les feux de forêt, les glissements de terrain et les canicules (« Buildings and Climate Change Adaptation: A Call For Action » 2021). Ces évènements naturels devraient monter en intensité à cause du réchauffement climatique. Les bâtiments devront s'adapter à cette montée en intensité.

Les séismes peuvent causer des dommages sur les composants de structure pouvant aller jusqu'à la destruction des bâtiments (Tena-Colunga et Nangullasmú-Hernández 2023).

Concernant les inondations, deux cas de figure sont à distinguer. D'une part, le réchauffement climatique devrait causer une augmentation du nombre des précipitations extrêmes (Chan et al. 2018). Or, la croissance de l'urbanisation augmente la taille des surfaces imperméables. Ces deux facteurs combinés devraient provoquer d'avantage d'inondation, particulièrement en zones urbaines. (Skougaard Kaspersen et al. 2017), (Bertsch, Glenis, et Kilsby 2022). D'autre part, les problèmes d'inondations seront de plus en plus accentués sur le littoral puisque le niveau des mers augmentera en raison de la dilatation thermique de l'océan et de la fonte des glaces (« Buildings and Climate Change Adaptation: A Call For Action » 2021). Les inondations entraînent des détériorations structurelles des bâtiments.

Le retrait et gonflement des argiles peut également fragiliser les structures (Elert et Rodriguez-Navarro 2022). Ce risque est accentué par l'augmentation de la fréquence des périodes de sécheresse et d'inondation. Selon le (Ministère de la transition écologique 2021b), plus de 10 millions de maison individuelles en France sont exposés moyennement ou fortement à des risques de fissurations liés au retrait et gonflement des argiles. Cette proportion risque d'augmenter.

Les changements climatiques ont pour conséquences une augmentation de la fréquence, de l'intensité et de la durée des canicules (Jenkins et al. 2009), (Zhang et al. 2021). Ces canicules n'entraînent pas de détérioration structurelle des bâtiments, mais elles peuvent entraîner des conditions thermiques extrêmes dans les bâtiments, les empêchant momentanément de constituer des abris sûrs pour les occupants. Par exemple, la canicule exceptionnellement longue et sévère de aout 2003 a causé plus de 50 000 décès en excès en Europe (Brücker 2005). En France, (Laaidi et al. 2012) estiment environ 14 800 décès en excès entre le 1er et le 20 août 2003 par rapport aux années précédentes, représentant une augmentation de 60 % par rapport à la mortalité attendue. L'ensemble de la France a été touché, mais la surmortalité a davantage concerné les zones urbaines. D'après (Russo et al. 2014) les canicules comme celle de 2003 pourraient devenir la norme dans les années 2070 dans le pire scénario d'émission de GES. La canicule de juillet 1995 a causé plus de 700 décès en excès dans la ville de Chicago (Whitman et al. 1997). La canicule de 2010 à Moscou a entraîné environ 11000 décès en excès (Shaposhnikov et al. 2014). Selon (Santé Publique France 2022), 78% de la population française a été impactée par les trois canicules de l'été 2022. Il y aurait eu 2816 décès en excès pendant ces canicules. Le risque des canicules est donc important et doit être étudié pour limiter la surmortalité des occupants pendant ces évènements extrêmes.

L'augmentation de l'intensité des canicules peut avoir pour effet d'augmenter les consommations d'énergie notamment électrique pour les bâtiments équipés de climatisation. Des coupures de courant

peuvent donc se produire lors des pics de consommation d'énergie occasionnés (Wang, Hong, et Li 2021).

Dans le cadre de cette thèse, seule l'adaptation des bâtiments face aux risques liés aux canicules sera étudiée. Cela se traduit par l'étude des performances des bâtiments pendant les périodes de canicule.

I.2 Performances des bâtiments en période de canicule

I.2.1 Population de bâtiments visés

Les humains passent une majorité de temps à l'intérieur des bâtiments (logement, travail, loisirs...). Les Français restent en moyenne 16,2 heure par jour dans leurs logements (Santé Publique France 2008), soit plus de 2/3 de la journée. Les travaux de cette thèse se concentrent sur les bâtiments de logement résidentiels puisque ce sont ceux où les occupants passent le plus de temps et donc dans lesquels le risque lié aux canicules est le plus grand. Cette catégorie de bâtiment est composée de plusieurs type de construction : les maisons individuelles, les maisons jumelées, ou les immeubles résidentiels collectifs.

Selon (Eurostat 2020), 46% de la population de l'Union Européenne vit dans des bâtiments résidentiels collectifs. De plus, la majorité des humains (environ 55% de la population mondiale) vit actuellement en milieu urbain et selon (United Nations 2018) ce pourcentage a tendance à augmenter ces dernières décennies et pourrait atteindre 68% en 2050. Par ailleurs, les canicules sont accentuées en ville par les effets de l'Îlot de Chaleur Urbain (ICU) (Hamdy et al. 2017). Ceci explique pourquoi les travaux présentés dans cette thèse s'intéressent uniquement aux bâtiments résidentiels en milieu urbain.

Les logements résidentiels sont très peu équipés de systèmes de refroidissement actifs en Europe. Selon (Santamouris 2019), 92 % des bâtiments résidentiels étaient passifs en période estivale en 2006 en Europe. Selon les recommandations du GIEC, il ne semble pas que l'augmentation du taux de pénétration des systèmes de climatisation dans les bâtiments résidentiel soit souhaitable. C'est pourquoi, les travaux de cette thèse traitent uniquement des bâtiments passifs.

I.2.2 Formulation de la problématique – Plans du manuscrit

Les différentes statistiques exposées dans la section précédente révèlent que les bâtiments urbains passifs sont particulièrement vulnérables aux épisodes de forte chaleur. Les ambiances thermiques intérieures qu'ils seront capable de maintenir durant les canicules à venir pourraient être excessivement chaudes, constituant un risque : pour le confort des occupants dans le meilleur des cas, ou pour la santé des occupants dans le pire des cas.

Ces observations soulèvent la nécessité d'élaborer un protocole d'évaluation du comportement des bâtiments urbains passifs durant les canicules futures. Les différents éléments du protocole à construire sont représentés dans le schéma de la Figure I-1.

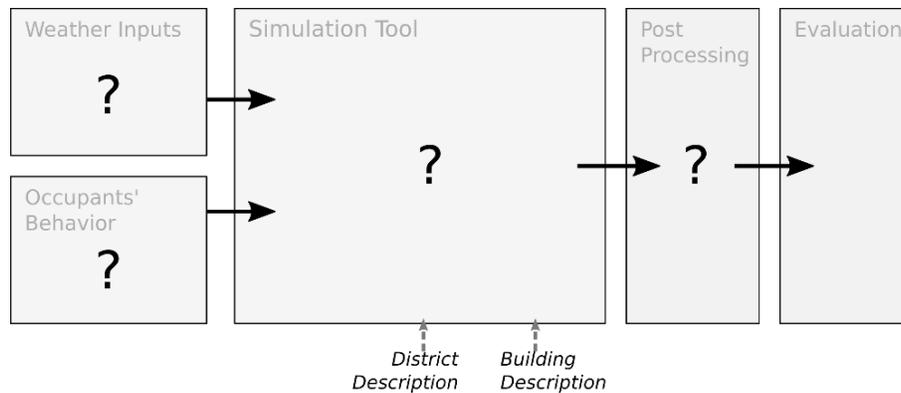


Figure I-1 : Eléments d'un protocole d'évaluation des performances des bâtiments

Le protocole doit bien sûr inclure un outil de simulation du comportement thermique des bâtiments (case « simulation tool » de la figure). Cet outil doit être adapté pour simuler avec précisions les ambiances intérieures des bâtiments urbains passifs dans des conditions estivales. Pour cela, il faut qu'il puisse considérer le contexte urbain des bâtiments, et simuler finement les échanges prédominants en période estivale. Le chapitre II décrit l'outil de simulation adapté à la modélisation des bâtiments urbains passifs en période estivale développé durant la thèse.

Les simulations seront alimentées avec les caractéristiques du bâtiment étudié : une description du bâtiment, et une description du tissu urbain dans lequel il est inséré. Le protocole doit définir deux autres types de données d'entrée des simulations : les données météorologiques et le comportement des occupants.

Concernant les données météorologiques (case « weather inputs » de la figure), il est fort probable qu'un bâtiment soit soumis à plusieurs vagues de chaleur durant les décennies à venir, et que ces vagues de chaleur aient des caractéristiques différentes : certaines seront plus longues, d'autres plus sèches, etc. Par conséquent la diversité des vagues de chaleur ne peut pas être condensée dans une seule canicule caractéristique. Mais à la place, un jeu de données météorologiques de vagues de chaleur, représentatif des canicules attendues dans le secteur d'intérêt serait souhaitable. Le chapitre III décrit une méthodologie développée dans le cadre de cette thèse permettant de constituer un tel jeu de données.

Concernant le comportement des occupants (case « occupants' behavior » de la figure), il n'est pas envisageable qu'un bâtiment soit destiné à une catégorie de population précise, au sein de laquelle le comportement vis-à-vis du bâtiment pendant les périodes de forte chaleur soit homogène. Des logements peuvent, tout au long de leur vie, accueillir différents groupes d'individus, avec différentes habitudes, différentes cultures, différentes situations professionnelles, et donc différents comportements vis-à-vis de leur bâtiment pendant les fortes chaleurs. Il serait alors souhaitable d'élaborer une base de modèles de comportement, qui soit capable de balayer toute cette diversité. Le comportement des occupants n'a pas été traité en détail pendant cette thèse. Un choix arbitraire de typologie de comportement a été réalisé dans le chapitre V dédié à l'application du protocole.

Le protocole doit aussi définir des indicateurs appropriés pour évaluer les performances des bâtiments durant les périodes de canicule (case « post-processing » sur la figure). Dans le cas de bâtiments passifs, les performances ne peuvent pas être évaluées par des indicateurs de consommations d'énergie mais plutôt par des indicateurs permettant de caractériser la sensation thermique des

occupants dans les conditions intérieures. Le chapitre IV s'intéresse à définir les manières d'évaluer la sensation thermique des occupants dans les bâtiments pendant des périodes de fortes chaleurs.

Pour finir, le protocole d'évaluation est appliqué à quatre appartements appartenant au tissu Lyonnais. Les résultats de cette application sont décrits dans le chapitre V de ce manuscrit. Ainsi les chapitres II, III, et IV décrivent l'élaboration de trois éléments du protocole d'évaluation : l'outil de simulation, les données météorologiques, et les indicateurs de sensation thermique. L'élaboration de ces trois éléments a fait appel à des notions scientifiques spécifiques. Une section de revue bibliographique concernant ces notions est intégrée aux chapitres correspondants.

Chapitre II

Modèle de simulation adapté

II.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de proposer un outil de simulation robuste permettant de prédire avec précision les paramètres d'ambiance intérieure dans les bâtiments urbains passifs, en conditions estivales.

L'outil de simulation développé doit simuler avec précision tous les transferts de chaleur prédominants qui se produisent dans un bâtiment passif dans des conditions estivales, et il doit tenir compte de l'effet de l'environnement urbain sur le bâtiment. L'utilisation de l'outil doit être la plus simple possible, afin de favoriser son adoption par une majorité des acteurs de la communauté de la simulation énergétique des bâtiments. L'outil doit reposer sur des logiciels existants robustes, ayant fait l'objet de validation, pour lesquels des documentations complètes, et éventuellement une interface conviviale, sont disponibles. De plus il doit pouvoir réaliser des simulations sur une longue période avec un ordinateur de bureau.

La première partie de ce chapitre s'intéresse aux spécificités du comportement thermique des bâtiments urbains passifs en conditions estivales, ainsi qu'aux outils de simulation existant permettant de considérer ces particularités.

La seconde partie décrit la chaîne d'outils de simulation développée.

Afin de tester la robustesse de l'assemblage de ces outils de simulation, une campagne de mesure a été réalisée dans la ville de Lyon (France) pendant l'été 2020. La troisième partie et la quatrième partie de ce chapitre décrivent la mise en place de la campagne et les résultats des mesures. Les résultats des simulations sont ensuite comparés aux données de mesure dans la sixième partie du chapitre. Pour finir, certains aspects spécifiques de la précision et de la pertinence du modèle seront discutés dans la dernière partie.

II.2 Exigences du modèle et outils existants

II.2.1 Spécificités du comportement thermique des bâtiments passifs dans des conditions estivales

La régulation thermique d'un bâtiment passif en période estivale est entièrement assurée par les actions des occupants (Fabi et al. 2012). Certaines actions affectent directement les caractéristiques thermiques du bâtiment. Ces actions correspondent à l'ouverture des fenêtres pour la ventilation naturelle et l'activation des systèmes de protection solaire ((Bui, Labat, et Lorente 2019), (Hong et al. 2017), (Mavrogianni et al. 2014), (Piselli et Pisello 2019)). D'autres actions modifient la distribution et l'amplitude des charges internes dans les bâtiments. Par temps chaud, un occupant peut préférer rester dans des pièces plus fraîches, ou éviter d'utiliser des cuisinières à gaz ((Bui, Labat, et Lorente 2019), (Hong et al. 2017), (Mavrogianni et al. 2014), (Piselli et Pisello 2019)).

Dans des conditions estivales, le rayonnement solaire constitue l'une des principales sollicitations thermiques sur les bâtiments (Geoff J. Levermore, Jones, et Wright 2000). La manière dont le rayonnement solaire chauffe les bâtiments dépend fortement des effets d'ombrage des masques solaires environnants (topographie, bâtiments voisins, arbres, balcons, etc.) et des caractéristiques des fenêtres (propriétés optiques, dimensions, nature et utilisation de dispositifs d'ombrage).

La différence de température de l'air entre l'intérieur et l'extérieur est plus faible en été qu'en hiver, mais les échanges de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur s'intensifient lorsque les fenêtres sont ouvertes pour permettre une ventilation naturelle. Le taux de refroidissement résultant de la ventilation naturelle est donc très sensible à la température de l'air extérieur et aux charges de pression du vent sur la façade (Geoff J. Levermore, Jones, et Wright 2000).

En conditions estivales, le comportement thermique d'un bâtiment passif est donc très sensible au rayonnement solaire, à la température d'air extérieur, aux caractéristiques des ouvrants, et aux actions des occupants sur ces ouvrants.

Les modèles thermiques de bâtiments (Building Energy Model, BEM) couramment utilisés, tels que ceux implémentés dans TrnSys (Solar Energy Laboratory, Transsolar, et CSTB 2007) ou EnergyPlus (U.S. Department of Energy 2021), contiennent déjà des sous-modèles permettant de simuler les aspects spécifiques du comportement thermique estival d'un bâtiment. Ils contiennent des modèles avancés de fenêtres et d'ombrage, avec la possibilité de fournir des scénarios pour contrôler le taux d'ouverture des menuiseries. Ces logiciels offrent un contrôle total de la production de chaleur interne des occupants. Ils proposent, sous la forme d'un module supplémentaire, un modèle de réseau aéraulique (AirFlowNetwork, AFN) pour prédire les débits de la ventilation naturelle et les effets thermiques correspondants.

II.2.2 Effet du tissu urbain sur les sollicitations thermiques extérieures

Les sollicitations thermiques des bâtiments sont calculées sur la base des grandeurs météorologiques extérieures : la température, l'humidité et la vitesse de l'air extérieur, le rayonnement solaire diffus et direct, et le rayonnement thermique. Tous ces paramètres sont disponibles dans les fichiers météorologiques. Cependant, les données météorologiques contenues dans ces fichiers sont représentatives des conditions météo extérieures dans les zones rurales et ne prennent donc pas en compte les caractéristiques des milieux urbains (Salvati et Kolokotroni 2022).

Initialement, les modèles thermiques des bâtiments calculaient les charges thermiques des bâtiments directement à partir des données météorologiques rurales. Ces modèles utilisaient les valeurs de température et de vitesse de l'air pour calculer le flux de convection sur l'enveloppe du bâtiment. Le rayonnements solaire et thermique étaient projetés directement sur cette enveloppe. Progressivement, les modèles thermiques de bâtiments ont intégré des nouvelles fonctionnalités pour simuler les effets de l'environnement du bâtiment. Actuellement, EnergyPlus et TrnSys peuvent ajuster la vitesse de vent extérieure avec un profil de vitesse configurable en fonction de la densité du tissu urbain. Ils contiennent des options spécifiques pour simuler les effets des masques solaires extérieurs formés par les bâtiments voisins.

Ces fonctionnalités restent insuffisantes pour simuler tous les effets urbains sur les sollicitations thermiques des bâtiments, en particulier les effets impactant la température extérieure et les charges de vent, qui jouent un rôle prédominant dans le comportement thermique des bâtiments passifs en conditions estivales (Geoff J. Levermore, Jones, et Wright 2000), (Salvati et Kolokotroni 2022). Ainsi, des modèles dédiés à la simulation du comportement thermique du milieu urbain doivent être utilisés conjointement à un modèle thermique de bâtiment pour simuler avec précision le comportement thermique des bâtiments urbains. C'est pourquoi l'outil de simulation proposé sera composé de plusieurs outils de simulation.

Les deux sous parties suivantes décrivent qualitativement les phénomènes thermiques dans l'environnement urbain ainsi que les modèles dédiés à la simulation de leurs effets. Ces deux sous

parties fournissent le contexte nécessaire pour justifier l'architecture de la chaîne d'outils proposée. Les phénomènes thermiques urbains sont distingués selon deux échelles : les phénomènes à l'échelle de la ville et les phénomènes à l'échelle du quartier.

II.2.2.1 Les phénomènes thermo-aérauliques à l'échelle de la ville

Les phénomènes thermo-aérauliques à l'échelle de la ville incluent l'ajustement du profil du vent, le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) et la réduction du rayonnement solaire entrant due à la pollution urbaine.

L'ajustement du profil du vent se manifeste sous la forme d'une adaptation du profil vertical du vent aux variations de la rugosité du sol entre les zones rurales et urbaines. EnergyPlus propose un modèle analytique simple basé sur les profils de vent en puissance. Urban Weather Generator (Bruno Bueno et al. 2013) contient un modèle plus détaillé, qui peut simuler les vitesses de vent induites par la brise urbaine.

L'ICU se manifeste sous la forme de variations de la température de l'air et de l'humidité de l'air, sur des échelles de l'ordre de quelques centaines de mètres. L'évolution de la température et de l'humidité de l'air entre les zones rurales et urbaines est déterminée par les variations du bilan énergétique à la surface du sol, qui est attribuable aux variations de matériau de la surface du sol, de densité de construction et de formes de bâtiments.

Les effets de l'ICU sont simulés à l'aide de modèles spécifiques, à savoir les modèles de canopée urbaine (Urban Canopy Models, UCMs). (Grimmond et al. 2010) a réalisé une synthèse des modèles de canopée urbaine existants. Les UCMs peuvent être utilisés en ligne (couplés avec un modèle atmosphérique complet à méso-échelle) ou hors ligne (les sollicitations thermiques sur la ville sont directement extraites des fichiers de données météorologiques). Cette dernière option est plus efficace en termes de calcul, mais elle est moins précise car l'évolution de la température de l'air dans la couche limite urbaine n'est pas modélisée. Un compromis a été développé par (Bruno Bueno et al. 2013), qui ont combiné un UCM et un modèle thermique simplifié de la couche limite urbaine. Ce modèle a été mis en œuvre dans un outil de simulation appelé Urban Weather Generator (UWG).

L'accumulation de la pollution atténue le rayonnement solaire. (Ferreira et al. 2012) ont étudié l'atténuation du rayonnement solaire atteignant la surface du sol dans les zones urbaines. Ils ont mesuré une atténuation variant entre 1 % (moyenne annuelle) et 22 % (pendant la saison humide), dans différentes zones urbaines du monde. L'atténuation du rayonnement solaire offre des conditions favorables à un bâtiment passif pour maintenir des conditions intérieures acceptables. En effet la sollicitation solaire étant moins intense, il y a moins de chaleur à évacuer. A l'inverse, un ciel pur, sans pollution, représente le scénario le plus défavorable en ce qui concerne le comportement thermique d'un bâtiment passif. Aucun outil spécifique n'a été développé pour prendre en compte l'effet de la pollution sur les sollicitations solaires des bâtiments.

II.2.2.2 Les phénomènes thermo-aérauliques à l'échelle du quartier

Les phénomènes thermo-aérauliques à l'échelle du quartier, ou d'une portion de quartier, correspondent à des gradients plus courts observables dans un périmètre restreint autour du bâtiment d'intérêt. À cette échelle, nous considérons l'effet explicite de chaque élément urbain (bâtiment, route, arbre ou mobilier) sur l'environnement thermique extérieur. L'écoulement du vent est ajusté autour des bâtiments et du mobilier urbain, formant un champ de vitesse tridimensionnelle complexe. Les

distributions de température et d'humidité de l'air sont influencées par des phénomènes locaux, tels que la stagnation de l'air dans les zones ombragées ou le rejet d'air chaud par les systèmes de climatisation. Les charges de rayonnement solaire sur les bâtiments dépendent des effets d'ombrage et de réflexion entre les bâtiments. Les flux de rayonnement thermique sur les bâtiments dépendent également des échanges de chaleur par rayonnement entre les bâtiments, car la visibilité de la voûte céleste est fortement réduite par la présence des bâtiments environnants.

Dans cette section, tous les modèles utilisés pour simuler les effets thermiques à l'échelle du quartier sont appelés « modèles à l'échelle du quartier » (District-scale models, DSMs). Les DSMs simulent les différents processus de transfert de chaleur entre les bâtiments et dans les bâtiments. La littérature fournit une grande diversité de DSMs, avec des niveaux de précision variables.

Les DSMs présentant le plus haut niveau de précision sont souvent appelés modèles micro météorologiques (Micro Meteorological Models, MMMs). Parmi les exemples de MMMs, il y a SOLENE-Microclimat (Musy et al. 2015), SOLENE EnviBatE (Gros et al. 2016) et ENVI-Met (Bruse et Fleer 1998). Ces modèles visent principalement à prédire le niveau de confort extérieur. A ce titre, ces modèles doivent estimer les valeurs de tous les paramètres thermiques extérieurs en tout point du volume extérieur. Ces estimations nécessitent un modèle de mécanique des fluides tridimensionnel (Computational Fluid Dynamics, CFD) et un modèle précis d'échanges de chaleur par rayonnement.

Les DSMs ayant un niveau de précision intermédiaire sont appelés modèles énergétiques des bâtiments urbains (Urban Building Energy Models, UBEMs). Des exemples d'UBEMs sont City-SIM (Robinson et al. 2009) et le modèle de (Frayssinet et al. 2018). Les UBEMs s'efforcent principalement à prédire des quantités agrégées ou statistiques, représentant le comportement thermique d'un ensemble de bâtiments. Le paramètre de sortie le plus courant est la consommation énergétique agrégée. Par rapport aux MMMs, les UBEMs ne s'appuient pas sur des modèles CFD pour prédire les écoulements d'air extérieur. Les UBEMs simulent les échanges de chaleur par rayonnement entre les bâtiments avec un maillage surfacique plus grossier.

Les DSMs à faible niveau de précision comprennent des modèles nodaux. Ils simulent le comportement d'un motif élémentaire de tissu urbain, tel qu'un canyon urbain idéalisé. Dans cette catégorie de modèles, les bâtiments individuels sont regroupés en bâtiments équivalents représentatifs. Le modèle de canyon urbain du « Town Energy Balance » (TEB) (Masson 2000) a été appliqué comme DSM et couplé à un modèle énergétique de bâtiment par (B. Bueno et al. 2012) et (Ali-Toudert et Böttcher 2018).

Enfin, les modèles CFD peuvent être utilisés dans une étape de préprocessing pour évaluer les coefficients de pression et les coefficients de convection le long des façades des bâtiments. Grâce au phénomène d'invariance de Reynolds (Van Hooff et Blocken 2010), seul un nombre limité de simulations est nécessaire pour couvrir toutes les valeurs possibles de vitesse et de direction du vent. Lorsqu'ils sont appliqués à cette fin, les modèles CFD peuvent être considérés comme des DSMs car ils simulent les interactions entre les bâtiments à l'échelle du quartier. Des modèles CFD polyvalents peuvent être utilisés comme DSMs, mais des outils spécialisés tels que UrbaWind (Sanquer, Caniot, et Bandhare 2015) ont également été développés pour simplifier la paramétrisation des modèles.

Il convient de mentionner que tous les DSMs contiennent des modèles thermiques de bâtiment. Cependant, aucun de ces modèles n'est aussi détaillé que les modèles d'EnergyPlus ou de TrnSys, et aucun de ces modèles ne peut prédire avec précision les conditions de confort à l'intérieur des

bâtiments passifs. Dans notre application, les DSMs sont utilisés pour affiner les sollicitations thermiques d'un unique bâtiment d'intérêt (Lauzet et al. 2019).

Il convient également de mentionner que les MMMs nécessitent beaucoup de ressources informatiques. La possibilité de réaliser des simulations à long terme avec les MMMs est limitée. En outre, tous les MMMs, à l'exception d'EnviMET, restent en cours de développement au sein de la communauté des chercheurs et la gestion de ces modèles nécessite une expertise notable.

II.2.3 Limites des chaînes d'outils de simulation thermique urbaine existantes

(Lauzet et al. 2019) ont inventorié les chaînes d'outils existantes pour la simulation du comportement thermique des bâtiments urbains. Les chaînes d'outils inventoriées ont pu être classées en deux catégories : les chaînes d'outils impliquant un MMM pour la simulation des effets à l'échelle du quartier et les chaînes d'outils sans MMM.

Les chaînes d'outils impliquant un MMM fournissent des représentations précises et exhaustives de l'état thermique du quartier. Cependant, comme ces chaînes d'outils nécessitent des ressources de calcul élevées, seules de courtes périodes de simulation sont envisageables. (Merlier et al. 2017) ont réalisé des simulations pour deux jours avec une chaîne d'outils comprenant SOLENE-Microclimat (DSM) et BuildSysPro (BEM). (Yang et al. 2012) ont réalisé des simulations pour 3 jours avec ENVI-Met (DSM + BEM). (Salvati et Kolokotroni 2022) ont réalisé des simulations pour 4 jours en avec ENVI-Met (DSM) et EnergyPlus (BEM).

Les autres chaînes d'outils sont capables de simuler des périodes d'une année sur un ordinateur personnel. Cependant, aucune de ces chaînes d'outils n'est explicitement dédiée à la prédiction du confort thermique dans les bâtiments. Elles sont conçues pour prédire les demandes de puissance de chauffage et de refroidissement, pour un bâtiment urbain ou un groupe de bâtiments. (Salvati, Roura, et Cecere 2015) ont appliqué une chaîne d'outils comprenant UWG et EnergyPlus pour prédire la demande énergétique de bâtiments situés à Rome et à Barcelone. (Palme et al. 2017) ont utilisé une chaîne d'outils comprenant UWG et TrnSys pour estimer la demande de refroidissement de différents types de bâtiments résidentiels pendant une période estivale de 3 mois. (Bruno Bueno et al. 2011) ont mis en œuvre un schéma de couplage complet entre TEB et EnergyPlus. Cependant leur intention n'était pas d'obtenir une représentation précise du comportement thermique d'un bâtiment spécifique mais d'affiner le modèle de bâtiment homogène représentatif utilisé par TEB. Pour atteindre cet objectif, le bâtiment a été modélisé comme une seule zone thermique, or la prévision du confort intérieur nécessite une représentation beaucoup plus précise des échanges de chaleur à travers l'enveloppe et à l'intérieur du bâtiment d'intérêt. De plus, le quartier environnant le bâtiment d'intérêt est modélisé par l'analogie d'une rue canyon par TEB, les flux radiatifs calculés et transférés à EnergyPlus sont donc des approximations car la géométrie du bâtiment d'intérêt est différente (Lauzet et al. 2019).

II.3 Description du modèle

L'outil de simulation proposé est une chaîne de trois outils de simulation : Urban Weather Generator (Bruno Bueno et al. 2013), UrbaWind (Sanquer, Caniot, et Bandhare 2015), et EnergyPlus (U.S. Department of Energy 2021). Urban Weather Generator est disponible sous la forme d'une bibliothèque Python dans un dépôt GitHub dédié. UrbaWind est un logiciel commercial doté d'une interface conviviale. EnergyPlus est un programme gratuit pour lequel plusieurs interfaces sont

disponibles. Ces trois outils sont robustes, et leur validation a fait l'objet de plusieurs publications scientifiques.

Les phénomènes considérés par la chaîne d'outils aux différentes échelles urbaines sont représentés graphiquement dans la Figure II-1. A l'échelle du bâtiment, le comportement thermique du bâtiment d'intérêt est simulé avec EnergyPlus, qui contient un AFN pour la simulation des écoulements d'air due à la ventilation naturelle.

À l'échelle du quartier, les coefficients de pression sont fournis par UrbaWind. EnergyPlus simule les masques solaires dus aux bâtiments environnants. La manière dont EnergyPlus considère l'environnement extérieur ne permet pas de modéliser les inhomogénéités de température et d'humidité d'air à l'échelle du quartier. En effet EnergyPlus n'accepte qu'une seule valeur de température et d'humidité d'air extérieur, fournie par le fichier météo d'entrée. Cette limite d'EnergyPlus restreint la possibilité de prise en compte de la distribution de la température et de l'humidité de l'air ambiant autour du bâtiment d'intérêt.

Concernant le modèle de rayonnement thermique extérieur à l'échelle du quartier, un compromis a été fait entre précision et simplicité d'utilisation. Depuis sa version 8.8, EnergyPlus permet de saisir manuellement des évolutions de température et des facteurs de vue associés aux surfaces environnantes le bâtiment. Pour obtenir les scénarios de température de surface, un DSM dédié est nécessaire. Pour obtenir les facteurs de vue, une routine dédiée doit être mise en œuvre. Ces fonctionnalités supplémentaires augmenteraient considérablement le niveau de complexité de l'outil de simulation. Puisque les échanges de chaleur par rayonnement thermique extérieur n'ont pas été identifiés comme un mode de transfert de chaleur prédominant du comportement thermique d'un bâtiment passif dans des conditions estivales, il a été décidé de conserver l'algorithme par défaut d'EnergyPlus pour calculer les échanges de chaleur par rayonnement thermique extérieur. EnergyPlus considère que les surfaces des bâtiments autour du bâtiment d'étude sont à la température de l'air extérieur.

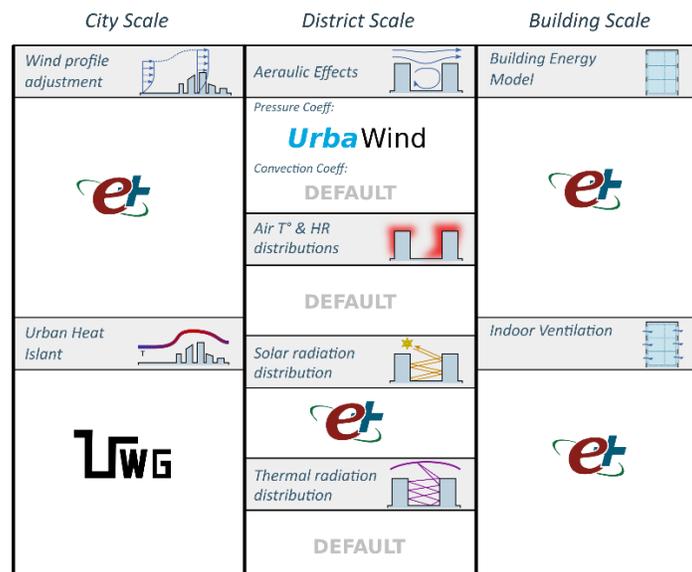


Figure II-1: Effets urbains modélisés par la chaîne d'outils thermiques urbains

À l'échelle de la ville, le modèle analytique d'EnergyPlus a été adopté pour prédire les valeurs d'ajustement du profil du vent entre la zone rurale et l'environnement urbain. UWG simule l'effet

dynamique de l'ICU. Pour effectuer des simulations dans le cas le plus défavorable, l'atténuation du rayonnement solaire due aux particules atmosphériques est négligée.

Les coefficients de pression fournis par UrbaWind sont calculés avec une valeur de vitesse du vent obtenue à une hauteur fixe (généralement c'est la hauteur du bâtiment qui est choisie), le long du profil de vitesse de vent en milieu urbain (Sanquer, Caniot, et Bandhare 2015). Cependant, le modèle AFN d'EnergyPlus prend la valeur de la vitesse à la hauteur de l'ouverture pour calculer les charges de pression avec les coefficients de pression fournis. Pour surmonter cette divergence, un profil de vitesse verticale homogène a été implémenté dans EnergyPlus, avec une valeur de vitesse correspondant à la vitesse à la hauteur du bâtiment. Le détail de la correction du profil de vitesse verticale est présenté dans l'Annexe 1 : Correction des profils de vent dans EnergyPlus.

L'outil de simulation développé a été nommé Urban Thermal Tool Chain (UTTC). Cette nouvelle désignation clarifie la distinction entre le présent outil et les UBEMs. Les UBEMs ont été développés pour prédire des grandeurs statistiques ou agrégées sur l'ensemble d'un parc immobilier. L'UTTC a été développé pour prédire précisément les paramètres d'ambiance intérieure d'un unique bâtiment. Les UBEMs ne nécessitent pas de modèles thermiques détaillés des bâtiments en raison de l'effet de foisonnement : lors de l'agrégation des grandeurs liées aux bâtiments, les erreurs commises par les divers bâtiments se compensent. A l'inverse, le modèle de bâtiment de l'UTTC doit être très détaillé pour obtenir une représentation détaillée du confort intérieur.

Le terme « chaîne d'outils » (Tool Chain), énoncé ci-dessus, fait référence à la stratégie de couplage entre les trois outils de simulation. Deux stratégies de couplage sont possibles : le couplage bidirectionnel (ou fort) et le couplage unidirectionnel (ou chaînage). La première stratégie consiste à orchestrer l'échange d'informations entre les outils de simulation à chaque pas de temps. De cette manière, les transferts de chaleur à la surface du bâtiment, qui sont finement estimés avec les simulations du bâtiment, peuvent être communiqués à un DSM ou UCM pour affiner les prédictions de l'environnement thermique extérieur. La mise en œuvre de cette stratégie de couplage nécessite des compétences avancées en programmation. Ses avantages sont plutôt limités lorsque les grandeurs cibles sont les paramètres thermiques à l'intérieur du bâtiment. Par conséquent, nous avons adopté une stratégie de couplage unidirectionnel (ou chaînage) : l'information est transférée des grandes échelles aux petites échelles, comme le montre la Figure II-2. UrbaWind fournit des valeurs de coefficients de pression qui sont ensuite implémentées dans EnergyPlus, soit manuellement via une interface utilisateur dédiée, soit via la bibliothèque Python d'EnergyPlus (eppy). UWG transforme les données météorologiques rurales contenues dans les fichiers météorologiques d'entrée (format EnergyPlus Weather, EPW) selon une description statistique du quartier. Il produit des fichiers météorologiques urbains (format EPW), qui peuvent être lus directement par EnergyPlus. De cette façon, le transfert d'informations entre UWG et EnergyPlus peut être assuré manuellement, et aucun programme auxiliaire n'est nécessaire. UWG modifie uniquement la température sèche extérieure, la température du point de rosée et l'humidité relative.

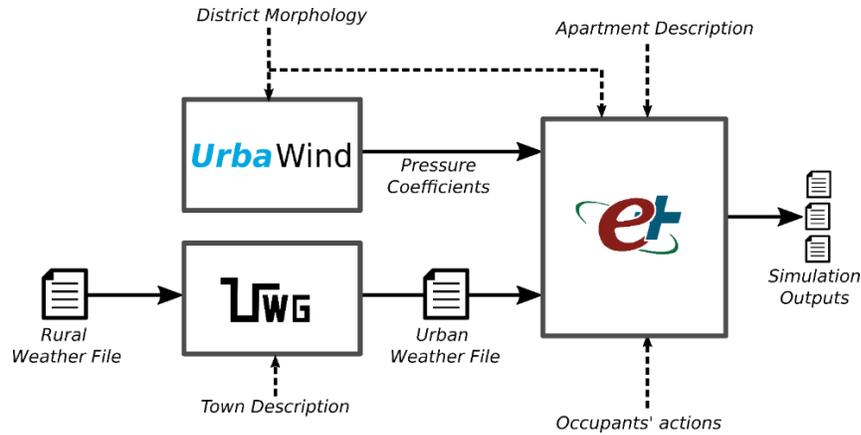


Figure II-2 : Transfert d'information au sein de l'UTTC.

II.4 Campagne de mesure

Une campagne de mesure in situ a été menée dans 4 appartements à Lyon (France) durant l'été 2020, de juillet à octobre. L'objectif de cette campagne de mesure était de produire un jeu de données complet pour évaluer la précision de l'UTTC.

II.4.1 Mesures in-situ

Afin de mettre en place une métrologie la plus complète et la moins intrusive possible, une analyse de la littérature concernant les mesures in-situ en site occupé a été réalisée.

(Rodler et al. 2018) ont mis en place des capteurs de température d'air, température de surface (parois intérieures et extérieures et toiture), de luminosité, d'ouverture de fenêtres (capteur de contact), de débit d'air et des compteurs d'énergie dans plusieurs logements à Nantes. Aussi, afin de mieux connaître l'environnement urbain du quartier d'intérêt, des mesures de températures de surface des bâtiments alentour ont été également implémentées. En outre, une station météo a été placée proche du site pour mesurer les conditions météorologiques locales. Les capteurs utilisés ont un système de transmission des données sans fil afin que la métrologie soit moins intrusive. Cette étude, réalisée entre Avril et Mai 2017, a permis de confronter les résultats du modèle SOLENE microclimat avec les données de mesures.

(Piselli et Pisello 2019) ont mesuré le comportement d'occupants dans un bâtiment de bureau à Perugia en Italie à des fins de comparaison des résultats de BEM en utilisant différents modèles de comportements d'occupants ainsi que les comportements réels mesurés. Ces mesures ont été réalisées pendant le printemps, l'été et l'hiver 2015. Dans 5 bureaux, les auteurs ont mis en place des capteurs pour mesurer la température d'air intérieure, le niveau d'éclairage, la consommation électrique ainsi que les ouvertures/fermetures des fenêtres et portes. Les capteurs ont utilisé un système de transmission sans fil (Wireless Sensor Network, WSN).

Pour réaliser des mesures in-situ, il faut donc identifier les grandeurs d'intérêt. De plus afin de limiter l'intrusion dans les logements, l'utilisation de capteur sans fil semble la plus adaptée.

II.4.2 Cas d'étude

Pour couvrir la diversité des tissus urbains et des conceptions de bâtiments rencontrés dans la ville de Lyon, quatre appartements issus de différentes périodes de construction ont été sélectionnés. Les quatre périodes de construction sont les suivantes :

- Période Canut : début du XIXe siècle.
- Période Industrielle : entre la fin du XIXe siècle et le début du XXe siècle.
- Période de Reconstruction : juste après la Seconde Guerre mondiale.
- Période Contemporaine : dès lors que les caractéristiques des nouveaux bâtiments ont adhéré aux exigences de la réglementation thermique française RT2012.

La Figure II-3 présente, pour chacun des appartements étudiés, un plan d'étage (en bas) et une photographie aérienne du quartier environnant, sur laquelle le rectangle bleu identifie la localisation de l'appartement (en haut).

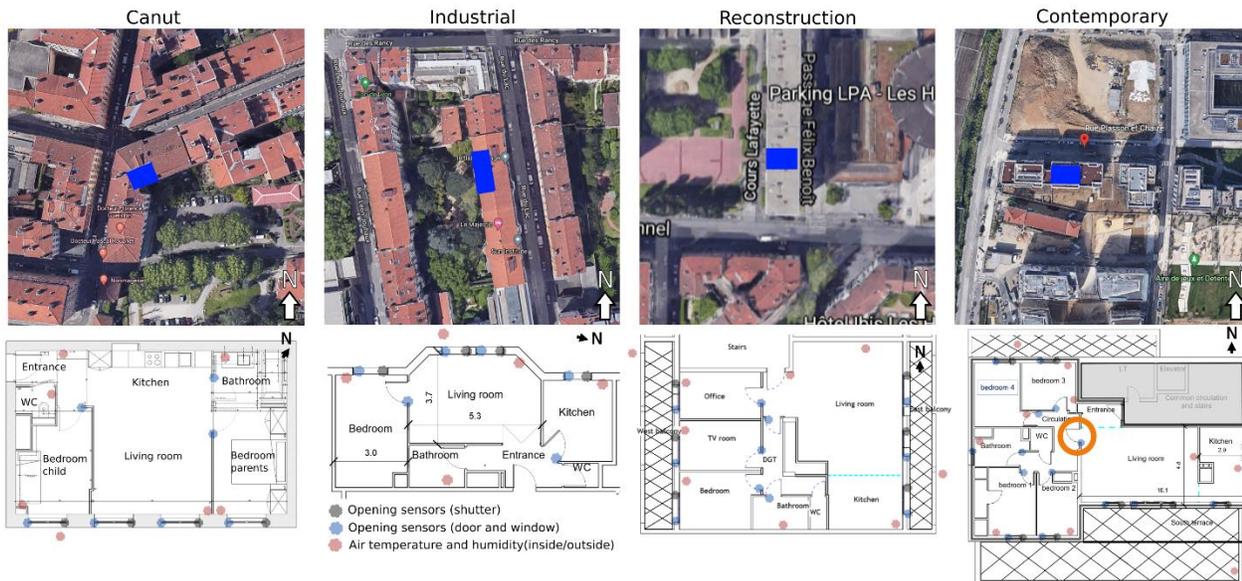


Figure II-3: Environnement urbain autour des bâtiments étudiés (le rectangle bleu correspond à l'appartement étudié), plans des appartements et emplacement des capteurs (Google Maps 2022)

L'immeuble de l'époque Canut est situé dans le 4^e arrondissement de Lyon, dans un quartier avec une morphologie urbaine dense. Il est situé sur une colline, il est mono-orienté. Sa façade unique est orientée vers le Sud. Aucun objet ne masque le rayonnement solaire ni le vent dans cette direction. L'appartement Canut est situé au 4^{ème} étage sur 6 et son mur extérieur est en pierre et il est épais (environ 0,5 m).

Le bâtiment d'époque Industrielle est situé dans le 3^e arrondissement de Lyon, dans un quartier avec une morphologie urbaine formant des îlots fermés. Il est situé au 6^{ème} étage sur 7, ses murs extérieurs sont en béton avec une couche d'isolation thermique sur la face intérieure. L'appartement est mono-orienté. Son unique façade donne sur l'Ouest et fait face à la cour intérieure de l'immeuble.

Le bâtiment de l'époque de la Reconstruction est situé dans le 3^e arrondissement de Lyon. Ici, la morphologie urbaine est constituée de grands ensembles. Ce quartier est moins dense que les deux

cas d'étude précédents, ce qui pourrait entraîner une plus grande exposition du bâtiment au rayonnement solaire et aux charges de vent. L'appartement de la période de Reconstruction est situé au 7^{ème} étage sur 16. Il s'agit d'un appartement traversant orienté Est/Ouest.

Le bâtiment d'époque Contemporaine est situé dans le 9^e arrondissement de Lyon, où le tissu urbain est constitué de bâtiments collectifs isolés, et est moins dense que le tissu urbain autour des autres bâtiments de l'étude. Ceci pourrait entraîner une plus grande exposition du bâtiment au rayonnement solaire et aux charges de vent. Ce bâtiment est situé plus vers la périphérie de la ville, contrairement aux autres appartements qui sont situés en centre-ville. L'appartement d'époque Contemporaine est situé au dernier étage d'un bâtiment de 6 étages. Les murs sont en béton avec une couche d'isolation thermique plus épaisse que celle des cas précédents. L'appartement est traversant avec une orientation Nord/Sud.

Pour plus de précision sur les caractéristiques thermiques des cas d'étude, voir l'Annexe 2 : Paramètres de l'enveloppe thermique et plan des cas d'étude. Cette annexe présente également les plans côtés des bâtiments. Le Tableau II-1 est un résumé des caractéristiques des cas d'étude. La classe d'inertie a été déterminé avec la méthode de la norme NF EN ISO 13786.

Tableau II-1 : caractéristiques des cas d'étude

	U _{appart} [W/(m ² · K)]	Classe d'inertie	Traversant ou mono-orienté	Orienta-tion
Canut	1,45	Très lourde	Mono-orienté	Sud
Industrielle	0,6	Très lourde	Mono-orienté	Ouest
Reconstruction	0,68	Lourde	Traversant	Est – Ouest
Contemporain	0,23	Très Lourde	Traversant	Nord - Sud

La Figure II-4 montre l'emplacement des 4 cas d'étude dans la ville de Lyon, ainsi que la position de la station météo de Lyon Bron.

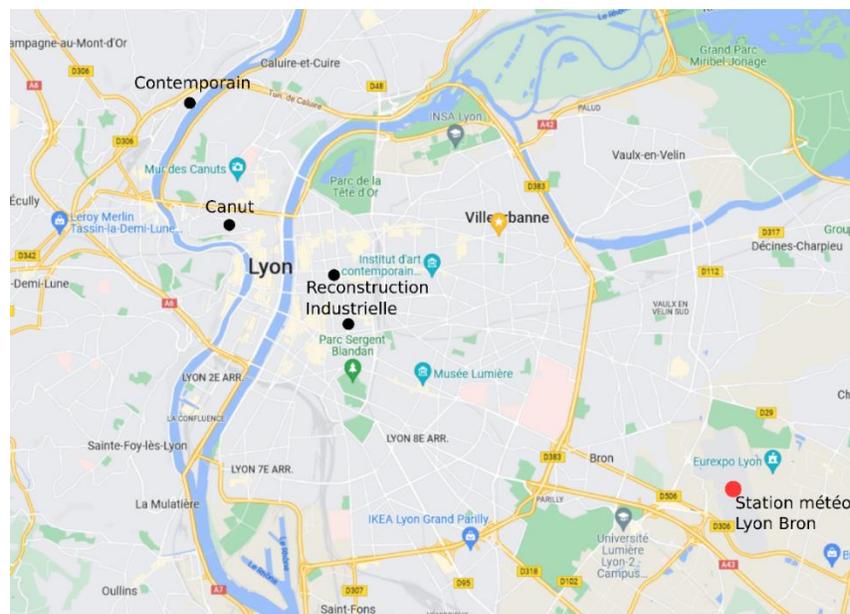


Figure II-4 : Emplacement des cas d'étude et de la station de Météo France de Lyon Bron (Google Maps 2022)

II.4.3 Stratégie de mesures

Pour constituer un jeu de mesures dédié à l'évaluation d'un modèle, il faut mesurer les grandeurs de sortie du modèle, mais il faut aussi mesurer toutes les grandeurs nécessaires au paramétrage de celui-ci pour qu'il puisse reproduire fidèlement les conditions des mesures lors des simulations. Les données d'entrée (encadrées en bleu) et de sortie (encadrées en rouge) de l'UTTC sont inventoriées graphiquement sur la Figure II-5. On distingue 4 groupes de données à produire :

Données météorologiques

Les données météorologiques rurales ont été fournies par Météo-France. Toutes les données nécessaires à la constitution d'un fichier météo EPW ont été mesurées par la station météo située dans l'aéroport de Lyon-Bron. Son emplacement par rapport aux cas d'étude est visible sur la Figure II-4. La méthodologie de (Taesler et Andersson 1984) a été appliquée pour décomposer le rayonnement solaire global mesuré en composantes diffuse et directe.

Données d'entrées dynamiques

Ces données décrivent les composantes du comportement des occupants qui ont eu une influence sur le comportement thermique du bâtiment, comme les ouvertures et fermetures des ouvrants (fenêtres, portes et volets). Elles prennent la forme de plannings d'ouverture.

Pour reconstituer les plannings d'ouverture, des capteurs binaires à contact ont été installés sur toutes les ouvrants (fenêtres, portes et volets) pour mesurer à chaque instant leur état d'ouverture. Pour pallier les éventuelles déficiences des capteurs, les occupants de chaque appartement ont été interrogés à la fin de la campagne de mesure sur leurs habitudes vis-à-vis des ouvrants.

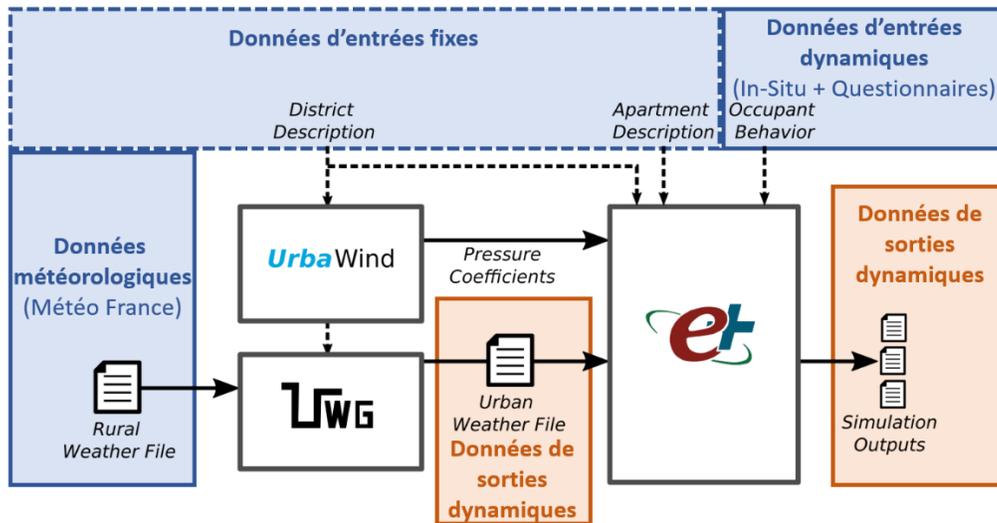


Figure II-5: Transfert d'informations au sein de l'UTTC, y compris les catégories de mesures (les zones bleues indiquent les données d'entrées de la simulation mesurées ou relevées ; les zones rouges indiquent les mesures employées pour évaluer la précision de la chaîne d'outils de simulation)

Données d'entrées fixes

Ces paramètres d'entrées permettent de décrire les caractéristiques géométriques et thermiques des bâtiments d'intérêt et leur environnement.

Quatre fichiers de paramétrages d'UWG ont été produits pour les quatre cas d'étude. La liste des paramètres d'entrée d'UWG contient des paramètres statistiques qui décrivent le quartier dans lequel le bâtiment est situé. Pour déterminer la valeur de ces paramètres, des données ont été collectées sur une zone carrée de 400 mètres de côté autour du bâtiment concerné. Les informations relatives à l'aménagement urbain (hauteur des bâtiments, densité des bâtiments, densité de la végétation et des arbres, etc.) ont été déduites des données de Google Maps (Google Maps 2022). Les paramètres d'entrée résultants sont indiqués dans le Tableau II-2. Les informations sur l'usage des bâtiments ont été extraites des cartes métropolitaines (Open Data Of the Métropole of Lyon 2014). Aucune règle n'a été trouvée pour définir la valeur de certains paramètres du modèle, notamment la hauteur de la couche limite urbaine pendant le jour et la nuit, la hauteur d'inversion, ainsi que les coefficients de circulation et d'échange. Ces paramètres ont dû être ajustés a posteriori, pour améliorer la concordance entre les résultats de simulation et les mesures de température extérieure.

Tableau II-2: Paramètres de simulation utilisés pour calculer l'UHI avec UWG

Paramètre	Canut	Industrielle	Reconstruction	Contemporaine
Hauteur des bâtiments [m]	21	21	38	21
Densité de bâti	0,43	0,33	0,29	0,19
Rapport vertical/horizontal de la zone urbaine	1,27	0,98	1,21	0,55
Ratio de couverture végétale	0,02	0,09	0,02	0,12
Ratio de couverture des arbres	0,04	0,05	0,05	0,22

La géométrie urbaine 3D nécessaire au paramétrage d'UrbaWind a été également extraite de l'outil Google Maps (Google Maps 2022) sur une zone carrée de 400 mètres de côté autour des appartements d'intérêt.

En ce qui concerne EnergyPlus, les formes et dimensions des appartements ont été mesurées in situ, modélisées en 3 dimensions dans le logiciel Revit et exportées vers DesignBuilder pour établir les modèles EnergyPlus correspondants. EnergyPlus a été utilisé avec son AFN. Les coefficients de pression obtenus à partir d'UrbaWind ont été saisis manuellement dans l'interface de DesignBuilder. Les paramètres par défaut de DesignBuilder pour les bâtiments résidentiels ont été appliqués pour déterminer la charge interne de chaque pièce. Les compositions des murs de l'appartement d'époque Contemporaine étaient entièrement décrites dans les plans d'étage fournis par l'architecte. Les compositions des murs des autres appartements ont été déduites de la base de données de composition des murs des bâtiments existants : Tabula (Rochard et al. 2015) et des observations in situ.

Données de sorties dynamiques

Ces données correspondent aux grandeurs intermédiaires et aux grandeurs de sorties de l'UTTC. Elles sont mesurées pour être par la suite comparées aux données prédites par l'UTTC, afin d'évaluer sa précision. Ce sont essentiellement des données de température et d'humidité.

La température et l'humidité de l'air extérieur à proximité des bâtiments ont été mesurées afin d'évaluer la précision des prévisions de l'ICU par UWG. La température et l'humidité de l'air ont été mesurées dans toutes les pièces des appartements pour évaluer la précision des données de simulations prédites par EnergyPlus.

II.4.4 Capteurs et emplacements des capteurs

La répartition des capteurs dans les quatre appartements est indiquée sur les plans d'étage de la Figure II-3.

La température et l'humidité de l'air extérieur ont été mesurés avec des capteurs ombragés fixés aux menuiseries des appartements, et maintenus à une distance d'environ 50cm de la façade. Les appartements mono-orientés (périodes Industrielle et Canut) ont été équipés d'un capteur. Les appartements traversants (périodes Reconstruction et Contemporaine) ont été équipés de deux capteurs, placés de part et d'autre des appartements.

Les capteurs de température et d'humidité intérieurs (points rouges sur la Figure II-3) ont été fixés au centre de la pièce verticalement, pour compenser la stratification verticale de température, et sur les murs ou les surfaces de meubles ombragés afin d'éviter l'exposition directe au soleil.

En supplément à l'instrumentation décrite précédemment et pour tenter l'interprétation du comportement des occupants sur les fenêtres, un enregistrement continu du niveau sonore extérieur a été effectué le long des façades des appartements des périodes Canut, Reconstruction et Contemporaine. Aucune mesure acoustique n'a été effectuée le long de la façade de l'appartement de la période Industrielle car il donnait sur le volume central d'un immeuble fermé, où le niveau de pollution sonore était faible.

Les informations sur la marque, le modèle et la précision des capteurs sont répertoriées dans le Tableau II-3. Tous les capteurs, à l'exception des capteurs acoustiques, ont communiqué leurs données via une passerelle sous le protocole ENOCEAN. La passerelle a transféré ces données à un serveur en ligne via une clé 4G. Les capteurs ont transmis des données à la passerelle chaque fois que la variation enregistrée des grandeurs mesurées dépassait la résolution de déclenchement indiquée dans la dernière colonne du tableau.

Tableau II-3: Caractéristiques des capteurs

Grandeur mesurée	Modèle/marque du capteur	Précision	Résolution de transmission
Température et humidité internes	-/Nodon	$\pm 0,16 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2\%$	$\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$
Température et humidité externes	FAFT60/Eltako electronics	$\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5\%$	$\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$
Manipulation des portes et fenêtres	-/Nodon	-	Changement d'état
Manipulation des volets	TRIO2SYS/O2LINE	-	Changement d'état
Niveau sonore	GREENBEE/azimuth-monitoring	$\pm 0,1 \text{ dB}$	
Niveau sonore	SV 258 Pro/SVANTEK	$\pm 0,1 \text{ dB}$	

II.4.5 Dates de la campagne de simulation

Les mesures ont été effectuées au cours de l'été 2020, La campagne a commencé le 3 juillet et s'est terminée vers la mi-octobre.

II.5 Résultats des mesures

Pendant la campagne de mesure, la vitesse du vent à la station météorologique rurale est restée supérieure à 2 m/s pendant 60% du temps. La direction du vent était principalement la direction Nord ou la direction Sud.

II.5.1 Températures extérieures

La Figure II-6 présente deux graphiques pour chacun des appartements étudiés. Le graphique supérieur montre les valeurs de température de l'air extérieur mesurées par les capteurs extérieurs en site urbains $T_{o,urb}$ (ligne bleue), et par la station météorologique rurale $T_{o,rur}$ (ligne verte). Le graphique inférieur montre l'amplitude de l'ICU δ_{UHI} calculée sur la base des températures extérieures mesurées. L'amplitude de l'ICU δ_{UHI} est la différence entre les températures d'air en milieu urbain et en milieu rural (équation II-1) :

$$\delta_{UHI} = T_{o,urb} - T_{o,rur} \quad \text{II-1}$$

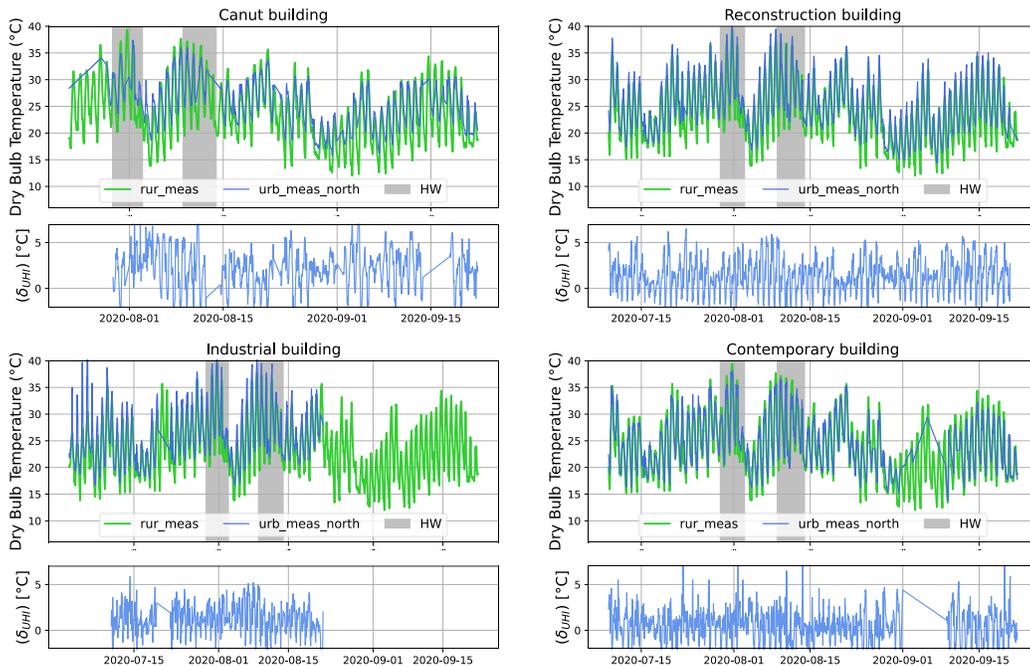


Figure II-6: Les résultats des mesures de la température de l'air extérieur sont présentés dans les graphiques du haut (les mesures urbaines sont indiquées par des lignes bleues et les mesures rurales obtenues de Météo-France sont indiquées en vert, et les jours de canicule sont identifiés par des rectangles gris), et l'amplitude de l'îlot de chaleur urbain δ_{UHI} est présentée dans le graphique du bas (lignes bleues)

Certains capteurs ont été défectueux au cours de la campagne de mesure. Les batteries de certains capteurs se sont épuisées pendant de longues périodes. Ces périodes sont identifiables sur les graphiques par des évolutions linéaires longues. Le capteur extérieur du bâtiment de la période Industrielle a cessé de fonctionner du 21 août jusqu'à la fin de la campagne de mesure. Les capteurs situés sur le côté Est de l'appartement de la période Reconstruction et sur le côté sud du bâtiment de

la période Contemporaine n'ont pratiquement pas collecté de données de mesure. De plus, certains capteurs ont mesuré des pics de température anormaux pendant la journée. Ces pics ont été attribués au rayonnement direct du soleil, qui a chauffé la protection thermique du capteur. Le capteur de température situé près du bâtiment de la période Industrielle a été particulièrement affecté par le rayonnement direct du soleil. Les autres capteurs étaient situés dans des zones plus ombragées. Ces pics de température anormaux et ces valeurs manquantes n'ont pas été pris en compte dans l'analyse de la précision des outils de simulations de la partie II.5.1.

Deux canicules ont été détectées sur les profils de température du milieu rural : entre le 29 juillet et le 2 août, et entre le 8 et le 13 août. Ces événements de canicules sont marqués par des rectangles gris sur la Figure II-6. Ils ont été détectés en utilisant la méthode de (Pascal et al. 2006), qui est actuellement la méthode utilisée pour les alertes canicules en France. Pendant ces épisodes de canicule, la température de l'air a dépassé 34 °C et n'est pas descendue en dessous de 20 °C pendant au moins 3 jours consécutifs.

Durant la période des mesures, l'amplitude de l'ICU δ_{UHI} était proche de 0 °C pendant la journée. Les effets de l'ICU se sont surtout produits pendant la nuit, avec δ_{UHI} variant entre 0 °C (autour du 20 août) et 5 °C. L'amplitude de l'ICU était légèrement plus importante près du bâtiment Canut (courbes en haut à gauche), qui est situé dans le quartier le plus dense parmi les cas d'étude. L'amplitude de l'ICU était légèrement plus faible près du bâtiment contemporain (courbes en bas à droite), qui est situé dans le quartier le moins dense parmi les différents cas d'étude, près de la rivière Saône (située à 200 m du bâtiment). Les valeurs nocturnes moyennes de l'amplitude de l'ICU $(\overline{\delta_{UHI}})_{night}$ ont été calculées en considérant les périodes nocturnes entre 22h00 et 7h00. Les valeurs varient de 1,12 °C (bâtiment contemporain) à 3,34 °C (bâtiment Canut).

Les amplitudes moyennes des fluctuations quotidiennes de température $\overline{\Delta T_{o,meas}}$ sont indiquées dans le Tableau II-4. L'amplitude moyenne a atteint 12 °C dans la zone rurale. L'ICU a eu pour effet de réduire les fluctuations de température à proximité des bâtiments Canut, Reconstruction et Contemporaine, avec des amplitudes $\overline{\Delta T_{o,meas}}$ atteignant 7,5 °C, 10,5 °C et 9,2 °C, respectivement. Les fluctuations plus importantes près du bâtiment industriel peuvent être attribuées à l'excès de chaleur apporté par le rayonnement direct du soleil qui a atteint le capteur pendant la journée.

II.5.2 Températures intérieures et ouvertures

La Figure II-7 présente deux graphiques pour chaque appartement. Le graphique supérieur montre les températures intérieures dans chaque pièce des appartements. Pour chaque appartement, la température du salon est indiquée par une ligne rouge. Les rectangles gris indiquent les périodes d'absences pendant lesquelles les appartements sont restés inoccupés. Un seuil de température de 28 °C est mis en évidence comme seuil arbitraire de température de confort.

Le graphique du bas montre, à chaque instant, la proportion des fenêtres ouvertes dans l'appartement (exprimée en pourcentage du nombre total de fenêtres), ainsi que le niveau sonore extérieur. Aucun des capteurs d'ouverture de volets n'a fonctionné, c'est pourquoi les pourcentages d'ouverture de volets ne sont pas affichés.

Dans chaque appartement, les températures de l'air dans les pièces présentent des tendances similaires. Les valeurs moyennes journalières évoluent simultanément, et dans le même sens. Des fluctuations élevés ou faibles ont affecté simultanément toutes les pièces. Deux pièces ont présenté des évolutions particulières de la température de l'air : les toilettes de l'appartement Canut car ils sont

équipés d'une machine à laver qui a augmenté périodiquement la température de l'air ambiant (ligne bleue, courbe supérieure gauche) et le salon de l'appartement Contemporain car il est isolé du reste de l'appartement et l'évolution de sa température était très différente (ligne rouge, courbe inférieure droite).

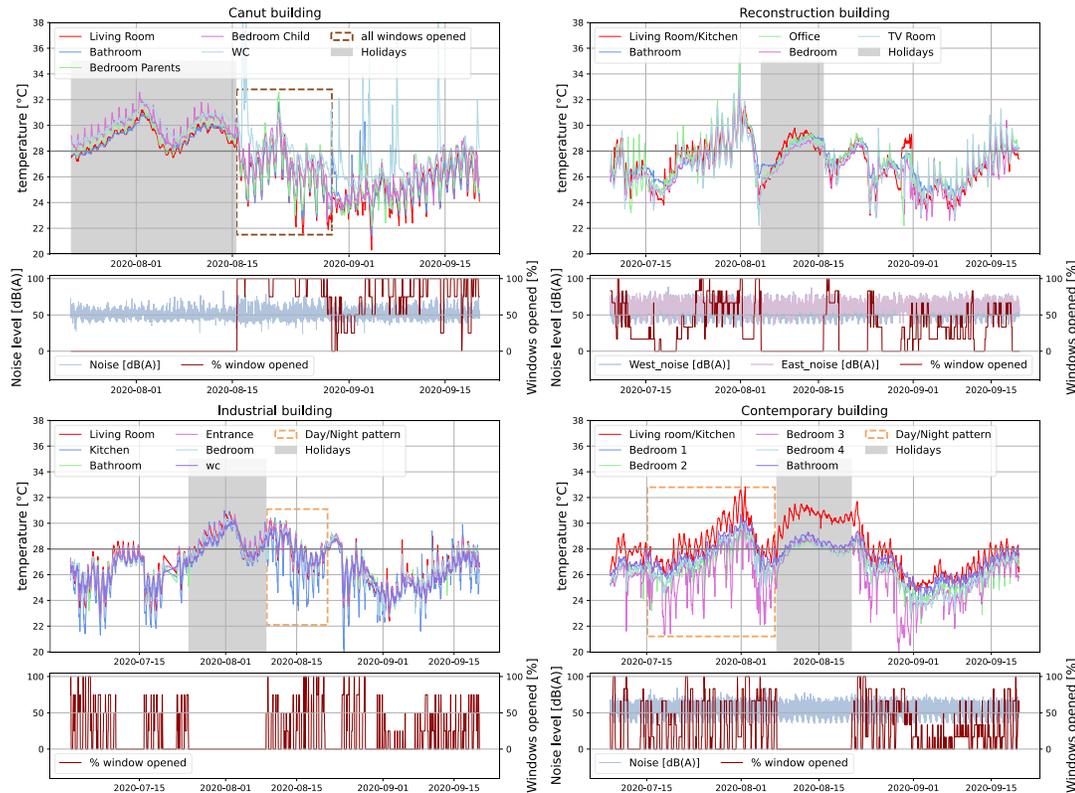


Figure II-7: Température mesurée de l'air intérieur, période d'absence (rectangles gris), état d'ouverture continue des fenêtres (rectangles marrons en pointillés) et schéma d'ouverture quotidienne des fenêtres (rectangles orange en pointillés) (courbes du haut), niveaux de bruit et pourcentage de fenêtres ouvertes (courbes du bas) pour chaque appartement étudié.

La figure montre que l'évolution de la température de l'air ambiant dépendait fortement des horaires d'ouverture des fenêtres. Pendant les périodes de vacances (zones grises), toutes les fenêtres et tous les volets sont restés fermés. Les appartements se trouvaient dans une configuration qui minimisait les interactions thermiques avec l'environnement extérieur. Les fluctuations quotidiennes de température étaient faibles, mais les températures quotidiennes moyennes étaient élevées car l'absence de ventilation naturelle ne permettait pas d'évacuer la chaleur.

Entre le 16 et le 28 août (rectangle marron pointillé sur les courbes), les fenêtres de l'appartement de la période Canut sont restées ouvertes quasiment en permanence. Cet état d'ouverture continue a entraîné les fluctuations maximales de la température quotidienne observées pendant toute la campagne de mesure.

Des motifs réguliers quotidiens d'ouvertures de fenêtres ont été enregistrés pendant des périodes significatives dans les appartements des périodes Industrielle et Contemporaine (rectangles oranges pointillés sur les courbes). Les occupants fermaient les fenêtres (et les volets) pendant la journée, ouvraient progressivement les fenêtres et les portes pendant la soirée et laissaient les fenêtres de quelques pièces ouvertes pendant la nuit pour assurer le rafraîchissement par ventilation naturelle. Les régimes de température associés comprenaient une stabilisation de la température pendant la journée et une baisse de la température pendant la nuit.

Les amplitudes moyennes des fluctuations quotidiennes de la température de l'air dans les salles de séjour ont atteint 2,5 °C, 2 °C, 1,6 °C et 1,6 °C pour les appartements des périodes Canut, Industrielle, de Reconstruction et Contemporaine, respectivement. Les fluctuations de température intérieure étaient en moyenne 5,5 fois plus faibles que les fluctuations de température extérieure.

II.5.3 Interprétation du comportement d'ouverture des fenêtres

D'un point de vue purement thermique, la régulation la plus efficace des ouvertures de fenêtres consisterait à ouvrir les fenêtres chaque fois que la température extérieure est inférieure à la température intérieure afin de s'assurer que la ventilation naturelle est toujours utilisée à des fins de rafraîchissement. Cependant, ce comportement idéal a rarement été observé pour plusieurs raisons. Les occupants n'étaient pas toujours disponibles pour manipuler les fenêtres : soit parce qu'ils dormaient, soit parce qu'ils étaient absents de l'appartement. L'ouverture des fenêtres pouvait également exposer l'environnement intérieur à des pollutions extérieures, notamment au bruit.

Dans une première tentative d'interprétation des comportements d'ouverture des fenêtres, une matrice de corrélation entre le pourcentage d'ouverture des fenêtres $\%_{wop}$, le niveau sonore L_A , la température extérieure T_o et la température intérieure moyenne dans les différentes pièces de l'appartement \overline{T}_i a été calculée à partir des données de mesure obtenues dans les quatre appartements. Les périodes de vacances ont été supprimées de cette analyse. La matrice de corrélation résultante est présentée dans la Figure II-8.

Les valeurs de corrélation entre $\%_{wop}$ et L_A étaient très faibles. On pourrait s'attendre à ce que les fenêtres soient fermées plus souvent lorsque le niveau de bruit extérieur est élevé. Ce comportement n'a pas été observé pendant la campagne de mesure. Cela ne signifie pas que les occupants n'ont pas tenu compte de la pollution sonore. Cela indique que leur décision d'ouvrir ou de fermer les fenêtres n'était pas déclenchée par des variations du niveau de bruit extérieur. Mais il se peut qu'elles aient été motivées par des variations de leur degré d'acceptation au bruit, qui dépendait de la nature de leurs activités (cuisiner, dormir, regarder la télévision, etc.).

Les valeurs des corrélations entre $\%_{wop}$ et T_o , et entre $\%_{wop}$ et \overline{T}_i , sont très faibles, sauf pour l'appartement de la période Canut. Ces valeurs de corrélation reflètent la relation entre l'état d'ouverture des fenêtres et les variations quotidiennes et journalières de la température. Les variations de température ne semblent pas déclencher les décisions d'ouverture des fenêtres. Les valeurs de corrélation plus élevées pour l'appartement de la période Canut sont attribuées à un état d'ouverture presque constant en juillet et août, lorsque la température extérieure était élevée, et à un état de fermeture presque constant après la mi-septembre, lorsque la température extérieure a baissé. L'état d'ouverture était plutôt corrélé avec les variations de température à long terme, qu'avec les variations de température journalières.

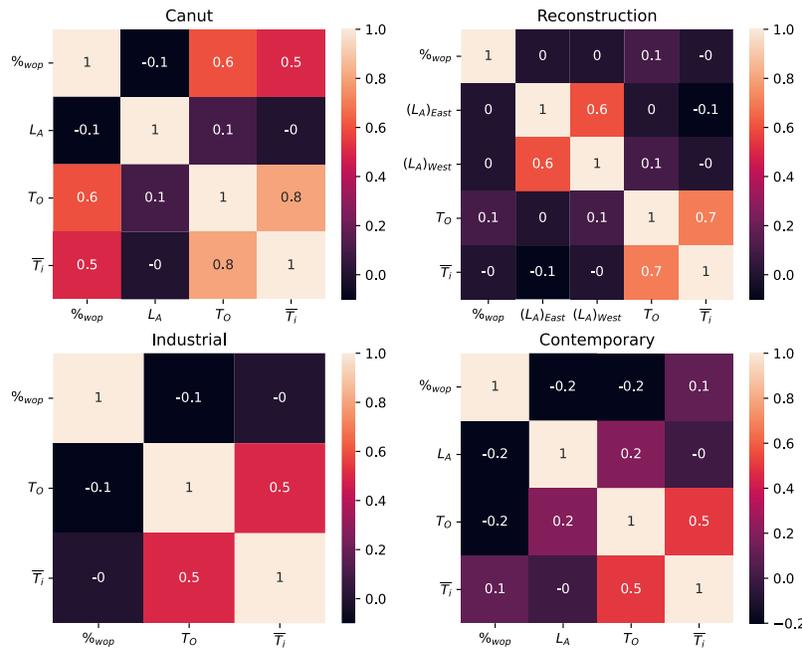


Figure II-8: Matrice de corrélation (coefficient de corrélation standard de Pearson) pour l'interprétation des comportements d'ouverture des fenêtres. $\%wop$: Pourcentage d'ouverture des fenêtres ; L_A : niveau de bruit extérieur ; T_O : température de l'air extérieur ; \bar{T}_i : température moyenne de l'air intérieur (tracé avec la fonction `seaborn.heatmap()` de la bibliothèque `seaborn` en Python).

II.6 Résultats des simulations – précision du modèle

II.6.1 Précision des prédictions d'UWG

Les Figure II-9 et Figure II-10 présentent deux graphiques pour chaque appartement. Le graphique supérieur montre les valeurs de température de l'air extérieur prédites par UWG (ligne rouge), les mesures en site urbain (ligne bleue) et les données météorologiques rurales (ligne verte). Le graphique inférieur montre les amplitudes de l'ICU (δ_{UHI} , équation II-1) calculées avec les températures urbaines mesurées (en bleu) et simulées (en orange). La Figure II-9 montre les valeurs de la température de l'air extérieur depuis le début de la période de mesure jusqu'au 22 septembre. La figure Figure II-10 se concentre sur la période entre le 15 et le 22 août.

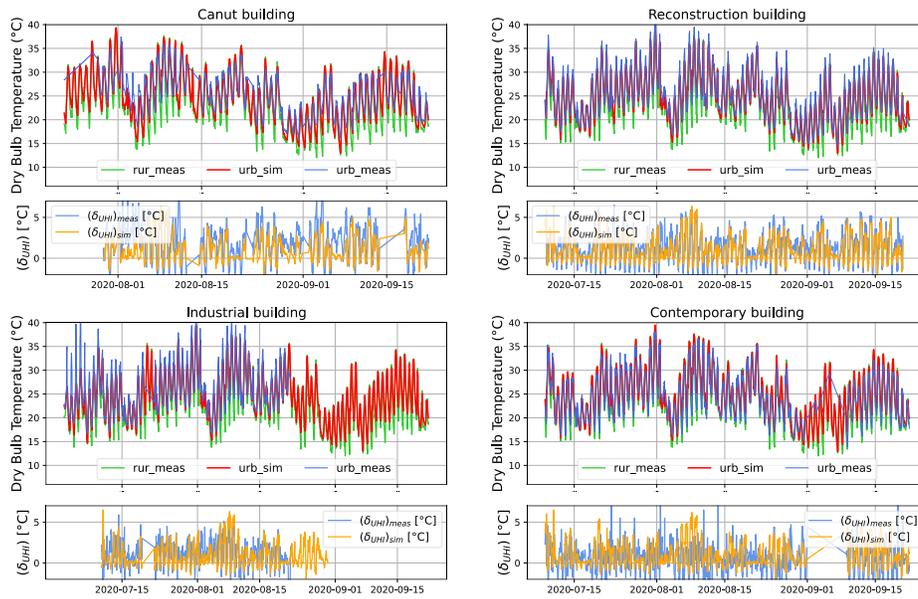


Figure II-9: Température de l'air extérieur dans tous les cas d'étude de juillet à septembre (graphique du haut) (simulations urbaines (rouge), mesures urbaines (bleu) et mesures rurales (vert)) et δ_{UHI} dans le graphique du bas (valeurs δ_{UHI} mesurées (lignes bleues) et simulées (lignes orange))

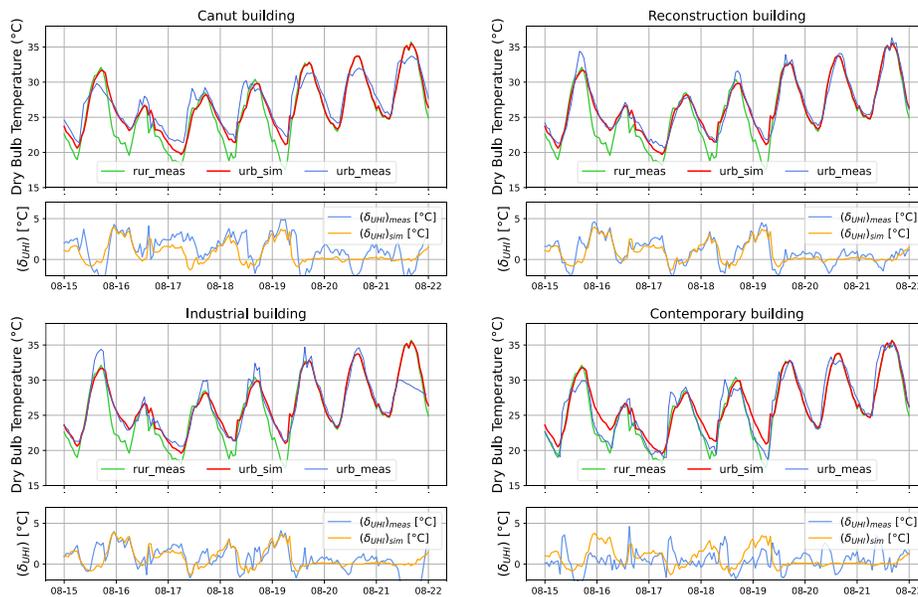


Figure II-10: Focus sur la température de l'air extérieur (graphique du haut) dans toutes les études de cas du 15 au 22 août (simulations urbaines (rouge), mesures urbaines (bleu) et mesures rurales (vert)) et δ_{UHI} dans le graphique du bas (valeurs δ_{UHI} mesurées (lignes bleues) et simulées (lignes orange)).

Les variations jour/nuit de l'amplitude de l'ICU δ_{UHI} prédites par UWG sont similaires aux variations qui ont été mesurées. Pendant le jour, δ_{UHI} prédit par UWG est nul. Pendant la nuit, lorsque la valeur de δ_{UHI} mesurée est nulle, la valeur δ_{UHI} prédite est aussi nulle (Figure II-10, autour du 20 août, par exemple). Les amplitudes prédites de l'ICU nocturne étaient assez similaires à celles basées sur les mesures, malgré une légère surestimation des prédictions de l'ICU pour le cas d'étude de la période Contemporaine (entre le 5 et le 10 août, par exemple) et une légère sous-estimation pour le cas d'étude de la période Canut.

La précision des prédictions de température extérieure a été quantifiée au travers de la distribution de l'erreur de simulation ε^T . L'erreur de simulation est la différence entre les températures prédites et mesurées. En termes de température extérieure urbaine cela se traduit par l'équation II-2 :

$$\varepsilon_{o,urb}^T = (T_{o,urb})_{sim} - (T_{o,urb})_{meas} \quad \text{II-2}$$

Les distributions d'erreur se présentent sous la forme de courbes en cloche. Une courbe qui n'est pas centrée sur 0 °C révèle une erreur systématique. Une courbe très étalée autour de sa valeur centrale indique une large plage d'erreurs, qui peut être attribuée à une mauvaise prédiction des fluctuations de température. Une concordance idéale entre les prédictions et les mesures correspondrait à une distribution étroite centrée sur 0 °C.

Les distributions d'erreur de simulation pendant la nuit ($\varepsilon_{o,urb}^T$)_{night} dans les quatre cas d'étude sont présentées sur la Figure II-11. Les périodes nocturnes ont été fixées arbitrairement entre 22h00 et 7h00. La moyenne et la RMSE des valeurs d'erreur nocturne sont données dans le Tableau II-4.

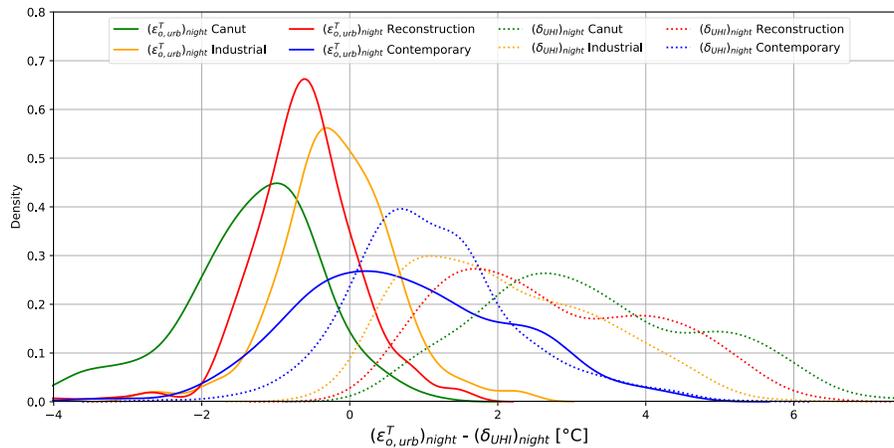


Figure II-11: Distribution de l'erreur de la température extérieure entre les prédictions et les mesures de l'UWG pendant la nuit $(\varepsilon_{o,urb}^T)_{night}$ (lignes pleines) et distribution de l'UHI mesuré pendant la nuit $(\delta_{UHI})_{night}$ (lignes pointillées).

En ce qui concerne le bâtiment de la période Canut, les températures nocturnes ont été sous-estimées, avec une erreur moyenne de -1,39 °C. Ainsi, les amplitudes de l'ICU ont été sous-estimées près du bâtiment, qui est situé dans le quartier le plus dense. En ce qui concerne le bâtiment de la période Contemporaine, les températures nocturnes ont été légèrement surestimées, avec une erreur moyenne de 0,73 °C, mais la distribution de l'erreur était assez large (ligne pleine bleue sur la figure), avec une valeur RMSE de 0,98 °C. Ces écarts pourraient être attribuables à la présence de la rivière Saône à

proximité du bâtiment, dont les effets rafraichissants ne peuvent être modélisés avec le modèle UWG. La moyenne et l'écart-type des erreurs étaient plus faibles pour les cas d'étude de la période Industrielle et de la période de Reconstruction.

Etant donné que l'objectif du modèle UWG était de corriger les données météorologiques en tenant compte des effets du tissu urbain, la question suivante se pose : UWG affine-t-il réellement la description de l'environnement thermique extérieur par rapport aux données rurales ? L'amplitude de l'ICU $(\delta_{UHI})_{night}$ peut être interprétée comme l'amplitude de l'erreur qui serait commise en prenant directement la température rurale en entrée des simulations de bâtiments. Pour qu'UWG affine la description de l'environnement extérieur, il faut donc que l'erreur en sortie d'UWG $(\varepsilon_{o,urb}^T)_{night}$ soit inférieure à l'erreur initiale $(\delta_{UHI})_{night}$. Les distributions des amplitudes de l'ICU nocturne mesurées $(\delta_{UHI})_{night}$ ont donc été affichées dans le même graphique que les distributions des erreurs de simulation $(\varepsilon_{o,urb}^T)_{night}$. Les valeurs moyennes des deux grandeurs $(\overline{\varepsilon_{o,urb}^T})_{night}$ et $(\overline{\delta_{UHI}})_{night}$ sont indiquées dans le Tableau II-4. Il est clair qu'il y a beaucoup plus de divergences entre les températures rurales et urbaines mesurées (une amplitude de l'ICU de 2,31 °C en moyenne) que celles entre les températures urbaines prédites par UWG et mesurées (une erreur de -0,36 °C en moyenne). En conclusion, lorsqu'il est paramétré de manière appropriée, UWG améliore la représentation de l'environnement extérieur des bâtiments urbains.

Tableau II-4: Résumé des statistiques sur les mesures et les prévisions de la température extérieure

	ICU nocturne				Totalité des données			
	ICU mesuré	ICU simulé	Erreur moyenne des simulations	RMSE	Amplitude journalière mesurée	Amplitude journalière simulée	Erreur moyenne des simulations	RMSE
	$(\overline{\delta_{UHI}})_{night}^{meas}$	$(\overline{\delta_{UHI}})_{night}^{sim}$	$(\overline{\varepsilon_{o,urb}^T})_{night}$		$\overline{\Delta T_{o,meas}}$	$\overline{\Delta T_{o,sim}}$	$(\overline{\varepsilon_{o,urb}^T})$	
Unité	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Canut	3,34	1,95	-1,39	1,09	7,48	9,48	-1,12	1,97
Industrielle	2,07	1,88	-0,16	0,44	11,39	10,03	-0,32	1,36
Reconstruction	2,72	2,11	-0,61	0,59	10,48	9,72	-0,36	1,14
Contemporaine	1,12	1,85	0,73	0,98	9,21	9,94	0,37	1,79
Valeur moyenne	2,31	1,95	-0,36	0,78	9,64	9,79	-0,36	1,56

II.6.2 Prévisions de la température intérieure

L'évolution de la température de l'air dans le séjour des quatre cas d'études est présentée dans les Figure II-12 et Figure II-13. Les données de la Figure II-12 commencent au début de la période de mesure jusqu'au 22 septembre. La Figure II-13 se concentre sur la période entre le 12 et le 19 septembre. Les mesures sont indiquées en bleu, et les prédictions de l'UTTC (Urban Thermal Tool Chain) sont indiquées en rouge. La température de l'air extérieur prédite par le modèle UWG est rappelée en bleu clair.

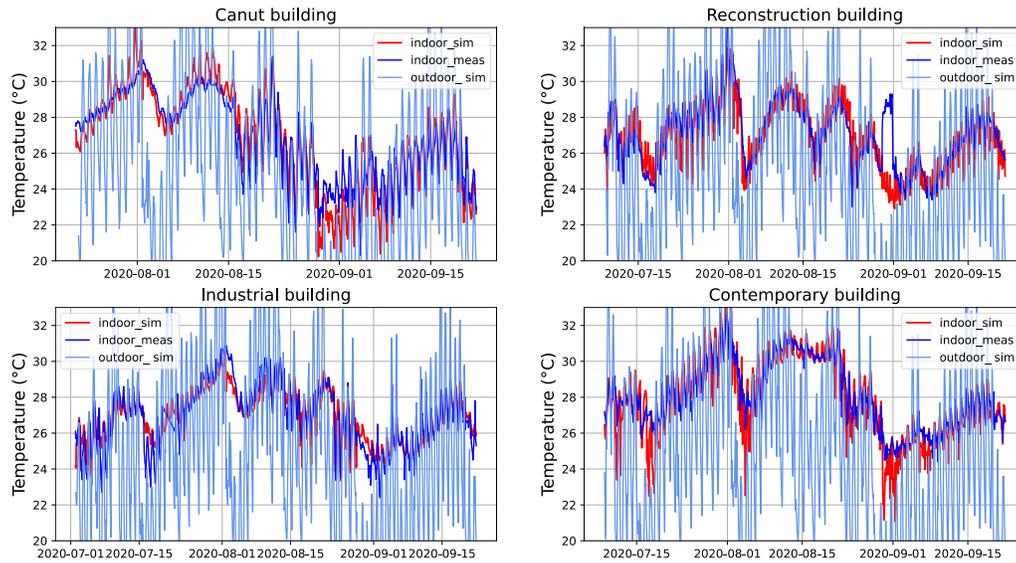


Figure II-12: Températures de l'air simulées (rouge) et mesurées (bleu) dans le salon et température de l'air extérieur (bleu clair) de juillet à septembre

La Figure II-12 montre que les tendances de l'évolution des températures intérieures ont été correctement reproduites par les simulations. Les évolutions des températures moyennes journalières sont similaires entre les prédictions et les mesures. Les courbes n'ont pas révélé de biais dans les températures simulées. Cette observation est particulièrement importante car elle suggère que le bilan énergétique moyen quotidien des appartements, impliquant tous les types de sollicitations thermiques (rayonnement solaire, température de l'air extérieur, rayonnement thermique extérieur et charges intérieures), a été convenablement reproduit par l'UTTC.

Les fluctuations quotidiennes de température ont été correctement reproduites malgré des événements isolés au cours desquels les températures mesurées étaient plus basses que les températures prédites. Ces événements survenaient essentiellement durant la nuit. En ce qui concerne les appartements des périodes Canut et Industrielle, les fluctuations quotidiennes de température ont été légèrement sous-estimées. Ces fluctuations ont été légèrement surestimées pour les appartements de la période de Reconstruction et de la période Contemporaine.

L'erreur de simulation est la différence entre la température simulée et la température mesurée :

$$\varepsilon_i^T = (T_i)_{sim} - (T_i)_{meas} \quad \text{II-3}$$

Le Tableau II-5 fournit des statistiques sur la distribution d'erreur de simulation calculée avec la température moyenne journalière intérieure ε_i^{DMT} . Cette erreur permet d'évaluer la capacité de la chaîne d'outils à prédire avec précision l'évolution de la température moyenne journalière intérieure. Les valeurs de l'erreur de prédiction de la température moyenne journalière intérieure ε_i^{DMT} varient principalement entre $-0,5$ °C et $0,5$ °C. La moyenne de l'erreur quadratique moyenne $rms_{\varepsilon_i^{DMT}}$ pour toutes les pièces était inférieure à 1 °C.

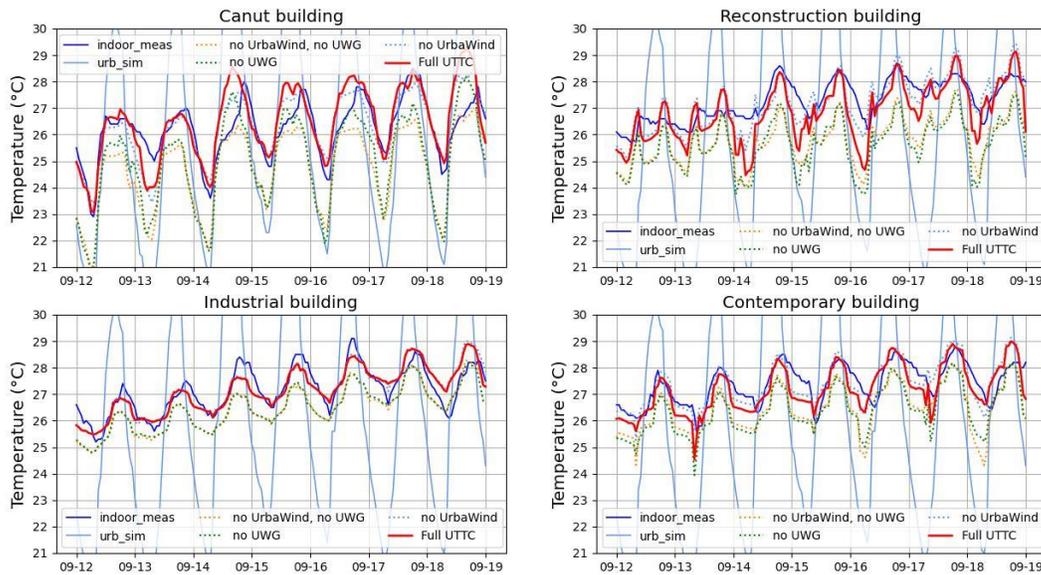


Figure II-13: Zoom sur les températures simulées [UTTC complète (ligne continue rouge), sans UrbaWind (ligne pointillée bleue), sans UWG (ligne pointillée verte), et seulement avec EnergyPlus en considérant le coefficient de pression standard et les valeurs du fichier météo rural (ligne pointillée jaune)] et mesurées (bleu) dans le salon et la température extérieure (bleu clair) du 12 au 19 septembre.

Les distributions d'erreur pour chaque pièce des quatre appartements sont présentées dans la Figure II-14 (courbes rouges). Les valeurs moyennes $\overline{\varepsilon_i^T}$ et les valeurs quadratiques moyennes $rms_{\varepsilon_i^T}$ de ces distributions d'erreurs sont données dans le Tableau II-5. Ces statistiques ont été calculées sur la base des valeurs d'erreur ε_i^T sur l'ensemble de la période.

Pour le cas des appartements des périodes Canut, Industrielle et Reconstruction, les distributions d'erreur sont en forme de cloche avec un pic unique situé près de zéro (Figure II-14, courbes rouges). En raison de la chaleur dégagée par la machine à laver, qui n'a pas été modélisée dans les simulations, les valeurs maximales de l'erreur moyenne et de l'erreur rms sont observées pour les WC de l'appartement de la période Canut, avec $\overline{\varepsilon_i^T} = -2,48 \text{ °C}$ et $rms_{\varepsilon_i^T} = 3,4 \text{ °C}$. En ce qui concerne les autres pièces de l'appartement, les erreurs moyennes $\overline{\varepsilon_i^T}$ varient principalement entre $-0,5 \text{ °C}$ et $0,5 \text{ °C}$, révélant une quasi-absence de biais. Les erreurs quadratiques moyennes $rms_{\varepsilon_i^T}$ sont généralement inférieures à $1,15 \text{ °C}$, avec une précision encore meilleure dans le cas de l'appartement de la période Industrielle.

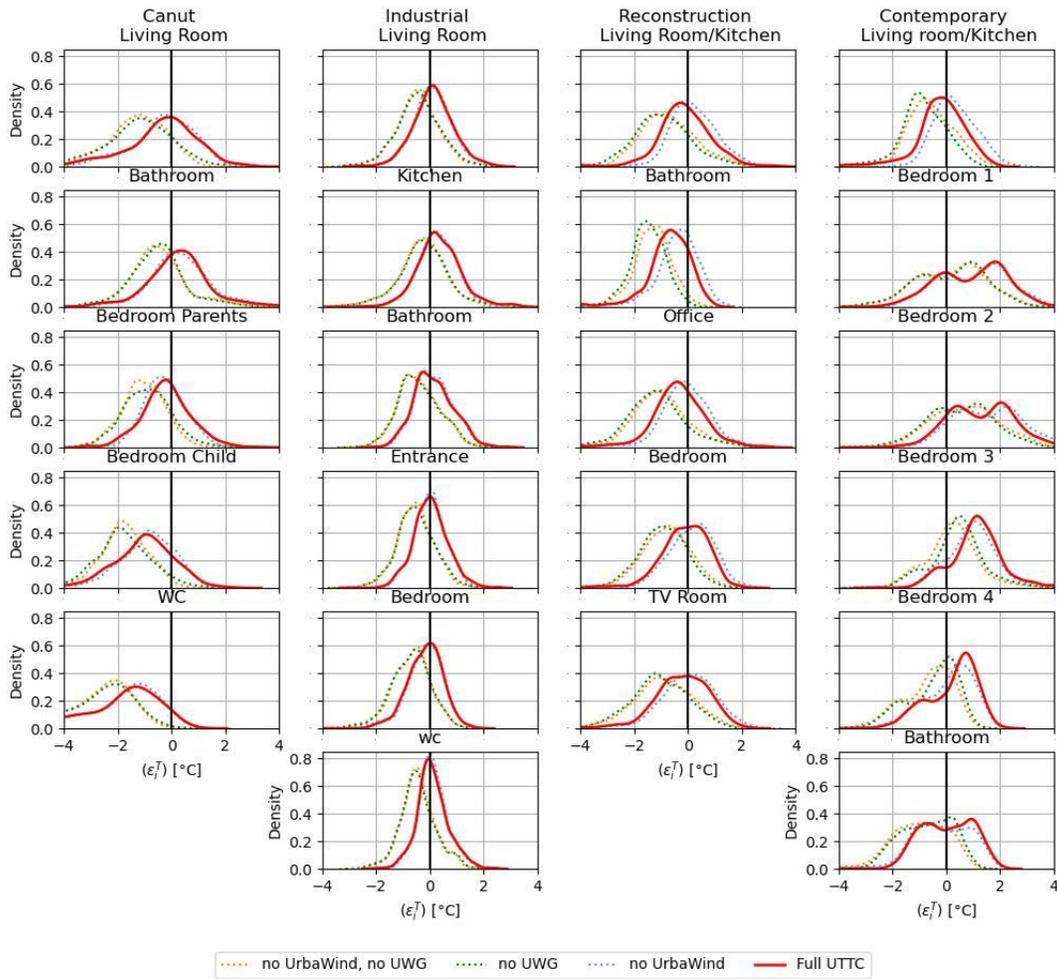


Figure II-14: Distribution de l'erreur de température entre les prédictions de simulation et les valeurs de température mesurées (ε_i^T) pour chaque pièce dans chaque cas d'étude [UTTC complet (ligne continue rouge), sans UrbaWind (ligne pointillée bleue), sans UWG (ligne pointillée verte), et uniquement avec EnergyPlus sur la base du coefficient de pression standard et des valeurs du fichier météo rural (ligne pointillée jaune)].

Dans le cas de l'appartement d'époque Contemporaine, les distributions d'erreurs ont révélé un pic secondaire et les valeurs d'erreurs moyennes et quadratiques moyennes sont donc légèrement plus élevées pour toutes les pièces, à l'exception du salon. Il a été constaté que les simulations ne reproduisaient pas les schémas d'évolution distincts de la température entre la zone de séjour (salons et cuisine) et la zone de nuit (chambres et salles de bains). La zone de séjour est mono-orientée vers le Sud. La zone de nuit est traversante Nord/Sud. Pendant le jour, dans la zone de nuit, les volets étaient fermés, ce qui entraînait une augmentation plus faible de la température. Pendant la nuit, les fenêtres étaient ouvertes, ce qui entraînait une baisse de la température grâce à la ventilation naturelle. Ces deux zones sont séparées par une seule porte de séparation (entourée en orange sur la Figure II-3). L'intensité des échanges de chaleur entre ces deux zones dépend du pourcentage d'ouverture de la porte de séparation. Si la porte est complètement ouverte, l'advection à travers l'ouverture de la porte homogénéise la température à l'intérieur de l'appartement. Si la porte n'est que légèrement

ouverte, on peut s'attendre à deux comportements thermiques distincts dans ces deux zones. Le pourcentage d'ouverture réel de la porte de séparation n'a pas pu être capturé par le capteur à contact et peut donc expliquer les écarts de comportement thermique entre les mesures et les simulations.

Tableau II-5: Statistiques des erreurs de prédiction de la température intérieure sur la période du 9 Juillet au 30 Septembre (à partir du 29 Juillet pour la période Canut et jusqu'au 30 Aout pour la période Industrielle)

Période	Pièce	Température horaire		Température moyenne journalière	
		$\overline{\varepsilon_i^T}$	$rms_{\varepsilon_i^T}$	ε_i^{DMT}	$rms_{\varepsilon_i^{DMT}}$
Canut	Living Room	-0,31	1,34	-0,01	0,8
	Bathroom	0,36	1,28	0,51	1,07
	Bedroom (Parents)	0,09	0,9	0,05	0,51
	Bedroom (Child)	-1,05	1,6	-0,78	1,13
	WC	-2,48	3,4	-1,97	2,44
	Moyenne de toutes les pièces	-0,69	1,7	-0,44	1,19
Industrielle	Living Room	0,12	0,76	0,08	0,56
	Kitchen	0,35	0,93	0,24	0,61
	Bathroom	0,14	0,76	0,06	0,62
	Entrance	0,02	0,65	-0,03	0,52
	Bedroom	-0,19	0,68	-0,2	0,48
	WC	0,1	0,59	0,03	0,48
	Moyenne de toutes les pièces	0,09	0,73	0,03	0,55
Reconstruction	Living Room/Kitchen	-0,21	1,12	-0,27	0,91
	Bathroom	-0,69	1,06	-0,59	0,87
	Office	-0,37	1,06	-0,41	0,78
	Bedroom	-0,12	0,87	-0,06	0,59
	TV Room	-0,25	1,06	-0,22	0,79
	Moyenne de toutes les pièces	-0,33	1,03	-0,31	0,79
Contemporaine	Living Room/Kitchen	-0,18	0,94	-0,17	0,61
	Bedroom 1	0,94	1,61	1,09	1,52
	Bedroom 2	1,29	1,78	1,4	1,73
	Bedroom 3	1,15	1,54	1,16	1,42
	Bedroom 4	0,2	0,96	0,27	0,77
	Bathroom	0,04	0,96	0,14	0,84
	Moyenne de toutes les pièces	0,57	1,30	0,65	1,15
Moyenne UTTC	Moyenne totale	-0,05	1,17	0,015	0,91

Il convient de mentionner que, compte tenu du niveau de fluctuation des températures extérieures mesuré à la station météorologique située à environ 10 km des cas d'étude, et compte tenu du nombre

et de la variété des phénomènes thermiques affectant l'évolution de la température entre la station météorologique et les pièces des appartements, le niveau de précision atteint par les simulations est remarquable.

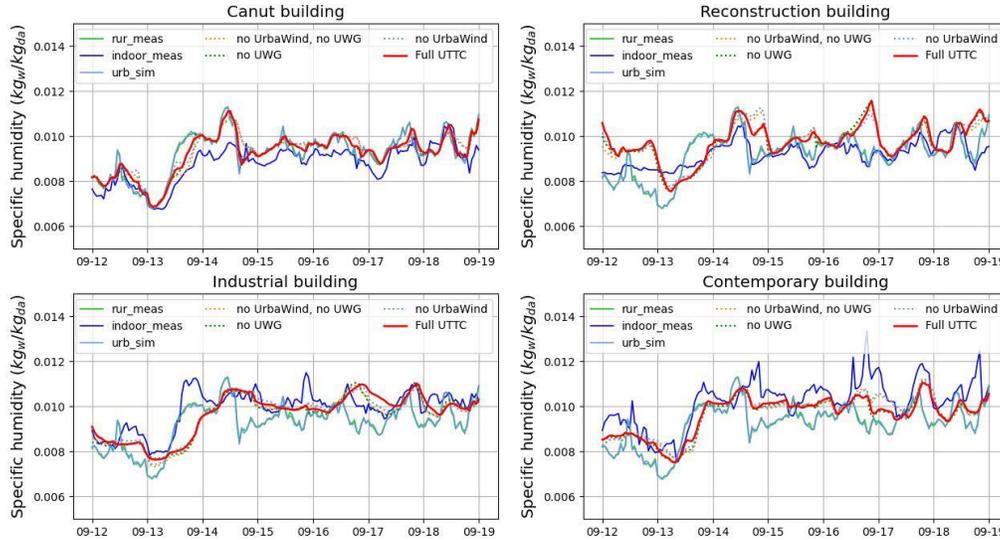


Figure II-15: Humidités spécifiques de l'air simulées [UTTC complet (ligne continue rouge), sans UrbaWind (ligne pointillée bleue), sans UWG (ligne pointillée verte), et seulement avec EnergyPlus basé sur le coefficient de pression standard et les valeurs du fichier météo rural (ligne pointillée jaune)] et mesurées (bleu) dans les salons et humidités spécifiques de l'air extérieur urbain (ligne bleue claire) et rural (ligne verte) mesurées du 12 au 19 septembre.

II.6.1 Humidité de l'air

La Figure II-15 montre l'évolution de l'humidité spécifique de l'air pendant la période entre le 12 et le 19 septembre. Durant cette période, la différence entre l'humidité spécifique mesurée à la station météorologique rurale (ligne verte) et l'humidité spécifique mesurée dans les séjours des appartements (courbes bleues) était proche de $0,002 \frac{kg_w}{kg_{da}}$, ce qui est très faible. Les sources et les puits de vapeur d'eau dans l'environnement urbain et au sein des appartements n'ont pas beaucoup affecté l'humidité spécifique. Dans les appartements des périodes Canut et Reconstruction, l'humidité spécifique était en moyenne légèrement inférieure à celle de la zone rurale. Dans les appartements des périodes Industrielle et Contemporaine, l'humidité spécifique était légèrement supérieure en moyenne.

Par rapport aux valeurs rurales, UWG n'a pas modifié l'humidité spécifique de l'air (les courbes bleu clair (urb_sim) et vertes (rur_meas) sont similaires). EnergyPlus n'a quasiment pas modifié les valeurs d'humidité spécifique (courbes rouges). Ainsi, en n'effectuant que de faibles ajustements de l'humidité spécifique de l'air, la chaîne d'outils a reproduit la quasi-absence d'effets du milieu urbain et des bâtiments sur cette grandeur. Les variations d'humidité relative pourraient donc être davantage liées aux variations de température locale qu'aux variations d'humidité spécifique.

II.7 Discussion

II.7.1 Pertinence de l'UTTC

Dans la chaîne d'outils proposée (UTTC), UWG et UrbaWind sont utilisés pour affiner les sollicitations thermiques extérieures sur le bâtiment d'intérêt. Dans la section précédente, la capacité du modèle UWG à ajuster précisément la température extérieure a été démontrée. Cependant, l'impact des deux outils de simulation du milieu extérieur sur les prédictions des ambiances intérieures n'a pas été évalué. Ainsi, des simulations supplémentaires ont été réalisées avec des utilisations partielles de l'UTTC afin d'évaluer individuellement le gain de précision dû à chaque outil.

Les Figure II-13, Figure II-14 et Figure II-15 montrent les résultats de simulation obtenus avec les utilisations partielles de l'UTTC suivantes : sans UWG, sans UrbaWind, et sans UWG ni UrbaWind. Lorsque UWG n'a pas été utilisé (lignes pointillées vertes et jaunes), la simulation du bâtiment a été alimentée directement par les données météorologiques rurales. Lorsque UrbaWind n'a pas été utilisé (lignes pointillées bleues et jaunes), les coefficients de pression par défaut proposés par DesignBuilder pour les conditions d'exposition abritées du vent ont été appliqués.

Les Figure II-13 et Figure II-14 révèlent que UrbaWind n'a pas eu d'impact significatif sur les prévisions de température intérieure. UrbaWind calcule le coefficient de pression devant les ouvertures. Ces coefficients de pression entrent en jeu dans le calcul des débits de ventilation naturelle lorsque la configuration de l'appartement permet d'obtenir un différentiel de pression dû au vent entre ses ouvertures. Ce n'est pas le cas pour les appartements mono-orientés, il est donc logique que l'utilisation d'UrbaWind n'améliore pas les prédictions pour les appartements d'étude mono-orientés (Canut et Industriel sur la Figure II-3). Pour ces appartements, le débit de ventilation est principalement attribué au tirage thermique.

Dans les appartements traversants (appartements de la période de Reconstruction et de la période Contemporaine), le débit d'air dépend largement de la distribution du coefficient de pression entre les fenêtres ouvertes, et UrbaWind devrait améliorer la prédiction des débits d'air. Cependant, il ne semble pas que cette amélioration supposée des prédictions des débits d'air, se traduisent par une modification notable des prédictions de température intérieure. L'une des pistes qui permettrait d'expliquer cette relative indépendance des prédictions de température aux prédictions de débits traversant est le phénomène de saturation de l'effet de refroidissement de l'écoulement.

Le débit de ventilation naturelle Q_v dans un appartement traversant (fenêtres ouvertes) dépend de la vitesse du vent v_{10} et des coefficients de pression c_{pf} et c_{pr} de part et d'autre de l'appartement :

$$Q_v \propto \sqrt{|c_{pf} - c_{pr}|} \cdot v_{10} \quad \text{II-4}$$

La température intérieure dans ces appartements peut être estimée, en première approximation, avec l'équation ci-dessous. Cette équation a été obtenue en exprimant un bilan de chaleur dans un appartement. Les termes T_{Si} , h_i et S_i sont respectivement les températures, coefficients d'échange convectifs, et aires des surfaces internes des appartements (parois, cloisons, planchers, etc.). Le terme Q_{int} représente les diverse charges internes.

$$T_{int} \approx \frac{\sum_i h_i S_i \cdot T_{Si} + 0.34 Q_v \cdot T_{ext} + Q_{int}}{\sum_i h_i S_i + 0.34 Q_v} \quad \text{II-5}$$

L'évolution de T_{int} en fonction de Q_v est représentée graphiquement dans la Figure II-16. On voit, dans cette équation, que la température de l'air intérieur tend asymptotiquement vers la température de l'air extérieur T_{ext} lorsque le débit de ventilation est élevé ($Q_v \gg 1$). Ainsi, lorsque le débit d'air est élevé, l'effet de rafraîchissement dû au débit de ventilation sature.

Ce phénomène de saturation nous amène à avoir un regard critique sur le choix des deux cas d'étude traversant. Ces deux appartements sont très exposés au vent. Or, comme on le voit dans la Figure II-16, dans un appartement traversant très exposé au vent (appartement A), la température intérieure est moins sensible aux variations de débits de ventilation (ΔQ_v) que dans un appartement peu exposé au vent (appartement B) : $\Delta T_{intA} \ll \Delta T_{intB}$. Les cas d'étude explorés dans cette étude ne sont pas les cas d'étude les plus appropriés pour évaluer les gains de précision apportés par UrbaWind pour l'évaluation de la température intérieure.

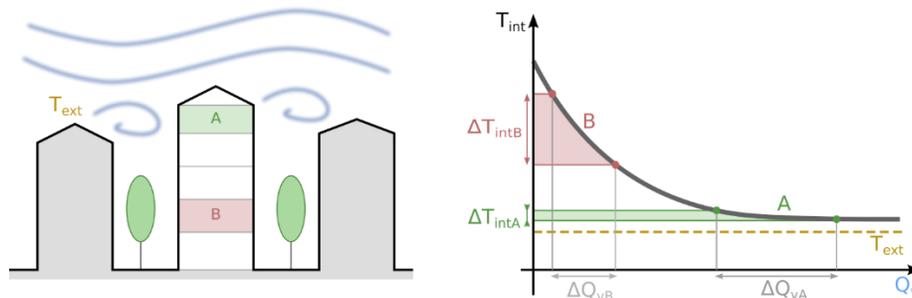


Figure II-16 : Effet de saturation dans un appartement très exposé au vent (appartement A)

Les Figure II-13 et Figure II-14 révèlent que l'utilisation d'UWG a eu un impact clair sur les prédictions de température intérieure. Il y a eu un biais constant d'environ 1 °C entre les résultats de simulation obtenus avec et sans le modèle UWG. Ce biais a été clairement observé dans les courbes de distribution des erreurs (Figure II-14), qui ont toutes été décalées vers la gauche d'environ 1 °C. En augmentant la température extérieure pendant la nuit, le modèle UWG simule la réduction du potentiel de refroidissement des bâtiments. Ne pas utiliser UWG pourrait entraîner une surestimation de ce potentiel de refroidissement.

Comme prévu, l'application d'UrbaWind et d'UWG n'a eu aucun impact sur les prédictions d'humidité spécifique (Figure II-15).

II.7.2 Paramètres clés de la simulation

Le nombre de paramètres nécessaires pour établir le modèle thermique d'un bâtiment urbain avec l'UTTIC est conséquent. Il est évident que certains paramètres ont plus d'impact que d'autre sur les prédictions de température. On appellera ces paramètres les paramètres clés du modèle. La technique rigoureuse pour identifier les paramètres clés est l'analyse de sensibilité. Cette technique n'a pas été appliquée dans cette étude. Cependant, lors de l'analyse des mesures et de la calibration des simulations, certains paramètres clés de simulation ont été clairement identifiés. Cette section répertorie ces paramètres clés identifiés.

II.7.2.1 Hauteur de couche limite urbaine nocturne

La hauteur de la couche limite urbaine (Urban Boundary Layer, UBL) nocturne $h_{ubl,night}$ doit être renseignée par l'utilisateur dans le fichier de paramétrage de UWG. Comme il n'existe pas de

directives claires pour fixer la valeur de $h_{ubl,night}$, plusieurs valeurs ont été testées entre 20 m et 500 m. Les meilleurs résultats de simulation extérieure ont été obtenus pour $h_{ubl,night} = 30 m$.

La Figure II-17 montre les distributions des erreurs de température extérieure $(\epsilon_{o,urb}^T)_{nuit}$ basées sur les résultats de simulation UWG obtenus avec $h_{ubl,night} = 30 m$ et $h_{ubl,night} = 150 m$. Le fait d'éloigner la hauteur de la couche limite urbaine de sa valeur optimale a entraîné une très grande dispersion des erreurs de température extérieure.

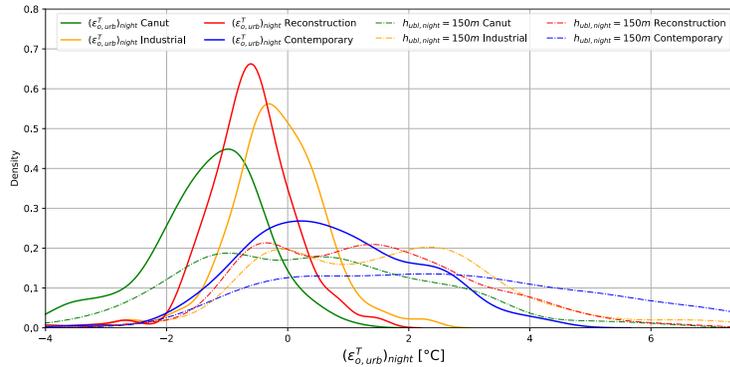


Figure II-17: Distribution de l'erreur de température extérieure entre les prédictions de l'UWG et les mesures pendant la nuit $(\epsilon_{o,urb}^T)_{nuit}$ [les lignes pleines indiquent la paramétrisation finale de l'UWG ($h_{ubl,night} = 30 m$), et les lignes en pointillés indiquent une hauteur de couche limite urbaine de $h_{ubl,night} = 150 m$].

Selon (Oke et al. 2017), l'UBL est la couche de l'atmosphère avec laquelle le milieu urbain échange de la chaleur sensible (Figure II-18, à gauche). La frontière supérieure de l'UBL correspond à la zone d'inversion du profil de température, qui empêche l'air chaud de monter plus haut. Avec cette définition rigoureuse de la hauteur de la couche limite urbaine, la valeur optimale $h_{ubl,night} = 30 m$ semble trop petite pour être physiquement réaliste. La divergence entre les valeurs physiquement réalistes de $h_{ubl,night}$ et la valeur optimale de $h_{ubl,night}$ donnée à UWG pourrait provenir de l'extrême simplicité du modèle de couche limite urbaine dans UWG. En effet l'UBL est modélisée dans UWG comme un volume à température homogène équivalente (Figure II-18, à droite). La température d'équilibre de ce volume résulte des échanges de chaleur sensible avec le tissu urbain, et du renouvellement d'air sur ses frontières latérales. Il semble que la modélisation de l'UBL de UWG se rapproche de celle de (Summers 1964). Il serait donc possible d'utiliser le modèle de (Summers 1964) afin de déterminer le paramètre $h_{ubl,night}$ avec soit une seule valeur pour l'ensemble de la simulation (comme actuellement), soit avec un calcul pour chaque pas de temps de simulation d'UWG.

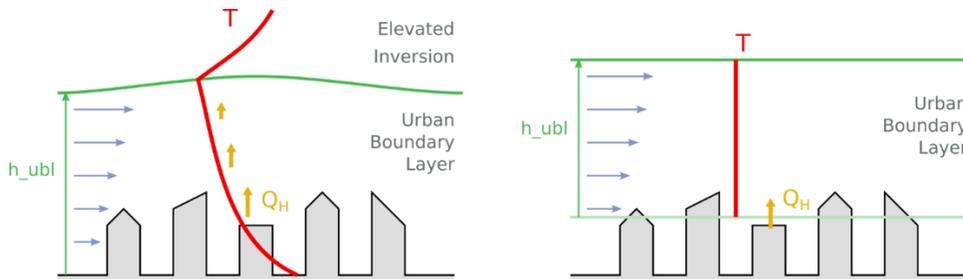


Figure II-18 : l'UBL selon (Oke et al. 2017) (à gauche), et tel que modélisé dans UWG (à droite)

II.7.2.2 Scénarios d'ouverture

L'analyse des résultats des mesures intérieures présentées notamment par la Figure II-7 a permis d'identifier les scénarios d'ouvertures des fenêtres comme étant aussi un des paramètres clés des modèles. Les différents scénarios d'ouverture observés pendant la campagne de mesure ont entraîné des régimes de température intérieure variables. La qualité de la reproduction des scénarios d'ouverture des fenêtres peut être évaluée à deux niveaux : la durée quotidienne de l'état d'ouverture et l'état d'ouverture instantané. Si les durées quotidiennes de l'état d'ouverture des fenêtres sont excessivement longues ou courtes, le bilan thermique quotidien de l'appartement est déséquilibré, ce qui entraîne un biais dans la température moyenne journalière. En outre, la température de l'air intérieur est rapidement ajustée par rapport à la température de l'air extérieur après l'ouverture de la fenêtre. Si une erreur est commise concernant l'état d'ouverture instantané, cela pourrait entraîner une erreur dans les prévisions de température, qui pourrait être élevée en amplitude mais de courte durée.

Le scénario de fonctionnement des stores ou volets est également un paramètre clé de la simulation. La Figure II-19 montre l'impact de la prise en compte de différents scénarios de manipulation des stores et des volets sur les prédictions de température intérieure pour le salon de chaque appartement. Les lignes pleines indiquent la distribution des erreurs de température intérieure obtenue avec les scénarios de stores construits sur la base des entretiens avec les occupants. Les lignes pointillées indiquent la distribution de l'erreur en considérant un scénario de stores « standard ». Dans ce scénario standard, les volets restent fermés tous les jours de la semaine, la nuit de 22h à 7h et le jour de 9h à 17h. Pendant tous les jours du week-end, les volets restent fermés uniquement pendant la nuit, de 23 heures à 9 heures. A l'exception du cas d'étude de la période Industrielle, l'erreur avec les scénarios standard d'ouverture des volets est plus grande que celle avec les scénarios créés à partir des entretiens. Les distributions sont plus étendues et moins centrées sur 0 °C, sauf pour l'appartement de la période Industrielle pour lequel la distribution est plus resserrée mais moins centrée sur 0. Les deux types de scénarios de manipulation des volets pour cet appartement sont assez similaires, ce qui explique cette petite différence dans la distribution des erreurs.

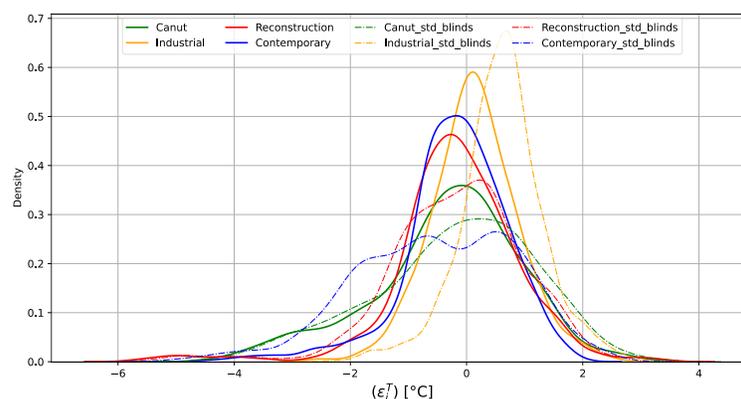


Figure II-19: Distribution de l'erreur de température du salon entre les prédictions de la simulation et les valeurs de température mesurées (ϵ_i^T) pour chaque appartement en fonction des différents scénarios de stores [les lignes pleines indiquent la paramétrisation finale de l'UTTC (scénarios de store construit sur la base des entretiens), et les lignes en pointillés indiquent les résultats avec les scénarios de stores standard].

II.7.3 Mesures requises pour l'étalonnage du modèle

Dans la section précédente, trois paramètres clés de la simulation ont été identifiés. Ces paramètres sont dynamiques et évoluent dans le temps. Si l'on veut réaliser une calibration correcte du modèle de l'UTTC, il faut mesurer les valeurs de ces trois paramètres clés de simulation.

L'une des intentions initiales de la campagne de mesure était de mesurer en continu chaque état d'ouverture avec des capteurs à contact. Outre le fait que les capteurs fixés aux volets n'ont pas du tout fonctionné, il existe une limitation notable du capteur à contact : ces capteurs ne détectent que deux états d'ouverture. Or, les occupants peuvent souhaiter ouvrir partiellement leurs fenêtres pour mieux contrôler le débit d'air ou ouvrir partiellement les volets pour personnaliser finement le compromis entre lumière naturelle et chaleur du soleil. Pour mesurer les ouvertures partielles, il faut disposer de capteurs d'ouverture graduels. Ces capteurs doivent être adaptés aux mesures in situ et donc être peu intrusif. Pour cela, ils doivent avoir une autonomie de plusieurs mois, et doivent enregistrer leurs données de mesures sur une mémoire interne ou les transmettre via un protocole sans fil. La littérature scientifique fait état de l'usage de capteurs progressifs basés sur des accéléromètres (Andersen et al. 2013), et sur des potentiomètres (Schweiker et al. 2012), mais ces capteurs ont une autonomie très limitée (David et al. 2022).

Le capteur approprié pour mesurer en continu la hauteur de la couche limite urbaine est le ceilomètre. En effet, certains ceilomètres peuvent calculer la hauteur de la couche limite à partir des profils verticaux de concentration de particules. Les ceilomètres sont chers et encombrants, et ces instruments nécessitent une vue dégagée du ciel. Ces appareils sont difficilement concevables dans le cadre d'un dispositif de mesure in situ, mais les mesures par ceilomètres pourraient être généralisées à l'échelle de la ville.

II.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté une nouvelle chaîne d'outils de simulation appartenant à une nouvelle catégorie d'outils de simulation dénommée chaînes d'outils thermiques urbains, ou UTTC (pour Urban Thermal Tool Chain). L'outil de simulation a été développé pour simuler avec précision et rapidement les paramètres d'ambiance thermique dans les bâtiments urbains passifs dans des conditions de chaleur estivale. Cet outil modélise avec précision tous les transferts de chaleur qui prévalent autour et à l'intérieur des bâtiments concernés. Cet outil simule également les effets de l'environnement urbain sur les transferts de chaleur dominants.

Pour évaluer la précision de l'UTTC, une campagne de mesures in situ a été menée pendant l'été 2020 dans la ville de Lyon, et les prédictions de l'UTTC ont été comparées aux données de mesure. La comparaison a révélé une capacité remarquable de l'UTTC à prédire avec précision la température et l'humidité de l'air intérieur. Même si un raisonnement scientifique rigoureux limiterait la validité du modèle dans le périmètre des quatre cas d'étude étudiés, il existe une forte probabilité que de nombreuses configurations de bâtiments urbains puissent être simulées avec précision avec l'UTTC.

L'étude de la pertinence de l'UTTC a démontré que la non-application de l'UWG pouvait entraîner une surestimation du potentiel de refroidissement des bâtiments passifs en été. Il y a en effet un biais constant d'environ 1 °C entre les résultats de simulation obtenus avec et sans le modèle UWG. En ce qui concerne les deux appartements à ventilation traversante de cette étude, les résultats ont révélé que l'outil UrbaWind n'a pas eu d'impact significatif sur les prédictions de température intérieure.

Cependant, des tests supplémentaires sur des appartements plus abrités pourraient être nécessaires pour mieux évaluer la pertinence du calcul des coefficients de pression d'UrbaWind.

Le modèle a été évalué sur sa capacité à prédire la température et l'humidité de l'air intérieur. Même si d'autres paramètres, tels que la vitesse de l'air ou la température des surfaces, peuvent influencer le niveau de confort, la température de l'air reste le paramètre prépondérant pour évaluer le confort dans les espaces fermés (Parsons 2002). Nous avons supposé que si la température de l'air est prédite de manière satisfaisante, la possibilité que les températures de surface soient également prédites de manière appropriée est élevée. La vitesse de l'air dans les pièces est plus difficile à évaluer, surtout si les occupants utilisent des ventilateurs individuels.

L'UTTC est maintenant un outil opérationnel et simple d'utilisation capable de répondre aux futurs problèmes de thermiques intérieurs attribués aux canicules dans les villes.

Ces travaux ont fait l'objet d'une participation à la conférence BS21 (Building Simulation) organisée par l'IBPSA (International Building Performance Simulation Association) à Bruges ainsi que d'une publication dans une revue internationale dont voici les références :

- Toesca, A., David, D., Kuster, A., Lussault, M., Johannes, K., 2021. A new building thermal model to a better evaluation of the thermal comfort during heat waves, in: Building Simulation. Presented at the Building Simulation 2021, IBPSA, pp. 3654–3661. <https://doi.org/10.26868/25222708.2021.30900>
- Toesca, A., David, D., Kuster, A., Lussault, M., Johannes, K., 2022. An urban thermal tool chain to simulate summer thermal comfort in passive urban buildings. Building and Environment 215, 108987. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108987>

Chapitre III

Fichiers météorologiques des canicules à venir

III.1 Introduction

Dans le cadre de cette thèse, les études se concentrent sur la thermique d'été, et plus particulièrement sur l'impact des canicules sur les performances des bâtiments. Pour réaliser ce type d'analyse, le modèle (UTTTC, Urban Thermal Tool Chain) précédemment défini a besoin d'être alimenté avec des données météorologiques appropriées.

Au cours des prochaines décennies, il est fort probable qu'une majorité des bâtiments sur terre subiront plusieurs canicules. De plus, les canicules auxquelles chaque bâtiment sera exposé auront probablement des caractéristiques différentes. Certaines dureront plus longtemps, d'autres auront une température plus élevée, etc. La grande variété de canicules auxquelles un bâtiment peut potentiellement être exposé peut-être attribuée à la nature aléatoire des phénomènes météorologiques extrêmes. Elle est également due à l'incertitude sur l'évolution du climat, qui peut être attribuée à la fois à l'incertitude sur l'évolution des émissions de gaz à effet de serre, et aux limites des modèles utilisés pour prédire les évolutions climatiques futures (Machard et al. 2020). Compte tenu de la diversité des canicules auxquelles un bâtiment pourrait être exposé au cours des prochaines décennies, une question se pose : est-il pertinent d'évaluer les performances d'un bâtiment lors de futures canicules en simulant le comportement thermique de ce bâtiment dans les conditions d'une canicule unique ? Du point de vue des auteurs, la plupart du temps, ce n'est pas pertinent. Au lieu de cela, un ensemble de fichiers météorologiques, décrivant un ensemble de canicules, serait nécessaire pour évaluer la diversité des comportements des bâtiments attendus au regard de la diversité des épisodes de canicule qui pourraient survenir à l'endroit où se trouve le bâtiment. Le jeu de canicules doit donc être suffisamment diversifié pour représenter l'ensemble des canicules qui peuvent potentiellement toucher la localité du bâtiment. Il doit aussi être réduit, pour minimiser le nombre de simulations nécessaires à l'évaluation des performances du bâtiment.

Ce chapitre présente une méthodologie pour constituer un jeu de canicules minimum représentatif des futures canicules d'une localité donnée. Il s'agit d'une méthodologie en quatre étapes.

Dans un premier temps, ce chapitre propose une analyse critique des différentes méthodes utilisées dans la littérature pour produire des données météorologiques utilisées pour des simulations thermiques durant les futurs événements extrêmes. Ensuite, une vue d'ensemble de la méthodologie est proposée dans la seconde partie. Une description détaillée de chaque étape est fournie dans les parties suivantes. La description de la méthodologie est illustrée par une application pour la localisation de l'aéroport de Lyon Saint-Exupéry.

III.2 Etat de l'art sur la production de données météorologiques de canicules futures

Cette section constitue un recensement bibliographique, et une analyse critique au regard de notre problématique, des techniques destinées à produire des données météorologiques pour l'évaluation du comportement thermique des bâtiments.

Les données météorologiques couramment utilisées à l'heure actuelle lors de simulations thermiques de bâtiments sont des données représentatives types. Ces données correspondent à une année médiane représentative de la localité du bâtiment. Elles ont été générées avec des techniques statistiques de sélection, appliquées sur des bases de données historiques de mesures météorologiques couvrant plusieurs dizaines d'années. (Herrera et al. 2017) ont réalisé un recensement de ces méthodes de

sélection. Ces méthodes sont identifiées au travers du nom des fichiers météorologiques qu'elles produisent : les Typical Meteorological Year (TMYs) (Hall et al. 1978) (Fernández et al. 2015), les Test Reference Years (TRYs) (Bilbao et al. 2004) (Kershaw, Eames, et Coley 2010), ou encore les International Weather for Energy Calculations (IWEC) (Huang et al. 2014). Les TMYs sont des années synthétiques construites en assemblant des mois types représentatifs. Pour chaque mois de l'année, les données sont sélectionnées à partir de l'année considérée comme la plus "typique" pour ce mois. Par exemple, le mois de janvier peut provenir de 2007, le mois de février de 2012 et ainsi de suite. La sélection se fait sur la base de la température de l'air, de l'irradiation horizontale globale et de l'humidité relative. Ce processus est décrit par la norme EN ISO 15927-4 2005.

Les données météorologiques représentatives types sont basées sur des données de mesures historiques. Elles ne prennent pas en compte les effets du changement climatique. Néanmoins, on peut citer l'initiative intéressante de (Lassandro et Di Turi 2019), qui ont supposé qu'il pouvait exister une similitude entre la variabilité spatiale et la variabilité temporelle du climat. Ils ont étudié des stratégies de rénovation résiliente d'un bâtiment situé à Bari (Italie), en prenant des données météorologiques correspondant à la semaine la plus chaude des fichiers IWEC pour les villes de Bari, Athènes (Grèce) et Tunis (Tunisie), pour représenter l'évolution du climat dans leur localité d'intérêt.

Autrement, pour prendre en compte les effets du changement climatique, les techniques de sélection de données météorologiques types ont été appliquées sur des données de projection climatiques. (Yaqubi et al. 2022) ont créé un fichier de données appelé Future Typical Weather Year (FTWY) pour la ville de Nantes, en utilisant la méthode TMY de la norme EN ISO 15927-4 2005 sur les données de projections climatiques issues de trois modèles de circulation régionale. (Machard et al. 2020) ont utilisé la même méthode sur les données de projections climatiques du projet CORDEX, et ont construit des fichiers météorologiques typique TMY. (Watkins, Levermore, et Parkinson 2011) ont utilisé les données de projections météorologiques du générateur UKCP09 afin de créer des fichiers météorologiques de type TRY. Les auteurs ont généré un fichier TRY par période future de 30 ans (jusqu'en 2100) et par scénario d'émissions de gaz à effet de serre.

Les données météorologiques annuelles types ne sont a priori pas adaptées pour l'étude du comportement thermique des bâtiments lors de vagues de chaleur, même lorsqu'elles sont produites à partir de données de projection climatique. En effet, ces données sont censées représenter une année médiane, qui ne comporte a priori pas les événements extrêmes qui se produisent plus rarement (Guo et al. 2019) (Machard et al. 2020). Des techniques ont alors été développées pour produire des fichiers météorologiques représentatifs d'années extrêmes. Ces techniques ont initialement été développées pour réaliser le dimensionnement des systèmes de chauffage et de climatisation des bâtiments. Elles ont donc été développées sur la base des données météorologiques historiques.

La Design Summer Years (DSY) est obtenue en sélectionnant l'année où la température moyenne d'avril à septembre est la troisième plus chaude sur un période de 20 ans (G J Levermore et Parkinson 2006). De ce fait, statistiquement, les conditions météorologiques décrites pour cette année ont des chances de se produire tous les $\frac{20}{3} \approx 7$ ans. On dit que la DSY a un temps de retour de 7 ans. Les Summer Reference Years (SRYs) utilisent comme base un fichier météo de type TRY. Ils ajustent la température d'air, le rayonnement solaire, la vitesse de vent et la pression atmosphérique de la TRY afin qu'au moins une période de canicules soit présente dans les fichiers (Herrera et al. 2017) (Jentsch, Eames, et Levermore 2015). L'Extreme Meteorological Year (XMY) est basée sur le même principe que la TMY. La différence est que les mois représentatifs sont choisis à partir des valeurs extrêmes de la température d'air durant la période historique, au lieu des valeurs moyennes. Les mois avec les

valeurs les plus élevées (pour l'été) et les plus basses (pour l'hiver) de la période historique sont ensuite combinés pour former une année avec l'été le plus chaud et l'hiver le plus froid. (Guo et al. 2019) ont défini la Typical Hot Year (THY). La THY est sélectionnée parmi les 60 années d'une période historique, elle correspond à l'année où l'environnement thermique intérieur d'un bâtiment de référence est le plus chaud. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle présuppose une conception de bâtiment (géométrie, compositions de parois, régulation des ouvrants, etc.). Or les conditions d'ambiance intérieure dépendent grandement de ces paramètres.

Les techniques de production de données météorologiques annuelles extrêmes ont été adaptées pour être appliquées sur des données de projection climatique. (Eames, Kershaw, et Coley 2011) ont généré des données de type TRY et de type DSY à partir des données de projections du générateur UKCP09. Dans cette étude, le 50^{ème} percentile est choisi pour construire les fichiers TRY, et un percentile plus élevé est utilisé pour générer les fichiers DSY. (Watkins, Levermore, et Parkinson 2013) ont généré des données de Design Reference Year (DRY), en utilisant la méthode de sélection des fichiers TRY, sur des tranches de 30 ans de données de projections du générateur UKCP09, avec des seuils de sélection au 87,5^{ème} percentile pour ne sélectionner que des données extrêmes. (Du, Underwood, et Edge 2012) ont utilisé les mêmes données afin de produire un fichier de type TRY et également deux fichiers de type DRY pour représenter différents extrêmes, le premier basé sur le 85^{ème} percentile et le second plus extrême basé sur le 99^{ème} percentile des températures moyennes de chaque mois. Contrairement à (Watkins, Levermore, et Parkinson 2013), les fichiers DRY de (Du, Underwood, et Edge 2012) sont basés sur les trois mois d'été de Juin à Août.

Les techniques citées jusqu'ici visent à produire des données météorologiques annuelles. Leur mécanisme de sélection se base sur des distributions de moyennes mensuelles de variables météorologiques (température d'air, rayonnement solaire, etc.). Or, dans cette étude, nous nous intéressons aux vagues de chaleur. Les vagues de chaleur sont des épisodes ponctuels, dont la durée peut varier de quelques jours à quelques dizaines de jours. Il n'y a pas d'intérêt à produire des données météorologiques annuelles pour représenter un phénomène si court. De plus, la sélection de données sur la base de statistiques mensuelle n'a pas de sens pour des vagues de chaleur qui commencent rarement le premier jour du mois, pour terminer exactement le dernier jour du mois. Pour sélectionner des vagues de chaleur représentatives d'une localité données, il faut constituer un jeu de données météorologiques contenant des vagues de chaleur, et réaliser une sélection basée sur les caractéristiques de ces vagues de chaleur.

Ce travail a d'abord été réalisé sur la base de données météorologiques historiques. (Tremeac et al. 2012) ont utilisé les données mesurées lors d'une canicule de cinq jours en 2003 à Paris pour simuler l'évolution de l'îlot de chaleur urbain en fonction de plusieurs scénarii d'utilisation de la climatisation. (Falasca et al. 2019) ont utilisé les données météorologiques d'une canicule de 10 jours qui s'est produite en juillet 2015 à Milan, pour évaluer les besoins en climatisation d'un bâtiment. (Ramakrishnan et al. 2017) ont étudié la performance thermique de bâtiments équipés de panneaux en matériaux à changement de phase dans des conditions de canicule à Melbourne en utilisant la canicule de 2009 comme fichier de base. Afin de prendre également en compte les impacts du changement climatique, ils ont construit les données météorologiques de canicule pour 2030 et 2050 en augmentant la température moyenne de la canicule de 2009 de 1°C et 1,5°C respectivement. Ils n'ont pas modifié les autres caractéristiques. Dans ces trois études, le choix des vagues de chaleur est restreint aux vagues de chaleur qui se sont déjà produits dans la localité d'intérêt. Le mécanisme de sélection semble très arbitraire : les vagues de chaleurs sélectionnées correspondent à des vagues de chaleur récentes qui ont marqué les esprits à cause de leurs forts impacts sociétaux.

Des méthodes de sélection de canicules moins arbitraires ont ensuite été développés.

(Zhang et al. 2021) décrit les travaux du groupe de travail sur les données météorologiques de l'annexe 80 du programme EBC (Energy in Buildings and Community) de l'Agence International de l'Energie. Le groupe de travail sélectionne, à partir de données de projections climatiques, trois canicules pour trois périodes temporelles distinctes (période actuelle entre 2001 et 2020, période future moyen terme entre 2041 et 2060 et période future long terme entre 2081 et 2100). Les canicules sélectionnées sont la plus longue, la plus intense et la plus sévère pour chacune des périodes. La durée, l'intensité et la sévérité des vagues de chaleur sont évaluées selon les indicateurs développés par (Ouzeau et al. 2016). Ces indicateurs sont uniquement basés sur l'évolution de la température de l'air. Avec cette méthode, seules les canicules les plus extrêmes sont sélectionnées. Cette méthode est issue des travaux de (Machard et al. 2020) qui ont utilisé des canicules issues de 3 modèles de projections climatiques. Les données météorologiques produites à l'issue de la sélection ont été nommées HWE (HeatWave Event).

(Laouadi et al. 2020) ont défini les Reference Summer Weather Years (RSWY). Les RSWY correspondent à des années durant lesquelles des canicules particulièrement fortes se sont produites. Pour identifier les RSWY, les auteurs calculent d'abord, à partir des données météorologiques disponibles, les valeurs horaires de l'indicateur de confort thermique transient-Standard Equivalent Temperature (t-SET). Sur la base des séries temporelles ainsi générées, les auteurs identifient les canicules, et calculent trois indicateurs pour chaque canicule identifiée : la durée, l'intensité, et la sévérité de la canicule. La définition de ces indicateurs est différente de celle de (Ouzeau et al. 2016). Ensuite, ils agrègent les valeurs de ces trois indicateurs pour chaque année. Les RSWY correspondent aux années pour lesquelles les valeurs des trois indicateurs atteignent leur seconde valeur maximale. La méthode peut ainsi produire trois RSWY, ou moins de RSWY s'il y a concordance entre les années sélectionnées pour plusieurs indicateurs.

Les méthodes de sélection basées sur les caractéristiques des canicules semblent être les méthodes les plus appropriées pour produire des données météorologiques dédiées à l'étude du comportement des bâtiments lors de futures canicules. Cependant, aucune des méthodes existantes ne satisfait pleinement les critères de notre étude.

Tout d'abord, les méthodes de (Machard et al. 2020) et de (Zhang et al. 2021) caractérisent les vagues de chaleur uniquement sur la base de données d'évolution de la température de l'air. Or, le comportement thermique des bâtiments est aussi très dépendant des autres sollicitations météorologiques, telles que le rayonnement solaire, la vitesse du vent, ou la température de voute céleste. Ces caractéristiques doivent être prises en compte dans la sélection des vagues de chaleur.

Ensuite, la sélection des canicules se fait sur des valeurs extrêmes des indicateurs utilisés pour mesurer la force de ces canicules. Les canicules sélectionnées sont des canicules extrêmes. Or l'objectif de notre étude est de produire un jeu de vagues de chaleur représentatif des vagues de chaleur qui peuvent se produire sur le territoire d'étude. Ce jeu de vague de chaleur représentatif doit aussi inclure des vagues de chaleurs moins extrêmes.

III.3 Vue d'ensemble de la méthodologie proposée

La Figure III-1 résume les différentes étapes de la méthodologie proposée. La première étape consiste à collecter des projections météorologiques pour la localité d'intérêt. Ici, le terme projection météorologique fait référence à des prévisions météorologiques à long terme qui prennent en compte

l'effet du changement climatique. La deuxième étape consiste à identifier des canicules dans les projections météorologiques collectées. Cette étape produit un jeu de canicule qui sera appelé le jeu étendu de canicules. La troisième et la quatrième étapes sont destinées à échantillonner les canicules parmi le jeu étendu de canicules. La troisième étape consiste à construire un espace de caractérisation des canicules. Il s'agit d'un espace dans lequel chaque canicule peut être localisée en fonction de ses caractéristiques. Pour finir, la quatrième étape consiste à sélectionner les canicules dans l'espace de caractérisation, de telle sorte que les canicules sélectionnées soient représentatives des canicules du jeu étendu.

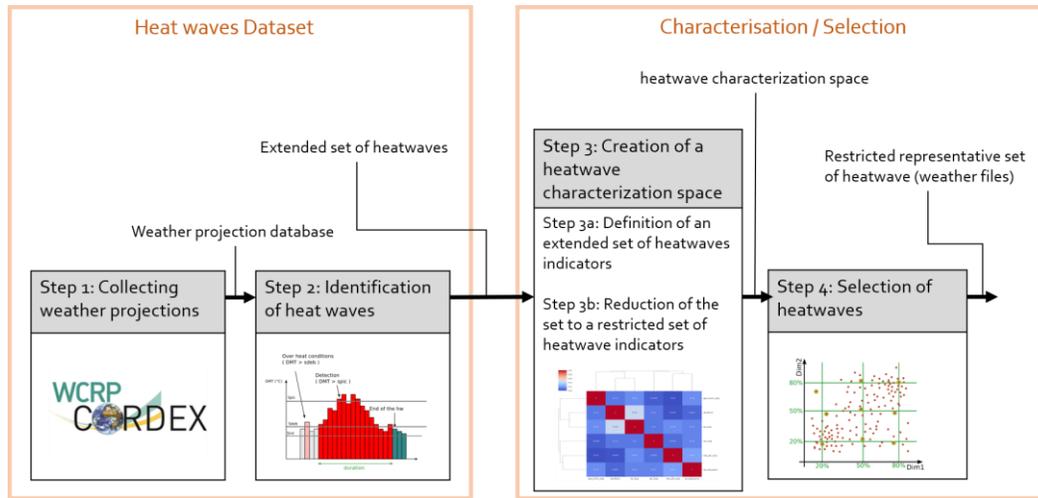


Figure III-1: Plan de la méthodologie

Dans le cadre de cette thèse, la méthodologie en quatre étapes a été appliquée à l'aéroport de Lyon-Saint-Exupéry, en France. Le Tableau III-1 fournit des informations générales sur ce cas d'étude. L'aéroport de Lyon Saint-Exupéry est situé dans une zone rurale, à 30 km de la ville de Lyon, en France. La méthode est appliquée sur une zone rurale, afin que les données météorologiques collectées ne soient pas déformées par le phénomène d'îlot de chaleur urbain qui pourrait se produire dans une zone urbaine. Ainsi, les résultats de la méthode ne dépendront pas de l'évolution du tissu urbain proche. Le phénomène d'îlot de chaleur urbain pourra être modélisé ultérieurement avec des outils dédiés.

Toutes les étapes de la méthodologie ont été implémentées dans le langage de programmation Python.

Tableau III-1: Information générale sur le cas d'étude : Aéroport de Lyon Saint-Exupéry

Nom	Latitude	Longitude	Altitude	Zone horaire
Lyon-Saint-Exupéry	45,7261 45° 43' 34" North	5,09083 5° 5' 27" East	250 m	UTC +1:00 (Europe/Paris) Heure d'été : UTC +2:00 Heure d'hiver : UTC +1:00

III.4 Détail de la méthodologie

III.4.1 Étape 1 : Collecte des données de projection climatique

III.4.1.1 Objectifs et méthode

L'étape 1 consiste à collecter des données projections météorologiques. Les projections météorologiques produites avec la méthode du morphing ne sont pas adaptées à l'étude des futures canicules. En effet, la méthode du morphing produit des données de projection météorologiques qui évoluent avec un schéma similaire, quel que soit le scénario d'évolution du climat. La méthode ne permet pas de considérer les variations de fréquences et d'amplitudes temporelles des événements météorologiques extrêmes telles que les canicules (Belcher, Hacker, et Powel 2005). En revanche, les projections météorologiques produites avec la méthode de descente d'échelle dynamique (Dynamical Downscaling) sont appropriées, puisqu'elles sont produites par des modèles capables de simuler des événements aléatoires (Herrera et al. 2017).

La base de données CORDEX (COordinate Regional Downscaling Experiment) contient des données de projection météorologique produites par la méthode de descente d'échelle dynamique. Dans la base de données CORDEX, chaque projection météorologique correspond à un scénario RCP (Representative Concentration Pathway) et à un modèle. Chaque modèle est la combinaison d'un modèle de circulation globale (Global Circulation Model, GCM), qui produit la projection climatique, et d'un modèle de circulation régionale (Regional Climate Model, RCM) pour la descente d'échelle dynamique. Ainsi, la base de données CORDEX contient une grande variété de projections météorologiques. Cependant, elles ne sont pas toutes exploitables dans le contexte de ces travaux. En effet, les projections météorologiques doivent remplir certains critères pour produire des données de qualités pour la simulation des bâtiments.

Les fichiers météorologiques de simulation de bâtiment contiennent une liste fixe de variables pour lesquelles les données doivent être fournies avec un pas de temps horaire. Mais il n'existe aucune projection météorologique dans la base de données CORDEX qui contienne toutes les variables requises. En outre, le nombre de variables disponibles peut varier considérablement entre les différentes projections météorologiques.

Il existe des techniques pour calculer les variables météorologiques manquantes, mais pour maximiser le degré de confiance dans les variables calculées, une liste minimale de variables pour sélectionner une projection météorologique a été établie. La liste minimum des variables requises est présentée dans les premières colonnes du Tableau III-2. Cette liste est un compromis entre les variables communément disponibles dans la base de données CORDEX et la liste complète des variables nécessaires pour les fichiers météorologiques de simulation de bâtiments. La liste contient trois variables supplémentaires par rapport à la liste minimale de variables proposées par (Machard et al. 2020) : le rayonnement infrarouge incident et les deux composantes de la vitesse du vent, qui sont utilisées pour calculer la direction du vent. Les noms des variables dans le Tableau III-2 suivent le standard CF (Climate and Forecast). La méthodologie proposée par (Machard et al. 2020) a été utilisée pour calculer les variables météorologiques manquantes. Elle est présentée dans l'Annexe 3 : Formules utilisées pour compléter les données météorologiques.

La base de données CORDEX contient très peu de variables disponibles au pas de temps horaire. Les données devront donc être interpolées pour obtenir des données horaires. Là encore, pour minimiser

l'effet de l'interpolation, un pas de temps maximum a été fixé pour chaque variable. Les pas de temps maximum sont énumérés dans la deuxième colonne du Tableau III-2. Une projection météorologique CORDEX ne sera considérée comme appropriée que si les pas de temps auxquels ses variables sont disponibles sont inférieurs ou égaux aux pas de temps maximums indiqués dans le tableau.

Les données météorologiques des futures canicules sont destinées à être utilisées pour l'évaluation absolue de la performance des bâtiments pendant les futures canicules, par opposition à une évaluation comparative avec un comportement de référence du bâtiment, évalué pendant une période historique. Dans ce contexte, les données météorologiques dont le biais a été corrigé sont plus adaptées (Yaqubi et al. 2022). Dans la base de données CORDEX, les données avec une correction du biais ne sont disponibles que pour 3 variables : la température de l'air, l'humidité spécifique de l'air et l'irradiation solaire globale. Seules les projections météorologiques pour lesquelles le biais a été corrigé pour ces 3 variables seront considérées comme appropriées.

La première étape de la méthodologie consiste : (1) à sélectionner les projections météorologiques appropriées avec les trois critères présentés ci-dessus, (2) à télécharger les données météorologiques des projections sélectionnées, (3) à calculer les variables météorologiques manquantes et (4) à interpoler les données linéairement pour obtenir la liste complète des données qui sont requises dans les fichiers météorologiques de simulation.

Tableau III-2: Ensemble minimal de variables utilisé pour filtrer les projections climatiques utilisables pour les simulations

Listes de variables nécessaires	Pas de temps maximum	Disponibilité de la correction du biais
Température de l'air sec [K]	3hrs	Oui
Humidité spécifique [kg/kg]	3hrs	Oui
Pression atmosphérique [Pa]	3hrs	-
Fraction des nuages [%]	3hrs	-
Rayonnement horizontal global [W/m ²]	3hrs	-
Vitesse du vent [m/s]	3hrs	Oui
Précipitations [kg/m ² /s]	3hrs	-
Rayonnement de grande longueur d'onde [W/m ²]	3hrs	-
Vitesse du vent en direction de l'est [m/s]	6hrs	-
Vitesse du vent en direction du nord [m/s]	6hrs	-

III.4.1.2 Application

Le Tableau III-3 montre les résultats de la sélection des projections météorologiques, pour la localité de Lyon St-Exupéry. Le site de l'aéroport de Lyon St-Exupéry est située dans le sous-domaine EURO-CORDEX du projet CORDEX. La sélection des projections météorologiques présentée dans le Tableau III-3 est pertinente pour l'ensemble de ce sous-domaine.

14 projections météorologiques ont été sélectionnées. Elles correspondent à 2 scénarios RCP : RCP4,5 et RCP8,5, et à 7 modèles différents. Les 7 modèles sont une combinaison de 5 GCM distincts et de 2 RCM distincts.

Chaque projection météorologique s'étend de 2007 à 2097. L'ensemble des données de projection météorologique sélectionnées représente donc 1260 années de projections météorologiques.

Tableau III-3: Liste des résultats des projections climatiques collectées pour cette étude.

GCM	RCM	Ensemble	Rcp45	Rcp85
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	RCA4	r1i1p1	X	X
ICHEC-EC-EARTH	RAMCO22E	r1i1p1	X	X
IPSL-IPSL-CM5A-MR	RCA4	r1i1p1	X	X
MOHC-HadGEM2-ES	RAMCO22E	r1i1p1	X	X
MOHC-HadGEM2-ES	RCA4	r1i1p1	X	X
MPI-M-MPI-ESM	RCA4	r1i1p1	X	X
ICHEC-EC-EARTH	RCA4	r12i1p1	X	X

III.4.2 Étape 2 : Identification des canicules

III.4.2.1 Objectifs et méthode

La deuxième étape de la méthodologie consiste à identifier les canicules dans les projections météorologiques. Il n'existe pas de définition universelle de la canicule (Perkins et Alexander 2013) mais la littérature fait fréquemment référence à quatre méthodes d'identification des canicules : la méthode " Spic, Sdeb, Sint " de (Ouzeau et al. 2016), la méthode " IBM " de (Pascal et al. 2006), la méthode Excess Heat Factor (" EHF ") de (Nairn et Fawcett 2014) et la méthode HeatWave Magnitude Index (" HWMI ") de (Russo et al. 2014). Le fonctionnement des 4 méthodes d'identification est précisé dans l'Annexe 4 : Détails sur les méthodes de détections de canicules.

Pour éviter les incohérences dans le jeu de données de canicules, un choix doit être fait entre les quatre méthodes d'identification. Mais il n'est pas possible de fonder ce choix uniquement sur la description des quatre mécanismes d'identifications. C'est la raison pour laquelle, il a été décidé de réaliser d'abord l'identification des canicules avec les quatre méthodes et ensuite de choisir la plus appropriée à partir d'une analyse du jeu de données produit par chaque méthode.

III.4.2.2 Application/illustration

Le Tableau III-4 contient une description statistique de l'ensemble des données de canicules produites par les quatre méthodes d'identification de canicules pour la localisation de Lyon Saint-Exupéry. Pour chaque jeu de canicules, la première colonne contient le nombre moyen de canicules identifiées par an, la deuxième colonne contient la durée moyenne des canicules, la troisième colonne contient la valeur moyenne de la température moyenne pendant les canicules et la quatrième colonne contient le nombre absolu de canicules identifiées.

Les méthodes "EHF" et "HWMI" ont identifié un nombre de canicules nettement plus important que les deux premières méthodes. Leurs critères d'identification sont moins restrictifs, avec des valeurs seuils plus faibles. En conséquence, la température moyenne pendant une partie considérable de ces canicules est modérée. Les risques d'inconfort et de problèmes de santé étant très faibles durant ces canicules modérées, les méthodes "EHF" et "HWMI" ne sont pas retenues.

Tableau III-4: Nombre annuel moyen, température de l'air moyenne, durée des canicules et nombre total de canicules identifiées pour chaque méthode de détection.

Méthodes de détection	Nombre annuel moyen de canicules	Température moyenne de l'air	Durée moyenne	Nombre total de canicules
Spic, Sdeb, Sint	1,89	28,3°C	14,5 j	2384
IBMn, IBMx	1,77	30,3°C	6,3 j	2229
EHF	6,06	24,8°C	11,1 j	7641
HWMI	6,65	25,6°C	6,9 j	8375

La distinction entre la méthode "Spic, Sdeb, Sint" et la méthode "IBM" est plus subtile. Ces deux méthodes ont identifié à peu près le même nombre de canicules et une analyse plus approfondie de leurs jeux de données révèle que, dans 90% des cas, les canicules identifiées par les 2 méthodes correspondent au même événement météorologique extrême : la même période de la même projection météorologique. La différence majeure entre les 2 méthodes est le critère qui situe le début et la fin de la canicule. Ce critère est moins restrictif pour la méthode "Spic, Sdeb, Sint", donnant ainsi des canicules beaucoup plus longues (8 jours en moyenne) et une température moyenne de l'air plus basse (2°C en moyenne). La méthode "IBM" identifie le "cœur" des canicules, c'est pourquoi les canicules produites sont en moyennes plus chaudes et plus courtes. Bien qu'elles révèlent certaines spécificités des deux méthodes d'identification des canicules, ces observations n'ont pas motivé le choix entre les méthodes.

Finalement, c'est la méthode "IBM" qui a été retenue. La raison principale de ce choix est que la méthode IBM est la méthode utilisée par le système français d'alertes canicule et santé (Pascal et al. 2006), (Laaidi et al. 2012).

La deuxième étape de la méthodologie, appliquée à Lyon St Exupéry, a permis de construire un ensemble de données contenant 2229 canicules (ligne surlignée en vert dans le Tableau III-4).

III.4.3 Observation des canicules identifiées

Cette partie ne constitue pas une étape de la méthodologie mais permet d'observer certaines caractéristiques des 2229 canicules à venir qui ont été identifiées par la méthode "IBM" dans l'étape précédente.

Les trois figures suivantes montrent les boîtes à moustache qui représentent l'évolution jusqu'à la fin du siècle de la fréquence, de la température moyenne, et de la durée des canicules pour les scénarios RCP4,5 (en bleu) et RCP8,5 (en orange). Les boîtes à moustache sont calculées pour des sous-ensembles de canicules correspondant chacun à une période de 15 ans et à un scénario RCP. Les moustaches des boîtes à moustache représentent les 5^{ème} et 95^{ème} percentiles des caractéristiques étudiées.

La Figure III-2 concerne la fréquence des canicules, c'est-à-dire le nombre de canicules détectées par an. En moyenne, les projections avec le scénario RCP8.5 prévoient quasiment 6 fois plus de canicules à la fin du siècle par rapport à la période 2007/2022. Pour le RCP4,5, c'est plus de 2,6 fois plus de canicules détectées d'ici 2100. L'augmentation du nombre de canicules annuelles semble être similaire pour les deux scénarios RCP jusqu'en 2050. Par la suite, il semble y avoir une stabilisation de l'augmentation de la fréquence dans le cas du RCP4.5.

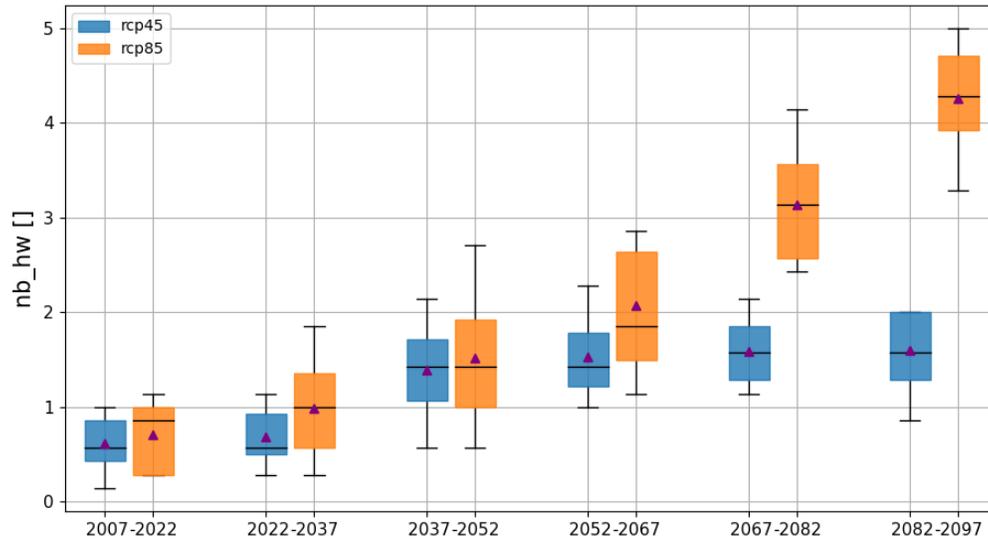


Figure III-2: Nombre annuel de canicules détectées pour chaque période de 15 ans avec le scénario RCP4.5 en bleu et le scénario RCP8.5 en orange. La moyenne de chaque boxplot est représentée par un triangle violet. Les moustaches représentent les 5^{ème} et 95^{ème} percentiles.

La Figure III-3 montre l'évolution de la température moyenne des canicules. Les résultats des projections climatiques pour les deux scénarios RCP montrent une augmentation des températures moyennes des canicules dans le temps. En moyenne, elles augmentent de 1,2°C pour le RCP 8,5, et de 0,5°C pour le RCP 4,5, entre le début et la fin du siècle. Pour le RCP8,5, ce ne sont pas les moyennes qui augmentent le plus (triangle violet) mais les extrêmes avec notamment des températures moyennes supérieures à 34°C pour 5% des canicules d'ici 2100 (moustache haute de la dernière boîte à moustache).

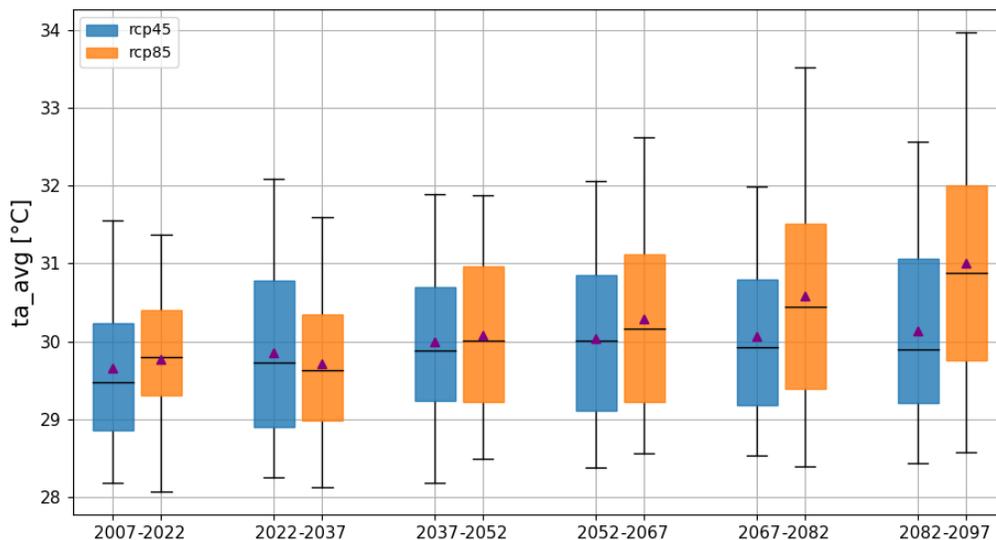


Figure III-3: La température moyenne des canicules détectées pour chaque période de 15 ans avec le scénario RCP 4,5 en bleu et le scénario RCP 8,5 en orange. La moyenne de chaque boxplot est représentée par un triangle violet. Les moustaches représentent les 5^{ème} et 95^{ème} percentiles.

La Figure III-4 montre l'évolution de la durée des canicules. En moyenne, la durée des canicules issues des projections climatiques augmente de 2 jours et demi entre le début et la fin du siècle pour le RCP 8,5. Pour le RCP4,5, elle augmente en moyenne de 1,4 jours. Sur les 2 dernières périodes, la durée des 5 % de canicules les plus longues augmente très fortement et atteint plus de 20 jours pour le RCP 8,5 (moustache haute de la dernière boîte à moustache).

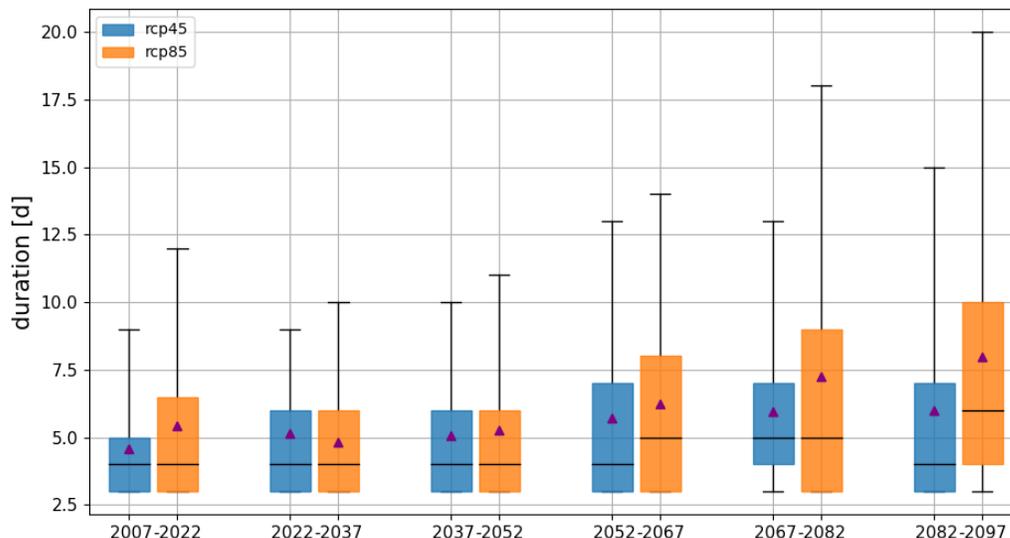


Figure III-4: Durée des canicules détectées pour chaque période de 15 ans avec le scénario RCP 4,5 en bleu et le scénario RCP 8,5 en orange. La moyenne de chaque boxplot est représentée par un triangle violet. Les moustaches représentent les 5^{ème} et 9^{ème} percentiles.

La Figure III-5 montre la probabilité qu'un jour de l'année soit caniculaire en fonction du scénario RCP considéré, et pour différentes périodes temporelles. Les axes des abscisses sont les jours d'une année (à partir de Mai jusqu'à Novembre). La figure présente 2 courbes pour les données historiques (période entre 1980 et 2007) : la courbe en bleu pointillé pour les canicules détectées sur les données mesurées à la station Lyon Bron, et la courbe en orange pointillé sur les données historiques simulées du projet CORDEX (tous modèles confondus). Le graphique de gauche présente les résultats pour les canicules issues du scénarios RCP4.5 et celui de droite les canicules issues du scénarios RCP8.5. Les données des canicules futures ont été séparées en 3 périodes de 30 ans. Le début du siècle entre 2007 et 2037 est tracé en vert, le milieu du siècle entre 2037 et 2067 en rouge et la fin du siècle entre 2067 et 2097 en violet.

La Figure III-5 permet d'observer que les probabilités de canicules augmentent par rapport à la période historique pour les deux scénarios RCP étudiés. Pour toutes les périodes et scénarios considérés, la probabilité de canicules est la plus forte pendant la période entre fin Juillet et début Août.

Les deux courbes de probabilité représentant la période historique sont assez similaires ce qui permet de dire que les projections du projet CORDEX sont en effet capable de modéliser les canicules.

Pour le RCP4.5, les premières canicules arrivent toujours autour du 1^{er} Juin peu importe la période temporelle. Par contre, pour le milieu et la fin du siècle, les dernières canicules peuvent arriver de plus en plus tard dans l'année : jusqu'à fin Septembre pour la fin du siècle contre début Septembre pour le début du siècle.

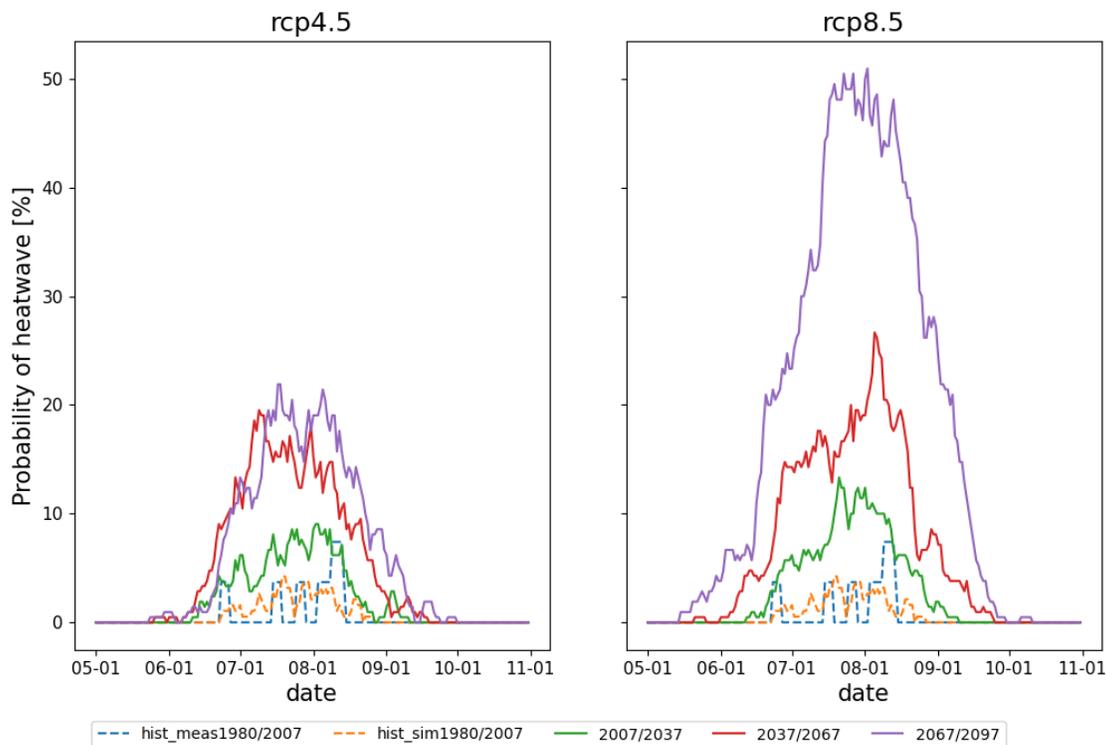


Figure III-5 : Probabilité qu'un jour de l'année soit caniculaire (pour le rcp 4.5 à gauche et pour le rcp8.5 à droite). Les courbes représentent différentes périodes temporelles. Les lignes pleines représentent les canicules futures, les lignes pointillées les canicules historiques.

Pour le RCP8.5, les jours caniculaires commencent de plus en plus tôt dans l'année. Lors de la période 2067/2097, les premières canicules commencent aux alentours de mi-mai tandis qu'elles commencent plutôt autour de mi-juin pendant la période 2007/2037. Pareillement que pour le RCP4.5, les derniers jours de canicules semblent arriver de plus en plus tard dans l'année. Les dernières canicules arrivant début Octobre à la fin du siècle contre début Septembre au début du siècle. La période de probabilité de canicule s'élargit d'une durée de quasiment deux mois entre le début et la fin du siècle.

La comparaison entre les deux scénarios RCP pour les mêmes périodes futures révèle que la probabilité de canicules est plus élevée pour le scénario RCP8.5. Cette différence est de plus en plus importante dans le temps. A la fin du siècle, la probabilité que la fin juillet et le début août soit caniculaire est d'environ 20% pour le RCP4.5 tandis qu'elle atteint 50% pour le RCP8.5, soit 1 chance sur 2 que ces jours soient caniculaires.

III.4.4 Étape 3 : Caractérisation des canicules

III.4.4.1 Objectifs et méthode

La troisième étape de la méthodologie consiste à définir l'espace de caractérisation des canicules. Il s'agit d'un espace pour lequel chaque dimension correspond à un indicateur de canicule. Chaque indicateur de canicule quantifie une caractéristique des canicules. La troisième étape consiste donc à établir une liste d'indicateurs de canicule pertinents.

(Ouzeau et al. 2016) définissent un espace de caractérisation de canicule à trois indicateurs : la durée, la température maximale et l'intensité globale (ou sévérité) de la canicule. Cet espace de caractérisation à trois dimensions permet une représentation graphique de la population des canicules, illustrée dans la Figure III-6 avec les données des canicules pour la localisation de Lyon St Exupery. Dans ce graphique, la taille de la bulle indique l'intensité globale de la canicule, et la couleur de la bulle est définie en fonction de l'année de la canicule. Cet espace de caractérisation n'est pas satisfaisant, car les trois indicateurs sont uniquement basés sur l'évolution de la température de l'air pendant les canicules. Or, comme il l'a été mentionné dans l'introduction de ce chapitre, le comportement thermique des bâtiments résulte également d'autres paramètres météorologiques tels que le rayonnement solaire, la température du ciel et la vitesse du vent. Un ensemble plus large d'indicateurs, basé sur ces variables, est nécessaire pour évaluer la diversité des canicules (Ji et al. 2022).

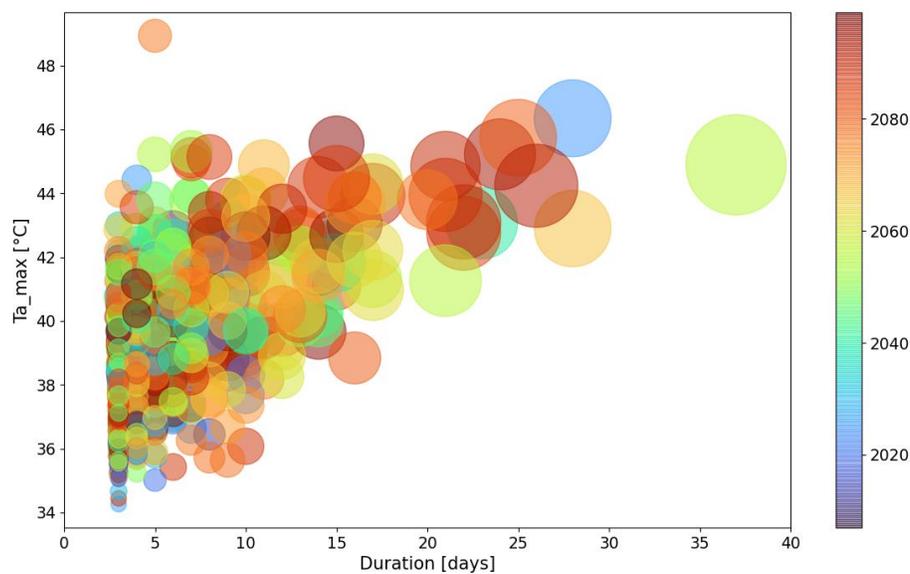


Figure III-6: Espace de caractérisation proposé par Ouzeau et al. (2016) pour les canicules détectées avec la méthode "IBM" pour le scénario RCP 4.5 dans la localisation de l'aéroport de Lyon Saint-Exupéry. Les prédictions météorologiques de tous les modèles sont mélangées dans cette figure. La barre de couleur indique l'année de chaque canicule. La taille de la bulle représente l'intensité globale de la canicule.

Etant donné la quantité de données disponibles pour chaque canicule, il y a presque une infinité de possibilités d'indicateurs de canicules. L'étape 3 commence par la définition d'une liste arbitraire d'indicateurs.

La liste d'indicateurs proposée dans la présente étude est composée de 3 groupes. Le premier groupe d'indicateurs contient la durée de canicule, le jour de l'année correspondant au premier jour de la canicule et des statistiques de base calculées sur les valeurs des différentes variables météorologiques. Les statistiques de base sont la valeur moyenne et la valeur maximale durant la période de canicule (avg/max) les valeurs moyennes des maximums et minimums journalier (dmin_avg/dmax_avg), la valeur moyenne de l'amplitude journalière (damp1_avg), les valeurs moyennes pendant les périodes nocturnes et les périodes diurnes (nighttime/daytime), et la valeur moyenne pendant la semaine précédant la canicule (avg_prior). Ici la nuit est fixée arbitrairement entre 22h et 9h et le jour est fixé

entre 10h et 21h. Il n'est pas pertinent de calculer toutes ces statistiques pour toutes les variables météorologiques. En effet, certaines statistiques représentent des grandeurs qui n'affectent pas le comportement thermique d'un bâtiment. Le Tableau III-5 indique les statistiques qui ont été calculées pour chaque variable météorologique.

Tableau III-5: Premier groupe d'indicateurs de la série étendue d'indicateurs

Données météo	avg	max	damp_avg	dmin_avg/dmax_avg	nighttime/daytime
Température de l'air sec [°C]	x	x	x	x	x
Humidité spécifique [kg/kg]	x				
Humidité relative [%]	x				x
Température du ciel [°C]	x				x
Rayonnement horizontal global [W/m ²]	x				
Rayonnement horizontal direct [W/m ²]	x				
Couverture nuageuse	x				
Vitesse du vent [m/s]	x				x
Précipitations [kg/m ² /s]	x	x			

Le deuxième groupe d'indicateurs est composé d'indicateurs de potentiel de rafraîchissement. Les indicateurs de potentiel de rafraîchissement quantifient les opportunités offertes par les conditions météorologiques pour qu'un bâtiment adopte des stratégies de rafraîchissement passif. Il existe quatre indicateurs de potentiel de rafraîchissement pour les quatre stratégies passives communes : rafraîchissement radiatif (cp_rad), protection solaire (cp_sol), rafraîchissement par évaporation (cp_humid), et ventilation naturelle (cp_nv). Leurs définitions sont représentées schématiquement dans la Figure III-7. Le potentiel de rafraîchissement radiatif est la valeur moyenne de la différence entre la température nocturne de l'air et la température nocturne du ciel. Le potentiel de rafraîchissement par protection solaire est le rapport entre le rayonnement solaire direct horizontal total (rsw_dirh) et le rayonnement solaire global horizontal total (rsw_hg). Le potentiel de rafraîchissement par évaporation est la valeur moyenne de la différence en humidité relative entre un air saturé (100%) et l'air extérieur. Le potentiel de rafraîchissement par ventilation naturelle est la différence positive moyenne entre la température moyenne quotidienne de l'air (Daily Mean Temperature, DMT) et la température instantanée de l'air.

Le troisième groupe d'indicateurs est composé d'indicateurs d'intensité globale (parfois aussi appelé sévérité). Les indicateurs d'intensité globale ont été élaborés en même temps que les méthodes d'identification des canicules. 3 indicateurs d'intensité de canicule ont été retenus : intensity_spic défini par (Ouzeu et al. 2016) associé à la méthode d'identification " Spic, Sdeb, Sint ", intensity_ehf défini par (Nairn et Fawcett 2014) associé à la méthode d'identification " EHF " et intensity_hwmi défini par (Russo et al. 2014) associé à la méthode d'identification " HWMI ".

Cette première liste d'indicateurs constitue la liste initiale étendue d'indicateurs.

Maintenant qu'une liste initiale étendue d'indicateurs a été établie, une analyse de la corrélation entre les valeurs des indicateurs pour l'ensemble des canicules est réalisée. Il y a deux objectifs à cette analyse de corrélation. Le premier est de réduire le nombre d'indicateurs en éliminant les indicateurs redondants. Si les valeurs de deux indicateurs sont fortement corrélées, cela signifie que la manière dont ils différencient les canicules est similaire et il n'est donc pas nécessaire de garder les deux

indicateurs dans la liste. Le deuxième objectif est d'obtenir des informations sur la présence éventuelle de tendances dans les caractéristiques des différentes canicules. Une fois que les indicateurs redondants ont été retirés de la liste, il ne reste plus que des indicateurs indépendants. Le nombre d'indicateurs indépendants mesure le degré d'indépendance entre les différentes caractéristiques de canicule. Plus ce degré d'indépendance est élevé, plus le nombre de canicules nécessaires pour représenter la diversité des canicules sera élevé.

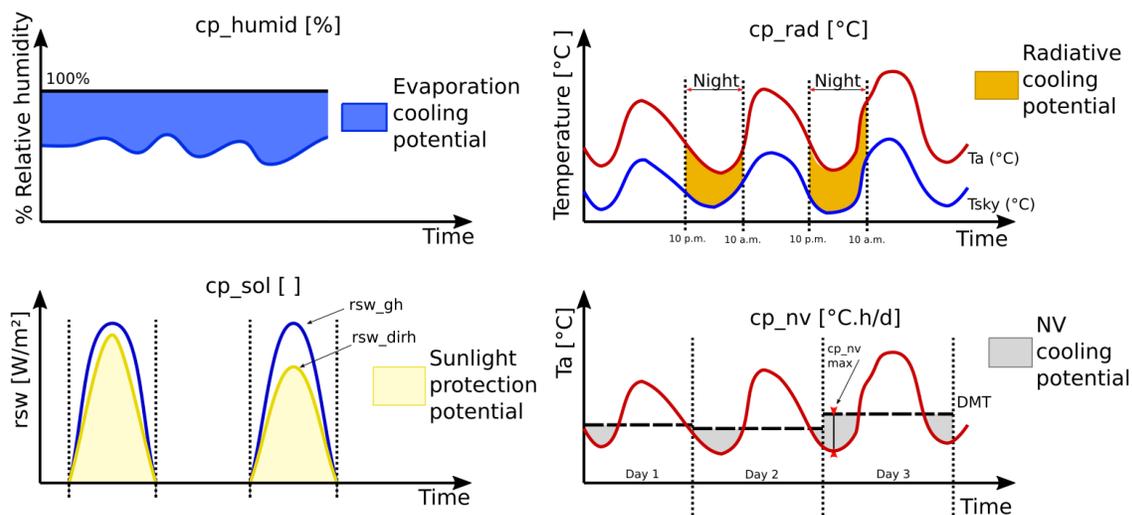


Figure III-7: Potentiel de refroidissement (par évaporation en haut à gauche, par protection directe contre le rayonnement en bas à gauche, par rayonnement thermique nocturne en haut à droite et par ventilation naturelle en bas à droite)

Une méthode graphique est proposée pour effectuer l'analyse de corrélation. Elle consiste à dessiner une matrice de corrélation ordonnée, et à identifier des groupes d'indicateurs fortement corrélés au sein de cette matrice. Une matrice de corrélation ordonnée est une matrice de corrélation pour laquelle la position des indicateurs est arrangée de manière à rapprocher les indicateurs fortement corrélés. La matrice de corrélation est calculée avec la valeur absolue de la corrélation de Pearson. La position des indicateurs dans la matrice est ordonnée à l'aide d'une technique de regroupement (ou clustering). Une technique de clustering est la combinaison d'une métrique entre éléments individuels et d'une méthode de liaison entre groupes. La métrique entre les éléments individuels choisie ici est la valeur absolue de la corrélation de Pearson. La présente méthodologie ne recommande pas de méthode de liaison. L'utilisateur est invité à tester différentes méthodes, et à sélectionner celle pour laquelle la matrice résultante permet la meilleure identification visuelle des groupes d'indicateurs fortement corrélés. Une fois les groupes d'indicateurs fortement corrélés identifiés, un indicateur est retenu dans chaque groupe. Les autres indicateurs sont retirés de la liste, ils sont redondants.

Ensuite le nombre d'indicateurs est encore réduit en retirant les indicateurs non significatifs. Les indicateurs non significatifs sont des indicateurs pour lesquels l'étendue des valeurs est suffisamment étroite, de sorte que les variations de leurs valeurs ne peuvent pas entraîner de changements significatifs dans les performances du bâtiment. L'identification des indicateurs non significatifs est basée sur la représentation graphique de la distribution des valeurs des indicateurs. Il appartient à l'utilisateur de déterminer, en fonction de son degré d'expérience du comportement thermique des bâtiments, quelle variable est non significative et quelle variable ne l'est pas.

III.4.4.2 Application/illustration

La valeur de tous les indicateurs a été calculée pour toutes les canicules contenues dans l'ensemble étendu des canicules de Lyon St Exupéry. Différentes méthodes de liaison (Average, Ward, Single, Complete, Weighted, Centroid, Median) ont été testées pour ordonner les indicateurs dans la matrice de corrélation. Les groupes d'indicateurs fortement corrélés générés par les différentes méthodes sont très similaires. La matrice de corrélation ordonnée de la Figure III-8 a été obtenue avec la méthode de liaison "Single". Avec cette méthode, la distance entre deux clusters correspond à la distance entre les 2 éléments les plus proches. Deux clusters fusionnent lorsque cette distance est la plus petite par rapport aux autres fusions possibles.

Après une inspection visuelle de la matrice, dix groupes d'indicateurs fortement corrélés ont été arbitrairement délimités. Ces groupes sont identifiables par un rectangle au trait épais dans la Figure III-8.

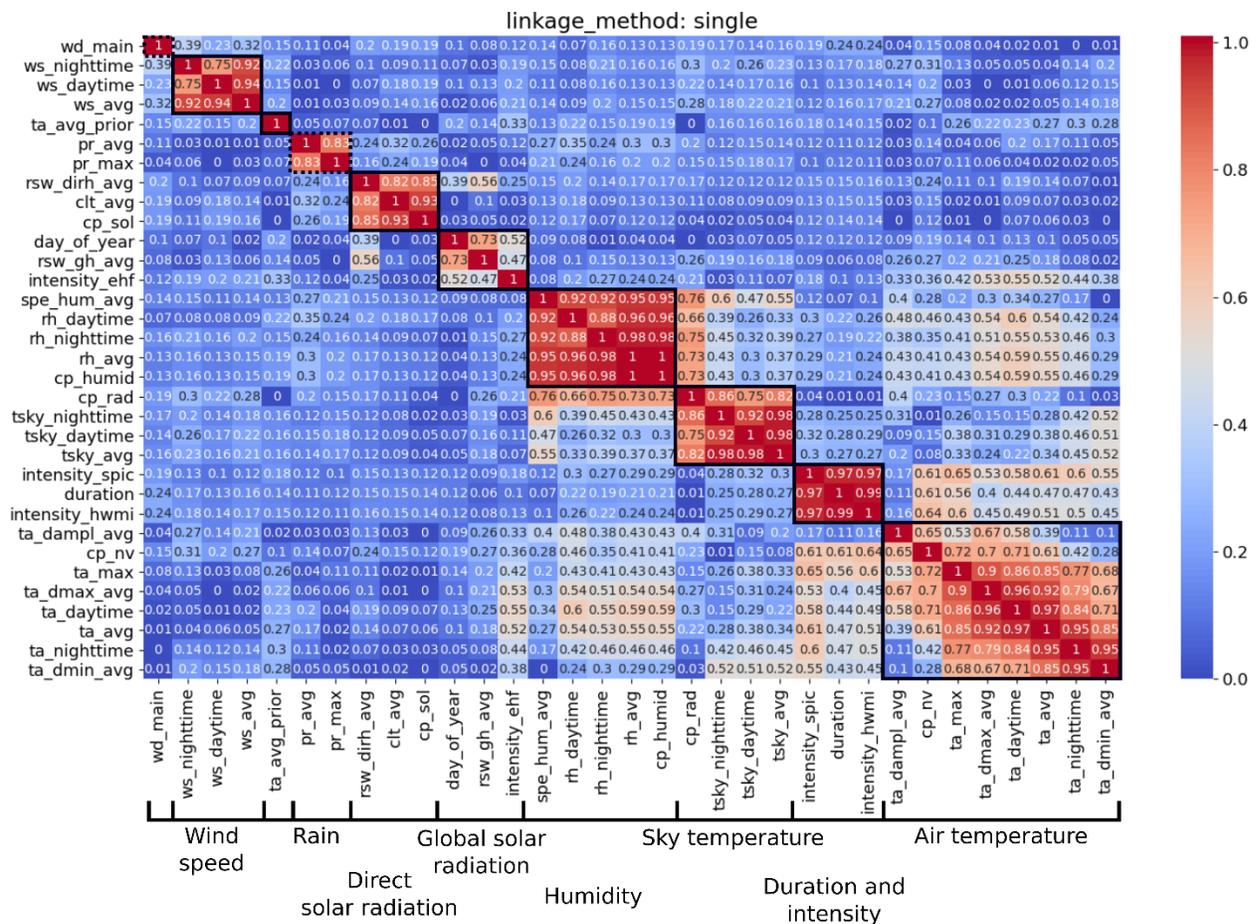


Figure III-8: Matrice de corrélation (en valeurs absolues) entre les différents indicateurs de canicule. Les corrélations fortes sont indiquées en rouge, et les faibles en bleu. Les rectangles noirs représentent les groupes d'indicateurs fortement corrélés. Les noms des groupes sont donnés en bas de la figure. Les rectangles en pointillés représentent les groupes non significatifs.

Il semble qu'il n'y ait pas de réel besoin de calculer plusieurs statistiques pour chaque variable météorologique, car ces statistiques sont redondantes. En effet, la plupart des groupes contiennent toutes les statistiques relatives à une ou deux variables météorologiques. Pour des raisons de

commodité, chaque groupe d'indicateurs est nommé en fonction de l'une des variables météorologiques qui lui sont associées. Les noms sont affichés au bas de la Figure III-8.

Il est intéressant de noter que la durée de canicule ("duration") et les indicateurs d'intensité ("intensity_hwmi" et "intensity_spic") appartiennent au même groupe. Cela révèle que les indicateurs d'intensité mesurent principalement la durée de la canicule et modulent légèrement cette durée en fonction des valeurs de la température de l'air. En d'autres termes, l'utilisation de l'un de ces indicateurs d'intensité pour décrire les canicules n'apporte que peu d'informations si les indicateurs de durée et de température moyenne de l'air sont déjà utilisés. Cette corrélation est visible dans la Figure III-6, où il est clair que toutes les canicules avec l'intensité la plus élevée (bulles plus grandes) correspondent aux canicules les plus longues (sur le côté droit du graphique).

La faible corrélation entre le rayonnement solaire global et le rayonnement solaire direct était inattendue. Elle révèle les deux mécanismes distincts qui affectent le rayonnement solaire. L'irradiation solaire globale est liée à la période de l'année où se produisent les canicules. Le rayonnement solaire global est maximal lorsque la canicule se produit en juin. Il diminue lorsque la canicule se produit à la fin de l'été, car la position du soleil est en moyenne plus basse. Quant à la quantité de rayonnement solaire direct, elle semble être plus affectée par la présence de nuages dans le ciel que par la période de l'année.

Chaque indicateur de potentiel de rafraîchissement est basé sur une ou deux variables météorologiques. Les indicateurs de potentiel de rafraîchissement appartiennent au groupe de ces variables météorologiques associées. Le potentiel de rafraîchissement par évaporation ("cp_humid") appartient au groupe de l'humidité relative. Le potentiel de rafraîchissement par protection du rayonnement solaire direct ("cp_sol") appartient au groupe du rayonnement solaire direct. L'indicateur "cp_rad" est fortement corrélé avec le groupe de température du ciel. Mais il est également fortement corrélé avec le groupe de l'humidité. La corrélation entre le groupe de température de ciel et le groupe de l'humidité s'explique par le fait que la température de ciel se rapproche de la température de l'air (valeurs plus élevées), lorsque le taux d'humidité de l'air est plus élevé.

Pour chaque groupe d'indicateurs, un indicateur a été désigné comme l'indicateur représentatif du groupe. Le choix s'est fait de manière arbitraire. Ici, la valeur moyenne de la variable météorologique du groupe a été systématiquement choisie lorsque ce choix était possible. La liste des indicateurs indépendants est fournie dans le Tableau III-6.

La Figure III-9 montre la distribution des valeurs des dix indicateurs indépendants. Les 5^{ème} et 95^{ème} percentiles sont donnés dans le Tableau III-6. Deux indicateurs non significatifs ont été identifiés : les précipitations maximales et la direction principale du vent.

Le 95^{ème} percentile des valeurs de précipitations maximales est de 2,5 mm/h. Selon Météo-France, une précipitation peut être considérée comme une pluie faible et légère lorsque son débit est inférieur à 3 mm/h. Ainsi, pendant les canicules, les précipitations maximales sont très faibles, et on ne s'attend qu'à de très faibles effets de la pluie sur le comportement thermique des bâtiments.

La distribution des valeurs de la direction principale du vent révèle deux directions principales : du nord au sud et du sud au nord. Ces directions sont opposées l'une à l'autre. La direction du vent affecte principalement les débits de ventilation naturelle dans les bâtiments traversants. Dans la plupart des cas, l'effet de l'écoulement du vent sur le débit de ventilation naturelle est presque symétrique selon la direction du vent. Deux directions opposées se traduiraient donc par un débit similaire. Les deux directions principales du vent auraient donc des effets thermiques similaires sur les bâtiments.

Les canicules peuvent donc finalement être caractérisées par un espace composé des huit indicateurs qui sont cochés dans la dernière colonne du Tableau III-6.

Tableau III-6: Liste des indicateurs indépendants et valeurs des 5^{ème} et 95^{ème} percentiles. La dernière colonne indique les indicateurs significatifs.

Indicateur	Nom de variable	Unité	Q5	Q95	Significatif
Précipitations maximales	pr_max	mm/h	0	2,5	
Température d'air moyenne	ta_avg	°C	28,36	32,99	X
Durée	duration	Days	3	16	X
Direction principale du vent	wd_main	°	-	-	
Vitesse moyenne du vent	ws_avg	m/s	1,83	4,37	X
Rayonnement solaire global horizontal moyen	rsw_gh_avg	W/m ²	207,03	321,33	X
Potentiel de rafraîchissement par protection solaire	cp_sol	/	0,41	0,92	X
Température moyenne du ciel	tsky_avg	°C	10,14	18,6	X
Humidité relative moyenne	rh_avg	%	26,99	57,34	X
Température moyenne avant la canicule	ta_avg_prior	°C	22,24	30,37	X

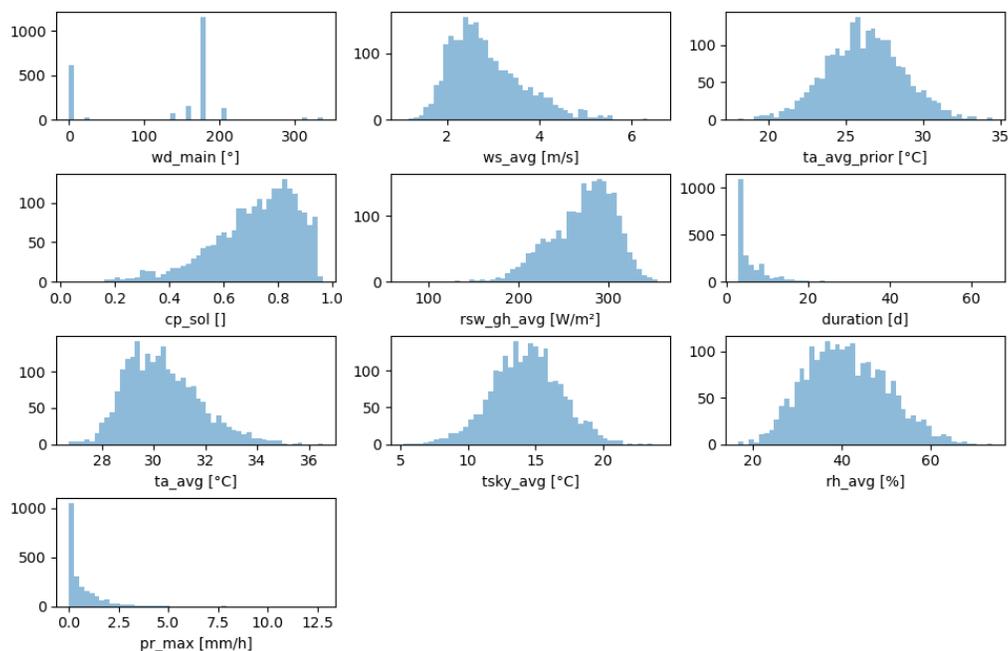


Figure III-9: Histogrammes des indicateurs indépendants pour l'ensemble de données de canicules identifiées

III.4.4.3 Comparaison des résultats de la méthode avec une analyse en composantes principales

L'identification des indicateurs indépendants a été réalisée à l'aide d'une analyse de matrice de corrélation (AMC). Au lieu de cela, cette identification aurait pu être effectuée avec une analyse en composantes principales (ACP). L'AMC implique des décisions arbitraires de la part de l'utilisateur, comme la délimitation des groupes d'indicateurs. L'ACP est une technique plus rationnelle, elle est

moins sensible aux décisions de l'utilisateur. La réalisation d'une ACP sur l'ensemble étendu des indicateurs et la comparaison des résultats de l'ACP avec ceux de l'AMC peuvent permettre d'évaluer la pertinence des résultats de l'AMC.

La composante principale (PC) d'un ensemble de données, est la combinaison linéaire de variables, pour laquelle la variance des données est maximale. Une ACP détecte les composantes principales de manière itérative, de telle sorte que toutes les PC soient indépendantes les unes des autres (la corrélation entre les valeurs des PC est faible). Lors de la détection d'une nouvelle PC, la variance de l'ensemble des données qui est expliquée par la liste des PC augmente. Le processus itératif s'arrête lorsque cette augmentation devient négligeable.

Une ACP a été réalisée sur le jeu de données contenant les valeurs de tous les indicateurs, pour toutes les canicules. L'ACP a fourni une liste de combinaisons linéaires indépendantes d'indicateurs. Cette liste peut être comparée à la liste d'indicateurs indépendants produite par l'AMC.

L'ACP a été exécutée jusqu'à ce que 89 % de la variance totale de l'ensemble de données soit expliquée par les PC. À ce stade, huit PC ont été sélectionnées. Cela confirme le haut niveau d'indépendance entre les indicateurs. Le nombre de PC (8) est comparable au nombre d'indicateurs indépendants (10) sélectionnés avec l'AMC.

Le Tableau III-7 révèle les trois principaux contributeurs des huit CP. Pour presque toutes les CP, les trois principaux contributeurs appartiennent au même groupe d'indicateurs indépendants identifiés dans l'AMC. Les noms des groupes correspondants sont indiqués dans la dernière colonne du tableau. Chaque groupe n'apparaît qu'une seule fois. Il existe un lien direct entre les PC et les indicateurs indépendants. L'ACP confirme la pertinence des résultats de l'AMC.

Tableau III-7: Composition des composantes principales de l'ACP

	1 st	2 nd	3 rd	Groupe AMC
PC1	ta_daytime	ta_avg	ta_dmax_avg	Air temperature
PC2	tsky_avg	tsky_nighttime	tsky_daytime	Sky temperature
PC3	ws_avg	ws_nighttime	ws_daytime	Wind
PC4	rsw_dirh_avg	day_of_year	rsw_gh_avg	Solar radiation
PC5	ta_dampl_avg	rsw_gh_avg	day_of_year	-
PC6	duration	intensity_hwmi	intensity_spic	Duration and intensities
PC7	pr_avg	pr_max	cp_sol	Rain
PC8	ta_avg_prior	wd_main	day_of_year	-

Enfin, étant donné que le nombre de PC nécessaires pour expliquer la variance du jeu de données est élevé, la valeur ajoutée de l'ACP par rapport à l'AMC est faible. De plus, même si l'ACP implique moins de choix arbitraires de la part de l'utilisateur, les CP qu'elle produit sont moins faciles à interpréter que les indicateurs représentatifs sélectionnés par une analyse visuelle de la matrice de corrélation ordonnée. C'est pourquoi, l'espace de caractérisation utilisé pour la suite de l'étude est celui construit à partir de la méthode d'AMC.

III.4.5 Etape 4 : Sélection des canicules

III.4.5.1 Objectifs et méthode

La quatrième étape consiste à échantillonner les canicules dans l'espace de caractérisation, afin d'obtenir un ensemble réduit de canicules distinctes et représentatives.

La méthode d'échantillonnage présentée dans cette sous partie vise à construire un ensemble représentatif minimal de canicules. Cet ensemble couvre un maximum de la diversité des profils de canicules, avec un nombre minimal de canicules représentatives. La méthode consiste d'abord à regrouper les canicules similaires à l'aide d'une technique de clustering, puis à sélectionner une canicule représentative pour chaque groupe.

Le processus de regroupement est assuré par une technique de clustering hiérarchique. C'est une méthode itérative. Au début de la première itération, toutes les canicules se trouvent dans des clusters distincts. À chaque itération, les deux clusters les plus proches sont fusionnés. La métrique entre les éléments de la méthode de clustering est la distance euclidienne dans l'espace de caractérisation (avec les valeurs normalisées des indicateurs). La méthode de liaison est la méthode de liaison "Ward". Cette méthode vise à trouver des clusters compacts et sphériques en sélectionnant les clusters à fusionner sur la base d'un changement dans les variances « Ward » des clusters. Les clusters sont fusionnés si l'augmentation de la variance combinée par rapport à la somme des variances spécifiques des clusters est minimale par rapport aux autres opérations de fusion.

La distance entre les deux clusters qui viennent d'être fusionnés est appelée distance de dissimilarité. A la fin du processus de liaison, elle est affichée en fonction du nombre de clusters générés. Le nombre optimal de clusters est un compromis entre un faible nombre de clusters et une faible distance de dissimilarité. Il peut être identifié graphiquement avec la méthode du coude, qui est couramment utilisée avec la méthode de clustering K-means (Ketchen Jr. et Shook 1996).

Ensuite il faut sélectionner une canicule représentative dans chaque groupe. Plusieurs possibilités de sélection ont été étudiées. Elles sont représentées schématiquement sur la Figure III-10. Cette figure présente une projection de l'espace de caractérisation en deux dimensions. Chaque point gris représente une canicule. Les clusters sont délimités par des traits verts. Le barycentre de chacun des clusters est représenté par une croix noire.

La première méthode testée consistait à sélectionner la canicule la plus proche du barycentre de chaque cluster (points bleus sur la Figure III-10). L'inconvénient de cette méthode est que le domaine de l'espace de caractérisation couvert par la sélection est assez restreint (en pointillé bleu sur la Figure III-10).

C'est pourquoi une deuxième méthode a été développée, pour sélectionner des canicules aux caractéristiques plus marquées, qui sont placées plus en périphérie de l'espace de caractérisation. Pour chaque cluster, la canicule sélectionnée est la canicule la plus éloignée au 85^{ème} percentile des barycentres des autres clusters. L'éloignement entre une canicule et les barycentres des autres clusters est obtenu avec la formule suivante :

$$D_k = \sum_{j \neq i} dist(k, barycenter(j)) \quad \text{III-1}$$

Pour chaque canicule k , on calcule la somme des distances Euclidiennes entre cette canicule k (appartenant au cluster i) et le barycentre de tous les autres clusters $j \neq i$. Pour chaque cluster i , cela forme la série de valeurs $[D_k, k \in i]$. Ensuite, la canicule dont la distance totale est la plus proche du 85° percentile de $[D_k, k \in i]$ est sélectionnée (canicules en rouge sur la Figure III-10). Les flèches noires sur la Figure III-10 sont les distances entre une canicule d'un cluster et les barycentres des autres clusters. Les pointillés rouges sur la Figure III-10 montrent le domaine de l'espace de caractérisation de canicules couvert par cette sélection. Cette technique permet de mettre en évidence les dissimilarités entre les différents clusters, et de couvrir une majorité de la portion de l'espace de caractérisation occupée par les canicules, sans nécessairement sélectionner les canicules marginales.

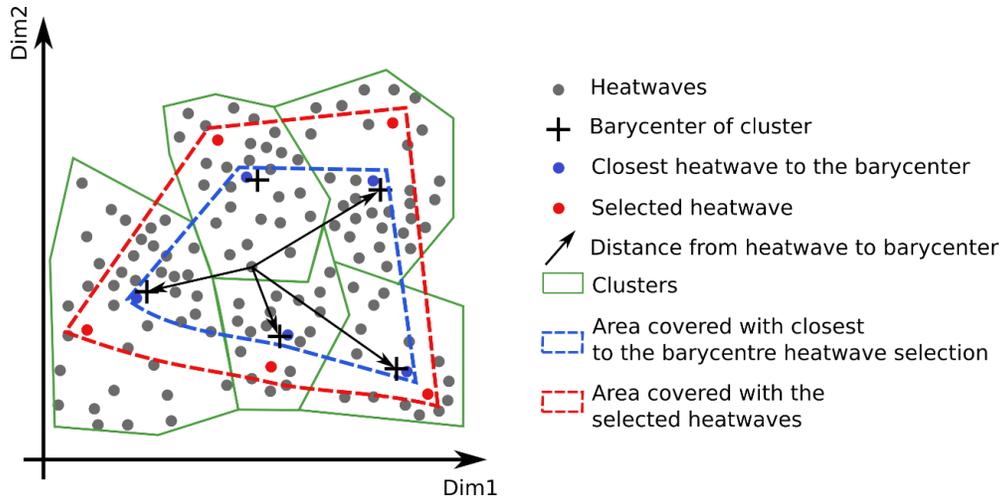


Figure III-10 : Schématisation des deux méthodes de sélection de canicules représentatives dans une projection de l'espace de caractérisation en deux dimensions.

III.4.5.2 Application/illustration

Le résultat du processus de clustering pour Lyon St Exupéry est représenté sous forme de dendrogramme dans la Figure III-11. Dans ce graphique, chaque jonction entre deux branches représente la fusion entre deux clusters. La distance verticale entre deux jonctions consécutives est la distance de dissimilarité.

La Figure III-11 (graphique de droite) montre l'évolution de la distance de dissimilarité en fonction du nombre de clusters. La courbe est strictement décroissante : plus le nombre de clusters est élevé, plus les canicules contenues dans les différents clusters sont similaires. Le coude de la courbe se produit lorsque le nombre de clusters est égal à huit. Ensuite, la diminution de la distance de dissimilarité est fortement réduite. Choisir un plus grand nombre de clusters ne réduirait pas significativement la distance entre les clusters, mais cela augmenterait considérablement le nombre de simulations nécessaires pour évaluer les performances des bâtiments. La dernière colonne du Tableau III-8 montre le nombre de canicules contenu dans chaque cluster. La taille des clusters est bien équilibrée. Chaque cluster contient entre 240 et 560 canicules, à l'exception du dernier cluster qui en contient 65.

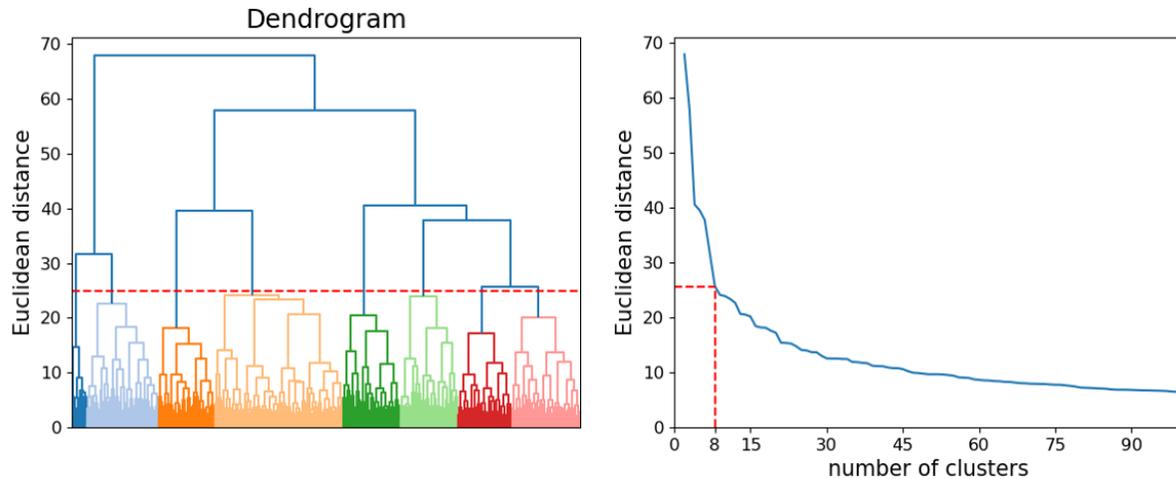


Figure III-11 : dendrogramme de l'ensemble de données sur les canicules dans l'espace de caractérisation (à gauche). Distance euclidienne en fonction du nombre de clusters (à droite). Les lignes rouges pointillées montrent le nombre de clusters sélectionnés et la distance euclidienne associée.

Une canicule représentative a été sélectionnée dans chaque groupe. Le Tableau III-8 montre la valeur des indicateurs de canicule pour les huit canicules sélectionnées. Une couleur de cellule claire signifie que les bâtiments subissent moins de stress thermique. Une cellule rouge signifie que le stress thermique sur les bâtiments est plus important. Les limites des échelles de couleur correspondent au 5^{ème} et au 95^{ème} percentile de chaque indicateur (valeurs de la deuxième ligne).

Tableau III-8: Valeurs de l'ensemble minimal de canicules dans l'espace de caractérisation des canicules

	duration	ta_avg	tsky_avg	ws_avg	ta_avg_prior	rsw_gh_avg	rh_avg	cp_sol	
Unité	[d]	[°C]	[°C]	[m/s]	[°C]	[W/m ²]	[%]	[-]	Nb canicules
Plage de valeur	[3; 16]	[28,4; 33]	[10,1; 18,6]	[1,82; 4,37]	[22,2; 30,4]	[207; 321]	[27; 57,3]	[0,4; 0,9]	
1	3	31,16	17,68	3,65	25,18	307,88	41,4	0,25	250
2	4	30,89	13,7	5,46	24,62	299,19	31,78	0,72	246
3	5	29	17,35	1,9	23,14	280,1	59,76	0,88	297
4	6	28,79	10,1	3,96	23,14	236,33	41,16	0,57	564
5	6	33,73	14,62	3,96	26,45	220,03	22,6	0,53	253
6	6	29,31	15,43	2,24	23,75	284,94	53,3	0,91	238
7	10	34,31	17,17	3,42	24,82	300,13	27,24	0,8	316
8	30	32,81	18,57	2,8	31,57	265,86	36,71	0,8	65

Chaque canicule a un profil spécifique. Les durées varient entre 3 jours (canicule courte) et 30 jours (canicule exceptionnellement longues). La température moyenne de l'air oscille entre 28,8°C et 34,3°C. Certaines canicules ont une température moyenne du ciel plus basse (canicules 2 et 4), ou une valeur de vitesse du vent plus élevée (canicules 2, 4 et 5), ce qui peut améliorer les performances des techniques de refroidissement passif. Les canicules 3 et 4 sont les canicules pour lesquelles la

température moyenne de l'air au cours de la semaine précédente est plus basse, ce qui permet au bâtiment de stocker de la fraîcheur avant le début de la canicule. Les canicules 1, 2 et 7 se produisent autour du solstice d'été, lorsque le rayonnement solaire est abondant. Au contraire, les canicules 4 et 5 surviennent à la fin de l'été, lorsque le soleil est nettement moins présent. Les canicules 3 et 6 sont nettement plus humides que les autres canicules de l'ensemble. La canicule 5 est plus sèche. Enfin, le ciel est dégagé pendant la plupart des canicules, ce qui se traduit par plus de 70 % de rayonnement solaire direct, à l'exception des canicules 4 et 5 où la proportion de rayonnement direct est respectivement de 57% et 53% et pour la canicule 1 pour laquelle le rayonnement solaire direct ne représente que 25% du rayonnement solaire total.

Les huit canicules dépeignent une grande variété de sollicitations météorologiques, qui peuvent entraîner une grande variété de réponses des bâtiments.

III.4.5.3 Validité de la sélection des clusters

La validité de la méthode de sélection par clustering est évaluée avec une analyse du score de silhouette (Rousseeuw 1987). Le score de silhouette ($s(i)$) se calcule selon l'équation III-2.

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max(a(i), b(i))} \quad \text{III-2}$$

Dans cette relation, $a(i)$ représente la distance moyenne du point i par rapport à tous les autres points appartenant au même cluster (la moyenne des traits rouge sur la Figure III-12) et $b(i)$ représente la distance moyenne du point i par rapport à tous les points appartenant au cluster le plus proche (moyenne des traits bleus sur la Figure III-12).

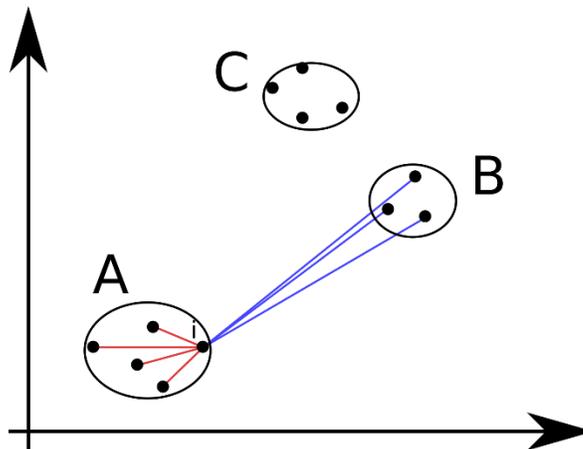


Figure III-12 : schéma pour le calcul du silhouette score : les traits rouges représentent les distances de dissimilarité entre le point i et les autres points du même cluster. Les traits bleus représentent les distances de dissimilarité entre le point i et les points du cluster le plus proche (ici le cluster B)

Le score de silhouette ($s(i)$) d'un point de données i se situe entre -1 et 1. Lorsque $s(i)$ est élevé (proche de 1), le point de données i est "bien groupé", car il y a peu de doute sur le fait que i a été assigné à un cluster approprié ($b(i) \gg a(i)$). Lorsque $s(i)$ est proche de zéro (lorsque $a(i)$ et $b(i)$ sont proches) : il est difficile de savoir si l'objet i aurait dû être assigné à son cluster ou à un autre. L'objet i se trouve à égale distance des deux, il peut donc être considéré comme un "cas

intermédiaire". La pire situation se produit lorsque $s(i)$ est proche de -1 ($b(i) \ll a(i)$). Dans ce cas, il aurait semblé beaucoup plus naturel d'affecter l'objet i à un autre cluster, l'objet i a donc été "mal classé" (Rousseeuw 1987).

La Figure III-13 montre la distribution des valeurs des scores de silhouette $s(i)$ au sein de chaque cluster. La valeur moyenne du score de silhouette pour l'ensemble du clustering est de 0,06 (ligne verticale pointillée rouge). Elle est assez proche de zéro, ce qui indique que les clusters se chevauchent.

Pour les clusters 1, 3, 4, 5 et 7 la moitié des canicules sont "bien groupées", avec un score de silhouette positif, et l'autre moitié des canicules est "mal classée", avec un score de silhouette négatif. Pour les clusters 2, 6 et 8, la plupart des canicules sont "bien groupées".

Même si l'analyse du score de silhouette révèle des clusters qui se chevauchent, les canicules représentatives de chaque cluster semblent être assez différentes les unes des autres, comme le montre le Tableau III-8.

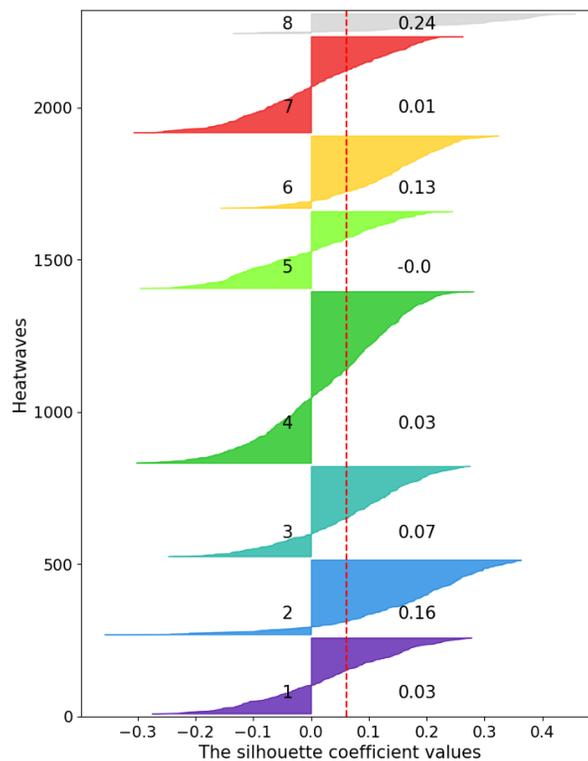


Figure III-13: Score de silhouette pour chaque canicule de l'ensemble de données. La ligne pointillée verticale rouge indique la moyenne du score de silhouette. Le nombre à droite de chaque groupe indique la valeur moyenne du score de silhouette pour chaque groupe.

III.5 Utilisation possible de la méthodologie

L'ensemble minimum représentatif de canicules devrait être le point de départ de l'évaluation des performances des bâtiments lors de futures canicules. Puisque l'ensemble représentatif minimum de canicules couvre toute une grande partie de la diversité des caractéristiques des futures canicules potentielles, les simulations effectuées avec cet ensemble de fichiers météorologiques peuvent

reproduire la variété attendue du comportement thermique des bâtiments pendant les futures canicules. Ces simulations peuvent également produire une première population de valeurs d'indicateurs de performance des bâtiments (Building Performance Indicator, BPI), et permettre d'avoir une première estimation de l'amplitude de ces valeurs.

Après avoir effectué des simulations avec le jeu minimum représentatif de canicules, deux manières d'approfondir l'étude des effets des futures canicules sur les bâtiments sont envisageables. Ces deux voies sont illustrées graphiquement dans la Figure III-14. La première consiste à échantillonner davantage de canicules et à effectuer des simulations jusqu'à ce que des statistiques affinées des valeurs de BPI puissent être calculées (moyenne, écart type, etc.). La deuxième voie consisterait à affiner la localisation de la frontière entre les canicules problématiques et non problématiques dans l'espace de caractérisation. Cet approfondissement nécessiterait d'établir un seuil de valeur de BPI pour distinguer les canicules problématiques et non problématiques.

Les deux façons d'aller plus loin dans l'investigation des effets futurs des canicules sur les bâtiments nécessiteraient un algorithme itératif spécifique pour continuer à échantillonner les canicules dans l'espace de caractérisation.

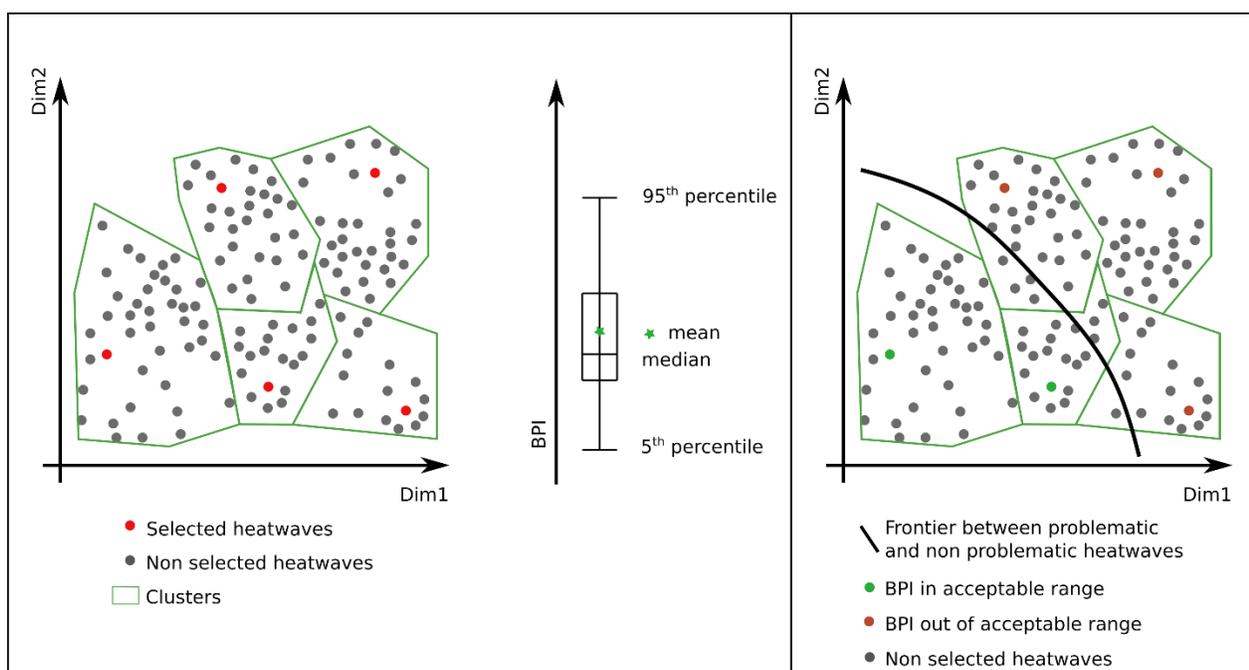


Figure III-14: Dispersion d'un indicateur de performance d'un bâtiment en raison de la variabilité des canicules (gauche) et frontière entre canicules problématiques et non problématiques (droite) dans une projection 2D de l'espace de caractérisation.

III.6 Conclusion

Ce chapitre propose une méthodologie pour la construction d'un ensemble minimum représentatif de fichiers météorologiques de canicule futures, dédié à l'évaluation des performances thermiques des bâtiments. Cette méthodologie a été appliquée à la ville de Lyon St Exupéry.

L'ensemble des fichiers de canicules construit au cours de la quatrième étape de la méthodologie est représentatif : les canicules sont suffisamment différentes les unes des autres pour couvrir le large

spectre des caractéristiques des canicules auxquelles un bâtiment pourrait être confronté sur le site de Lyon St Exupéry. Il s'agit d'un ensemble minimum : huit canicules se sont avérées suffisantes pour obtenir un ensemble représentatif des canicules futures.

Pour évaluer le comportement d'un bâtiment pendant les canicules des décennies à venir, des simulations du bâtiments doivent être effectuées avec l'ensemble représentatif minimum de canicules, pour obtenir un ordre de grandeur de la dispersion des indicateurs de performance des bâtiments, et pour identifier les caractéristiques météorologiques auxquelles le bâtiment est le plus sensible. Ensuite, davantage de fichiers météorologiques peuvent être nécessaires pour obtenir une description plus précise de la distribution des valeurs des indicateurs de performance, ou pour affiner la frontière entre les canicules problématiques et non problématiques.

Pour l'instant rien ne permet d'avancer que l'espace de caractérisation des canicules soit identique sur les différentes régions du globe. Pour pouvoir énoncer ce type d'affirmation, il faudra avoir un retour d'expérience sur l'application de cette méthode à large échelle.

Ces travaux ont fait l'objet d'une participation à la conférence internationale 42nd AIVC, 10th TightVent and 8th Venticool à Rotterdam en 2022. Un article dans une revue internationale est également en cours de soumission. Les références de ces travaux sont listées ci-dessous :

Toesca, A., David, D., Johannes, K., Lussault, M., 2022. Methodology for the constitution of a restricted set of heatwaves, derived from climate projections, that can be used for building performance simulations, in: 42nd AIVC, 10th TightVent and 8th Venticool Conference. Presented at the 42nd AIVC, 10th TightVent and 8th Venticool Conference, Rotterdam, p. 10.

Toesca, A., David, D., Johannes, K., Lussault, M., 2023. Generation of weather data for the assessment of building performances under future heatwave conditions, Building and Environment (soumis)

Chapitre IV

Les indicateurs de performances d'un bâtiment passif

IV.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de définir un indicateur pertinent pour l'évaluation du comportement thermique des bâtiments urbains passifs pendant les périodes de canicule. Les bâtiments passifs ne possèdent pas de système de refroidissement actif, il n'est pas pertinent d'évaluer leurs performances avec des indicateurs basés sur les consommations d'énergie. Il faut que l'indicateur reflète le niveau d'acceptation par les habitants des ambiances thermiques à l'intérieur de ces bâtiments.

La mesure du niveau d'acceptation d'une ambiance thermique est généralement associée à la notion de confort thermique. Le confort peut être défini par « la condition d'esprit qui exprime la satisfaction de l'environnement thermique » (Coccolo et al. 2016). C'est une notion binaire : une ambiance est confortable, ou ne l'est pas. Mais en période estivale, et plus particulièrement pendant des canicules, il est fort probable que les ambiances intérieures ne soient presque jamais jugées confortables. Ce n'est donc pas le confort que doit mesurer l'indicateur. Par contre, les ambiances seront chaudes. C'est donc plutôt l'intensité de la sensation thermique, et plus particulièrement de la sensation de chaleur, qui doit être mesurée. La sensation thermique correspond à l'aspect qualitatif (chaud/froid) et quantitatif (intensité) de la perception de l'état thermique d'un individu (Moujalled 2007). La première partie de ce chapitre est dédiée à la sélection d'un indicateur permettant de mesurer la sensation thermique « instantanée », c'est-à-dire la sensation thermique à un endroit donné de l'espace, pendant un instant donné.

La performance d'un bâtiment vis-à-vis d'un type de canicule sera évaluée à partir des résultats d'une simulation du comportement thermique de ce bâtiment. A l'issue de cette simulation, des séries temporelles de valeurs de l'indicateur de sensation thermique pourront être calculées pour chaque local du bâtiment étudié. Pour évaluer le comportement du bâtiment avec un indicateur scalaire unique, il faut définir une méthode pour agréger spatialement (entre tous les locaux du bâtiment), et pour intégrer temporellement (sur la durée de simulation), les valeurs de sensation thermique. L'indicateur scalaire unique est nommé indicateur à long terme. La méthode d'intégration utilisée doit permettre de faire en sorte que la valeur de l'indicateur à long terme soit représentative de l'intensité de la gêne occasionnée durant toute la durée de la vague de chaleur. La seconde partie de ce chapitre s'intéresse aux différentes méthodes d'intégration spatio-temporelle des indicateurs de confort. Dans un premier temps, les critères de sélection seront établis, puis la littérature sur le sujet sera explorée et critiquée au regard de ces critères.

La dernière partie de ce chapitre fait la synthèse des choix effectués dans les deux sections précédentes.

IV.2 Indicateurs de sensation thermique instantanés

Les indicateurs présentés dans cette section prédisent la sensation thermique en fonctions des 6 paramètres de base du confort thermique ((Hensen 1990), (Parsons 2002), (Epstein et Moran 2006)). Ces paramètres permettent de calculer tous les échanges de chaleur du bilan thermique du corps humain et ainsi déterminer son état. Les 6 paramètres de base du confort thermique peuvent être séparés en deux catégories, les paramètres concernant l'individu : le métabolisme (M), l'isolation intrinsèque de la tenue vestimentaire (I_{cl}) et les paramètres concernant l'environnement thermique : la température de l'air (T_a), l'humidité relative de l'air (HR_a), la température moyenne radiante (T_{rm}) et la vitesse d'air (v_a). Pour plus d'information sur le bilan thermo-physiologique du corps humain

ainsi que les paramètres de bases, le lecteur peut lire l'Annexe 5 : Le bilan thermo-physiologique du corps humain.

Parmi les indicateurs de sensation thermique, on distingue un premier groupe : le groupe des indicateurs de confort. Ces indicateurs ont été initialement développés pour identifier des zones de confort thermique, c'est-à-dire les combinaisons de valeurs des 6 paramètres de base du confort thermique qui permettent d'assurer des conditions de confort aux occupants des bâtiments. C'est par exemple sur la base d'indicateurs de confort que sont définies les plages de température acceptables par la norme Européenne EN-16798-1. Et même si ce n'est pas leur vocation première, certains indicateurs de confort mesurent aussi la sensation thermique. Le second groupe d'indicateurs de sensation thermique est le groupe des indicateurs de stress thermiques. Les indicateurs de stress thermique ont initialement été développés pour fixer des limites à des expositions aux ambiances chaude, afin d'assurer la sécurité des individus. Le public visé par ces indicateurs est essentiellement un public de travailleurs, qui peuvent être soumis à des ambiances particulièrement chaudes dans le cadre de leur travail (mineurs, travail dans des aciéries, etc.). Pour certains de ces indicateurs, une équivalence en termes de sensation thermique a été établie.

Les indicateurs de confort et de stress thermique sont construits sur la base de mesures empiriques (d'état de confort, de niveau de sensation thermique, et de niveau d'astreinte thermique). Certains indicateurs sont aussi basés sur un modèle thermo-physiologiques. Les indicateurs peuvent être classés en trois catégories distinctes : les indicateurs basés uniquement sur l'environnement thermique (ou indicateurs directs), les indicateurs empiriques basés uniquement sur des mesures, et les indicateurs basés sur des modèles physiologiques de thermorégulation du corps humain (ou indicateurs rationnels) (Epstein et Moran 2006). Dans tous les cas, la grande majorité des indicateurs ont un côté empirique puisqu'ils sont alimentés par des mesures subjectives de sensation thermique.

La littérature scientifique compte un nombre conséquent d'articles de revue sur les indicateurs de confort et de stress thermique. (Enescu 2017) et (Zhao, Lian, et Lai 2021) proposent une revue bibliographique sur les modèles de thermorégulation, (Tavakoli et al. 2022) traitent spécifiquement des indicateurs à utiliser dans des bâtiments naturellement ventilés. (Djongyang, Tchinda, et Njomo 2010) discutent des indicateurs pour les environnements de sommeil. (Rupp, Vásquez, et Lamberts 2015) discutent des indicateurs à utiliser dans les milieux extérieurs. (Holmes, Phillips, et Wilson 2016) décrivent spécifiquement les approches utilisées pour caractériser les surchauffes à l'intérieur des bâtiments passifs. (Peeters et al. 2009) se sont intéressés aux approches adaptatives pouvant être utilisées dans le cadre de bâtiments résidentiels. (R. de Dear et al. 2020) ont inventorié les modèles de confort adaptatifs.

Ce chapitre de thèse ne se veut pas aussi exhaustif qu'une revue de la littérature. Seuls les indicateurs couramment utilisés dans la littérature pour caractériser des surchauffes intérieures seront présentés et décrits brièvement afin de pouvoir les critiquer au regard des critères de sélection définis dans la sous partie suivante.

IV.2.1 Critères de sélection

Les critères permettant de sélectionner l'indicateur instantané qui sera utilisé dans le protocole d'évaluation des bâtiments urbains passifs sont les suivants : l'indicateur doit évaluer la sensation thermique et pas uniquement identifier des zones de confort, ou indiquer des limites d'exposition aux ambiances chaudes. Il doit tout particulièrement pouvoir évaluer la sensation de chaleur. Il doit être progressif dans le sens où la valeur de l'indicateur doit refléter l'intensité de la sensation de chaleur.

De plus, l'indicateur doit pouvoir être utilisé pour des expositions continues et prolongées. L'indicateur doit être basé sur les 6 paramètres de base du confort thermique, afin notamment de pouvoir envisager différents scénarios d'habillement et d'activité pour les occupants. Pour finir l'indicateur ne doit pas avoir de limite haute (pas borné). En effet l'indicateur sera utilisé pour évaluer la sensation thermique pendant des canicules, avec un indicateur borné il est fort probable que la limite haute soit souvent atteinte ce qui ne permettra pas de nuancer la sensation thermique en cas de très forte chaleur.

IV.2.2 Indicateur basé sur l'environnement thermique (ou direct)

Cette partie décrit les indicateurs directs les plus utilisés.

Température opérative

La température opérative T_{op} est définie comme la température uniforme d'une enceinte noire dans laquelle une personne échangerait la même quantité de chaleur par rayonnement et convection que dans l'environnement réel non uniforme. Elle se calcule avec l'expression IV-1 :

$$T_{op} = \frac{T_{rm} \cdot h_r + T_a \cdot h_c}{h_r + h_c} \quad \text{IV-1}$$

Avec :

- T_{rm} : température radiante moyenne [$^{\circ}\text{C}$]
- h_r : coefficient de transfert radiatif [$\text{Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$]
- h_c : coefficient de transfert convectif [$\text{Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$]

Pour les environnements avec une température radiante moyenne proche de la température d'air ($t_{rm} - t_a < 4^{\circ}\text{C}$), la température opérative peut être estimée comme étant égale à la moyenne entre la température radiante moyenne et la température d'air (Butera 1998) :

$$t_{op} = \frac{t_{rm} + t_a}{2} \quad \text{IV-2}$$

Heat Index

Le *Heat Index (HI)* est une température équivalente dans un environnement ombragé. Il combine l'humidité relative à la température opérative. Il est calculé selon la formule proposé par (Steadman 1979):

$$HI = 0.5 \cdot [T_{op} + 61 + 1.2 \cdot (T_{op} - 68) + 0.094 \cdot RH] \quad \text{IV-3}$$

Avec :

- T_{op} : température opérative en [$^{\circ}\text{F}$]
- RH : humidité relative en [%]

Il existe plusieurs formules pour calculer le *Heat Index*, avec des coefficients un peu différents. (Avanzini et al. 2022) ont utilisé la formule proposée par (Rothfus 1979) dans les cas où le *Heat Index* est supérieur à 27°C . (O'Donovan, Psomas, et O'Sullivan 2022) ont présenté une autre formule pour calculer le *Heat Index* ainsi qu'un tableau permettant d'associer les valeurs de *Heat Index* à des risques sur la santé (Tableau IV-1).

Tableau IV-1 : Définition de niveaux de risques associés à l'Heat Index

HI [°C]	Risques associés
HI<27	No risk
27<HI<32	Fatigue
32<HI<41	Possibility of Heat stoke, cramps or exhaustion
41<HI<52	Likely heat cramps or exhaustion
HI>52	Highly likely leading to heat stroke

Humidex

L'*Humidex* est un indicateur inventé au Canada, il est plutôt utilisé pour caractériser l'environnement thermique extérieur. C'est un indicateur empirique qui combine la température de l'air et la pression de vapeur et s'apparente à une température ressentie (Laouadi et al. 2020). C'est l'équivalent Canadien du *Heat Index* (Avanzini et al. 2022). En effet lorsque l'humidité de l'air est élevée et qu'elle tend vers la saturation, il est plus difficile pour le corps humain de se rafraîchir par évaporation, c'est pourquoi pour une même température d'air, le ressenti est différent selon la valeur du taux d'humidité.

La valeur de l'*Humidex* est toujours égale ou supérieure à la valeur de la température de l'air. (Masterton et Richardson 1979) proposent les relations suivantes pour calculer la valeur de l'*Humidex* (équations IV-4, IV-5 et IV-6):

$$\text{Humidex} = T_a + h \quad \text{IV-4}$$

$$h = \frac{5}{9} \cdot (e - 10) \quad \text{IV-5}$$

$$e = 6.11 \cdot \exp\left(M_w \cdot \frac{L}{R} \cdot \left(\frac{1}{273.16} - \frac{1}{T_d}\right)\right) \quad \text{IV-6}$$

Avec :

- e : pression de vapeur dans l'air ($mbar$)
- M_w : masse molaire de l'eau (18.016 g/mol)
- R : Constante des gaz parfait ($8.3144 \cdot 10^7 \text{ erg/mol/K}$)
- $6.11 [mbar]$: pression de vapeur saturante pour une température de 273.16 K
- 273.16 : point de fusion de la glace [K]
- T_d : température de rosée [K]

Des classes de confort et de sensation thermique ont été associées à des plages de valeurs d'*Humidex* (Tableau IV-2 et

Tableau IV-3). L'*Humidex* a été utilisé par (Sahabi ABED et Kerrouche 2017) et (Masterton et Richardson 1979) pour cartographier des environnements thermiques extérieurs.

Tableau IV-2 : plage de confort associée aux valeurs de l'humidex

Valeurs de l'Humidex [°C]	Confort associé
20-29	Confortable
30-39	Inconfort variable
40-45	Inconfort pour presque tout le monde
>46	Beaucoup d'activités doivent être limitées

Tableau IV-3 : sensation thermique associée aux valeurs de l'humidex

Valeurs de l'Humidex [°C]	Sensation thermique
<15	Sensation de frais ou de froid
15-19	Peu de gens sont inconfortables
20-29	Sensation de bien-être
30-34	Sensation de malaise plus ou moins grande
35-39	Sensation de malaise assez grande. Prudence : ralentir certaines activités en plein air.
40-45	Sensation de malaise généralisée. Danger : éviter les efforts
46-53	Danger extrême : arrêt de travail dans de nombreux domaines.
>54	Coup de chaleur imminent. Danger de mort

IV.2.3 Indicateurs de confort adaptatif

Les modèles de confort adaptatif expriment la température de confort dans une ambiance intérieure T_{Conf} en fonction de la température extérieure moyenne $T_{moy,ext}$, sous la forme d'une équation linéaire :

$$T_{Conf} = A + B \cdot T_{moy,ext} \quad \text{IV-7}$$

Cette relation linéaire a été mise en évidence par (M. Humphreys 1978). Elle a par la suite été retrouvée par de nombreux auteurs, pour de nombreux bâtiments, et de nombreuses localisations. Avec cette approche, plus la température extérieure est élevée, plus la température de confort des occupants est élevée.

Les modèles de confort adaptatif sont censés prendre en compte trois niveaux d'adaptation à l'environnement thermique (J. F. Nicol et Humphreys 2002) : l'adaptation physiologique (mécanismes mis en œuvre par le corps humain pour assurer le maintien de la température corporelle interne), l'adaptation comportementale (actions de l'occupant pour modifier son environnement), et l'adaptation psychologique (changement de perception des ambiances thermique liée à des contextes particuliers). Les modèles de confort adaptatif sont cependant des « black box » : il n'est pas possible de déterminer les raisons exactes pour lesquelles le confort évolue en fonction de la température extérieure. Les équations du confort adaptatif sont purement empiriques.

IV.2.4 Indicateurs rationnels

Ce sont les indicateurs dont la définition fait intervenir un bilan thermo-physiologique du corps humain.

Predicted Mean Vote-Percentage of People Dissatisfied (PMV-PPD)

Le *PMV* (ISO 7730 2005) est un modèle permettant de prédire la sensation thermique moyenne d'un groupe de personne pour une ambiance thermique donnée. Le *PMV* est exprimé sur l'échelle ASHRAE de sensation thermique à 7 points. Une valeur nulle du *PMV* correspond à la thermoneutralité en conditions de confort. Le modèle a été développé par (Fanger 1970). Il prend en compte les six paramètres de base du confort. La partie empirique du modèle se base sur des résultats de mesures subjectives effectuées sur plus de 1200 étudiants.

Le *PMV* est associé à un autre indicateur : le *PPD* pour Percentage of People Dissatisfied ou pourcentage de personnes insatisfaites. Le *PPD* correspond au pourcentage de personnes qui seraient insatisfaites de l'environnement thermique. Lorsque la valeur du *PMV* est nulle, cela ne signifie pas que tout le monde est satisfait de l'ambiance : le *PPD* vaut 5%, signifiant qu'il reste toujours une petite proportion de personnes insatisfaites.

Dans le modèle thermo physiologique du *PMV*, la composante d'échanges thermiques par sudation est exprimée pour des conditions de confort, à partir de mesures subjectives. De ce fait, Fanger met en garde sur l'utilisation du modèle pour des valeurs de *PMV* supérieures à +2 ou inférieures à -2 (van Hoof 2008). Plus les conditions thermiques s'éloignent de la neutralité, plus le biais entre la sensation thermique réelle des occupants et celle prédite par le *PMV* est important. Ce biais a été observé par de nombreux auteurs, notamment dans des ambiances chaudes et pour des bâtiments non climatisés (M. A. Humphreys et Nicol 2002), (R. J. de Dear et Brager 2002), (Moujalled 2007), (Baker et Standeven 1996). De plus le *PMV* est plutôt destiné à prédire la sensation thermique pour des ambiances contrôlées (ou climatisées) (R. J. de Dear et Brager 2002), (Fanger 1970).

Pour plus d'information sur le modèle du *PMV* et ses dérivés, (van Hoof 2008) a réalisé une revue bibliographique complète sur les différentes utilisations, les confrontations expérimentales, et les évolutions du modèle depuis sa création en 1970.

Heat Strain Index (HSI)

Le *HSI* est initialement un indicateur de stress thermique. Il permet de déterminer l'astreinte thermique du corps humain pour une exposition de 8 heures dans un environnement thermique chaud. Le *HSI* est défini comme le rapport entre l'énergie d'évaporation par transpiration requis (E_{req}) pour équilibrer le bilan thermique du corps humain dans l'environnement étudié, et l'énergie maximale d'évaporation (E_{max}) que le corps humain peut échanger avec son environnement thermique (Belding et Hatch 1955).

$$HSI = \frac{E_{req}}{E_{max}} \quad \text{IV-8}$$

Le modèle thermo-physiologique utilisé pour le calcul de l'*HSI* est un modèle simple à un nœud, qui considère que la température de la peau est constante à 35°C.

Une équivalence a été établie entre la valeur du *HSI* et l'intensité de la sensation de chaleur (Epstein et Moran 2006). L'équivalence est renseignée dans le Tableau IV-4.

Tableau IV-4 : Confort et sensation thermique en fonction de la valeur du HSI (Epstein et Moran 2006)

ASHRAE thermal scale	Thermal sensation	Comfort sensation	Zone of thermal effect	HSI [%]
	Very hot	Very uncomfortable	Incompensable heat	80
+3	Hot	Uncomfortable		40-60
+2	Warm	Slightly uncomfortable	Sweat evaporation compensable	20
+1	Slightly warm			
0	Neutral	Comfortable	Vasomotor compensable	0
-1	Slightly cool			
-2	Cool	Slightly uncomfortable	Shivering compensable	
-3	Cold			
	Very Cold	Uncomfortable	Incompensable cold	

Températures équivalentes

Certains indicateurs de confort sont définis comme une température opérative, dans un environnement thermique de référence, qui entrainerait la même astreinte thermique sur le corps humain que dans l'environnement étudié. Ces indicateurs peuvent s'apparenter à des températures ressenties, ou températures équivalentes.

Les températures équivalentes sont basées sur des modèles thermo-physiologiques. Ils prennent en compte les 6 paramètres de base du confort thermique. Dans cette partie, trois indicateurs de température équivalente seront abordées : la *PET* (Physiological Effective Temperature) (Höppe 1999), la *SET* (Standard Effective Temperature) (Gonzalez, Nishi, et Gagge 1974) et l'*UTCI* (Universal Thermal Climate Index) (Fiala et al. 2012). Le Tableau IV-5 synthétise les caractéristiques de ces trois indicateurs.

Les indicateurs de température équivalente se distinguent d'abord par la définition de leur environnement thermique de référence. Dans cet environnement, la température de l'air est systématiquement égale à la température radiante moyenne, mais les valeurs d'humidité, de vitesse d'air, d'activité métabolique, et d'habillement sont différentes.

Les indicateurs n'utilisent pas les mêmes modèles thermo-physiologiques pour évaluer l'astreinte thermique dans les deux environnements. Pour la *SET* et la *PET*, des modèles thermo-physiologiques à deux nœuds sont utilisés. Le modèle du *PET* distingue les parties du corps recouvertes et parties dénudées. L'*UTCI* utilise le modèle de Fiala, à 12 segments et 187 nœuds (Fiala et al. 2012).

Les indicateurs diffèrent enfin dans la définition de leur règle d'équivalence d'astreinte. Une règle d'équivalence d'astreinte définit quels sont les paramètres qui représentent l'état thermique d'un corps humain (température de peau, température corporelle interne, etc.), et qui doivent être conservés lorsqu'on passe d'un environnement à un autre, pour qu'on puisse considérer que l'astreinte thermique (dont découle la sensation) est équivalente dans les deux environnements. Pour la *PET*, on considère que l'astreinte thermique est équivalente si la température de peau T_{sk} et la température interne du corps T_{cr} sont identiques. Pour la *SET*, l'astreinte est équivalente si la température de peau T_{sk} et la mouillure cutanée w_{sk} sont identiques. Pour l'*UTCI*, l'astreinte thermique équivalente a été

établie à partir d'une analyse en composante principale réalisée sur des résultats de simulation couvrant une grande variété d'environnement thermique extérieur.

L'*UTCI* est restreint à l'évaluation du confort thermique pour des individus marchant dans l'espace extérieur à une vitesse de 4 km/h.

Tableau IV-5 : synthèse de certains indicateurs de température équivalente

Indicateurs	Environnement thermique de référence	Equivalence d'astreinte thermique	Modèle de thermorégulation utilisé	Références
PET	$T_{rm} = T_a$ $P_v = 12 \text{ hPa}$ $V_a = 0,1 \text{ m/s}$ $M = 80 \text{ W} \approx 1,3 \text{ MET}$ $I_{cl} = 0,9 \text{ CLO}$	T_{sk} T_{cr}	MEMI : modèle de thermorégulation à 2 noeuds	(Höppe 1999)
SET	$T_{rm} = T_a$ $HR = 50 \%$ $V_a = 0,1 \text{ m/s}$ $M = 1 \text{ MET}$ $I_{cl} = 0,6 \text{ CLO}$	T_{sk} w_{sk}	Modèle à 2 noeuds de Gagge	(Gagge, Stolwijk, et Nishi 1971) (Gonzalez, Nishi, et Gagge 1974)
UTCI	$T_{rm} = T_a$ $\begin{cases} P_v = 20 \text{ hPa} & \text{si } T_a > 29^\circ\text{C} \\ HR = 50 \% & \text{si } T_a < 29^\circ\text{C} \end{cases}$ $V_a = 0,3 \text{ m/s}$ $M = 135 \text{ W} = 2,3 \text{ MET}$ $I_{cl} = f(T_a)$	Combinaison linéaire des 7 variables suivantes à 30 et 120 minutes : T_{re} , T_{skm} , T_{skfc} , $M_{sk,dot}$, w_{sk} , $V_{bl,sk}$, $Shiv$	Modèles de Fiala	(Fiala et al. 2012) (Bröde, Krüger, et al. 2012) (Jendritzky, de Dear, et Havenith 2012) (Havenith et al. 2012)

Une équivalence en sensation thermique sur l'échelle ASHRAE a été établie pour la *SET*. Cette équivalence est représentée dans le Tableau IV-6.

Tableau IV-6 : Echelle de sensation thermique de la *SET* (Gonzalez, Nishi, et Gagge 1974)

SET [°C]	Sensation thermique	Etat physiologique
22,2-25,6	Confortable et acceptable	Neutre
25,6-30	Un peu chaud, un peu inacceptable	Vasodilatation, petit débit de sudation
30-34,5	Chaud, inconfortable, inacceptable	Sudation
34,5-37,5	Très inacceptable	Forte sudation
>37,5	Très chaud, très inconfortable	Disfonctionnement de la thermorégulation

IV.2.5 Synthèse et sélection des indicateurs

Le Tableau IV-7 présente une synthèse des indicateurs instantanés de sensation thermique présentés dans les sections précédentes. Dans le tableau, une croix montre que l'indicateur respecte le critère

de sélection correspondant. Pour rappel les critères permettant de sélectionner l'indicateur de sensation thermique instantanée sont les suivants :

- Quantifier la sensation thermique et être progressif
- Être adapté pour la modélisation d'expositions continues et prolongées à des ambiances thermiques chaudes
- Prendre en compte les 6 paramètres basiques du confort thermique
- Ne pas être borné afin de pouvoir comparer les sensations thermiques même dans les extrêmes

Le Tableau IV-7 montre que seules la *SET* et la *PET* remplissent tous les critères de sélection d'un indicateur instantané définis dans ces travaux. Pour départager ces deux indicateurs, nous nous sommes basés sur leur règle d'équivalence d'astreinte (Tableau IV-5). La *SET* établit sa règle d'équivalence sur la mouillure cutanée et la température de peau. La *PET* établit sa règle d'équivalence sur la température interne du corps et sur la température de peau. La température interne du corps est beaucoup plus difficile à modéliser que la mouillure cutanée. La mouillure cutanée varie très rapidement en fonction des caractéristiques de l'ambiance thermique. A contrario, la température interne du corps bénéficie de l'inertie du corps humain, elle varie très lentement, sur des amplitudes très faibles. La mouillure cutanée est un indicateur plus réactif et plus facile à modéliser que la température interne du corps. De plus elle est fortement corrélée à la sensation de chaleur (Hensen 1990), (Moujalled 2007). C'est pourquoi le choix de l'indicateur instantané de sensation thermique s'est porté sur la *SET*.

Tableau IV-7 : synthèse des indicateurs de sensation thermique instantané

	Sensation thermique progressive	Exposition continue et prolongé	Paramètres basiques du confort thermique						Non borné
			T_a	RH_a	T_{rm}	v	M	I_{cl}	
			[°C]	[%]	[°C]	[m/s]	[Met]	[Clo]	
Humidex	X	X	X	X					X
Heat Index	X	X	X	X					X
Température opérative		X	X		X				X
HSI	X		X	X	X	X	X		
SET	X	X	X	X	X	X	X	X	X
PET	X	X	X	X	X	X	X	X	X
UTCI	X	X	X	X	X	X			X
PMV-PPD	X	X	X	X	X	X	X	X	
Confort adaptatif		X	X						X

IV.3 Intégration spatiale et temporelle des indicateurs de confort

L'essentiel des méthodes d'intégration a été développé pour les indicateurs de confort. Les indicateurs de confort instantané permettent de calculer, à partir de résultats de simulation, des séries temporelles qui représentent l'état de confort à chaque instant de la période de simulation, et dans tous les locaux du bâtiment simulé. Pour transformer une série temporelle en un indicateur scalaire unique, il faut définir une méthode d'intégration temporelle (pour une seule pièce). Ensuite, pour gérer les hétérogénéités de confort entre les différentes pièces d'un bâtiment, il faut définir des règles d'agrégation spatiale. L'indicateur scalaire obtenu est un indicateur de confort à long terme (Long Term Comfort Index).

Dans ce chapitre, les différentes méthodes d'intégration proposées par la littérature seront décrites, et une sélection sera faite parmi ces méthodes. Avant de décrire les méthodes d'intégration de la littérature, une sous-section sera dédiée aux critères de choix qui seront appliqués lors de la sélection de la méthode, et trois sous-sections de prérequis seront proposées. La première sous-section concerne la modélisation de la présence des occupants dans les locaux. La seconde sous-section décrit les différents seuils d'inconfort qui sont utilisés par une majorité des méthodes d'intégration. La troisième sous-section décrit les différentes manières de quantifier l'inconfort instantané.

IV.3.1 Critères de sélection des méthodes d'intégration

La sélection de la méthode d'intégration se fera sur les critères suivants. Tout d'abord, il faudra que l'indicateur scalaire qui découle de l'intégration puisse avoir une unité qui soit facilement interprétable : l'unité de l'indicateur ne doit pas être trop complexe. Il faudra que l'indicateur reflète les niveaux de sensation thermique rencontrés par les occupants durant toute la période d'analyse.

La valeur de l'indicateur intégré doit être insensible à la durée de la période sur laquelle les résultats de simulation sont analysés. Cette valeur ne doit pas augmenter ou diminuer artificiellement lorsqu'on élargit les bornes temporelles de cette période. Ce critère est particulièrement important lorsqu'il s'agit d'étudier le comportement des bâtiments lors des vagues de chaleur. En effet, les vagues de chaleur ont des durées très différentes. Pour évaluer leurs effets sur les ambiances intérieures, il faut réaliser des simulations sur des périodes de simulation qui doivent intégrer des périodes tampons avant la vague de chaleur (pour initialiser correctement l'état thermique du bâtiment), et après la vague de chaleur (pour observer les effets persistants des vagues de chaleur dans les bâtiments). Il se posera alors une question quasiment insolvable concernant la période sur laquelle les résultats doivent être analysés : doit-elle se concentrer sur la période de la vague de chaleur ? ou doit-elle inclure les périodes tampons ? Et si oui, quelle doit être la durée de ces périodes tampons ? Si l'indicateur utilisé ne dépend pas des bornes de la période d'analyse, mais se concentre sur les effets de surchauffes directement imputables à l'épisode de canicule, ces questions n'auront plus lieu d'être. D'où la nécessité que l'indicateur soit indépendant de la période d'analyse.

IV.3.2 Prérequis : modèles de présence d'occupants dans les locaux

La plupart des méthodes d'intégration prennent en compte la présence des occupants dans les locaux au travers d'un modèle de présence d'occupants. En effet, il est inutile de considérer un environnement thermique lorsqu'il n'affecte aucun occupant.

La première manière de modéliser la présence des occupants se fait avec une fonction d'occupation « heaviside » : $I_{t,z}$. Cette fonction prend la valeur de 0 lorsqu'aucun occupant n'est présent dans la

pièce z à un instant t donné. Et elle prend la valeur de 1 lorsque des occupants sont présents dans la pièce, peu importe le nombre d'occupant. La deuxième manière de modéliser la présence d'occupants, est de considérer directement le nombre d'occupants $n_{t,z}$ présents dans la pièce z à un instant t donné. Ainsi lorsqu'il n'y a personne, la valeur de $n_{t,z}$ sera égale à zéro. Les valeurs de $n_{t,z}$ peuvent être des valeurs non entières. Dans ce cas, elles représentent des statistiques d'occupation des locaux obtenus sur une population d'occupants.

IV.3.3 Prérequis : valeurs seuils et catégories de confort

Une majorité de méthodes d'intégration fait appel à des valeurs seuils d'indicateurs de confort.

Les valeurs seuils les plus utilisées sont les valeurs seuils définies par les normes ISO 7730, EN 15251 et ASHRAE 55. Ces valeurs seuils ont été définies pour délimiter des catégories de confort, qui représentent différents niveaux d'acceptation des ambiances thermiques. Ces valeurs seuils sont définies sur la base du modèle de confort adaptatif (pour les bâtiments naturellement ventilés), et du modèle PMV/PPD (pour les bâtiments régulés). Les catégories de confort définies par les normes ISO 7730 et EN 15251 sont décrites dans le Tableau IV-8. Les catégories de confort définies par la norme ASHRAE 55 sont décrites dans le Tableau IV-9. Les membres du CIBSE (Chartered Institution Of Building Services Engineers) ont également défini les catégories de confort délimités par des seuils de température opérative différents selon le type de pièce étudiée (J. Fergus Nicol et al. 2009).

On remarquera que les catégories de confort basées sur les modèles adaptatifs sont définies par une plage de température opérative ΔT_{op} autour de la température de confort optimale prédite par ces modèles. Les catégories de confort basées sur le modèle du *PMV/PPD* sont délimitées ici directement par des valeurs seuils de *PMV* et de *PPD*. Ces seuils peuvent être traduits en seuils de température opérative, en inversant les équations du modèle, et en posant des hypothèses sur les autres paramètres du modèle (activité métabolique M , isolement vestimentaire I_{cl} , vitesse de l'air v_a et humidité de l'air RH_a).

Tableau IV-8: définition des catégories de confort selon l'EN 15251 et l'ISO 7730

Catégorie	Description	PPD	PMV	$\Delta T_{op}[K]$
I	Le niveau d'exigence élevé est recommandé pour les espaces occupés par des personnes très sensibles et fragiles ayant des exigences particulières, comme les personnes handicapées, les malades, les très jeunes enfants et les personnes âgées.	≤ 6	$-0,2 \leq PMV \leq 0,2$	± 2
II	Un niveau d'attente normal qui devrait être utilisé pour les nouveaux bâtiments et les rénovations.	≤ 10	$-0,5 \leq PMV \leq 0,5$	± 3
III	Un niveau d'attente acceptable et modéré qui peut être utilisé pour les bâtiments existants.	≤ 15	$-0,7 \leq PMV \leq 0,7$	± 4
IV	Valeur en dehors des critères des catégories ci-dessus. Cette catégorie ne devrait être acceptée que pour une partie limitée de l'année.	> 15	$PMV < -0,7$ ou $PMV > 0,7$	

Tableau IV-9 : définition des catégories de confort selon l'ASHRAE 55

ASHRAE 55 Class	Description	PPD	PMV	$\Delta T_{op}[K]$
90 %	Il doit être utilisé lorsqu'un niveau plus élevé de confort thermique est souhaité.	≤ 10	$-0,5 \leq PMV \leq 0,5$	$\pm 2,5$
80 %	Elle est destinée aux applications typiques et doit être utilisée lorsque d'autres informations ne sont pas disponibles.	≤ 20	$-0,85 \leq PMV \leq 0,85$	$\pm 3,5$

IV.3.4 Prérequis : mesure de l'inconfort instantané

On le verra dans les sections suivantes, les indicateurs de confort à long terme n'intègrent en réalité pas directement la valeur d'un indice de confort, mais la valeur d'un facteur de pondération $w_{t,z}$ qui représente un « niveau » d'inconfort, pour un pas de temps t dans une zone z . Le facteur de pondération peut être directement égal à la valeur du PPD , qui quantifie le taux d'insatisfaction d'une ambiance au sein d'une population d'individus :

$$w_{t,z}^{PPD} = PPD \quad \text{IV-9}$$

Le facteur de pondération peut représenter un état d'inconfort binaire :

$$w_{t,z}^{BIN} = \begin{cases} 1 & \text{si la valeur de l'indicateur est hors de la gamme de confort} \\ 0 & \text{si la valeur de l'indicateur est dans la gamme de confort} \end{cases} \quad \text{IV-10}$$

Dans cette définition, la gamme de confort est délimitée par les valeurs seuils d'une catégorie de confort (voir sous-section précédente).

Le facteur de pondération peut aussi quantifier une « surchauffe » (Over-Heating, OH) instantanée, exprimée en degrés Celsius. Cette surchauffe correspond à la différence entre la valeur de la température équivalente (T_{eq}) dans l'ambiance étudiée et une valeur limite supérieure de confort T_{lim} :

$$w_{t,z}^{OH} = \begin{cases} |T_{eq} - T_{lim}| & \text{si } T_{eq} > T_{lim} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{IV-11}$$

La température équivalente peut être la température opérative T_{op} , la SET , ou tout autre indicateur de sensation thermique exprimé sous la forme d'une température. L'équation précédente peut être adaptée pour quantifier des excès de fraîcheur. Dans ce cas, T_{lim} sera une limite inférieure de température de confort.

IV.3.5 Méthodes d'intégration purement temporelle (local unique)

Les prochains paragraphes présentent les différentes méthodes d'intégrations purement temporelles, en distinguant les méthodes cumulatives, les pourcentages hors limites (Percentage Out of Range, POR), et les moyennes. Ces méthodes sont, pour la plupart, détaillées dans (Salvatore Carlucci et Pagliano 2012).

IV.3.5.1 Indice cumulatif d'inconfort

Les indices cumulatifs d'inconfort (Cumulative Discomfort Index, CDI) s'obtiennent en intégrant temporellement le facteur de pondération $w_{t,z}$. Etant donné qu'à l'issue des simulations, les valeurs du facteur de pondération ne sont disponibles qu'à des pas de temps discrets, l'intégration temporelle prend la forme d'une somme discrète :

$$CDI = \sum_t w_{t,z} \cdot I_t \cdot h_t \quad \text{IV-12}$$

Dans cette formule, l'indice t identifie les pas de temps auxquels les données sont disponibles, la grandeur I_t est la fonction d'occupation des occupants, et la grandeur h_t correspond à la durée d'un pas de temps (souvent 1h).

Pourcentage cumulé de personnes insatisfaites (CPPD)

Le pourcentage cumulé de personnes insatisfaites s'obtient avec le facteur de pondération égal au PPD :

$$w_{t,z} = w_{t,z}^{PPD} \quad \text{IV-13}$$

Degrés heures d'inconfort (DDH)

Pour calculer des degrés heures d'inconfort (Discomfort Degrees Hours, DDH), le facteur de pondération doit correspondre à une surchauffe exprimée en degrés : $w_{t,z} = w_{t,z}^{OH}$. A l'issue de l'intégration, l'unité de l'indicateur obtenu est bien le degrés-heures.

Très souvent, lors du calcul des degrés heures, la surchauffe est calculée avec la température opérative simulée ($T_{eq} = T_{op}$), et avec les seuils de température définis par les normes (ISO 7730, EN 15251 ou ASHRAE 55). Lorsque les valeurs seuils sont calculées à partir du modèle adaptatif de confort, elles peuvent varier d'un jour à l'autre, en fonction de l'évolution de la température extérieure. Lorsqu'elles sont calculées sur la base du PMV/PPD , elles restent fixes, si l'activité des occupants et leur habillement ne varient pas.

La Figure IV-1 montre un exemple de calcul de degrés heures. Dans le schéma de gauche, le modèle de PMV est utilisé pour définir les seuils de température. Pour la figure de droite, c'est le modèle de confort adaptatif qui est utilisé pour définir les seuils. Sur cette figure, les températures opératives simulées ne sont pas affichées en fonction du temps, mais en fonction de la valeur de la température moyenne extérieure au moment où ces températures ont été estimées. Dans les deux figures, les croix rouges correspondent aux instants durant lesquels l'ambiance est jugée inconfortablement chaude (pour des seuils correspondant à une catégorie III de confort du Tableau IV-8), et les segments verticaux représentent les valeurs de la surchauffe $w_{t,z}^{OH}$.

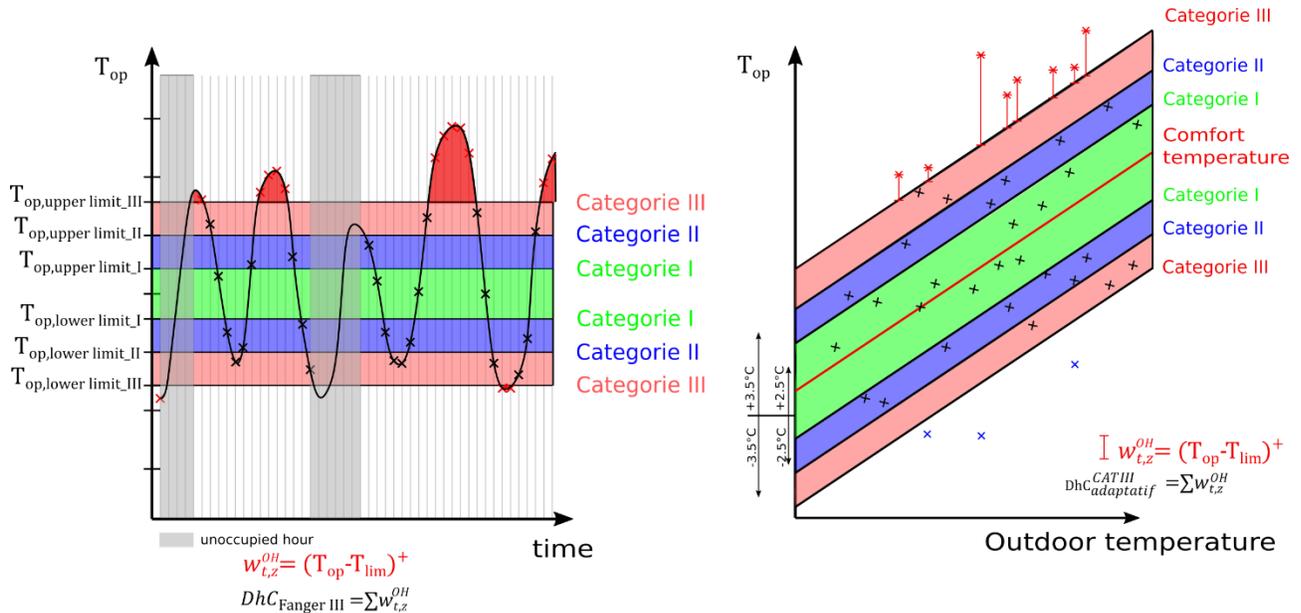


Figure IV-1: Schéma d'explication des degrés heures

La littérature décrit quelques exemples de travaux pour lesquels des degrés heures d'inconfort ont été calculés sur la base de la *SET*. (Machard 2021) a calculé des degrés heures d'inconfort avec un facteur de pondération $w_{t,z}^{OH}$ défini sur la base du *SET*, avec un seuil fixe de 25.6°C qui correspond au début des sensations d'inconfort liée à la chaleur selon le Tableau IV-6. (Laouadi, Bartko, et Lacasse 2020) ont également développé un indicateur en se basant sur la *SET*, avec des seuils différents entre les pièces de vie et les pièces de nuit.

Nombre d'heures au-dessus d'un seuil (IOH duration)

Pour ce type d'indicateur, le facteur de pondération mesure un état d'inconfort binaire $w_{t,z} = w_{t,z}^{BIN}$ (valeurs égales à 0 ou à 1). Le pas de temps h_t est exprimé soit en heures (pour obtenir un nombre d'heures), soit en jours.

Nombre d'heures consécutives au-dessus d'un seuil (CIOH duration)

Cet indicateur présente des similitudes avec l'indicateur précédent : $w_{t,z}$ mesure un état d'inconfort binaire, et h_t est exprimé en heures ou en jours. Mais cette fois-ci, on calcule une somme sur chaque plage temporelle durant laquelle $w_{t,z} = 1$ en continu, et on retient le maximum des sommes obtenues.

C'est sur ce principe que (Machard 2021) a défini un indice de surchauffe intérieure qui représente les risques potentiels sur la santé d'exposition à de forte chaleur. Cet indicateur s'obtient en calculant le nombre de jours consécutifs pour lesquels les valeurs de *SET* sont supérieures au seuil de 25,6 °C.

IV.3.5.2 Pourcentage hors de la gamme (Percentage Out of Range, POR)

Cette catégorie d'indicateur correspond au pourcentage d'heures d'inconfort. C'est le ratio entre le nombre d'heures d'occupation inconfortable sur le nombre d'heures total d'occupation de l'espace. Le *POR* se calcule avec l'équation ci-dessous, avec le facteur de pondération qui mesure un état d'inconfort binaire.

$$POR = \frac{\sum_t w_{t,z}^{BIN} \cdot I_t \cdot h_t}{\sum_t I_t \cdot h_t} \quad \text{IV-14}$$

La Figure IV-2 présente un exemple du calcul d'un indicateur POR , où les limites de la gamme de confort correspondent à une ambiance de Catégorie III, définie sur la base du PMV par la norme EN 15251. Chaque ligne verticale représente un pas de temps. En gris, sont représentées les périodes d'inoccupation. Chaque croix rouge correspond à une heure durant laquelle le bâtiment est occupé, et durant laquelle l'environnement est jugé inconfortable. Sur cet exemple, 15 heures sont inconfortables sur les 38 heures d'occupation simulée. La pièce est donc inconfortable pendant $15/38=39,5\%$ de son temps d'occupation.

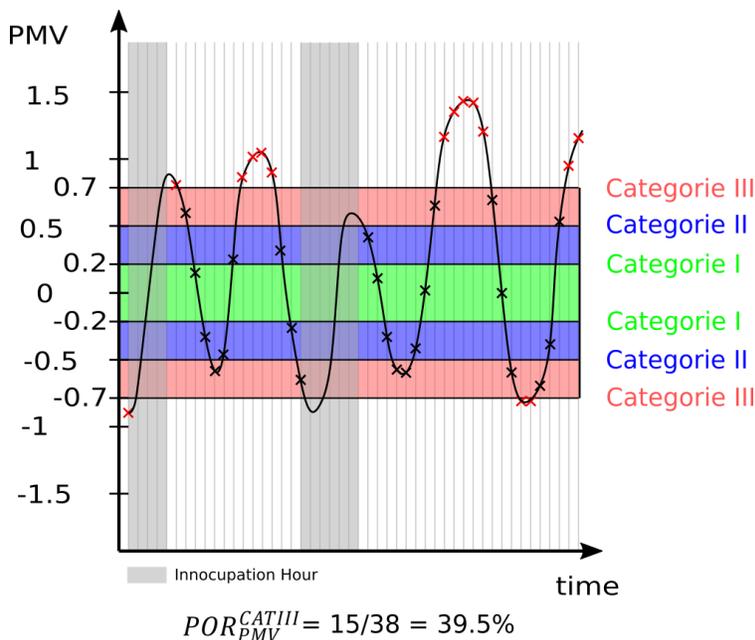


Figure IV-2: Schéma explicatif du calcul de l'indicateur POR dans le cas de l'utilisation du PMV

Exceedence (EX)

L'Exceedence a été développé par (Borgeson et Brager 2011). La formule de l'Exceedence est renseignée ci-dessous :

$$EX = \frac{\sum_t w_{t,z}^{BIN} \cdot n_t \cdot h_t}{\sum_t n_t \cdot h_t} \quad \text{IV-15}$$

Cette formule correspond à la formule du POR dans laquelle la fonction heaviside de présence (I_t) a été remplacée par le nombre d'occupants du local (n_t). L'Exceedence correspond alors à un POR , pondéré dynamiquement par le taux de présence du local. De ce fait, si un local est peu occupé, son état d'inconfort aura moins de poids que s'il est fortement occupé.

Le principe de calcul de l'Exceedence est illustré par la Figure IV-3. Sur ce schéma, la zone 1 est souvent jugée comme inconfortable (12 heures dans l'exemple) mais touche peu d'occupants (seulement 2 occupants) tandis que la zone 2 est jugée inconfortable seulement pendant 3 heures mais affecte plus d'occupants (10 personnes dans l'exemple). Avec l'Exceedence, le pourcentage d'inconfort est quasiment similaire dans les deux zones, alors qu'il aurait été beaucoup plus important dans la zone 1 avec le POR .

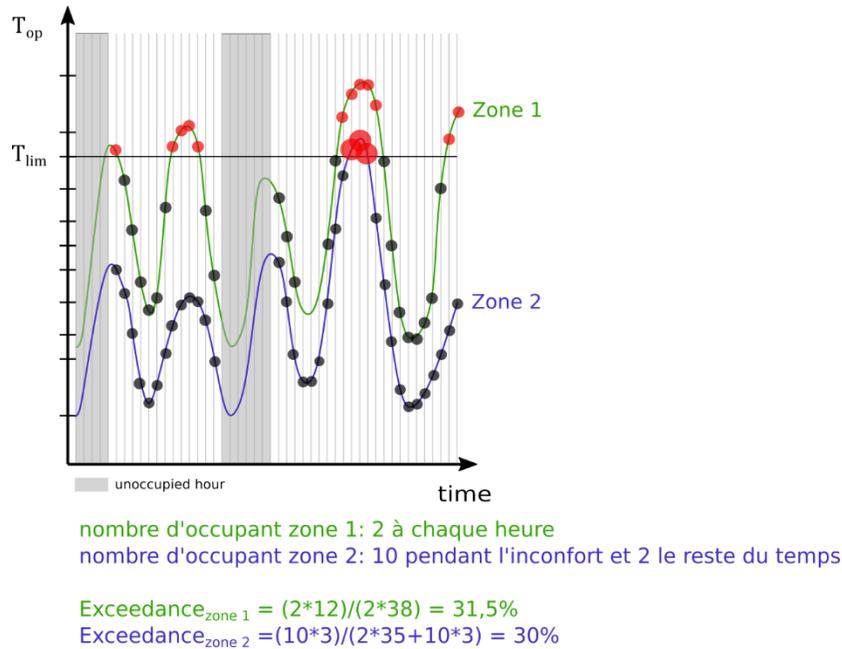


Figure IV-3 : schéma d'illustration du calcul de l'exceedance (Borgeson et Brager 2011)

IV.3.5.3 Inconfort moyen (Average Discomfort, AD)

La formule générale qui permet de calculer les indicateurs d'inconfort moyen est renseignée ci-dessous. Elle est identique à la formule du *POR*, à la différence près que $w_{t,z}$ mesure maintenant une surchauffe, ou correspond au *PPD*.

$$AD = \frac{\sum_t w_{t,z}^{PPD \text{ ou } OH} \cdot I_t \cdot h_t}{\sum_t I_t \cdot h_t}$$

La littérature recense quelques exemples d'application de ces indicateurs d'inconfort moyen. (S. Carlucci et al. 2018) ont calculé la moyenne du *PPD* sur la période d'occupation. (Hamdy et al. 2017) ont calculé la moyenne temporelle des surchauffes, avec soit un seuil fixe, soit un seuil défini par le modèle de confort adaptatif.

IV.3.5.4 Valeur maximum de l'indicateur instantané (Maximum Discomfort, MD)

(Machard 2021) utilise la valeur maximale de la *SET* sur la période de simulation afin de comparer l'intensité de sensation de chaleur maximum ressentie selon différents climats et différentes conceptions de bâtiments.

IV.3.5.5 Synthèse des méthodes d'intégration temporelle

Le Tableau IV-10 évalue les différentes méthodes d'intégration purement temporelles vis-à-vis des critères de sélection listés au début de cette section. Les critères pleinement remplis sont identifiés par des croix, les critères remplis sous conditions sont identifiés par des astérisques.

Tableau IV-10 : synthèse des méthodes d'intégration purement temporelles

Nom	Acronyme	Interprétabilité des valeurs	Quantifie une sensation de chaleur sur toute la période	Insensible à la période de calcul
Cumulative Percentage of People Dissatisfied	CPPD	X		
Discomfort Degrees Hours	DDH		X	*
Indoor OverHeating duration	IOH duration	X		*
Consecutive Indoor OverHeating duration	CIOH duration	X		*
Percentage Out of Range	POR	X		
Average Discomfort	AD	X	X	
Maximum Discomfort	MD	X		X

Seuls les DDH ne satisfont pas le critère concernant l'interprétabilité des valeurs. En effet, il est difficile d'interpréter une valeur de degrés heures d'inconfort, car il n'existe pas d'ordres de grandeur pour savoir si la valeur de cet indicateur reflète une bonne ou une mauvaise performance thermique du local.

Seules les méthodes DDH et AD permettent de quantifier la sensation de chaleur sur toute la période d'étude. En effet, pour ces deux méthodes, le facteur de pondération quantifie une surchauffe dans le local, et la surchauffe est directement proportionnelle à la sensation de chaleur ressentie par les occupants. De plus, ce sont des méthodes intégratrices, qui prennent en compte les conditions thermiques dans les locaux durant toute la période de simulation.

A contrario, la méthode CPPD se base sur le *PPD* qui ne quantifie pas directement une sensation de chaleur. Les méthodes IOH duration, CIOH duration, et POR ne sont pas sensibles à l'intensité des surchauffes, car elles ne font que comptabiliser le temps durant lequel l'ambiance est jugée inconfortable. La méthode MD réduit ce qui se passe durant toute la période de simulation à un instant extrême unique. Toutes ces méthodes ne permettent donc pas de quantifier la sensation de chaleur sur toute la période d'étude.

Rappelons maintenant que l'objectif est de trouver une méthode d'intégration temporelle qui permet d'évaluer les ambiances thermiques durant des épisodes de canicule. Les méthodes de cumul DDH, IOH duration, et CIOH duration nécessitent de définir un seuil qui doit permettre de distinguer si une ambiance est confortable ou si elle est inconfortable. Ces méthodes réalisent ensuite une intégration uniquement sur les périodes d'inconfort. Si la valeur du seuil est élevée, les périodes d'inconfort se concentreront autour de la période de canicule, quelle que soit la durée de la période d'analyse. La valeur des indicateurs DDH, IOH duration, et CIOH duration ne dépendra pas de cette durée. A contrario, si la valeur du seuil est trop basse, des périodes d'inconfort pourront être identifiées en dehors de la période d'influence de la canicule, et les valeurs des indicateurs pourront dépendre de la durée d'analyse. Pour ces trois méthodes, la conformité avec le troisième critère d'évaluation est donc tributaire de la valeur des seuils utilisés.

Les équations utilisées pour calculer les AD et les POR ont un dénominateur qui représente l'intégrale des périodes d'occupation durant la période d'analyse. Plus cette période d'analyse est prolongée, plus les effets des canicules seront noyés.

IV.3.6 Intégration spatio-temporelle (plusieurs locaux)

Lorsqu'un bâtiment comporte plusieurs locaux, il faut réaliser une agrégation spatiale pour obtenir un indicateur représentatif du comportement thermique de tous les locaux.

L'agrégation spatiale peut se faire avant l'intégration temporelle (agrégation spatiale préalable). Dans ce cas, c'est la valeur de l'indicateur de confort instantané qui est agrégée à chaque instant. L'agrégation peut aussi se faire sur la valeur d'un indicateur à long terme calculés pour chaque local (agrégation spatiale postérieure). Enfin, l'agrégation spatiale peut se faire en même temps que l'intégration temporelle, c'est-à-dire qu'une équation unique est utilisée pour réaliser les deux opérations (agrégation spatiale combinée).

Les paragraphes ci-dessous recensent les différentes méthodes d'agrégations spatiales préalable, postérieure, et combinée utilisées dans la littérature. Dans tous les cas, on s'attachera à analyser les règles de pondération entre locaux.

IV.3.6.1 Agrégation spatiale préalable

Moyenne pondérée par la surface des locaux

Les règles d'intégration spatiale proposées par les standards ISO 7730 et EN 15251 consistent à calculer la moyenne spatiale des indicateurs instantanés, pondérée par la surface au sol de chacune de zones (Salvatore Carlucci 2013).

IV.3.6.2 Agrégation spatiale postérieure

Moyenne non pondérée

Pour évaluer l'inconfort dans un bâtiment comprenant plusieurs locaux, (Hamdy et al. 2017) ont calculé un POR pour chaque local, et ont ensuite calculé la moyenne non pondérée de ces valeurs de POR. De même, (Attia et al. 2021) ont calculé la moyenne non pondérée de DDH calculés pour différents locaux.

IV.3.6.3 Agrégation spatiale combinée

Long-term Percentage Dissatisfied (LPD)

Le LPD est un indicateur développé par (Salvatore Carlucci 2013) qui correspond à la probabilité horaire d'insatisfaction calculée pour chaque zone, pondérée en fonction du nombre de personnes à l'intérieur de la zone, et normalisée par rapport au nombre total de personnes à l'intérieur du bâtiment et sur l'ensemble du temps correspondant à la période de calcul saisonnier. Cet indicateur correspond donc à une moyenne temporelle et spatiale du pourcentage de personnes insatisfaites de l'ambiance thermique pondérée par le taux d'occupation de chaque zone.

$$LPD = \frac{\sum_z \sum_t w_{t,z}^{PPD} \cdot n_{t,z} \cdot h_t}{\sum_z \sum_t n_{t,z} \cdot h_t}$$

IV.3.6.4 Synthèse des méthodes d'intégration spatiales

Cette analyse vise uniquement à apporter un regard critique sur les pondérations appliquées aux différents locaux lors de l'agrégation spatiale des indicateurs. Trois types de pondération ont été

recensés : l'absence de pondération (tous les locaux ont le même poids), la pondération par la surface des locaux, et la pondération par le nombre d'occupants instantané dans les différents locaux.

Il est clair que la première méthode risque d'induire des biais dans l'analyse des résultats, avec certains locaux peu occupés (sanitaires, etc.) sur-représentés dans la part de l'inconfort qu'ils apportent.

La pondération par la surface des locaux permet d'accorder plus de poids aux grandes zones des bâtiments. L'inconvénient est que la surface au sol des zones n'est pas forcément représentative de l'occupation.

La pondération par le nombre d'occupants semble donc être l'approche la plus juste pour effectuer la moyenne d'un indicateur de confort parmi plusieurs locaux. L'inconvénient principal de ce type de pondération, est qu'il nécessite d'établir un scénario précis d'occupation des locaux.

IV.4 Synthèse - Stratégie adoptée

IV.4.1 Synthèse

Nous avons vu dans la première section de ce chapitre que l'indicateur *SET* semblait être l'indicateur le plus adéquat pour évaluer la sensation thermique instantanée des occupants.

Dans la seconde section de ce chapitre, nous avons vu qu'il n'existait pas à l'heure actuelle de méthode d'intégration spatiale qui soit pleinement satisfaisante au regard des critères que nous avons établis. Plus particulièrement, la seule méthode qui ne soit pas sensible à la période d'analyse des résultats est le calcul de l'inconfort maximum (MD), et cette méthode a l'inconvénient de réduire le comportement thermique d'une ambiance pendant une longue période à un événement ponctuel extrême. Tous les autres critères sont sensibles au choix de la période d'analyse des résultats. Si un de ces indicateurs doit être choisi, la période d'analyse doit être définie précisément.

Enfin, concernant l'intégration spatiale des résultats, il semble que la pondération par l'occupation des locaux soit la méthode qui restitue le plus justement les disparités des niveaux d'exposition aux différentes ambiances des bâtiments. C'est cette méthode qui est retenue.

IV.4.2 Stratégie adoptée

Etant donné qu'aucune des méthodes d'intégration temporelle ne s'est avérée optimale, notre choix de méthode d'intégration temporelle sera donc plus arbitraire qu'optimal. Trois indicateurs sont développés. Les trois indicateurs sont calculés à partir de séries temporelles de l'agrégation spatiale de la *SET*. Nous adoptons alors une stratégie d'agrégation préalable pour les trois indicateurs. Les valeurs agrégées spatialement de la *SET* sont notées SET_t . L'agrégation spatiale se fait en calculant la moyenne de la valeur de la *SET* pondérée par le taux d'occupation :

$$SET_t = \frac{\sum_z SET_{t,z} \cdot n_{t,z}}{\sum_z n_{t,z}} \quad \text{IV-16}$$

Les trois indicateurs sont schématisés par la Figure IV-4. Cette figure représente l'évolution temporelle de la SET_t . La période sur laquelle les indicateurs sont calculés sera précisée dans le chapitre V lors de la définition du protocole d'évaluation des performances des bâtiments.

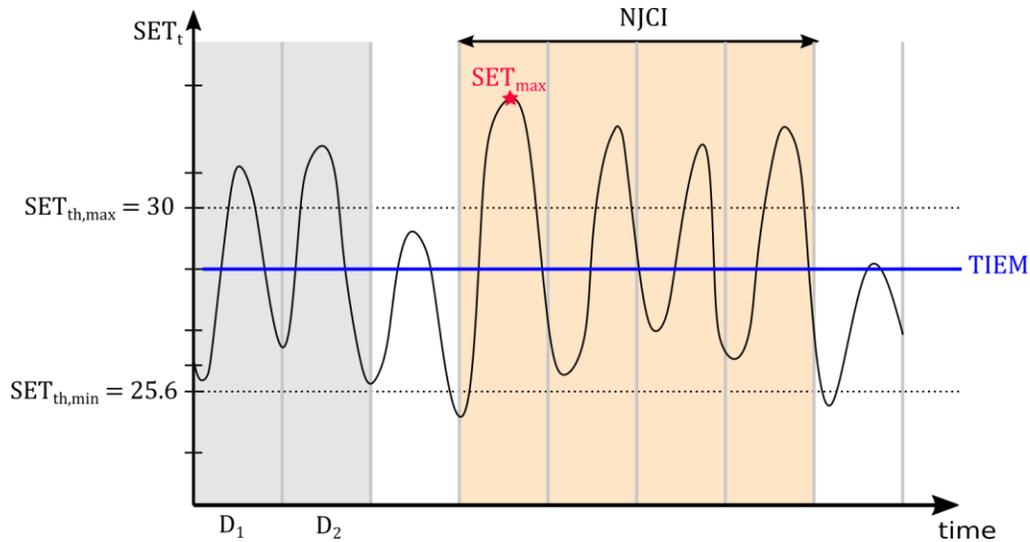


Figure IV-4 : représentation schématique des indicateurs développés : TIEM (ligne horizontale bleue), SET_{max} (étoile rouge) et NJCI (zone orangée).

La Température Intérieure Equivalente Moyenne (TIEM)

Cet indicateur correspond à la moyenne temporelle de la SET_t : (représenté par la ligne horizontale bleue sur la Figure IV-4) :

$$TIEM = \frac{\sum_t SET_t \cdot h_t}{\sum_t h_t} \quad IV-17$$

L'utilisation de la moyenne permet de connaître l'intensité globale de la sensation de chaleur ressentie.

Valeur maximale (SET_{max})

C'est la valeur maximale de la série temporelle SET_t (étoile rouge sur la Figure IV-4). Elle représente les conditions les plus extrêmes obtenues lors de la canicule.

Nombre de jours consécutifs d'inconfort (NJCI)

Le troisième indicateur vise à donner une indication sur la durée des épisodes de forte chaleur atteints dans les locaux. La définition du NJCI reprend les mécanismes d'identification d'une canicule utilisés par le système d'alerte canicule en France (Pascal et al. 2006). Ainsi le nombre de jour consécutif NJCI peut correspondre à la durée de canicule à l'intérieur des bâtiments.

L'indicateur NJCI représente le nombre de jour consécutif maximum pendant lesquels les valeurs maximum et minimum journalières de la série temporelle SET_t sont supérieures aux seuils $SET_{th,max}$ et $SET_{th,min}$.

Les seuils sont définis à partir des valeurs de sensation thermique de la SET (Tableau IV-6). Pour cette étude, il a été considéré qu'en dessous du seuil de SET de 25.6°C (limite basse de la catégorie « Un peu chaud, un peu inacceptable »), il serait possible pour les occupants d'avoir un moment de répit dans la journée, permettant de se rafraîchir, c'est pourquoi ($SET_{th,min} = 25.6^\circ\text{C}$). Pour le seuil de la valeur maximum journalière de SET ($SET_{th,max}$), il a été considéré qu'il fallait éviter au maximum que les occupants se retrouve dans la catégorie de sensation thermique « Chaud,

inconfortable, inacceptable » du Tableau IV-6, c'est pourquoi le seuil maximum a été défini à 30°C ($SET_{th,max} = 30^{\circ}C$). Ces seuils sont représentés par les lignes horizontales noires pointillées sur la Figure IV-4.

Sur la Figure IV-4, les zones grisées et orangées représentent un nombre de jour consécutif où les valeurs maximums et minimums journalières de SET_t sont supérieures aux seuils. Le nombre de jours consécutifs maximum est représenté par la zone orangée et représente l'indicateur *NJCI*.

Chapitre V

Etude de la performance des bâtiments face aux canicules futures

V.1 Introduction

La Figure V-1 rappelle les différents éléments du protocole d'évaluation des performances des bâtiments passifs en période de fortes chaleurs, tels qu'ils ont été définis dans l'introduction de ce manuscrit. Une partie de ces éléments a été développés de manière précise dans les chapitres précédents.

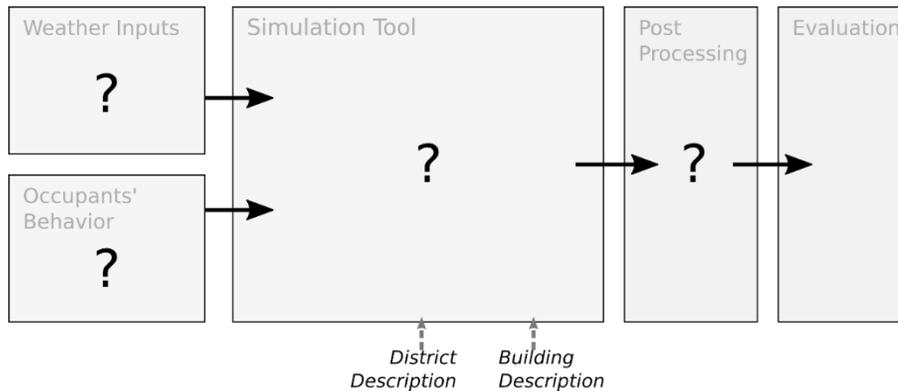


Figure V-1 : Eléments du protocole

Le premier objectif de ce chapitre est de proposer un protocole complet pour évaluer les performances des bâtiments pendant les canicules à venir. Afin de réaliser cet objectif, les éléments de protocole qui ont été développés dans les chapitres précédents seront assemblés. Le comportement des occupants n'a pas fait l'objet d'un chapitre dédié, cet élément sera donc décrit dans ce chapitre afin de compléter le protocole.

Le deuxième objectif de ce chapitre est de tester le protocole en réalisant des simulations sur 4 cas d'étude. Pour chaque cas d'étude, plusieurs simulations doivent être réalisées (une pour chaque fichier météorologique de canicule) et plusieurs indicateurs sont calculés. Ce premier test du protocole permet de révéler les problématiques liées à la multiplicité des résultats de simulations obtenus.

La première partie de ce chapitre constitue une synthèse du protocole d'évaluation complet. La seconde partie décrit les cas d'étude sur lesquels le protocole est testé. La troisième partie décrit et analyse les résultats de simulations.

V.2 Synthèse : protocole d'évaluation complet

La Figure V-2 présente le protocole d'évaluation complet. Sur cette figure, les différents éléments du protocole sont illustrés avec les solutions définies dans les chapitres précédents.

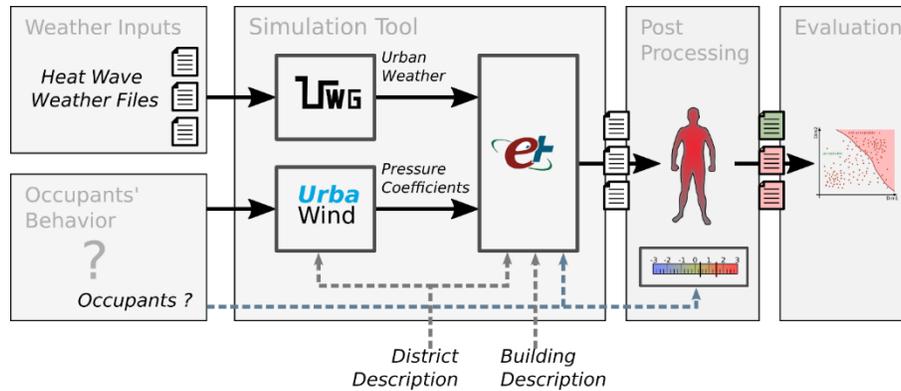


Figure V-2 : protocole d'évaluation des performances d'un bâtiment urbain passif face aux canicules à venir

V.2.1 Modèle de comportement thermique de bâtiment (Simulation Tool)

Le modèle utilisé par le protocole pour simuler le comportement des bâtiments est l'UTTC qui a été défini dans le chapitre II. L'UTTC fournit directement des valeurs de température d'air, température radiante moyenne, et humidité relative de l'air dans les différents locaux. Par contre, il ne fournit pas de valeur de vitesse de l'air, or cette valeur est nécessaire pour calculer la *SET*.

Pour calculer la vitesse de l'air, une stratégie arbitraire a été définie. Le débit d'air traversant chaque zone est divisé par une moyenne entre la surface moyenne des ouvertures et la section transversale moyenne du local (Holmes, Phillips, et Wilson 2016). Le principe du calcul est illustré par le schéma de la Figure V-3. Sur cette figure, deux configurations extrêmes de tube de courant sont schématisées avec des lignes pointillées bleues et oranges. Les pointillés bleus représentent un tube de courant s'étalant sur toute la largeur de la pièce. L'air s'écoule sur l'intégralité de la section de la pièce S_t , la vitesse de l'air est minimale. Les pointillés oranges représentent le cas où l'air s'écoulerait directement d'une ouverture à l'autre. La section de passage moyenne de l'écoulement est égale à $\left(\frac{S_f + S_p}{2}\right)$. La vitesse moyenne qui en résulte est maximale.

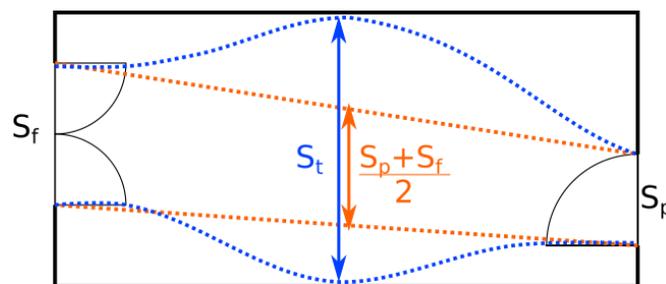


Figure V-3 : Schéma d'explication du calcul de la vitesse d'air dans une pièce rectangulaire. Deux configurations extrêmes de tubes de courant.

Il est plutôt probable que l'écoulement réel de l'air se trouve entre les deux extrêmes, c'est pourquoi pour calculer une vitesse d'air v_a moyenne dans la pièce, il a été décidé de diviser le débit d'air Q_v (en m^3/s) par une surface correspondant à la moyenne entre la section transversale moyenne de la pièce et la surface d'ouverture moyenne :

$$v_a = \frac{Q_v}{S_t + \frac{(S_f + S_p)}{2}} \quad \text{V-1}$$

V.2.1 Les canicules (Weather Inputs) – Période de simulation

Dans le chapitre III, un jeu de canicule minium a été défini. Il permet de représenter la diversité des canicules à venir pour la localisation de Lyon. Les fichiers météorologiques de ces canicules seront utilisés comme données d’entrée de l’UTTC. Afin d’initialiser les simulations, une période tampon de 15 jours avant les canicules sera simulée. De plus afin de considérer la rémanence des conditions de forte chaleur dans les bâtiments, après l’épisode caniculaire à cause de leur inertie, une période de 7 jours est considérée après la fin des canicules. Le Tableau V-1 présente de nouveau la valeur des indicateurs de canicule pour les huit canicules représentatives sélectionnées.

Tableau V-1 : Valeurs de l'ensemble minimal de canicules dans l'espace de caractérisation des canicules

	duration	ta_avg	tsky_avg	ws_avg	ta_avg_prior	rsw_gh_avg	rh_avg	cp_sol	
Unité	[d]	[°C]	[°C]	[m/s]	[°C]	[W/m ²]	[%]	[-]	Nb canicules
Plage de valeur	[3; 16]	[28,4; 33]	[10,1; 18,6]	[1,82; 4,37]	[22,2; 30,4]	[207; 321]	[27; 57,3]	[0,4; 0,9]	
1	3	31,16	17,68	3,65	25,18	307,88	41,4	0,25	250
2	4	30,89	13,7	5,46	24,62	299,19	31,78	0,72	246
3	5	29	17,35	1,9	23,14	280,1	59,76	0,88	297
4	6	28,79	10,1	3,96	23,14	236,33	41,16	0,57	564
5	6	33,73	14,62	3,96	26,45	220,03	22,6	0,53	253
6	6	29,31	15,43	2,24	23,75	284,94	53,3	0,91	238
7	10	34,31	17,17	3,42	24,82	300,13	27,24	0,8	316
8	30	32,81	18,57	2,8	31,57	265,86	36,71	0,8	65

V.2.2 Indicateurs de performances (Post Processing)

Pour analyser les résultats de simulations, les trois indicateurs de performances définis dans le chapitre IV seront utilisés. Ces trois indicateurs sont la Température Intérieure Equivalente Moyenne (*TIEM*), la température standard maximale (*SET_{max}*), et le Nombre de Jours Consécutif d’Inconfort (*NJCI*).

La période considérée pour le calcul des trois indicateurs de sensation thermique commence au début des canicules et se finit 7 jours après la fin des canicules afin de prendre en compte l’inertie des bâtiments.

Le calcul de la *SET* nécessite de connaître les six grandeurs de base du confort thermique. Les grandeurs environnementales sont calculées par l’UTTC. Les grandeurs liées aux occupants (le niveau d’habillement et le taux de métabolisme des occupants) sont définies dans la section suivante.

V.2.3 Modélisation des occupants

La modélisation du comportement des occupants englobe la modélisation de la présence des occupants dans les différents locaux, la modélisation des actions des occupants sur les ouvrants : fenêtre, portes, volets et les paramètres individuelles de base pour le confort : le niveau d'habillement et le métabolisme énergétique.

La modélisation du comportement des occupants n'a pas été explorée en détails dans les travaux de cette thèse. Cependant, pour tester le protocole, il a fallu définir un modèle de comportement des occupants. Ce modèle a été défini arbitrairement. Dans ce modèle, les sous-modèles de présence et d'actions des occupants sont des modèles déterministes passifs : la présence et les actions des occupants sont définis à l'avance. Le modèle est implémenté sous la forme de profils d'occupations et de comportements d'occupants (fenêtres, portes, volets, occupations, apports internes...) sous EnergyPlus.

Concernant le modèle de présence des occupants : les occupants sont considérés présents tout le temps dans leur logement. La journée, ils sont dans les pièces de vie, la nuit dans les chambres. Cette configuration peut s'apparenter aux situations de confinements liées au COVID19 auxquelles la France a fait face pendant plusieurs périodes entre 2020 et 2021. C'est une configuration s'apparentant au pire cas possible pour des occupants de bâtiments non performants, puisqu'ils n'ont pas la possibilité de se réfugier dans des zones climatisées plus tempérées pendant la journée (comme dans des bâtiments de bureaux climatisés, ou des espaces extérieurs frais). La chambre à coucher parentale est occupée par 2 adultes, et les chambres supplémentaires sont occupées chacune par un enfant. Pendant la journée, la pièce de vie principale est occupée par les parents et les enfants.

Les actions des occupants sur les ouvrants sont modélisées comme suit : les fenêtres sont ouvertes la nuit à partir de 21 heures jusqu'à 8 heures le matin, et fermées le reste du temps. Les volets ou stores sont fermés la journée de 8 heures à 20 heures, et ouverts pendant la nuit. De cette manière les apports solaires seront limités la journée et la ventilation naturelle sera à son maximum la nuit. Les portes intérieures sont ouvertes pendant toute la période des simulations. Ces actions correspondent à un comportement idéal des occupants durant une période de forte chaleur.

Pour les paramètres de confort liés à l'occupant, ils ont été fixés selon les zones thermiques considérées. Le métabolisme est fixé à 1,2 MET dans les pièces de vie, correspondant à une activité sédentaire et à 0,8 MET dans les chambres à coucher, correspondant à du repos, couché (Tableau A-9). Le niveau d'habillement est considéré assez faible, avec 0,3 Clo, correspondant à un sous-vêtement, un short, un T-shirt, et des sandales (Tableau A-10).

Pour aller un peu plus loin sur la modélisation du comportement des occupants, le lecteur peut se référer à des articles de revue de littérature sur le sujet ((Gunay, O'Brien, et Beausoleil-Morrison 2013), (Gaetani, Hoes, et Hensen 2016)).

V.3 Cas d'étude

Dans ce chapitre, les cas d'étude sont les mêmes que ceux qui ont été utilisés pour confronter la chaîne d'outils de simulation UTTC avec des mesures expérimentales. Ils sont définis dans la partie II.4.2 et dans l'Annexe 2 : Paramètres de l'enveloppe thermique et plan des cas d'étude.

Le Tableau V-2 rappelle quelques caractéristiques importantes de ces cas d'étude. La première colonne indique le coefficient de déperdition thermique de chaque cas d'étude. La deuxième colonne

donne la classe d'inertie des appartements. La troisième colonne décrit si l'appartement est mono-orienté ou traversant et enfin la dernière colonne précise l'orientation des façades des différents appartements.

Tableau V-2 : caractéristiques des cas d'étude

	$U_{\text{appart}} [W/(m^2 \cdot K)]$	Classe d'inertie	Traversant ou mono-orienté	Orientation
Canut	1,45	Très lourde	Mono-orienté	Sud
Industrielle	0,6	Très lourde	Mono-orienté	Ouest
Reconstruction	0,68	Lourde	Traversant	Est – Ouest
Contemporain	0,23	Très Lourde	Traversant	Nord - Sud

La Figure V-4 rappelle les plans des 4 appartements étudiés ainsi qu'une photo aérienne permettant d'observer les différences de morphologie urbaine.

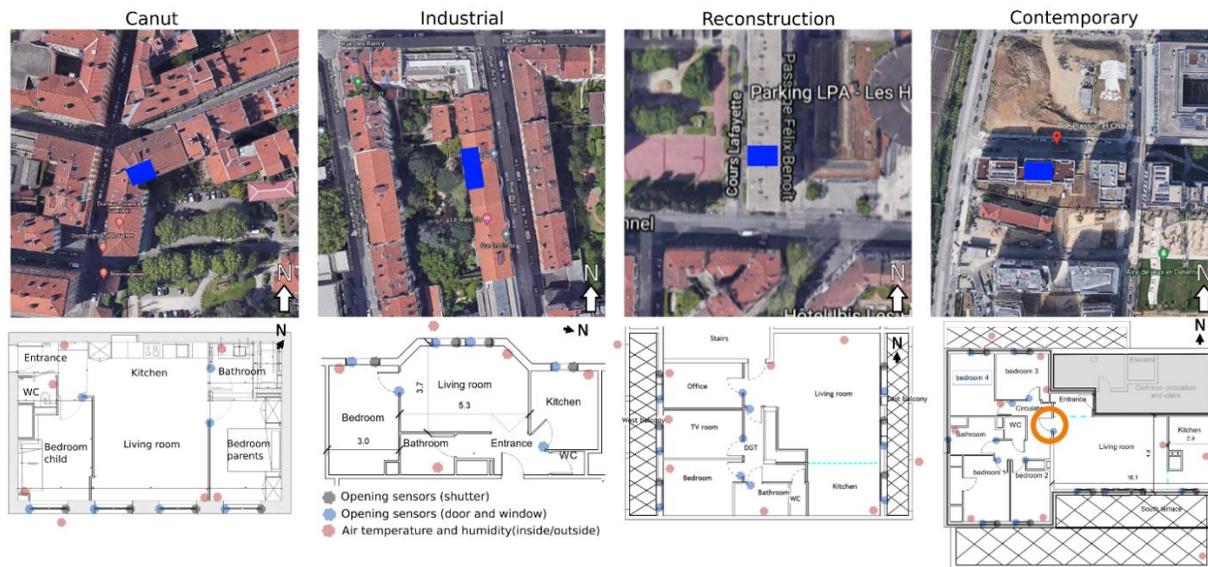


Figure V-4 : Environnement urbain autour des bâtiments étudiés (le rectangle bleu correspond à l'appartement étudié), plans des appartements et emplacement des capteurs (Google Maps 2022)

V.4 Résultats

Dans un premier temps les résultats seront traités par cas d'étude : les réponses d'un même cas d'étude aux différentes canicules seront analysées. Ensuite, les performances des différents bâtiments seront comparées. Les évolutions temporelles de température standard agrégée (SET_t) des quatre appartements sont tracées pour chaque canicule dans l'Annexe 6 : Evolution temporelle de la sensation thermique des occupants.

V.4.1 Description des résultats de simulation par cas d'étude

La Figure V-5 présente les résultats de simulations pour les quatre cas d'étude et pour les huit canicules représentatives. Un graphique a été produit pour chacun des cas d'étude. L'axe des

abscisses représente l'index des différentes canicules (première colonne du Tableau III-8). Chaque graphique comprend deux axes en ordonnée : celui de gauche représente l'indicateur $NJCI$ en jour et celui de droite représente les indicateurs $TIEM$ et SET_{max} en degré Celsius. Les valeurs de $NJCI$ sont représentées par le diagramme en barre bleue. Les valeurs maximums SET_{max} sont représentées par des points rouges et celles de l'indicateur $TIEM$ par des triangles violets.

V.4.1.1 Bâtiment des Canuts

Les valeurs de $NJCI$ pour le bâtiment Canut (barres bleues en haut à gauche de la Figure V-5) sont nulles pour les canicules 2, 4 et 6. Cela signifie que les valeurs de SET_t journalières maximums et minimums sont toujours inférieures aux seuils. Pour ces quatre canicules, les valeurs de $TIEM$ sont inférieures à 26°C. Pour les canicules 2 et 4, les valeurs de $TIEM$ sont inférieures à 25,6°C. La sensation thermique des occupants de ces bâtiments pendant ces canicules est donc acceptable selon l'échelle de sensation thermique de la SET définie dans le Tableau IV-6. Pour ces trois canicules, la valeur de SET_{max} qui permet d'indiquer les très fortes expositions sont inférieures à 30°C signifiant que la sensation thermique la plus dangereuse pendant ces canicules peut être qualifiée d' « un peu inacceptable » mais n'entraîne pas de disfonctionnement de la thermorégulation des occupants. La canicule 4 semble être encore moins impactante que les autres avec des valeurs maximums (SET_{max}) et moyennes ($TIEM$) 3°C inférieures aux valeurs des canicules 2 et 6. La canicule 4 est la canicule avec les températures moyenne d'air et de ciel la plus faible. C'est aussi une canicule avec une vitesse de vent moyenne assez élevée et un pourcentage de rayonnement solaire direct assez faible favorisant les mécanismes de rafraîchissement passif.

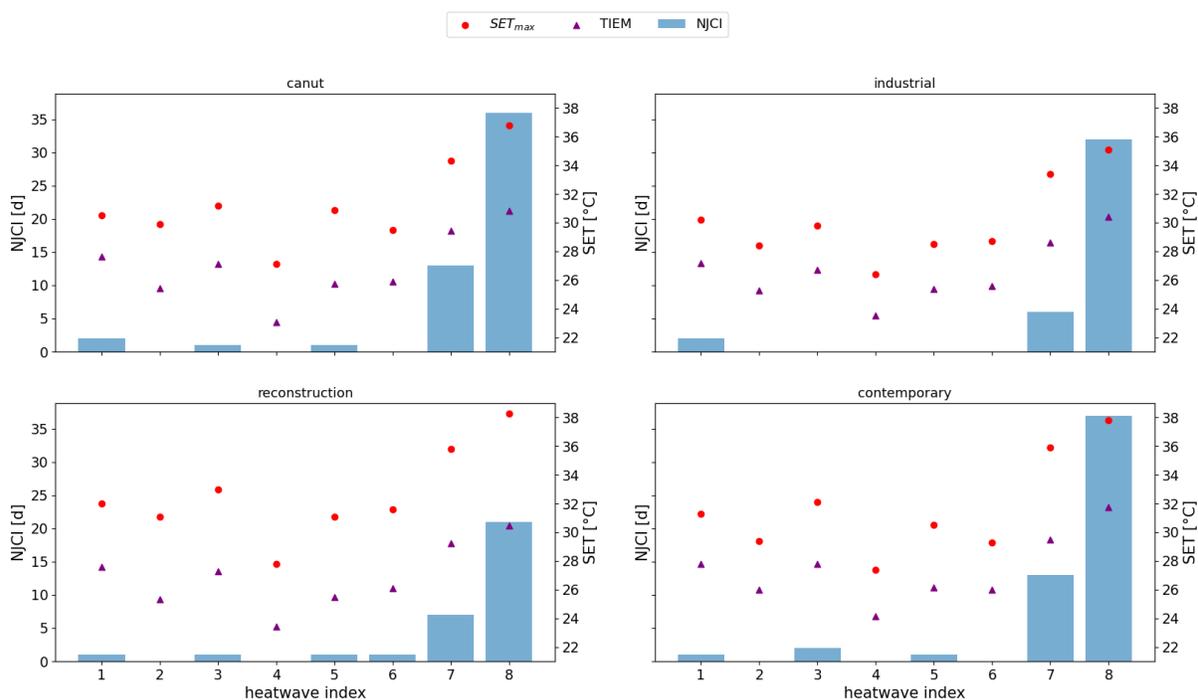


Figure V-5 : Indicateurs de performances pour les 4 bâtiments et les 8 canicules. Les barres bleues : nombre de jour supérieur aux seuils, points rouges : valeurs SET_{max} , triangles violets : valeurs de $TIEM$.

Les canicules 1, 3 et 5 semblent avoir à peu près le même impact sur l'appartement Canut. Les valeurs de $NJCI$ sont soit de 1 jour (canicules 3 et 5) soit de 2 jours (canicule 1). Les valeurs de SET_{max} sont entre 30,5 et 31,5°C correspondant à une sensation thermique « chaud, inacceptable », Mais la valeur de $TIEM$, pour la canicule 5 est 2°C inférieure aux canicules 1 et 3 avec une valeur de 25,7 °C. L'impact reste également dans le même ordre de grandeur que pour les canicules 2 et 6.

Par contre l'impact des canicules 7 et 8 est beaucoup plus important. Premièrement, le nombre de jour $NJCI$ est supérieur à 10 jours. Ceci s'explique premièrement par le fait que ces canicules sont plus longues que les autres (10 jours et 30 jours respectivement contre 6 jours ou moins pour les autres). Pour ces deux canicules, la valeur de $TIEM$ est 29,4°C et 30,8°C. Les valeurs moyennes ($TIEM$) sont presque aussi importantes que les valeurs de SET_{max} pour les autres canicules. Les valeurs de SET_{max} sont de 34,3°C et 36,8°C. Pour ces deux canicules, la sensation thermique maximale est donc proche d'être très inacceptable et induit une très forte sudation pour les occupants. Cette valeur est une valeur instantanée, et à la vue des valeurs moyennes de la sensation thermique (impliquant également de la sudation pour les occupants), il faudrait faire attention à bien se réhydrater pendant ces canicules. Une des limites de l'indicateur de sensation thermique choisi, est qu'il considère que les occupants ont une réserve d'eau illimitée. Or à force de transpirer, il y a des risques de déshydratation.

V.4.1.2 Autres cas d'étude

Il semblerait que pour les autres cas d'étude, les observations soient similaires. La canicule 4 est celle ayant le moins d'impact sur la sensation thermique des occupants dans les bâtiments. Les canicules 1, 2, 3, 5 et 6 ont des impacts plus ou moins similaires : les valeurs de $NJCI$ sont comprises entre 0 et 2 jours, les valeurs de $TIEM$ sont comprises entre 25,6°C et 28°C correspondant à une sensation thermique moyenne « un peu chaud » et les valeurs de sensation thermique maximum sont entre 29°C et 33°C et correspondent donc à une sensation de chaleur « inconfortable entraînant de la sudation ». Tout comme pour l'appartement Canut, les canicules 7 et 8 ont des impacts nettement plus élevés avec des valeurs $NJCI$ plus importantes que pour les autres canicules et des valeurs de sensation thermique max (SET_{max}) allant jusqu'à 37,8°C pour l'appartement Contemporain (en bas à droite) pour la canicule 8. Cette valeur correspond à une sensation thermique maximum très chaude et très inconfortable pouvant entraîner des dysfonctionnements de la thermorégulation. Cette canicule est donc dangereuse pour les occupants ! Ces résultats montrent que les appartements ne réagissent pas de la même manière selon les différentes canicules et que certaines canicules sont plus dangereuses pour les occupants.

Pour tous les cas d'étude, les valeurs de SET_{max} et de $TIEM$ évoluent de manières similaires entre les différentes canicules. Ces deux indicateurs classent de la même manière les disparités de comportement thermique vis-à-vis des caractéristiques des différentes canicules étudiées. Il semble que ces deux indicateurs soient redondants.

V.4.2 Comparaison des performances des différents cas d'étude

V.4.2.1 Nombre de jours d'inconfort ($NJCI$)

Afin de mieux comparer les performances des différents appartements durant les mêmes canicules, les valeurs de $NJCI$ de chacun des appartements ont été réunies dans la Figure V-6. Cette figure est un diagramme en barre, chaque appartement correspond à une couleur.

Pour la canicule 1, les valeurs de $NJCI$ sont de 2 jours pour les appartements Canut et Industriel (en bleu et orange) et de 1 jours pour les appartements Reconstruction et Contemporain (en vert et rouge). Les valeurs de $NJCI$ sont plus faibles pour les 2 appartements traversants de l'étude. Il est possible que la ventilation naturelle traversante soit à l'origine de la meilleure performance de ces deux cas d'étude. Cette canicule a une durée de 3 jours à l'extérieur (en milieu rural) et a une durée entre 1 et 2 jours à l'intérieur (indicateur $NJCI$). Les différents bâtiments n'arrivent donc pas totalement à protéger les occupants des conditions extérieures, d'autant plus que le critère (seuils $SET_{min} = 25,6^{\circ}C$) est moins restrictif que pour l'extérieur (seuil $IBM_n = 20^{\circ}C$). Ce choix a été fait car généralement l'amplitude des températures intérieures est plus faible que l'amplitude des températures extérieures (voir partie II.5).

Pour les canicules 2 et 4, les 4 bâtiments réagissent de la même manière avec une valeur nulle de $NJCI$. Pourtant la canicule 2 est plus longue que la canicule 1. Mais ses autres caractéristiques font que cette canicule est plus facilement acceptable dans les bâtiments. Par exemple, les valeurs de vitesses de vent sont beaucoup plus élevées durant cette canicule ce qui permet d'améliorer la performance de la ventilation naturelle pour refroidir les bâtiments la nuit. Par rapport à la canicule 1, la part de rayonnement solaire direct de la canicule 2 est beaucoup plus élevé (0,72 contre 0,25 pour la canicule 1). Il semblerait que dans le cas de cette étude, les scénarios de fermeture de volet suffisent à limiter les apports solaires pendant la journée.

Pour la canicule 4, l'analyse peut être similaire. Cette canicule est plus longue (6 jours) mais elle a des températures d'air et de ciel plus faibles que les autres canicules. De plus les vitesses de vent sont assez élevées pendant cette canicule et le rayonnement solaire direct ne représentent que 57% du rayonnement global permettant d'augmenter les chances des bâtiments de protéger les occupants. De plus, le rayonnement solaire global horizontal moyen pendant cette canicule est plutôt faible par rapport aux autres expliquant également pourquoi l'impact est plus faible en termes de $NJCI$ même pour une canicule plus longue à l'extérieur.

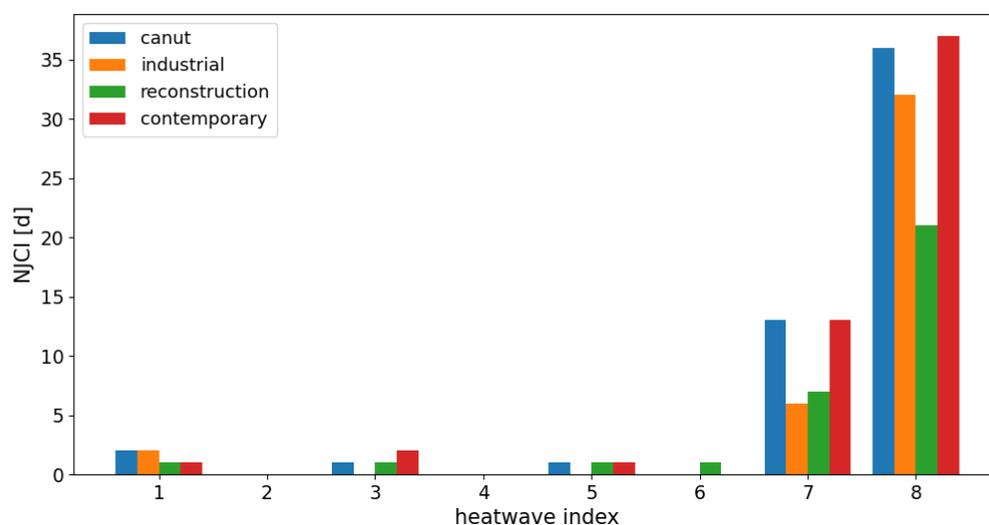


Figure V-6 : $NJCI$ en jours (Nombres de jours consécutifs avec des valeurs de SET supérieures aux seuils) pour les quatre cas d'étude et les huit canicules représentatives.

Les valeurs de *NJCI* pour la canicule 3 sont un peu différentes entre les cas d'étude. Elles varient de 0 (industrielle) à 2 jours (contemporain) en passant par 1 jours (pour canut et reconstruction). Cette canicule est plus longue (5 jours) que la canicule 1 (3 jours) mais les valeurs de *NJCI* sont dans le même ordre de grandeur. Cette canicule est par contre moins chaude que la première mais avec des vitesses de vent beaucoup plus faible (1.9m/s) pouvant limiter l'intérêt de la ventilation naturelle. Une autre différence qui peut expliquer que le nombre de jours *NJCI* pour cette canicule n'est pas plus important que pour la canicule 1 est que les températures moyennes précédant la canicule sont plus faibles, ce qui permet de stocker un peu de fraîcheur et donc ralentir les augmentations de températures intérieures grâce à l'inertie.

Même si la canicule 5 est plus longue (6 jours) que la canicule 1 (3 jours), les valeurs de *NJCI* à l'intérieur des bâtiments sont du même ordre de grandeur : 1 jours pour les tous les appartements sauf industrielle pour lequel la valeur est de 0. Cette canicule est pourtant plus chaude (2°C de plus en moyenne par rapport à la canicule 1) et les jours précédents la canicule sont également assez chauds. Mais ses autres caractéristiques semblent plutôt favorables pour qu'un bâtiment puisse protéger ses occupants. Premièrement c'est une canicule qui arrive assez tard dans l'année avec une valeur de rayonnement solaire global horizontal assez faible en comparaison des autres canicules et la part du rayonnement direct n'est que de 53%. De plus cette canicule est assez sèche avec une valeur d'humidité relative moyenne de seulement 22,6%. Cette valeur permet aux occupants de mieux tirer parti de la transpiration puisque l'air ambiant étant plus sec, peut absorber une plus grande partie de la sudation et donc mieux refroidir les occupants.

La canicule 6 a des caractéristiques assez similaires avec la canicule 3. Les principales différences étant une température de ciel plus basse et une vitesse de vent légèrement plus élevée permettant certainement aux bâtiments de réduire encore plus l'impact à l'intérieur. En effet les valeurs de *NJCI* pour la canicule 6 sont plus faibles que pour la canicule 3 sauf pour l'appartement Reconstruction avec une valeur similaire de 1 jour.

Les différences de réponses à la canicule 7 pour les valeurs de *NJCI* sont plus importantes. Les valeurs sont de 13 jours pour les bâtiments Canut et Contemporain (bleu et rouge) et de 6 et 7 jours pour les bâtiments Industrielle et Reconstruction (orange et vert). Pour les bâtiments Canut et Contemporain, il semblerait que la canicule 7 soit plus longue dans les bâtiments qu'à l'extérieur. En effet la canicule 7 a une durée de 10 jours (selon la méthode IBM). Les bâtiments Canut et Contemporain ont tous les deux des façades orientées au Sud, entraînant une plus grande sensibilité au rayonnement solaire, qui est assez important pendant cette canicule. Il se peut que cette orientation empêche ces appartements de se rafraîchir même lorsque la canicule est terminée. Le bâtiment Reconstruction possède une orientation Est/Ouest et des balcons protègent les façades des rayonnements solaires directs. Pour le bâtiment Industriel, il est orienté Ouest. Il devrait subir les rayonnements solaires de l'après-midi à la fin de la journée mais est protégé contre les rayonnements de fin d'après-midi par les bâtiments environnants.

Pour finir la canicule 8, qui est la plus longue (30 jours), est celle qui entraîne logiquement les plus fortes valeurs de *NJCI*. Comme pour la canicule 7, il y a une assez forte différence entre les réponses des différents bâtiments. Comme pour la canicule 7, les bâtiments Canut et Contemporain sont ceux avec les plus fortes valeurs de *NJCI* : 36 et 37 jours respectivement. Par contre, les valeurs de *NJCI* des bâtiments Industrielle et Reconstruction sont moins similaires que pour la canicule 7. Cette fois ci, la valeur de *NJCI* pour le bâtiment industriel est plus élevée (32 jours) que celle du bâtiment reconstruction (21 jours). Il semblerait que seul le bâtiment reconstruction soit capable de réduire la longueur de la canicule extérieure. En effet c'est le seul bâtiment pour lequel la durée de l'indicateur

$NJCI$ est plus faible que la durée de la canicule (30 jours). L’inertie plus faible de cet appartement peut éventuellement expliquer la différence de réponse face à cette canicule de longue durée. En effet, la capacité d’un appartement à évacuer la chaleur une fois qu’elle est entrée augmente pour des inerties plus faibles. La température moyenne la semaine précédant la canicule est plus importante que la température moyenne pendant la plupart des canicules représentatives avec une valeur de $31,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Avant même le début de cette canicule, les appartements sont déjà dans des situations de fortes de chaleurs, ce qui permet de renforcer l’hypothèse qu’une inertie plus légère permettrait de mieux supporter cette canicule. De plus, par rapport aux autres appartements, celui de la période Reconstruction est le seul qui possède des casquettes solaires sur l’ensemble de ses vitrages, limitant donc encore plus les apports solaires que l’utilisation d’occultations mobiles. Pendant cette canicule, la valeur de $NJCI$ est plus courte pour l’appartement Reconstruction également à cause de la discontinuité induit par les seuils qui définissent l’indicateur. En effet au milieu de la canicule, la valeur de la moyenne spatiale de SET pondérée par l’occupation descend juste en dessous du seuil $SET_{th,min}=25,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ avec une valeur de $25,55\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figure A-31 de l’annexe 6). Si le seuil $SET_{th,min}$ avait été égal à $25,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, l’indicateur $NJCI$ pour l’appartement Reconstruction aurait été également proche de 30 jours.

V.4.2.2 Sensation moyenne et maximale

Après avoir analysé les différentes réponses des bâtiments en termes de durée de canicule intérieure, les valeurs de sensation thermique moyenne et maximale seront comparées. La Figure V-7 présente les valeurs de $TIEM$ (à gauche) et de SET_{max} (à droite) pour les 4 cas d’étude et les 8 canicules représentatives. Les lignes horizontales noires pointillées représentent les différents paliers des catégories de sensation thermique de SET du Tableau IV-6.

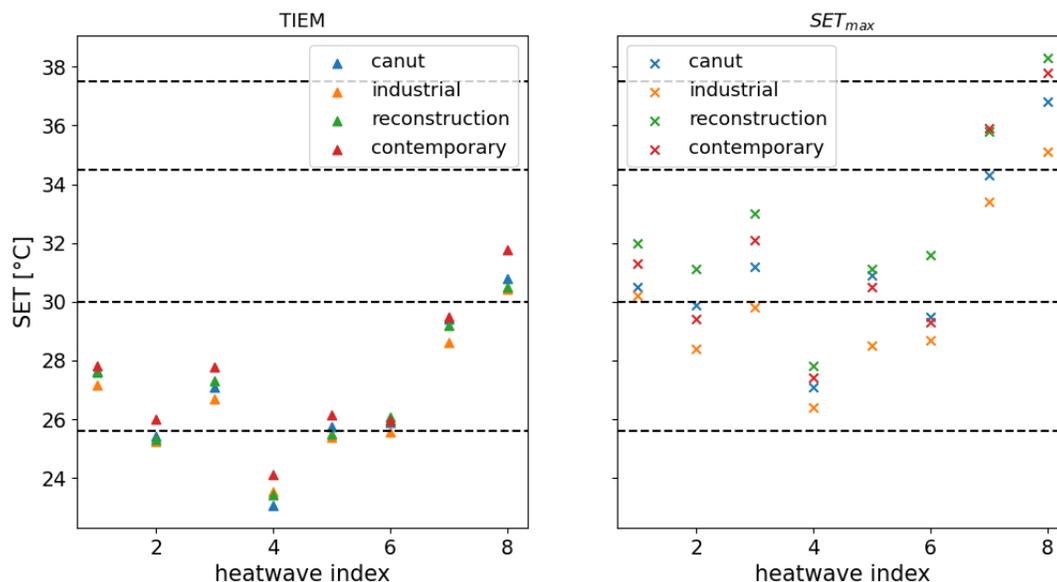


Figure V-7 : Valeurs de $TIEM$ (à gauche) et SET_{max} (à droite) pour les quatre cas d’étude et les huit canicules représentatives

Curieusement, les valeurs de sensation thermique moyenne (*TIEM*) sont relativement similaires entre les bâtiments peu importe la canicule. Cela pourrait être expliqué par le fait que le calcul d'une moyenne aurait tendance à écraser les valeurs, et ainsi masquer des disparités de *SET*. C'est quasiment toujours le bâtiment de la période industrielle qui offre la sensation thermique moyenne la plus fraîche (sauf pour la canicule 4) et le bâtiment contemporain qui entraîne la sensation thermique moyenne la plus chaude (sauf pour la canicule 6 pour laquelle les sensations thermiques sont très similaires). L'écart maximum entre les différents bâtiments est d'environ 1°C de *SET*. Excepté la canicule 8, la sensation thermique moyenne intérieure est toujours inférieure à 30°C correspondant à une sensation 'un peu chaud, un peu inacceptable' et donc un état physiologique de vasodilatation et de légère sudation (Tableau IV-6). La sensation thermique moyenne pour la canicule 8 est un peu plus importante avec des valeurs comprises entre 30,5 et 31,7°C correspondant à la catégorie supérieure de l'échelle de sensation thermique de la *SET* (Tableau IV-6). Pour la canicule 4, les valeurs de *TIEM* sont toutes inférieures à 24,2°C correspondant à une sensation thermique confortable selon le Tableau IV-6. Les bâtiments et occupants de cette étude semblent pouvoir faire face à cette canicule (représentative du cluster de canicules le plus fréquent, représentant 25% des canicules futures identifiées) sans trop souffrir.

Les valeurs de SET_{max} sont plus dispersées selon les bâtiments. Par contre, le bâtiment de la période industrielle est toujours celui ayant une valeur de SET_{max} la plus faible et le bâtiment reconstruction celui ayant la valeur la plus élevée (sauf pour la canicule 7 où les valeurs avec le bâtiment contemporain sont très similaires). Les différences de sensation thermique maximum sont entre 2,5°C et 3,5°C selon les canicules. Le bâtiment industrielle limite l'impact des différentes canicules en étant le seul pour lequel la sensation thermique maximum (SET_{max}) est majoritairement dans la catégorie de sensation thermique correspondant à une sensation 'un peu chaud'. Pour les autres cas d'étude, les valeurs de sensation maximales sont plus souvent dans la catégorie du dessus correspondant à des sensations de 'chaud' et entraînant de plus forts débits de sudation. Pendant la canicule 8, les bâtiments reconstruction et contemporain atteignent même des sensations thermiques dangereuses entraînant un dysfonctionnement de la thermorégulation des occupants (valeur de $SET_{max} > 37,5°C$). Ces deux appartements semblent d'ailleurs entraîner systématiquement des sensations d'inconfort maximales supérieures aux deux autres. Une des caractéristiques qui différencie ces deux appartements est qu'ils sont traversants. Cela permet certainement de pouvoir mieux rafraîchir la nuit mais selon les scénarios considérés, il est possible que la ventilation naturelle soit activée trop tôt et que la température extérieure soit plus importante que la température intérieure entraînant une surchauffe momentanée au lieu d'un effet rafraîchissant. La plus faible inertie de l'appartement Reconstruction pourrait expliquer pourquoi les valeurs de SET_{max} sont plus élevées dans cet appartement par rapport à l'appartement Contemporain. Une autre différence, est que ces appartements sont plus grands et donc accueillent plus d'occupants. Il est possible que les charges internes liées à ces occupants supplémentaires fassent augmenter les températures suffisamment pour impacter la sensation thermique des occupants.

V.4.2.3 Distributions de SET agrégées spatialement

Dans la même idée que pour l'analyse de la Figure V-7, la Figure V-8 permet de comparer la sensation thermique des différents bâtiments pendant les différentes canicules. La Figure V-8 représente les distributions des valeurs de sensations thermiques instantanées : série temporelle SET_t (valeur moyenne spatiale de la *SET* pondérée par l'occupation). De plus sur ce graphique, les catégories de

sensation thermique de la SET sont représentées en arrière-plan avec des rectangles plus ou moins foncés.

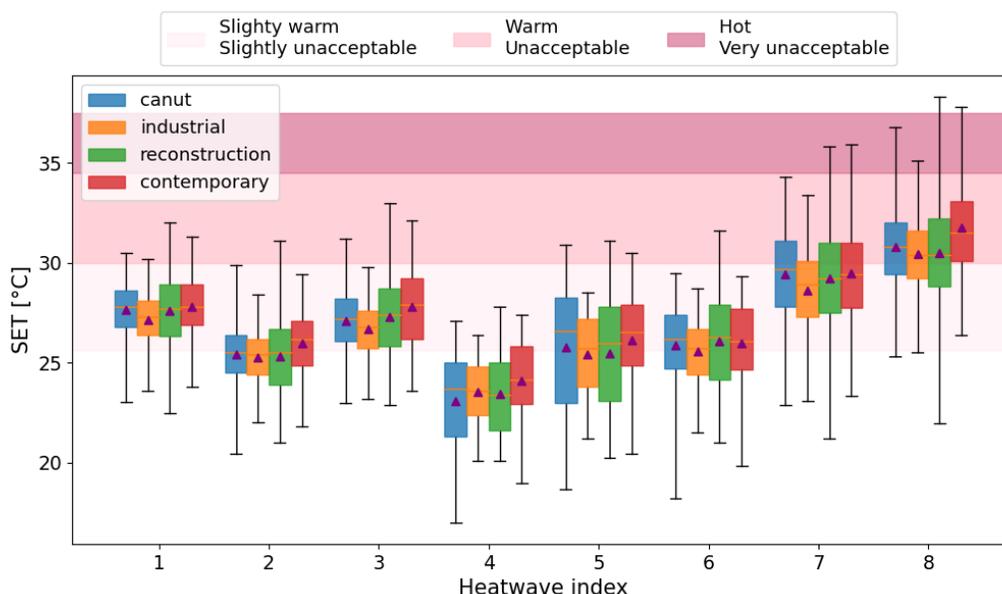


Figure V-8 : distribution des valeurs de SET_t (série temporelle des moyennes spatiales de SET pondérées par l'occupation) pour les quatre cas d'étude et les huit canicules représentatives.

Pour les canicules 1, 2, 3, 4, 5 et 6, la grande majorité des valeurs de SET_t sont inférieures à 30°C faisant que les ambiances intérieures des bâtiments sont un peu chaudes. La canicule 7 entraîne des valeurs de sensation thermique chaude (même si ce n'est pas la majorité). Si ces valeurs sont considérées indépendamment les unes des autres, elles ne sont pas dangereuses, puisque les occupants peuvent toujours équilibrer le bilan thermique de leur corps grâce à la sudation. Mais comme évoqué précédemment, le modèle de thermorégulation de la SET considère une quantité d'eau illimitée dans le corps et ne peut donc pas prendre en compte les risques liés à la déshydratation. Pour la canicule 8, elle est la seule entraînant une majorité de sensation thermique chaude avec également un certain nombre de valeur impliquant une sensation 'très inacceptable' et donc une forte sudation pouvant entraîner de plus gros problèmes de déshydratation pour des longues périodes d'expositions. De plus c'est la seule canicule qui entraîne également des dysfonctionnements de la thermorégulation. Même en considérant des quantités d'eau illimitée dans le corps, la transpiration ne suffit pas à équilibrer le bilan thermique du corps humain (valeur de $SET_t > 37,5^\circ\text{C}$).

Dans le cas de la configuration testée, le comportement des occupants était assez idéal, avec des volets fermés pendant une grande partie de la journée (les occupants vivant donc dans le noir) et les fenêtres ouvertes toutes la nuit pour favoriser la ventilation naturelle (même si les scénarios utilisés peuvent impliquer de faire rentrer de l'air plus chaud dans le bâtiment). Mise à part quelques différences, notamment pour les canicules 7 et 8, la réponse des bâtiments aux différentes canicules semble plutôt similaire. Cette étude ne permet pas de dire si un bâtiment permet de vraiment mieux protéger pour un type de canicule par rapport aux autres bâtiments. Ceci peut venir du comportement idéal des occupants. Par contre cette étude permet de dire qu'il semblerait qu'un comportement idéal d'occupant permette d'assurer une ambiance intérieure saine pour la plupart des canicules représentatives à venir pour n'importe quel bâtiment. S'il ne permet pas d'assurer une ambiance saine

pour les canicules 7 et 8, ce comportement d'occupant semble avoir un impact plus important que les différences de caractéristiques entre les différents bâtiments.

V.5 Conclusion

Les bâtiments testés ont des réponses assez différentes selon les huit canicules représentatives du futur pour la ville de Lyon. Certaines canicules ne sont pas problématiques avec des valeurs de sensation thermique restant dans des plages de valeur acceptable en période de canicules. Par contre les canicules les plus extrêmes (canicules 7 et 8) entraînent des sensations thermiques intérieures plutôt problématiques allant même jusqu'à pouvoir entraîner des dysfonctionnements de la thermorégulation.

Afin de pouvoir étudier plus en détail la dangerosité de ces canicules, il faudrait pouvoir connaître le taux de déshydratation des occupants. En effet, pendant la plupart des canicules, les occupants sont dans une situation où l'équilibre thermique de leur corps est maintenu grâce à la transpiration. Le modèle de thermorégulation utilisé dans l'indicateur de sensation thermique ne permet pas de considérer la déshydratation, ce qui fait que les occupants peuvent transpirer continuellement à la même intensité. Si ces occupants ne s'hydratent pas pendant les canicules (pour reconstituer les réserves d'eau du corps), ils risquent de ne pas pouvoir maintenir la température interne de leur corps. C'est pourquoi il semble intéressant d'utiliser la quantité d'eau transpirée par les occupants pendant les canicules afin d'établir des recommandations sur les quantités d'eau à boire pour limiter les risques de déshydratation.

Concernant les occupants, ils ont été modélisés très simplement dans cette étude. Il semblerait qu'avec ces scénarios (assez idéals), les caractéristiques des quatre bâtiments de l'étude n'aient pas trop d'influence sur les résultats. En effet, les performances des quatre bâtiments sont assez similaires pour chaque canicule. Afin d'étudier ceci plus en détail, il faudrait tester d'autres modélisations d'occupants. Dans un premier temps on pourrait modifier les plannings des différentes actions. Mais il serait également intéressant d'aller plus loin et d'essayer de modéliser la part plus stochastique des comportements des occupants en période de canicules. Ceci nécessiterait de faire des campagnes de collectes de données à plus grandes échelles afin de construire des modèles de comportement.

Il serait également intéressant d'étudier l'influence des paramètres des bâtiments et du milieu urbain sur les résultats de performances des bâtiments. Un certain nombre d'études thermiques testent l'impact des solutions architecturales passives pour réduire l'inconfort dans les bâtiments. A l'échelle du bâtiment, les techniques les plus couramment utilisées sont : l'ajout de casquette solaire, la sur ventilation nocturne (testée par ventilation naturelle dans cette étude), l'utilisation de ventilateur dans les logements. A l'échelle du quartier, des techniques comme l'augmentation de la densité d'arbre, l'augmentation de l'albédo (avec des peintures blanches ou des toitures et façades végétalisées par exemple) sont également testées pour réduire l'inconfort en période estivale. Il faudrait néanmoins faire attention à l'impact de ces solutions sur la thermique d'hiver afin qu'elles n'augmentent pas drastiquement les consommations de chauffage.

Dans cette étude, des hypothèses ont été faites pour comprendre les différentes réponses des bâtiments face aux différentes canicules. Mais il n'est pas facile d'identifier les caractéristiques de canicules qui influencent le plus les différences de réponses. Pour aller plus loin, il serait intéressant d'étudier l'influence des caractéristiques de canicules sur l'évolution des indicateurs de performances des bâtiments. Malheureusement le jeu de 8 canicules est trop restreint pour mener une telle étude, qui

nécessiterait une analyse statistique en utilisant des méthodes de régressions pas à pas (backward ou forward stepwise regression) par exemple. Ce type d'étude permettrait de comprendre quelles caractéristiques des canicules influencent le plus les performances des bâtiments. Pour réaliser ce type d'étude, il faudrait augmenter le nombre de canicules représentatives et simuler le comportement thermique des bâtiments pour chacune d'entre elles.

.

Conclusion générale

Synthèse des résultats

Cette thèse s'est intéressée à définir un protocole permettant d'évaluer les performances des bâtiments urbains passifs (sans système de climatisation) pendant les canicules du siècle à venir, afin d'étudier les problèmes d'inconfort et les problèmes de santé des occupants pendant ces événements climatiques extrêmes.

Ce protocole est composé de différents éléments qui ont été définis par les différents chapitres de cette thèse. La Figure V-9 présente ces éléments de protocole.

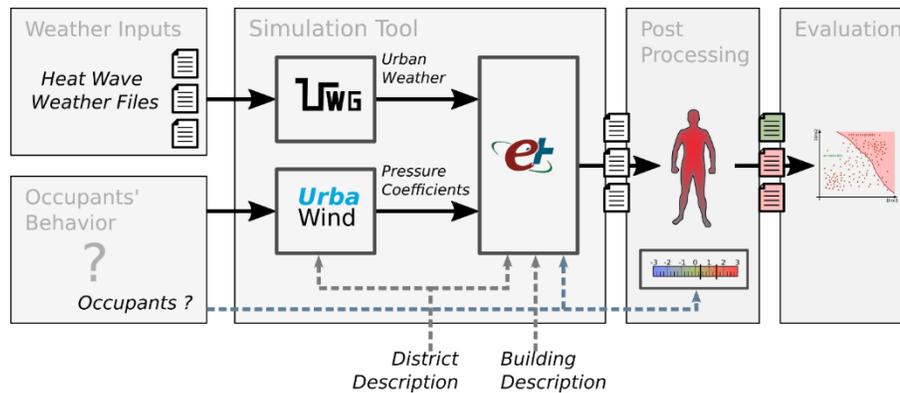


Figure V-9 : protocole d'évaluation des performances des bâtiments urbains passifs en période de canicule

Les différents outils de simulations (case « simulation tool ») permettant de prendre en compte les différentes sollicitations des bâtiments résidentiels urbains passifs ont été analysés. Une chaîne d'outils de simulation dénommée UTTC (Urban Thermal Tool Chain) a été construite. L'UTTC est composé d'outils robustes et indépendamment validés. Cette chaîne d'outils permet de simuler des bâtiments urbains passifs sans nécessairement de compétences informatiques particulières du fait de son couplage simple (chaînage). Les simulations sont assez rapides et peuvent être réalisées sur un ordinateur personnel.

Afin de confronter les prédictions de l'UTTC, des mesures in-situ ont été réalisées durant l'été 2020 dans 4 bâtiments de Lyon. La comparaison a révélé que les prédictions de la température et l'humidité de l'air intérieur de l'UTTC sont plutôt précises. Même si un raisonnement scientifique rigoureux limiterait la validité du modèle dans le périmètre des quatre cas d'étude étudiés, il existe une forte probabilité que de nombreuses configurations de bâtiments urbains passifs puissent être simulées avec précision avec l'UTTC.

Des simulations ont été réalisées avec une utilisation partielle de l'UTTC permettant d'étudier la pertinence de la chaîne d'outils complète. Ces simulations ont montré que ne pas utiliser UWG entraîne une surestimation du potentiel de rafraîchissement des bâtiments passifs en été puisqu'un biais constant d'environ 1°C a été obtenu entre les résultats de simulations avec et sans le modèle UWG. L'effet de l'îlot de chaleur urbain est donc assez important et ne doit pas être négligé dans les simulations de bâtiments en ville.

L'impact du comportement des occupants a été observé comme un paramètre clé de simulation en période estivale. L'importance d'avoir des mesures précises sur les actions des occupants, notamment sur les ouvertures a été détaillée.

Afin d'étudier les performances des bâtiments face aux canicules, il est nécessaire d'utiliser des données météorologiques de canicules (case « weather input » sur la figure) pour alimenter les outils de simulations (tel que l'UTTC). Durant les prochaines décennies, il est fort probable que les bâtiments seront soumis à plusieurs canicules ayant des caractéristiques différentes. C'est pourquoi le chapitre III de cette thèse s'est intéressé à définir une méthodologie en quatre étapes permettant de caractériser les canicules futures. Un ensemble de huit fichiers météorologiques représentatif de canicules dédié à l'évaluation des performances des bâtiments a été développé. Afin d'illustrer la méthodologie, elle a été appliquée à la localisation de l'aéroport de Lyon Saint-Exupéry.

L'ensemble minimum des fichiers de canicules construit au cours de la quatrième étape de la méthodologie est représentatif : les huit canicules sont suffisamment différentes les unes des autres pour couvrir le large spectre des caractéristiques des canicules auxquelles un bâtiment pourrait être confronté pour la localisation de Lyon St Exupéry.

La fonction principale d'un bâtiment est d'être un abri pour les occupants. Pour protéger les occupants en période de canicules, les bâtiments doivent permettre aux occupants de maintenir une ambiance intérieure sûre, en limitant les sensations thermiques de forte chaleur.

Le chapitre IV a fait un état de l'art des différentes manières de caractériser la sensation thermique des occupants sur le long terme dans les bâtiments passifs en période de forte chaleur.

Après avoir détaillé différents indicateurs de sensation thermique instantané et différentes manières d'intégrer un indicateur instantané dans le temps et l'espace, trois indicateurs ont été développés (case « post processing »). Le premier indicateur est une moyenne temporelle et spatiale de la *SET*, pondérée par le taux d'occupation de chaque zone. Cet indicateur a été nommé *TIEM* pour Température Intérieure Equivalente Moyenne. La valeur maximum (SET_{max}) est également utilisée afin d'étudier les risques potentiels sur la santé pendant les périodes de canicules. Pour caractériser la durée d'exposition dans les bâtiments, le nombre de jour consécutif de forte sensation de chaleur (ou d'inconfort) (*NJCI*) est également utilisé comme indicateur de performance.

Le dernier chapitre de cette thèse a permis de tester le protocole d'évaluation des performances des bâtiments face aux canicules futures. Pour se faire le modèle UTTC est alimenté avec les 8 canicules représentatives du chapitre III. La performance des bâtiments est évaluée avec les indicateurs présentés aux chapitre IV. Dans cette étude le comportement des occupants a été modélisé assez simplement (case « occupant behavior ») en construisant des scénarios d'occupation plutôt idéals (limitation des apports solaire en journée et ventilation naturelle toute la nuit pour rafraîchir au maximum les appartements).

Les canicules représentatives du futures testées ont entraîné des performances de bâtiments différentes. Certaines canicules n'ont finalement pas un très grand impact sur les occupants, les bâtiments semblent donc bien pouvoir protéger les occupants en gardant des ambiances intérieures apportant une sensation thermique acceptable. Par contre certaines canicules sont problématiques et entraînent même des dysfonctionnements de la thermorégulation.

Perspectives

Chacun des éléments de ce protocole peut être approfondi. Cette dernière section détaille les perspectives que ces travaux de thèses ont permis de définir.

Concernant les outils de simulation, et notamment UWG, il s'avère que la hauteur de couche limite atmosphérique nocturne semble avoir un impact assez important sur les résultats de prédictions de l'ICU. Pourtant il n'existe pas de consigne particulière permettant de fixer cette valeur. Des améliorations pourraient être envisagées afin de déterminer ce paramètre autrement qu'en calibrant le modèle.

Les résultats de confrontation entre simulations et mesures ont révélé que UrbaWind n'a pas eu d'impact significatif sur les prédictions de température intérieure. Ceci était prévisible pour les bâtiments mono-orientés, mais plutôt surprenant pour les deux appartements traversants de l'étude. Des explications ont été suggérées mais il est nécessaire de pousser les investigations. En particulier, des tests supplémentaires sur des appartements plus abrités pourraient être nécessaires pour mieux évaluer la pertinence de l'utilisation des coefficients de pression d'UrbaWind.

Il serait intéressant d'utiliser la méthodologie définie dans le chapitre III pour construire des ensembles de fichiers météorologiques représentatifs des canicules à venir pour d'autres lieux que Lyon.

Concernant l'indicateur instantané de sensation thermique, le modèle de thermorégulation à deux nœuds de Gagge, utilisé pour calculer la *SET*, considère les réserves d'eaux du corps humains comme illimité. Or en période de forte chaleur, un des risques pour la santé est la déshydratation. En effet, pendant les canicules, les occupants sont dans une situation où l'équilibre thermique est maintenue grâce à la transpiration, impliquant donc des pertes hydriques qu'il faudrait nécessairement compenser en s'hydratant. Ne pas considérer la réhydratation est donc bel et bien une limite de cet indicateur. Une piste pour améliorer ces travaux serait d'inclure une quantité d'eau stockée dans le corps permettant de limiter les débits de sudations lorsque cette quantité serait épuisée. Pour que cet ajout soit pertinent, il faudrait également ajouter des scénarios de réhydratation. Dans un premier temps, il serait possible d'extraire les quantités d'eau transpirées (en intégrant dans le temps les débits de sudation) du modèle dans le but de donner des recommandations sur les quantités d'eau à consommer pendant les différentes canicules.

Aucune méthode d'intégration temporelle idéale de sensation thermique n'a été trouvée. Il serait intéressant d'explorer plus en profondeur ces méthodes afin de définir une méthode d'intégration temporelle qui rende réellement compte de la pénibilité de la chaleur subie pendant les canicules. L'indicateur découlant de cette méthode ne devra jamais être borné afin de faciliter la comparaison des performances et la confrontation entre les différentes caractéristiques de canicules.

Les scénarios d'occupants considérés dans le test du protocole du chapitre V sont simples et idéaux. Les réponses des différents bâtiments face aux mêmes canicules sont proches. Il est donc possible que les comportements d'occupants idéaux aient lissés les différences entre les bâtiments. Par conséquent, il serait intéressant d'étudier ces appartements avec d'autres comportements d'occupants, afin d'observer l'impact des autres caractéristiques sur les performances des bâtiments durant les mêmes canicules. Il serait particulièrement intéressant de pouvoir modéliser plus en détail les comportements d'occupants en période de canicules et d'élaborer une base de modèles de comportement, qui soit capable de balayer la diversité. Pour cela, la construction de modèles stochastique ou agent semble adaptée. Ceci nécessiterait la réalisation de campagnes de collectes de données à grandes échelles en période de canicules.

Toujours concernant les comportements d'occupants, il pourrait être intéressant de définir, pour chaque bâtiment et éventuellement selon les différents types de canicules, un mode d'emploi pour les

occupants. Ce mode d'emploi consisterait en un nombre d'action à mener pour limiter les risques de surchauffes dans leur bâtiment.

Dans le but de comprendre pourquoi les bâtiments réagissent différemment aux différentes canicules, cette thèse a fait quelques hypothèses concernant l'influence des caractéristiques des canicules sur les performances des bâtiments. Une méthode de traitement automatique serait à développer afin d'approfondir l'étude des liens entre les caractéristiques des canicules et les performances des bâtiments.

Le protocole devrait viser à terme à identifier les caractéristiques des bâtiments qui permettent de maintenir des conditions intérieures acceptables en période de canicules. C'est pourquoi afin que ce protocole soit utilisé dans ce sens, il faudrait réaliser d'autres modélisations voir même réaliser une analyse de sensibilité sur les paramètres du modèle. Etant donné le nombre de paramètres du modèle, une analyse de sensibilité implique donc un grand nombre de simulation.

Pour la réalisation d'une analyse de sensibilité permettant de connaître l'influence des différents paramètres du modèle sur la sensation thermique intérieure, il serait intéressant de tester certaines configurations permettant d'améliorer les performances des bâtiments. Les solutions passives les plus étudiées à l'échelle du bâtiment sont : l'ajout de casquette solaire, la sur ventilation nocturne (testée par ventilation naturelle dans cette étude) et l'utilisation de ventilateur. Les solutions étudiées à l'échelle du quartier ou de la ville sont : l'augmentation de la densité d'arbre, l'augmentation de l'albédo (avec des peintures blanches ou des toitures et façades végétalisées par exemple).

Ce protocole d'évaluation mérite maintenant d'être utilisé pour évaluer les performances des bâtiments urbains passifs en périodes de canicules à venir pour de nombreuses localisations à travers le monde.

Remerciements

Nous remercions le Groupe de travail sur le climat régional du Programme mondial de recherche sur le climat, ainsi que le Groupe de travail sur la modélisation couplée, ancien organe de coordination de CORDEX et groupe responsable du CMIP5. Nous remercions également les groupes de modélisation climatique (énumérés dans le Tableau III-3 du présent document) pour avoir produit et mis à disposition les résultats de leurs modèles. Nous remercions également l'infrastructure de la Earth System Grid Federation, un effort international dirigé par le Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison du ministère américain de l'énergie, le European Network for Earth System Modelling et d'autres partenaires de la Global Organisation for Earth System Science Portals (GO-ESSP).

Je remercie l'école urbaine de Lyon (EUL) pour avoir financé ces travaux de thèse.

Annexes

Annexe 1 : Correction des profils de vent dans EnergyPlus

Problématique

Pour calculer la pression qu'exerce le vent sur la façade d'un bâtiment, le modèle AFN d'EnergyPlus utilise des coefficients de pression. La formule générale qui permet d'obtenir la pression est :

$$p = c_p \cdot \frac{1}{2} \rho u_{ref}^2$$

Avec c_p le coefficient de pression, p la pression statique générée par le vent, et u_{ref} une valeur de vitesse de vent.

Théoriquement, les coefficients de pression c_p ne dépendent ni de la vitesse du vent, ni de la longueur caractéristique du bâtiment (analogie de Reynolds). Par contre, ils dépendent de la direction du vent, ainsi que de la morphologie du bâtiment et du tissu urbain qui l'entoure.

Les valeurs de coefficient de pression sont renseignées sous la forme de tableaux de valeurs en fonction de la direction du vent. Chaque tableau de valeurs est spécifique à une morphologie du bâtiment et de son entourage, ainsi qu'à la position considérée sur la façade considérée. Les tableaux de valeurs ont été obtenues soit à partir de mesures réalisées en soufflerie, soit à partir de simulations de type CFD.

La problématique qui nous intéresse ici est que la vitesse du vent u est spatialement inhomogène. Cela soulève deux questions :

1. Quelle valeur prendre pour la vitesse du vent ?
2. Comment paramétrer EnergyPlus de telle sorte qu'il sélectionne la bonne valeur de vitesse du vent ?

Pour répondre à la question 1, il faut consulter les rapports relatifs à la production des données de coefficient de pression, pour savoir quelle vitesse de vent les auteurs ont utilisés pour calculer les coefficients de pression.

Vitesses utilisé lors de la production de tableaux de valeur

Comme indiqué précédemment, les tableaux de coefficient de pression ont été établis à partir de mesure en soufflerie ou de calculs CFD. Pour déterminer les coefficients de pression, les auteurs disposaient de valeurs (mesurées ou simulées) de surpression à la façade p , et de profils de vent verticaux $u(z)$. Pour obtenir une valeur de coefficient de pression, les auteurs sélectionnent une valeur de vitesse de vent $u_{ref} = u(z_{ref})$ à une hauteur déterminée z_{ref} sur le profil de vent, et ils adimensionnent la surpression avec la pression dynamique calculée avec cette valeur de vitesse :

$$c_p = \frac{p}{\frac{1}{2} \rho [u_{ref}]^2}$$

On retrouve divers choix dans la littérature pour l'obtention du profil de vent $u(z)$ et pour le choix de la hauteur de référence z_{ref} .

Obtention du profil de vent

Pour l'obtention du profil de vent, on retrouve les stratégies suivantes (les différents choix sont expliqués dans le cas d'une mesure soufflerie, ils sont aussi valables pour les études CFD) :

- Soit la mesure du profil de vent est réalisée lors d'une campagne de mesures préliminaire réalisée sans la maquette du bâtiment et de son entourage, mais avec les éléments de rugosité placés en amont de la zone d'intérêt pour l'ajustement du profil de vent. Cette option permet de mesurer un profil entier de vitesse de vent (c'est-à-dire à partir d'une hauteur proche de $z = 0$)
- Soit la mesure de profil de vent est réalisée en présence de la maquette du bâtiment considéré et de son entourage. Dans ce cas, la distribution de la vitesse est extrêmement inhomogène dans un volume proche des maquettes. Ce volume est appelé sous-couche de rugosité. Dans la sous-couche de rugosité, la notion de « profil vertical de vent » n'a plus de sens car la vitesse présente de fortes variations dans le plan horizontal. Dans ce cas deux solutions sont adoptées pour déterminer un profil de vent :
 - Soit le profil de vent est mesuré au-dessus de la maquette, en dehors de la sous-couche de rugosité. La limite supérieure de la sous-couche de rugosité est généralement située entre 2,4 et 4 fois la hauteur des bâtiments. Cette option ne permet pas d'obtenir un profil de vitesse entier.
 - Soit le profil de vent est mesuré en amont des maquettes. Dans ce cas le profil de vent est entier.

Dans tous les cas, les auteurs réalisent des mesures de vitesse de l'air à plusieurs hauteurs. Ensuite, ils effectuent une régression des valeurs mesurées sur une forme de profil théorique. Deux formes de profils théoriques coexistent dans la littérature :

- Profil puissance : $u(z) = c \cdot z^\alpha$
- Profil logarithmique : $u(z) = \frac{u^*}{\kappa} \log\left(\frac{z-d+z_0}{z_0}\right)$

Dans la littérature, le profil en puissance est systématiquement utilisé lors des mesures en soufflerie, alors qu'Urbawind utilise un profil logarithmique sans hauteur de déplacement ($d = 0$).

Choix de la hauteur de référence

Pour la hauteur de référence à laquelle la vitesse est déterminée, on retrouve couramment les choix suivants :

- $z_{ref} = H$: la hauteur de référence est prise comme égale à la hauteur du bâtiment. Pour des mesures de profils de vent au-dessus des maquettes, cela nécessite de projeter le profil à la hauteur des bâtiments.
- $z_{ref} = \delta$: la hauteur de référence est prise comme étant égale à la hauteur de couche limite urbains. Cette hauteur est suffisamment haute pour que la vitesse du vent puisse y être mesurée directement en présence de la maquette dans une soufflerie.
- $z_{ref} = h$: ici le terme h désigne une hauteur arbitraire. C'est le cas pour le logiciel Urbawind qui considère $h = 10m$

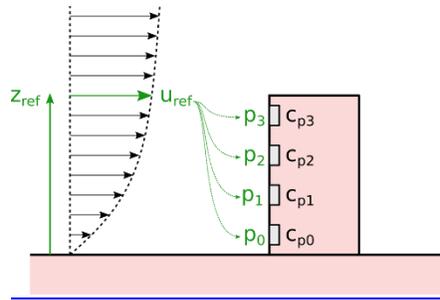
La hauteur de référence z_{ref} choisie pour déterminer la vitesse du vent n'est jamais égale à la hauteur de l'ouverture. La hauteur z_{ref} à adopter est donc fixe quelle que soit la hauteur du point considéré sur la façade du bâtiment.

Démarche pour la détermination de la vitesse de vent lors de l'utilisation des c_p

D'après les observations faites précédemment, pour calculer la vitesse du vent u_{ref} à utiliser pour le calcul de la pression à la façade, la démarche adoptée est la suivante :

- Au préalable :
 - Identifier la hauteur z_{ref} à laquelle la vitesse du vent a été prise pour établir le tableau de valeurs de coefficient de pression utilisées.
- A chaque pas de temps :
 - Déterminer le profil de vent au-dessus de la zone où se trouve le bâtiment $u_{bs}(z)$ (« bs » pour « building site »),
 - Calculer la vitesse $u_{ref} = u_{bs}(z_{ref})$.

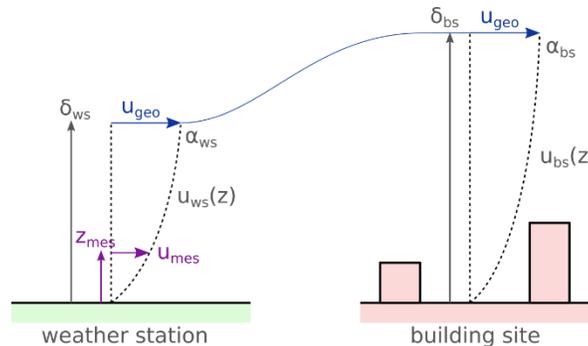
Cette démarche est illustrée par l'image ci-dessous.



Procédure de calcul adopté par EnergyPlus

Profil de vent

EnergyPlus détermine un profil de vent au-dessus du site de construction $u_{bs}(z)$. La démarche utilisée pour établir ce profil est illustrée par l'image ci-dessous.



EnergyPlus utilise des profils de vent en puissance :

$$u(z) = c \cdot z^\alpha \quad \text{avec} \quad z \in [0, \delta]$$

Ce type de profil comprend deux paramètres qui sont propres à un type de site donné (urbain, rural, périurbain, etc) : l'exposant α et la hauteur de couche limite δ . Ces deux coefficients peuvent être renseignés dans le logiciel par l'utilisateur.

Tableau A-3 : Valeurs des paramètres α et δ selon le site

Terrain Description	Exponent	Boundary Layer Thickness (m)
Flat, open country	0,14	270
Rough, wooded country	0,22	370
Towns and cities	0,33	460
Ocean	0,10	210
Urban, industrial, forest	0,22	370

EnergyPlus distingue deux profils : un à l'emplacement de la station météo (« weather station »), et l'autre à l'emplacement du bâtiment étudié (« building site »). Les expressions générales de ces deux profils sont :

$$u_{ws}(z) = c_{ws} \cdot z^{\alpha_{ws}} \quad \text{avec } z \in [0, \delta_{ws}]$$

$$u_{bs}(z) = c_{bs} \cdot z^{\alpha_{bs}} \quad \text{avec } z \in [0, \delta_{bs}]$$

La station météo est généralement située dans un terrain plat en milieu rural. On suppose généralement $\alpha_{ws} = 0,14$ et $\delta_{ws} = 270m$. Les valeurs de α_{bs} et δ_{bs} dépendent du terrain sur lequel se trouve le bâtiment,

Du côté de la station météo, le fichier météo fournit une valeur de vitesse mesurée u_{mes} . Cette vitesse a été mesurée à la hauteur z_{mes} . En exprimant $u_{ws}(z_{mes}) = u_{mes}$, on obtient facilement :

$$u_{ws}(z) = u_{mes} \cdot \left(\frac{z}{z_{mes}}\right)^{\alpha_{ws}} \quad \text{avec } z \in [0, \delta_{ws}]$$

A la hauteur de la couche limite $z = \delta$, on suppose que la vitesse ne varie pas entre l'emplacement de la station et l'emplacement du bâtiment. A cette hauteur, la vitesse de vent est appelée « vitesse de vent géostrophique » et est notée u_{geo} . On a :

$$u_{geo} = u_{ws}(\delta_{ws}) = u_{bs}(\delta_{bs})$$

On a alors :

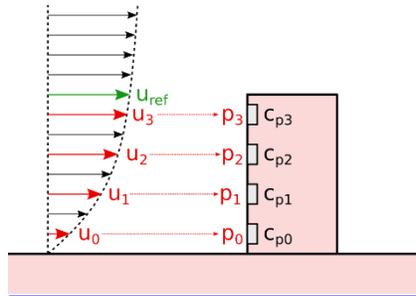
$$u_{mes} \cdot \left(\frac{\delta_{ws}}{z_{mes}}\right)^{\alpha_{ws}} = c_{bs} \cdot \delta_{bs}^{\alpha_{bs}} \rightarrow c_{bs} = u_{mes} \cdot \left(\frac{\delta_{ws}}{z_{mes}}\right)^{\alpha_{ws}} \cdot \frac{1}{\delta_{bs}^{\alpha_{bs}}}$$

La formule du profil de vent au-dessus du bâtiment étudié est donc la suivante :

$$u_{bs}(z) = u_{mes} \cdot \left(\frac{\delta_{ws}}{z_{mes}}\right)^{\alpha_{ws}} \cdot \left(\frac{z}{\delta_{bs}}\right)^{\alpha_{bs}}$$

Pour calculer la pression aux abords d'une ouverture dans la façade d'un bâtiment, EnergyPlus utilise une valeur de vitesse de vent « locale » : c'est à dire à la hauteur de l'ouvrant (cf. image ci-dessous). Le logiciel ne permet donc pas (pas directement en tout cas) à l'utilisateur de renseigner une hauteur unique z_{ref} à utiliser pour le calcul des pressions.

Ainsi, d'après ce qui a été établi précédemment, si aucune correction spécifique n'est faite au paramétrage du modèle (c'est-à-dire si les valeurs de coefficient de pression et de profils de vent sont renseignées sans modification), les valeurs de pression calculées seront fausses.



Correction à apporter au modèle EnergyPlus

Stratégie adoptée

La stratégie adoptée consiste à modifier le paramétrage du profil de vent d'EnergyPlus, pour que le profil obtenu soit, au niveau du bâtiment, un profil homogène dont la vitesse est partout égale à u_{ref} . Cette solution implique néanmoins une légère perte de précision concernant la détermination du coefficient d'échange convectif, qui lui aussi sera calculé sur la base du nouveau profil constant (dans ce cas, il vaut mieux que la hauteur de référence z_{ref} soit du même ordre de grandeur que la hauteur du bâtiment).

Mise en œuvre de la stratégie adoptée

La stratégie adoptée consiste donc à renseigner à DesignBuilder un profil homogène artificiel (Figure A-10). Dans cette section, les paramètres du profil artificiel sont identifiés avec l'exposant « art », et les paramètres du profil réel associé sont identifiés avec l'exposant « real ».

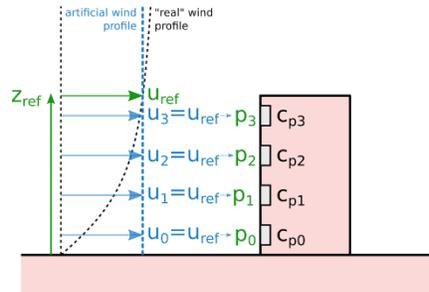


Figure A-10 : Ajustement du profil de vent de EnergyPlus

Selon la formule de la vitesse de vent définie dans la section précédente, la vitesse du vent à la hauteur de référence vaut :

$$u_{ref} = u_{bs}^{real}(z_{ref}) = u_{mes} \cdot \left(\frac{\delta_{ws}^{real}}{z_{mes}^{real}} \right)^{\alpha_{ws}^{real}} \cdot \left(\frac{z_{ref}}{\delta_{bs}^{real}} \right)^{\alpha_{bs}^{real}}$$

Le profil artificiel renseigné dans le logiciel a pour formule :

$$u_{bs}^{art}(z) = u_{mes} \cdot \left(\frac{\delta_{ws}^{art}}{z_{mes}^{art}} \right)^{\alpha_{ws}^{art}} \cdot \left(\frac{z}{\delta_{bs}^{art}} \right)^{\alpha_{bs}^{art}}$$

Pour que ce profil soit homogène, c'est à dire indépendant de z, il faut que :

$$\alpha_{bs}^{art} = 0$$

Dans ce cas, la vitesse u_{bs}^{art} ne dépend plus de la hauteur de couche limite δ_{bs}^{art} . On fixe arbitrairement :

$$\delta_{bs}^{art} = \delta_{bs}^{real}$$

On obtient alors :

$$u_{bs}^{art}(z) = u_{mes} \cdot \left(\frac{\delta_{ws}^{art}}{z_{mes}^{art}} \right)^{\alpha_{ws}^{art}}$$

On veut que $u_{bs}^{art}(z) = u_{ref}$. Par conséquent :

$$\left(\frac{\delta_{ws}^{art}}{z_{mes}^{art}} \right)^{\alpha_{ws}^{art}} = \left(\frac{\delta_{ws}^{real}}{z_{mes}^{real}} \right)^{\alpha_{ws}^{real}} \cdot \left(\frac{z_{ref}}{\delta_{bs}^{real}} \right)^{\alpha_{bs}^{real}}$$

A ce stade, nous avons trois paramètres à fixer δ_{ws}^{art} , z_{mes}^{art} , et α_{ws}^{art} pour assurer l'égalité. Deux paramètres doivent être fixés arbitrairement. Voici les choix qui ont été faits :

$$z_{mes}^{art} = z_{mes}^{real}$$

$$\alpha_{ws}^{art} = \alpha_{ws}^{real}$$

On obtient alors la valeur suivante pour le dernier paramètre :

$$\delta_{ws}^{art} = z_{mes}^{real} \left[\left(\frac{\delta_{ws}^{real}}{z_{mes}^{real}} \right)^{\alpha_{ws}^{real}} \cdot \left(\frac{z_{ref}}{\delta_{bs}^{real}} \right)^{\alpha_{bs}^{real}} \right]^{1/\alpha_{ws}^{real}}$$

Implémentation

La Figure A-11 montre une copie d'écran d'un calcul de paramètre effectué à l'aide d'une feuille Excel.

	Reference height				
	z_{ref}				
	[m]				
	10				
	Weather Station			Building Site	
	alpha coefficient	boundary layer thickness	measurement height	alpha coefficient	boundary layer thickness
	α_{ws}	δ_{ws}	z_{mes}	α_{bs}	δ_{bs}
	[-]	[m]	[m]	[-]	[m]
Real profile	0.14	270	10	0.33	460
Artificial profile	0.14	0.03250918	10	0	460

Figure A-11 : tableur permettant de calculer les coefficients à modifier pour créer un profil de vitesse artificiel dans EnergyPlus

Pour renseigner le profil dans EnergyPlus, il faut ajouter le morceau d'IDF présenté dans la Figure A-12 (les valeurs indiquées ci-dessous sont les valeurs calculées dans l'exemple ci-dessus) :

```
Site:WeatherStation,  
  10,      !- Wind Sensor Height Above Ground {m}  
  0.14,    !- Wind Speed Profile Exponent {}  
  0.03250918,  !- Wind Speed Profile Boundary Layer Thickness {m}  
  2;       !- Air Temperature Sensor Height Above Ground {m}  
  
Site:HeightVariation,  
  0,       !- Wind Speed Profile Exponent  
  460,     !- Wind Speed Profile Boundary Layer Thickness {m}  
  0.0065;  !- Air Temperature Gradient Coefficient {deltaC/m}
```

Figure A-12 : Exemple de morceau d'IDF à ajouter pour modifier les profils de vitesse de vent

Annexe 2 : Paramètres de l'enveloppe thermique et plan des cas d'étude

Cette annexe présente des informations supplémentaires sur les cas d'étude. Pour toutes les simulations, les parois des appartements en contact avec d'autres appartements (planchers intermédiaires et certains murs de refend) ont été considérées comme adiabatiques. Cela permet de simplifier les simulations en ne modélisant que l'appartement d'intérêt.

Canut

L'appartement de la période Canut est un T3 d'environ 57 m². Il est situé au 4^{ème} étage sur 6 d'un bâtiment localisé sur les pentes de la croix rousse à Lyon. Ce bâtiment a été construit au début de XIX^{ème} siècle et a fait l'objet d'une rénovation légère en 2019. Le coefficient U_{bat} est estimé à 1,45 W/m².K. La classe d'inertie de l'appartement est : Très Lourde. Le plan de l'appartement est donné par la Figure A-13. Les parois extérieures sont en pierre avec une épaisseur de 55 cm et une conductivité thermique $\lambda = 1,83 \frac{W}{m.K}$. Les menuiseries double vitrages ont un cadre en bois et sont équipées de persienne métallique en guise de protection solaire.

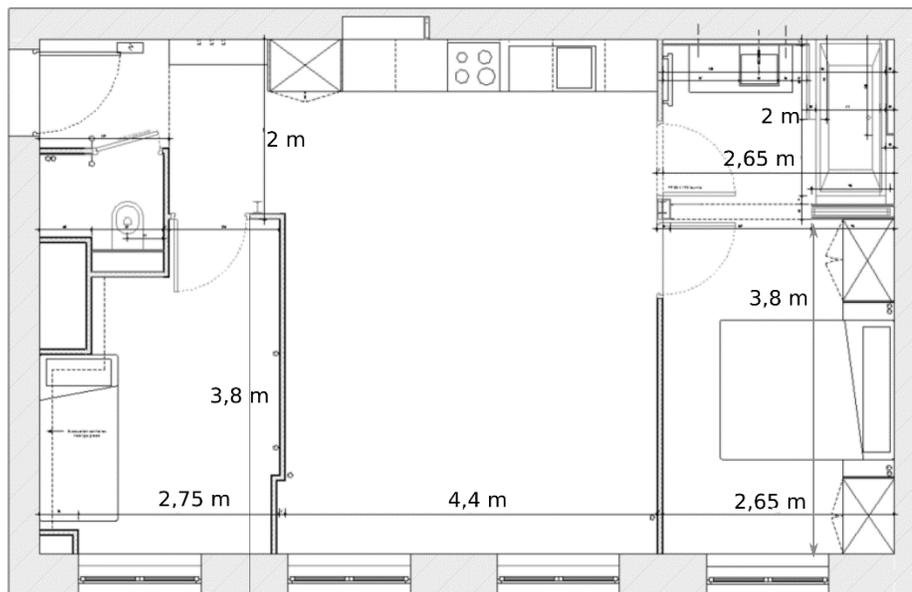


Figure A-13 : Plan de l'appartement de la période Canut

Industrielle

L'appartement de la période Industrielle est un T2 d'environ 50 m². Il est situé au 6^{ème} étage sur 7 d'un bâtiment localisé le 3^{ème} arrondissement de Lyon. Il a été construit à la fin du XIX^{ème} siècle. Le coefficient U_{bat} est estimé à 0,6 W/(m².K). La classe d'inertie de l'appartement est : très lourde. Les murs extérieurs sont en béton (épaisseur 20 cm et $\lambda = 1,13 W/(m.K)$) avec une isolation thermique intérieure d'environ 8 cm en Polystyrène extrudé ($\lambda = 0,04 W/(m.K)$). Les menuiseries double vitrages sont en PVC et sont équipées de volets roulant également en PVC. Le plan de l'appartement est donné par la Figure A-14.

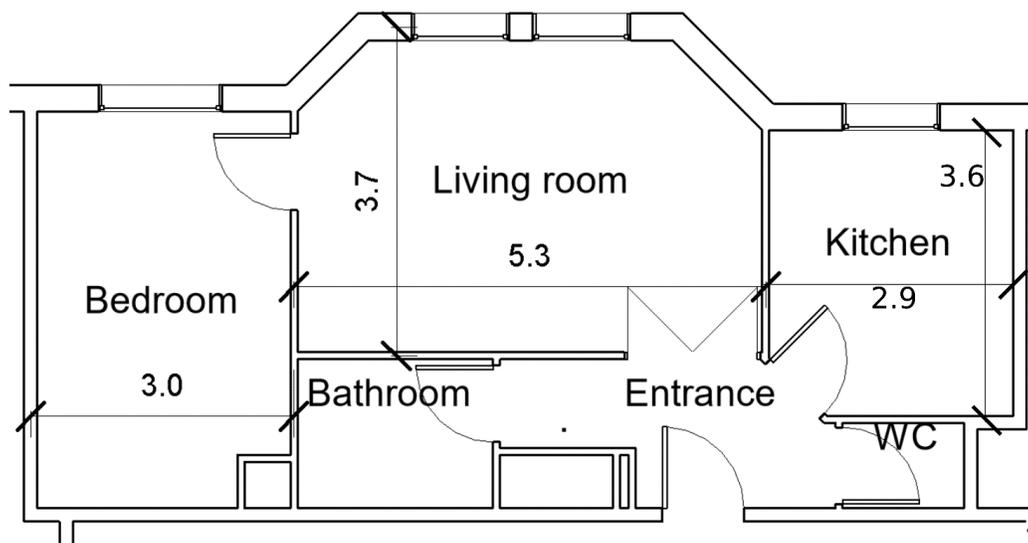


Figure A-14 : plan de l'appartement de la période Industrielle

Reconstruction

L'appartement de la période Reconstruction date de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle. C'est un T4 d'environ 90 m² situé au 7^{ème} étage sur 16. Il est situé dans le 3^{ème} arrondissement de Lyon. Le coefficient U_{bat} est estimé à 0,68 W/(m².K) et sa classe d'inertie est lourde. Les murs extérieurs sont en béton de 20 cm d'épaisseur et sont isolés par l'intérieur avec 16 cm d'isolant de conductivité thermique ($\lambda = 0,035$ W/(m.K)). Les menuiseries sont du double vitrage avec des cadres en bois équipées de protections solaires de type volet battant en bois. Le plan de l'appartement est donné par la Figure A-15.

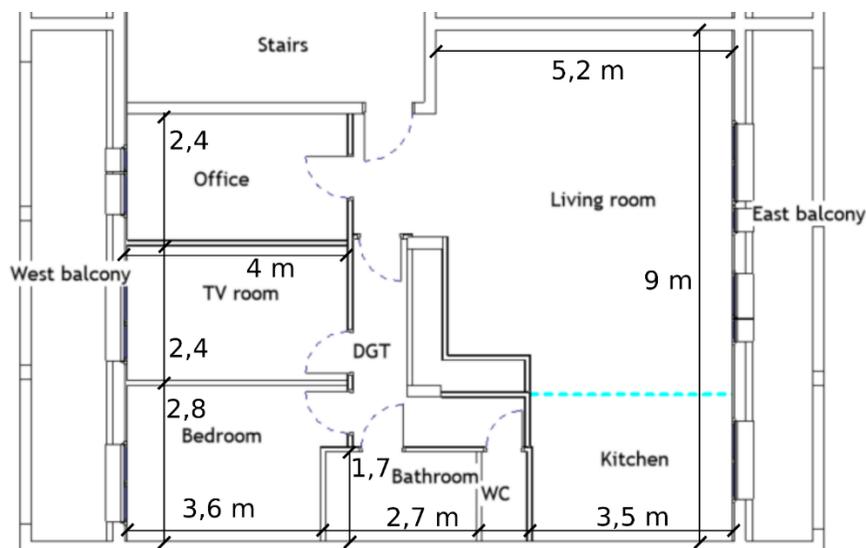


Figure A-15 : Plan de l'appartement de la période Reconstruction

Contemporain

L'appartement de la période Contemporaine a été construit en 2016, il suit la réglementation thermique RT2012. C'est un T5 d'environ 110 m² situé au dernier étage d'un bâtiment de 6 étages. Il est situé dans le 9^{ème} arrondissement de Lyon. Le coefficient U_{bat} est estimé à 0,23 W/(m².K) et sa classe d'inertie est très lourde. Les murs extérieurs sont en béton de 20 cm d'épaisseur et sont isolés par l'extérieur avec 18 cm d'isolant de conductivité thermique ($\lambda = 0,035 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$). Pour certains murs extérieurs, l'isolation divisée en 2 : avec 10 cm à l'intérieur et 8 cm à l'extérieur. Les menuiseries sont du double vitrage avec des cadres en PVC équipées de volet roulant extérieur. Le plan de l'appartement est donné par la Figure A-16.

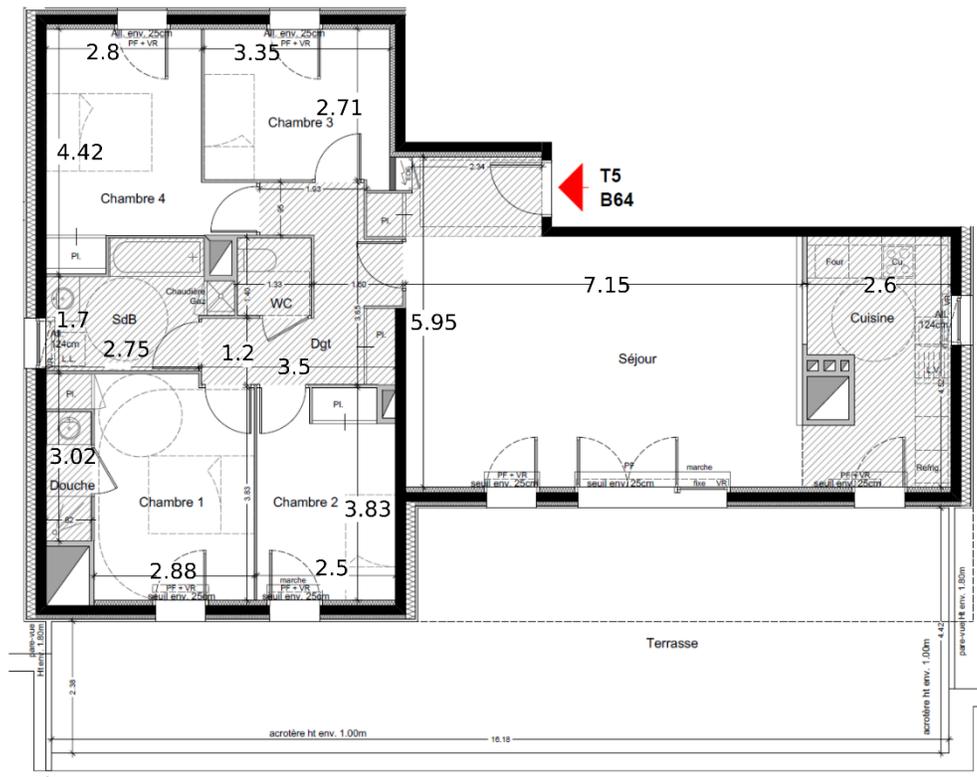


Figure A-16 : Plan de l'appartement de la période Contemporaine

Annexe 3 : Formules utilisées pour compléter les données météorologiques

L'objectif est d'obtenir la liste des variables requises dans un fichier météo de simulation de bâtiment (Tableau A-5), à partir des variables collectées dans la base de données CORDEX (Tableau A-4, symboles avec un tilde et nom court avec le suffixe "_cx"). La méthodologie employée n'est pas nouvelle, mais, à la connaissance des auteurs, elle n'a jamais été entièrement décrite.

Tableau A-4: données de projections météo collectées dans CORDEX

Nom court	Symbole	Unité	Nom complet
tas_cx	\tilde{T}_a^K	K	Température de l'air proche de la surface
huss_cx	\tilde{r}_s	kg_w/kg_da	Humidité spécifique proche de la surface
ps_cx	\tilde{p}_{atm}	Pa	Pression de l'air en surface
clt_cx	$\tilde{c\bar{l}t}$	%	Fraction totale des nuages
rsds_cx	$\tilde{S}_{GH}^\downarrow$	W/m2	Rayonnement descendant des ondes courtes en surface
sfcWind_cx	\tilde{v}	m/s	Vitesse du vent proche de la surface
pr_cx	$\tilde{p\bar{r}c}$	Kg/m2/s	Précipitations
rlds_cx	\tilde{K}^\downarrow	W/m2	Rayonnement grande longueur d'onde incident en surface
uas_cx	\tilde{v}_{WE}	m/s	Vent proche de la surface vers l'est
vas_cx	\tilde{v}_{SN}	m/s	Vent de surface vers le nord

Tableau A-5: Grandeur nécessaire pour produire un fichier météo au format EPW

Nom court	Symbole	Unité	Nom complet	Plage de validité	Manquante
ta	$T_a = \tilde{T}_a^K - 273.15$	C	Température	[-70 ; 70]	99.9
tdp	T_{dp}	C	Température du point de rosée	[-70 ; 70]	99.9
rh	rh	%	Humidité relative	[0 ; 110]	999
patm = ps_cx	$p = \tilde{p}_{atm}$	Pa	Pression atmosphérique de la station	[31000 ; 1200000]	999999
rlw = rlds_cx	$K^\downarrow = \tilde{K}^\downarrow$	W/m2	Intensité du rayonnement infrarouge horizontal	[0 ; ∞]	9999
rsw_gh = rsds_cx	$S_{GH}^\downarrow = \tilde{S}_{GH}^\downarrow$	W/m2	Rayonnement horizontal global (non utilisé)	[0 ; ∞]	9999
rsw_dirn	$S_{DIR,N}^\downarrow$	W/m2	Rayonnement direct normal	[0 ; ∞]	9999
rsw_diffh	$S_{DIFF,H}^\downarrow$	W/m2	Rayonnement horizontal diffus	[0 ; ∞]	9999
wd	wd	°	Direction du vent	[0 ; 360]	999
ws = sfcWind_cx	$ws = \tilde{v}$	m/s	Vitesse du vent	[0 ; 40]	999
clt = clt_cx/10	$clt_{tot} = \frac{\tilde{c\bar{l}t}}{10}$	tenths	Couverture totale du ciel	[0 ; 10]	99
pr	pr_d	mm	Profondeur des précipitations liquides		
rsw_dirh	$S_{DIR,H}^\downarrow$	W/m2	Rayonnement horizontal direct		
tsky	T_{sky}		Température du ciel		

Les données soulignées en vert dans le Tableau A-5 sont des variables supplémentaires qui facilitent la caractérisation de l'environnement thermique du bâtiment. Lorsque la relation entre la variable du fichier EPW et la variable CORDEX est triviale, la relation est formulée dans la première colonne du Tableau A-5.

Pression de vapeur saturante p_{sv} en [Pa] :

La formule de (ASHRAE 2017) est utilisée :

Pression de saturation sur la glace ($\tilde{T}_a^K < 273.15$ K) :

$$p_{sv} = \exp \left[\frac{-5,6745359e^3}{\tilde{T}_a^K} + 6,3925247 - 9,6778430e^{-3} \cdot \tilde{T}_a^K + 6,2215701e^{-7} \cdot (\tilde{T}_a^K)^2 + 2,0747825e^{-9} \cdot (\tilde{T}_a^K)^3 - 9,4840240e^{-13} \cdot (\tilde{T}_a^K)^4 + 4,1635019 \cdot \ln(\tilde{T}_a^K) \right]$$

Pression de saturation de l'eau liquide ($\tilde{T}_a^K > 273,15$ K) :

$$p_{sv} = \exp \left[\frac{-5,8002206e^3}{\tilde{T}_a^K} + 1,3914993 - 4,8640239e^{-2} \cdot \tilde{T}_a^K + 4,1764768e^{-5} \cdot (\tilde{T}_a^K)^2 - 1,4452093e^{-8} \cdot (\tilde{T}_a^K)^3 + 6,5459673 \cdot \ln(\tilde{T}_a^K) \right]$$

Pression de vapeur p_v en [Pa] :

L'humidité spécifique \tilde{r}_s ($[kg_v/kg]$) est le rapport entre la masse de vapeur d'eau dans l'air m_v et la masse totale de l'air $m_v + m_{da}$:

$$\tilde{r}_s = \frac{m_v}{m_v + m_{da}}$$

Le taux d'humidité W ($[kg_v/kg_{as}]$) est égal au rapport entre la masse de vapeur d'eau présente dans l'air et la masse d'air sec :

$$W = \frac{m_v}{m_{da}} = \frac{\tilde{r}_s}{1 - \tilde{r}_s}$$

En considérant l'air sec et la vapeur d'eau comme des gaz parfaits, on peut appliquer la relation des gaz parfaits aux deux gaz ($pV = nRT \rightarrow n = pV/RT$). La pression de la vapeur vaut p_v . La pression de l'air sec vaut alors $\tilde{p}_{atm} - p_v$.

Le ratio d'humidité vaut alors :

$$W = \frac{m_v}{m_{da}} = \frac{M_v \cdot p_v V / RT}{M_{as} \cdot (\tilde{p}_{atm} - p_v) V / RT} = \frac{M_w}{M_{as}} \cdot \frac{p_v}{p_{atm} - p_v} = 0,6921945 \cdot \frac{p_v}{\tilde{p}_{atm} - p_v}$$

La pression de vapeur peut être calculée à partir de la relation précédente :

$$p_v = \tilde{p}_{atm} \cdot \frac{W}{0,621945 + W}$$

Humidité relative rh en [%]

L'humidité relative rh ([%]) s'obtient directement avec la formule suivante :

$$rh = \frac{p_v}{p_{vs}} \cdot 100$$

Température de rosée T_{dp} en [°C]

Pour la température de rosée T_{dp} ([°C]), la formule de (ASHRAE 2017) est utilisée:

$$\alpha = \ln\left(\frac{p_v}{1000}\right)$$

$$T_{dp} = 6,54 + 14,526 \cdot \alpha + 0,7389 \cdot \alpha^2 + 0,09486 \cdot \alpha^3 + 0,4569 \cdot \alpha^{0,1984}$$

On notera que cette valeur n'est supposée être valide que pour des températures de rosée situées entre 0°C et 93°C.

Valeurs en dehors de la plage acceptable

A cause des interpolations indépendantes de température sèche et d'humidité spécifique, l'humidité relative calculée peut être en dehors de la plage de validité [0% - 100%].

Pour garder une marge d'erreur et pour éviter de faire planter les outils de calculs qui n'acceptent pas des humidités relatives égales à 0% (pour lesquelles il est impossible de calculer la température de rosée), nous allons restreindre les valeurs de rh à l'intervalle [1% ;99%]

Une fois l'humidité relative corrigée, on actualise la valeur de la pression de vapeur avec la formule ci-dessous, avant de calculer la température de rosée.

$$p_v = p_{vs} \cdot \frac{rh}{100}$$

Direction du vent

La direction du vent est par définition la direction d'où provient le vent (un vent du nord est un vent qui vient du nord et se dirige vers le sud).

Dans EnergyPlus, la convention utilisée pour définir la direction du vent est $wd = 0^\circ$ pour un vent du nord, et ensuite une rotation dans le sens horaire. Ainsi, on a : North=0.0, East=90.0, South=180.0, West=270.0.

La direction du vent wd est déduite des deux composantes de vitesse de vent renseignées par la base de données CORDEX ($\tilde{v}_{WE} = ua$ et $\tilde{v}_{SN} = va$). Quatre secteurs angulaires sont distingués (Nord-Est, Sud-Est, Sud-Ouest et Nord-Ouest). Le secteur angulaire est déterminé à partir des signes de ua et va (première colonne du Tableau A-6). Les équations pour obtenir wd pour chaque secteur angulaire sont données dans la dernière colonne du Tableau A-6, et illustrées avec la Figure A-17.

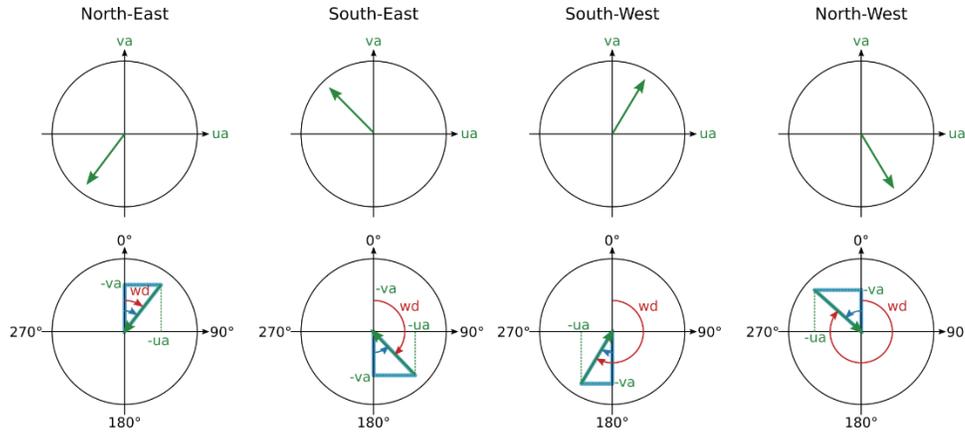


Figure A-17: Secteur angulaire pour le calcul de la direction du vent

Tableau A-6: Formule pour calculer wd à partir des 4 secteurs angulaires

Dir	Signe	$\text{sign} \left[\frac{ua}{va} \right] = \text{sign} \left[\text{atan} \left(\frac{ua}{va} \right) \right]$	Formule avec $\alpha = \frac{180}{\pi} \cdot \text{atan} \left(\frac{ua}{va} \right)$
NE	$ua < 0$ $va < 0$	Pos	α
SE	$ua < 0$ $va > 0$	Neg	$180 + \alpha$
SW	$ua > 0$ $va > 0$	Pos	$180 + \alpha$
NW	$ua > 0$ $va < 0$	Neg	$360 + \alpha$

Précipitations

La profondeur de précipitation pr_d ([mm]) présente dans les fichiers météorologiques de simulation bâtiment correspond à la hauteur de liquide observée sur une surface imperméable qui reçoit la pluie à un instant donné. Cette hauteur résulte des débits de pluie et d'évaporation de la pluie à la surface du sol.

Les données fournies par la base de données CORDEX sont des données de débit de pluie \widetilde{prc} ([kg/m²/s]).

Il faudrait un modèle d'évaporation de l'eau pour exprimer précisément pr_d ([mm]) en fonction de \widetilde{prc} ([kg/m²/s]). Comme nous ne disposons pas de ce type de modèle, nous allons faire une approximation de la hauteur de précipitation qui correspondrait à la hauteur d'eau accumulées durant la dernière heure (3600s). On posera alors :

$$pr_d = \frac{\widetilde{prc}}{\rho_{eau}} \cdot 3600 \cdot 1000 = \widetilde{prc} \cdot 3600$$

Température de ciel

La température de ciel T_{sky} en [°C] est calculée en considérant le ciel comme un corps noir ($\varepsilon = 1$) :

$$\tilde{K}^\downarrow = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{sky} + 273,15)^4$$

$$T_{sky} = \left(\frac{\tilde{K}^\downarrow}{\varepsilon \cdot \sigma} \right)^{\frac{1}{4}} - 273,15$$

Rayonnement solaire direct et diffus

Le rayonnement solaire globale $\tilde{S}_{GH}^\downarrow$ doit être décomposé en rayonnement diffus sur une surface horizontale $S_{DIFF,H}^\downarrow$, en rayonnement direct normal $S_{DIR,N}^\downarrow$ et sur une surface horizontale $S_{DIR,H}^\downarrow$.

Pour réaliser cette décomposition, nous suivons exactement la méthode proposée par (Machard et al. 2020).

Estimation du rayonnement direct normal

Le calcul du rayonnement direct horizontal $S_{DIR,H}^\downarrow$ n'a de sens que si le soleil est visible, c'est-à-dire si la hauteur du soleil h est strictement supérieure à 0. Dans la pratique, ce calcul sera réalisé uniquement si $h > 1^\circ$, sinon on fixera $S_{DIR,N}^\downarrow = 0$

Rayonnement solaire direct normal non corrigé

Le calcul est basé sur un spectre discrétisé du rayonnement solaire direct à l'extérieur de l'atmosphère $i_0(\lambda_k)$ en [$W/m^2/nm$] données dans le Tableau A-7 ci-dessous.

Le rayonnement spectral à la surface de la terre $i(\lambda)$ s'obtient avec l'équation suivante :

$$i(\lambda) = i_0(\lambda) \cdot \exp\{-[\alpha_r(\lambda) + \alpha_d(\lambda, \beta)] \cdot m(z_t)\}$$

$\alpha_r(\lambda)$ est le coefficient d'absorption dû à la dispersion moléculaire :

$$\alpha_r(\lambda) = 0,00816 \cdot \lambda^{-4}$$

$\alpha_d(\lambda)$ est le coefficient d'absorption dû à la dispersion particulaire qui dépend du coefficient de turbidité β , donné dans le Tableau A-8:

$$\alpha_d(\lambda, \beta) = \beta \cdot \lambda^{-1,3}$$

m (sans unité) est la masse optique de l'air, qui dépend de l'angle zénithal z_t en [rad], lui-même déduit de la hauteur du soleil h en [°]:

$$z_t = (h - 90) \cdot \frac{\pi}{180}$$

$$czt = \cos(z_t)$$

$$m(z_t) = \frac{1,002432 \cdot czt^2 + 0,148386 \cdot czt + 0,0096467}{czt^3 + 0,149864 \cdot czt^2 + 0,0102963 \cdot czt + 0,000303978}$$

Tableau A-7: Spectre du rayonnement solaire $i_0(\lambda_k)$ en $[(W / m^2) / nm]$, discrétisé sur les valeurs de longueur d'onde λ_k , avec $k \in [0 ; N - 1]$.

$\lambda_k [\mu m]$	$i_0(\lambda_k) [W/m^2 / nm]$	$\lambda_k [\mu m]$	$i_0(\lambda_k) [W/m^2 / nm]$	$\lambda_k [\mu m]$	$i_0(\lambda_k) [W/m^2 / nm]$
0,115	0,000007	0,43	1,66	0,9	0,902
0,14	0,00003	0,44	1,833	1	0,757
0,16	0,00023	0,45	2,031	1,2	0,491
0,18	0,00127	0,46	2,092	1,4	0,341
0,2	0,0108	0,47	2,059	1,6	0,248
0,22	0,0582	0,48	2,1	1,8	0,161
0,23	0,0675	0,49	1,975	2	0,104
0,24	0,0638	0,5	1,966	2,2	0,08
0,25	0,0718	0,51	1,906	2,4	0,063
0,26	0,132	0,52	1,856	2,6	0,049
0,27	0,235	0,53	1,865	2,8	0,039
0,28	0,225	0,54	1,805	3	0,031
0,29	0,488	0,55	1,747	3,2	0,0229
0,3	0,52	0,56	1,716	3,4	0,0168
0,31	0,698	0,57	1,734	3,6	0,0137
0,32	0,84	0,58	1,737	3,8	0,0112
0,33	1,072	0,59	1,721	4	0,0096
0,34	1,087	0,6	1,687	4,5	0,006
0,35	1,107	0,62	1,622	5	0,0038
0,36	1,081	0,64	1,563	6	0,0018
0,37	1,19	0,66	1,505	7	0,001
0,38	1,134	0,68	1,445	8	0,006
0,39	1,112	0,7	1,386	10	0,00025
0,4	1,447	0,72	1,331	15	0,000049
0,41	1,773	0,75	1,251	20	0,000015
0,42	1,77	0,8	1,123	50	4E-07

Le rayonnement direct normal non corrigé à la surface de la terre $S_{DIR,N0}^\downarrow$ en $[W/m^2]$ s'obtient en calculant l'intégrale du spectre d'irradiation à la surface de la terre :

$$S_{DIR,N0}^\downarrow = \int_{\lambda} i(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda} i_0(\lambda) \cdot \exp\{-[\alpha_r(\lambda) + \alpha_d(\lambda, \beta)] \cdot m(z_t)\} d\lambda$$

Cette intégrale est calculée numériquement de la sorte :

$$S_{DIR,N0}^\downarrow = \sum_{k=0}^{N-2} \frac{i(\lambda_k) + i(\lambda_{k+1})}{2} \cdot (\lambda_{k+1} - \lambda_k) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k \cdot i(\lambda_k)$$

Avec :

- $a_0 = \frac{\lambda_1 - \lambda_0}{2}$
- $a_k = \frac{\lambda_{k+1} - \lambda_{k-1}}{2}$ pour $k \in [1; N - 2]$
- $a_{N-1} = \frac{\lambda_{N-1} - \lambda_{N-2}}{2}$

Par conséquent :

$$S_{DIR,N0}^\downarrow = \sum_{k=0}^{N-1} a_k \cdot i_0(\lambda_k) \cdot \exp\{-[\alpha_r(\lambda_k) + \alpha_d(\lambda_k, \beta)] \cdot m(z_t)\}$$

Tableau A-8: Coefficient de turbidité β

Month	β
January	0,04
February	0,04
March	0,05
April	0,06
May	0,07
June	0,07
July	0,065
August	0,06
September	0,055
October	0,05
November	0,04
December	0,04

Correction due à la couverture nuageuse

Le rayonnement direct normal est corrigé par rapport aux effets de la couverture nuageuse grâce à la formule suivante :

$$S_{DIR,N1}^\downarrow = \left(1 - \frac{\widetilde{c}lt}{100}\right) \cdot S_{DIR,N0}^\downarrow$$

Correction due à la variation de la distance soleil/terre

Le rayonnement direct normal incident est corrigé par rapport aux effets de la couverture nuageuse avec à la formule suivante :

$$S_{DIR,N2}^\downarrow = k \cdot S_{DIR,N1}^\downarrow$$

Le coefficient k est calculé qu'une fois dans l'année. Il dépend du numéro du jour dans l'année N_d , ainsi que de la pulsation ratio $w_n = \frac{2\pi}{366}$:

$$k = \frac{1}{1353} \cdot [1353 + 45,326 \cdot \cos(w_n \cdot N_d) + 0,88018 \cdot \cos(2 \cdot w_n \cdot N_d) - 0,00461 \cdot \cos(3 \cdot w_n \cdot N_d) + 1,8037 \cdot \sin(w_n \cdot N_d) + 0,097462 \cdot \sin(2 \cdot w_n \cdot N_d) + 0,18412 \cdot \sin(3 \cdot w_n \cdot N_d)]$$

Correction due à l'humidité présente dans l'air

La correction due à la présence de vapeur dans l'atmosphère est réalisée en retranchant une quantité F au rayonnement calculé précédemment :

$$S_{DIR,N}^{\downarrow} = S_{DIR,N2}^{\downarrow} - F$$

Avec

$$F = 70 + 2,8 \cdot m \cdot \frac{p_v}{100}$$

Dans l'équation précédente, la pression de vapeur p_v est convertie de [Pa] à [mbar] avec le facteur 100. La masse optique de l'air m a été calculée précédemment.

Décomposition du rayonnement solaire

Si le rayonnement direct normal calculé est inférieur à 0 ($S_{DIR,N}^{\downarrow} \leq 0$), le rayonnement direct est nul, tout le rayonnement solaire est diffus :

$$S_{DIR,N}^{\downarrow} = 0, S_{DIR,H}^{\downarrow} = 0, S_{DIFF,H}^{\downarrow} = \tilde{S}_{GH}^{\downarrow}$$

Sinon, le rayonnement solaire est projeté sur le plan horizontal :

$$S_{DIR,H}^{\downarrow} = S_{DIR,N}^{\downarrow} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{180} \cdot h\right)$$

Si le rayonnement direct horizontal dépasse le rayonnement global horizontal ($S_{DIR,H}^{\downarrow} > \tilde{S}_{GH}^{\downarrow}$), le rayonnement direct est corrigé : $S_{DIR,H}^{\downarrow} = \tilde{S}_{GH}^{\downarrow}$, $S_{DIR,N}^{\downarrow} = \frac{S_{DIR,H}^{\downarrow}}{\sin\left(\frac{\pi}{180} \cdot h\right)}$

Le rayonnement diffus horizontal est alors calculé :

$$S_{DIFF,H}^{\downarrow} = \tilde{S}_{GH}^{\downarrow} - S_{DIR,H}^{\downarrow}$$

Annexe 4 : Détails sur les méthodes de détections de canicules

Méthode de (Ouzeau et al. 2016) : Spic, Sdeb, Sint

Cette méthode est basée sur la méthode opérationnelle de détection des vagues de chaleur utilisée en France depuis 2006. Cette méthode opérationnelle a été développée pour réaliser un suivi du climat à l'échelle de la France. Elle se base sur l'utilisation de 3 seuils absolus. Dans le but de créer une méthode pouvant être applicable plus localement et également dans n'importe quel climat, (Ouzeau et al. 2016) ont préféré l'utilisation de seuils relatifs (percentiles sur une période historique).

Les seuils ont été calculés sur la période historique de 1976 à 2005 à partir de l'évolution des températures moyennes journalières (Daily Mean Temperature, DMT). Afin d'utiliser la méthode pour le climat de la ville de Lyon, les seuils ont été calculés à partir des données de températures sur la même période historique. Les données ont été fournies par Météo France. La Figure A-18 montre la distribution cumulée des températures moyennes journalières pour la ville de Lyon et permet de déterminer les 3 seuils :

- Spic : pic de détection (99,5^{ième} percentiles) = 27,96°C pour Lyon
- Sdeb : début de VC (97,5^{ième} percentiles) = 25,17°C pour Lyon
- Sint : interruption de VC (95^{ième} percentiles) = 23,7°C pour Lyon

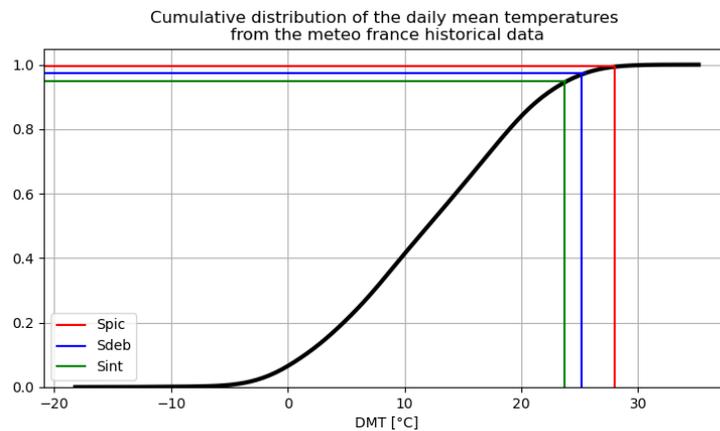


Figure A-18 : Distribution des températures moyennes journalières de la ville de Lyon (station météo Lyon-Bron) sur la période historique de 1976 à 2005.

Une période de surchauffe est identifiée dès que la DMT est supérieure au seuil Spic. Tant que la DMT des jours précédents le pic est supérieure au seuil Sdeb, ces jours sont considérés comme en période de surchauffe. La fin est détectée de deux manières différentes. Il faut soit que la DMT soit inférieure au seuil Sdeb pendant 3 jours consécutifs, soit que la DMT soit inférieure au seuil Sint pendant 1 jour. Au finale une période de surchauffe est considérée comme une canicule seulement si elle dure au moins 5 jours. La Figure A-19 schématise ce mécanisme de détection sur une évolution temporelle de DMT. Les périodes de canicules sont représentées en rouge.

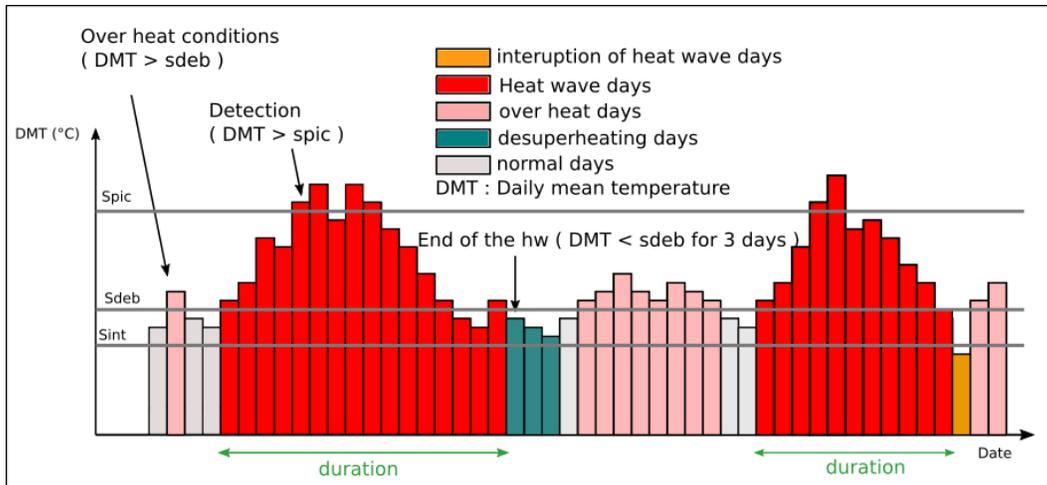


Figure A-19 : Exemple de détection de canicule avec la méthode de Ouzeau et al. (2016)

Méthode de Pascal et al. (2006) : IBM

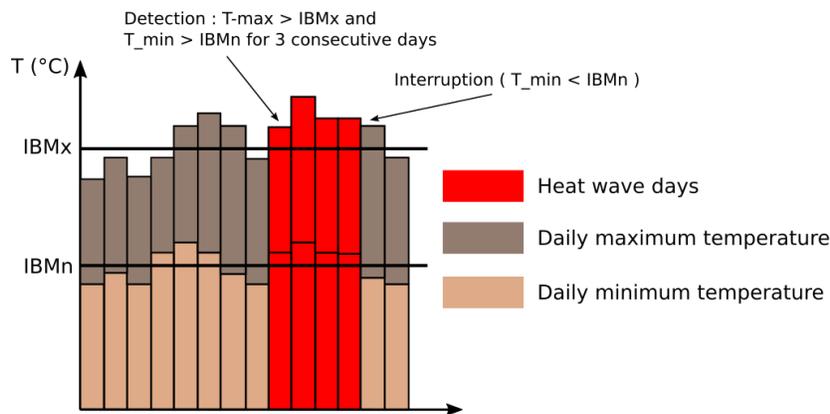


Figure A-20 : Exemple de détection de canicule avec la méthode de Pascal et al. (2006)

La méthode détaillée dans l'article de (Pascal et al. 2006) a été développée en France après la canicule meurtrière de 2003. Cette méthode est utilisée par le système français d'alertes canicule et santé (Laaidi et al. 2012). Elle a pour objectif d'anticiper les prochaines canicules pouvant entraîner un fort excès de mortalité. Afin de déterminer quels seraient les seuils (ou indicateurs biométéorologiques, IBM) les plus pertinents pour anticiper les prochaines canicules, une analyse rétrospective de la mortalité et des données météorologiques a été menée dans 14 villes. Les auteurs concluent que la combinaison des températures maximums et minimums journalières est représentative de la surmortalité. C'est donc sur la distribution des températures maximums et minimums journalières ($DMaxT$ et $DMinT$) sur la période historique du 1^{er} Juin au 31 août entre 1973 et 2003 que sont calculés les seuils de détections. Ils correspondent au 95^{ème} percentile de ces températures pour les grandes villes (Paris, Lyon, Marseille et Lille) et au 98^{ème} percentile pour les autres villes (équation A-2 et A-3).

$$IBM_n = 95^{ème} (98^{ème}) \text{ percentile des } DMinT = 20^{\circ}C \text{ pour Lyon} \quad A-2$$

$$IBM_x = 95^{\text{ème}} (98^{\text{ème}}) \text{ percentile des } DMaxT = 34^{\circ}\text{C pour Lyon} \quad \text{A-3}$$

Avec cette méthode, une canicule est détectée lorsque les températures maximum et minimum journalières sont supérieures aux seuils IBM_x et IBM_n pendant au moins 3 jours consécutifs (Figure A-20).

Méthode de Nairn et Fawcett (2014) : méthode Excess Heat Factor (EHF)

La méthode EHF a été développée en Australie en 2013 pour observer et prévoir les futures canicules. Elle est développée parallèlement avec un indicateur d'intensité corrélé avec les effets sur la santé des humains. Cette méthode est basée sur la distribution des températures moyennes journalières (DMT) sur la période historique de 1971 à 2000. Le seuil de détection de canicule est fixé comme le 95^{ème} percentile de cette distribution et il est nommé : T_{95} . Avec cette méthode, une canicule est détectée lorsque la moyenne des DMT sur 3 jours glissants (Three Day Period, TDP) est supérieure ou égale au seuil T_{95} (équation A-4 et A-5). Dans ce cas, les 3 jours font partie de la canicule.

$$DMT_{TDP,i} = \left[\frac{DMT_i + DMT_{i+1} + DMT_{i+2}}{3} \right] \quad \text{A-4}$$

$$\text{Si : } DMT_{TDP,i} \geq T_{95} \rightarrow \text{jours } i, i + 1 \text{ et } i + 2 \in \text{Canicule} \quad \text{A-5}$$

Avec cette méthode, une canicule a une durée minimum de 3 jours. La Figure A-21 donne deux exemples de détection de canicules.

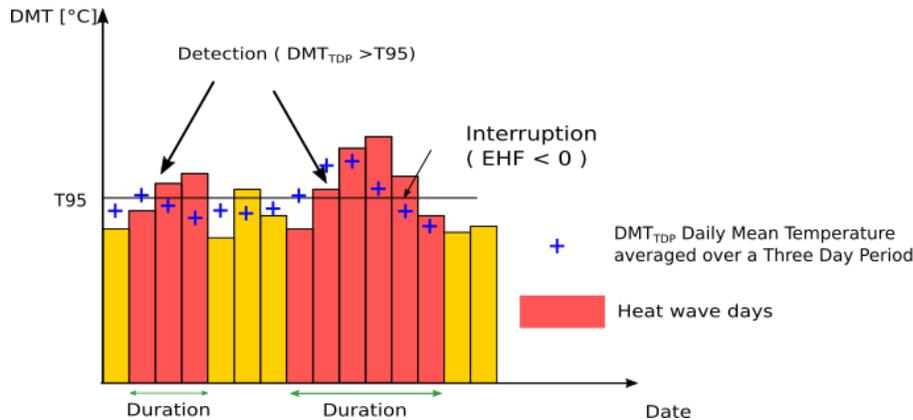


Figure A-21 : Exemple de détection de canicules avec la méthode de Nairn et Fawcett (2014)

Méthode de Russo et al. (2014): méthode Heat Wave Magnitude Index (HWMI)

La méthode de Russo et al. (2014) a été développée en Russie après une canicule extrême en 2010. L'objectif était de développer un indicateur permettant de comparer les canicules aussi bien dans le temps que dans l'espace. Il fallait qu'il soit universellement applicable et non spécifique à un secteur d'application ou secteur impacté par les canicules (comme la santé ou l'agriculture...). Cette méthode est composée d'une partie détection de vagues de chaleur et d'un calcul d'intensité. Un seuil de détection est calculé pour chaque jour de l'année. Ils sont calculés à partir de la température maximum journalière $DmaxT$ sur la période historique de 1981 à 2010. Pour chaque jour, le seuil correspond au 90^{ème} percentile de la série de valeur A_d (équation A-6). Cette série est composée des valeurs des $DMaxT$ sur la période centrée sur le jour d'intérêt sur une fenêtre de 31 jours. Afin qu'une vague de

chaleur soit détectée, il faut que la température maximum journalière soit supérieure au seuil journalier pendant au moins 3 jours consécutifs (Figure A-22).

$$A_d = U_{y=1981}^{2010} U_{i=d-15}^{d+15} DMaxT_{y,i} \quad A-6$$

Puisque les seuils de détections sont différents pour chaque jour de l'année et sont calculés sur une période d'un mois centrée sur le jour d'intérêt, cette méthode peut détecter des périodes de surchauffes en hiver. C'est pourquoi, cette méthode permet de détecter des vagues de chaleur plutôt que des canicules. Les canicules étant plutôt caractérisées par les températures les plus extrêmes pour une zone climatique donnée.

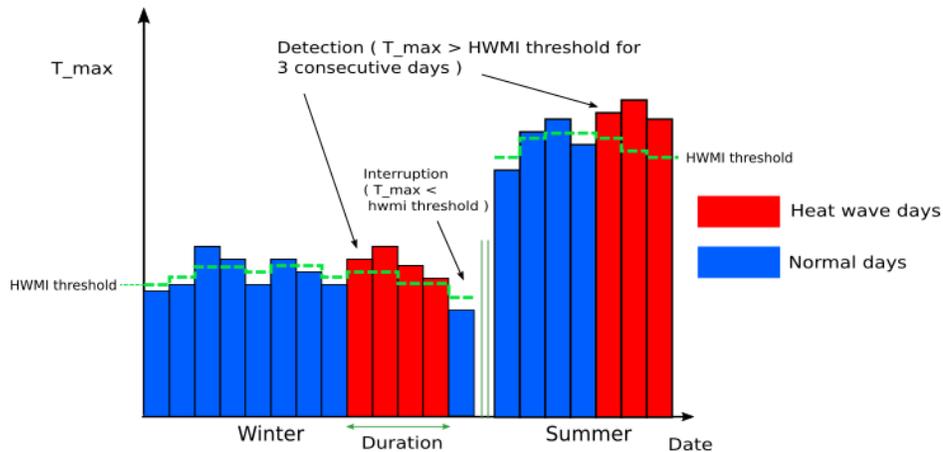


Figure A-22 : Exemple de détection de vague de chaleur avec la méthode de Russo et al. (2014)

Annexe 5 : Le bilan thermo-physiologique du corps humain

Cette annexe donne des détails sur le fonctionnement de la thermorégulation du corps humain.

Les êtres humains sont homéothermes, cela signifie qu'ils doivent maintenir la température interne de leur corps à une température relativement constante (environ 37°C) afin d'assurer le bon fonctionnement des différents organes (El Kadri 2020). Le corps humain échange de la chaleur constamment avec son environnement thermique.

Ces échanges thermiques se passent à différents niveaux et sont synthétisés par un bilan des flux de chaleur entre le corps humain et son environnement thermique. Ce bilan thermique représenté schématiquement par la Figure A-23, peut s'exprimer par l'équation A-7 :

$$M - W = E_r + E_c + E_{sw} + K + E_d + E_{res} + C_{res} + S \quad A-7$$

Avec :

- M : métabolisme total [W/m^2]
- W : Travail mécanique [W/m^2]
- E_r : Echange de chaleur par rayonnement [W/m^2]
- E_c : Echange de chaleur par convection [W/m^2]
- E_{sw} : Echange de chaleur latente par sudation [W/m^2]
- K : Echange de chaleur par conduction [W/m^2]
- E_d : Echange de chaleur latente par perspiration [W/m^2]
- C_{res} : Echange de chaleur convectif dans les voies respiratoires [W/m^2]
- E_{res} : Echange de chaleur latente dans les voies respiratoires [W/m^2]
- S : Accumulation de chaleur dans le corps [W/m^2]

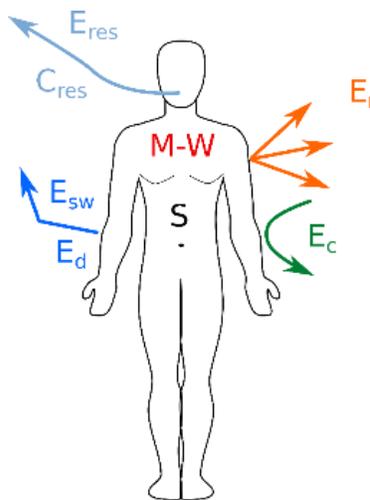


Figure A-23 : Schéma du bilan thermique du corps humain dans son environnement

Pour que le corps soit en équilibre thermique, il ne faut pas qu'il accumule ni ne perde de chaleur ($S = 0$) : c'est-à-dire qu'en moyenne, la production de chaleur dans le corps doit être équilibrée par les pertes dans l'environnement. S'il y a un gain net de chaleur, le corps va accumuler de la chaleur ($S > 0$) et la température du corps augmentera. S'il y a une perte nette de chaleur, le corps va perdre de la chaleur ($S < 0$) et la température corporelle baissera. Le corps humain puise de l'énergie dans son alimentation afin de produire la chaleur (le métabolisme M) qui permet de compenser les pertes pour équilibrer le bilan thermique et donc maintenir la température du corps constante (Fiala 1998).

Tous les échanges de chaleur du bilan thermique n'ont pas lieu au même endroit du corps humain. Une partie de ces échanges se fait entre la peau et l'environnement : par convection (E_c), rayonnement (E_r) et par évaporation (E_{sw} et E_d). Lorsque les humains sont en contact direct avec des surfaces (couché sur un lit par exemple), il y a également des échanges par conduction (K) entre la peau et le lit. Les humains sont rarement totalement nus, c'est pourquoi les échanges de chaleur entre le corps et l'environnement passent également par l'habillement. Le reste de ces échanges se passe directement entre la partie interne du corps et l'environnement comme c'est le cas des échanges convectifs (C_{res}) et latents (E_{res}) lors de la respiration.

De la chaleur circule aussi au sein du corps humain à travers la circulation du sang, qui circule dans tout le corps jusque dans la peau. Les différentes couches de tissus du corps humain sont en contact les unes avec les autres, elles échangent donc de la chaleur par conduction.

Etant donné que l'environnement thermique ainsi que les humains sont dynamiques, il existe des mécanismes de thermorégulation permettant au corps humain homéotherme de maintenir sa température interne constante dans une large gamme de niveaux d'activité et d'environnement thermique dynamique.

Lorsque la production interne de chaleur (le métabolisme M) ne suffit pas à combler les pertes, la chaleur du corps est préservée avec la vasoconstriction des vaisseaux sanguins périphériques et si nécessaire de la chaleur est générée en plus par frissonnement (Parsons 2002). A l'inverse, dans le cas où le corps humain est dans un environnement chaud et que la température interne a tendance à augmenter, le système de thermorégulation du corps humain déclenche la vasodilatation des vaisseaux sanguins périphériques et si nécessaire, il évacue également de la chaleur grâce à l'évaporation de la transpiration (Chartered Institution of Building Services Engineers 2010). Les mécanismes de vasodilatation et vasoconstriction ont une influence sur le débit de sang (et donc de la chaleur transportée par le sang) qui circule entre le corps et la peau. La vasoconstriction entraîne une diminution de cette chaleur permettant de la conserver au centre du corps tandis que la vasodilatation augmente le débit de sang vers la peau et donc permet d'évacuer plus de chaleur vers l'environnement. Pour plus de détail sur le bilan thermique du corps humain ainsi que sur les mécanismes de thermorégulation, le lecteur peut se référer à (Parsons 2002).

Le principe du bilan de chaleur entre le corps humain et son environnement a été approfondi par de nombreux auteurs qui ont également développé des modèles de thermorégulation permettant de reproduire ce fonctionnement. (Katić, Li, et Zeiler 2016) ont fait une analyse de la littérature et présentent les principaux modèles. Ces modèles de thermorégulations permettent de prédire l'état thermique du corps humain (température de peaux, température interne, débit de sudation...) et donc sont utiles pour prédire la sensation thermique ou le confort d'un occupant dans un environnement donné.

Paramètres de base du confort thermique

Dans la partie précédente de l'annexe, le bilan thermique du corps humain a été présenté. A partir de celui-ci, il est possible de faire ressortir 6 paramètres suffisants pour déterminer l'état thermique d'un individu ((Hensen 1990), (Parsons 2002), (Epstein et Moran 2006)). Avec ces paramètres, il est possible de calculer tous les échanges de chaleur du bilan thermique du corps humain et ainsi déterminer son état.

Les 6 paramètres de base du confort thermique peuvent être séparés en deux catégories : les paramètres concernant l'individu et ceux concernant l'environnement thermique.

Paramètres de l'individu

Métabolisme et travail mécanique

Le métabolisme énergétique M représente la quantité d'énergie produite dans les cellules du corps humain. Cette énergie est produite par la combustion des nutriments avec l'oxygène de l'air inspiré (El Kadri 2020). Le métabolisme produit est différent d'un individu à l'autre, il peut varier également avec l'âge (Fiala 1998). Ce métabolisme dépend entre autres de l'activité physique réalisée. Comme détaillé dans le bilan thermique du corps humain (équation A-7), l'unité de base de la grandeur est le $[W/m^2]$, mais afin de simplifier la relation entre le niveau d'activité et la quantité d'énergie produite, une unité spécifique a été développée : le $[MET]$ (pour Metabolic Equivalent of Task). L'équation A-8 donne la conversion entre le $[MET]$ et le $[W/m^2]$. Cette conversion correspond à l'activité d'une personne au repos n'exerçant aucune activité particulière.

$$1 \text{ MET} = 58,2 \text{ W/m}^2 \quad \text{A-8}$$

L'annexe B de la norme ISO 7730 donne un tableau de valeur du métabolisme énergétique en fonction de l'activité d'un individu. Le Tableau A-9 fourni le métabolisme soit en $[MET]$ soit en $[W/m^2]$ pour différentes activités.

Tableau A-9 : Métabolisme énergétique (Annexe B de la norme ISO7730)

Activité	Métabolisme énergétique	
	$[W/m^2]$	$[MET]$
Repos, couché	46	0,8
Repos, assis	58	1
Activité sédentaire (bureau, domicile, école, laboratoire)	70	1,2
Activité légère, debout (achats, laboratoire, industrie légère)	93	1,6
Activité moyenne, debout (vendeur, travail ménager, travail sur machine)	116	2
Marche à plat :		
2 km/h	110	1,9
3 km/h	140	2,4
4 km/h	165	2,8
5 km/h	200	3,4

Selon l'activité réalisée, une partie de la production de chaleur interne M est convertie en puissance mécanique externe W . L'énergie nécessaire au travail mécanique varie entre zéro (pour de nombreuses activités) et peut atteindre un maximum de 20% (Fiala 1998) à 25 % du métabolisme total M (Parsons 2002). Le travail mécanique peut donc être exprimé en fonction du métabolisme total selon l'équation A-9:

$$W = \eta \cdot M \quad \text{A-9}$$

Avec η représentant l'efficacité du travail mécanique.

Habillement

L'isolation des vêtements représente la résistance au transfert de chaleur entre la peau et la surface du vêtement. L'isolation des vêtements se calcule comme l'inverse de la conductivité thermique des vêtements et donc son unité est le $[m^2 \cdot K / W]$ (Parsons 2002).

Pour simplifier la relation entre la résistance thermique des vêtements et les tenues vestimentaires, une unité spéciale a été définie : le $[Clo]$. Un $[Clo]$ correspond à l'isolation thermique nécessaire pour qu'une personne sédentaire soit à l'aise à une température de 21°C, soit une valeur moyenne de 0,155 $[m^2 \cdot K / W]$. La valeur de 1 $[Clo]$ est représentative de la résistance thermique d'un costume d'affaires typique. Par le biais de cette unité définie par $[m^2]$ de surface de corps, il faut comprendre que la valeur $[Clo]$ donne une estimation de l'isolation comme si le vêtement était réparti uniformément sur l'ensemble du corps.

La norme ISO 7730 donne des valeurs de l'isolation de différentes tenues vestimentaires dans l'Annexe C. Le Tableau A-10 reproduit la partie du tableau C.1 de cette annexe concernant les vêtements d'usage courant. Les valeurs de résistances thermiques I_{cl} sont données en $[Clo]$ et en $[m^2 \cdot K / W]$.

Tableau A-10 : Isolement thermique de combinaisons vestimentaires types (Annexe C norme ISO 7730)

Tenus vestimentaires	I_{cl}	
	$[Clo]$	$[m^2 \cdot K / W]$
Slip, T-shirt, shorts, chaussettes fines, sandales	0,30	0,050
Caleçon, chemise à manches courtes, pantalon léger, chaussettes fines, chaussures	0,50	0,080
Slip, jupon, bas, robe, chaussures	0,70	0,105
Sous-vêtements, chemise, pantalon, chaussettes, chaussures	0,70	0,110
Slip, chemise, pantalon, veste, chaussettes, chaussures	1,00	0,155
Slip, bas, corsage, jupe longue, veste, chaussures	1,10	0,170
Sous-vêtements à manches et jambes longues, chemise, pantalon, tricot col en V, veste, chaussettes, chaussures	1,30	0,200
Sous-vêtements à manches et jambes courtes, chemise, pantalon, gilet, veste, manteau, chaussettes, chaussures	1,50	0,230

Paramètres de l'environnement thermique

Température d'air

La température d'air a une influence dans le calcul des échanges thermiques sous forme de chaleur sensible entre les humains et leurs environnements à plusieurs niveaux.

Au niveau de la peau (ou des vêtements), si les températures de peau (ou des vêtements) et les températures d'air sont différentes, il y a des échanges de chaleur par convection.

Au niveau des poumons, la température de l'air inspiré est égale à la température de l'ambiance (T_a). La température de l'air expiré est proche de la température interne du corps. Généralement ces deux températures sont différentes, il y a donc un transfert de chaleur entre le corps et l'environnement thermique.

Humidité relative

De même que pour la température d'air, l'humidité relative de l'ambiance thermique a une influence dans le calcul du bilan thermique du corps et notamment dans les échanges sous forme de chaleur latente.

Au niveau de la surface de la peau, un échange de chaleur latent a lieu entre la peau et l'air lorsque de la sueur s'évapore dans le milieu environnant. C'est l'humidité relative de l'air (HR_a) qui représente la capacité de l'air à absorber de la vapeur d'eau, qui détermine la quantité de chaleur échangée.

De même que pour la température de l'air, il y a des échanges de chaleur sous forme latente au niveau des poumons lors de la respiration. En effet l'air inspiré avec une humidité relative de (HR_a) est expiré avec une humidité relative proche de 100%.

Température radiante moyenne

Le corps humain échange de la chaleur par rayonnement thermique avec son environnement. Ces échanges sont déterminés selon les différentes températures des surfaces alentours.

La température radiante moyenne (T_{rm}) est la température d'un corps noir qui échange la même quantité de radiation thermique qu'un humain avec son environnement (Bröde, Fiala, et al. 2012). Dans sa forme la plus simple, la T_{rm} est exprimée comme la moyenne pondérée des températures des différentes surfaces en régime permanent (Enescu 2017).

$$T_{rm} = \left(\sum_{i=1}^n T_i \cdot S_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n S_i \right)^{-1} \quad \text{A-10}$$

Avec :

- T_{rm} : température radiante moyenne
- T_i : température de la surface i
- S_i : Aire de la surface i

Vitesse de l'air

La vitesse d'air (v) affecte les vitesses des échanges de chaleur sous forme sensible et latente entre la peau et l'air. Les coefficients d'échanges convectifs dépendent généralement de la vitesse de l'air.

Synthèse

Le Tableau A-11 présente une synthèse des paramètres de base du confort thermique ainsi que leurs influences sur le bilan thermique du corps humain.

Tableau A-11 : synthèse de l'influence des paramètres de base

Paramètres de base	Unité	Influence sur le bilan thermique
Métabolisme (M)	[MET] ou [W/m^2]	Chaleur produite par le corps
Habillement (I_{cl})	[Clo] ou [$m^2 \cdot K/W$]	Resistance thermique aux échanges de chaleur entre la peau et l'environnement
Température d'air (T_a)	[°C]	Echange sensible par convection entre la peau et l'air ou lors de la respiration
Humidité relative de l'air (HR_a)	[%]	Echange latent entre la peau et l'air ou lors de la respiration
Température radiante moyenne (T_{rm})	[°C]	Echange radiatif grande longueur d'onde
Vitesse de l'air (v)	[m/s]	Echange sensible et latent entre la peau et l'environnement

Annexe 6 : Evolution temporelle de la sensation thermique des occupants

Cette annexe présente des figures supplémentaires pour l'analyse des résultats de simulations du chapitre V. Les huit figures suivantes présentent les évolutions temporelles de la moyenne spatiale de *SET* pondérée par l'occupation pour les quatre cas d'étude pendant les périodes de canicules ainsi que sept jours après celles-ci (les zones grisées sont les périodes de canicules).

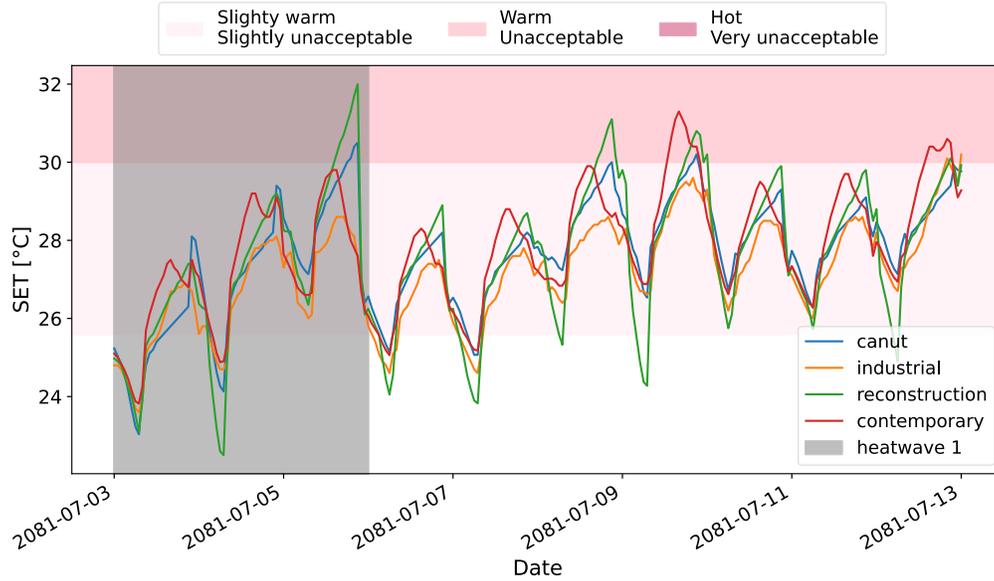


Figure A-24: Evolution temporelle de la moyenne spatiale de *SET* pondérée par l'occupation pour la canicule 1 pour les quatre cas d'étude

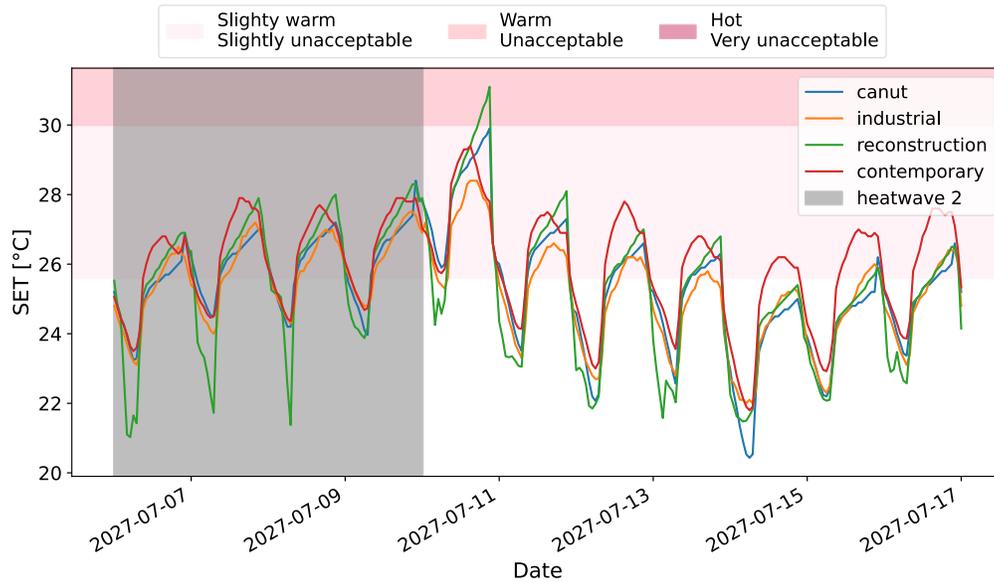


Figure A-25: Evolution temporelle de la moyenne spatiale de *SET* pondérée par l'occupation pour la canicule 2 pour les quatre cas d'étude

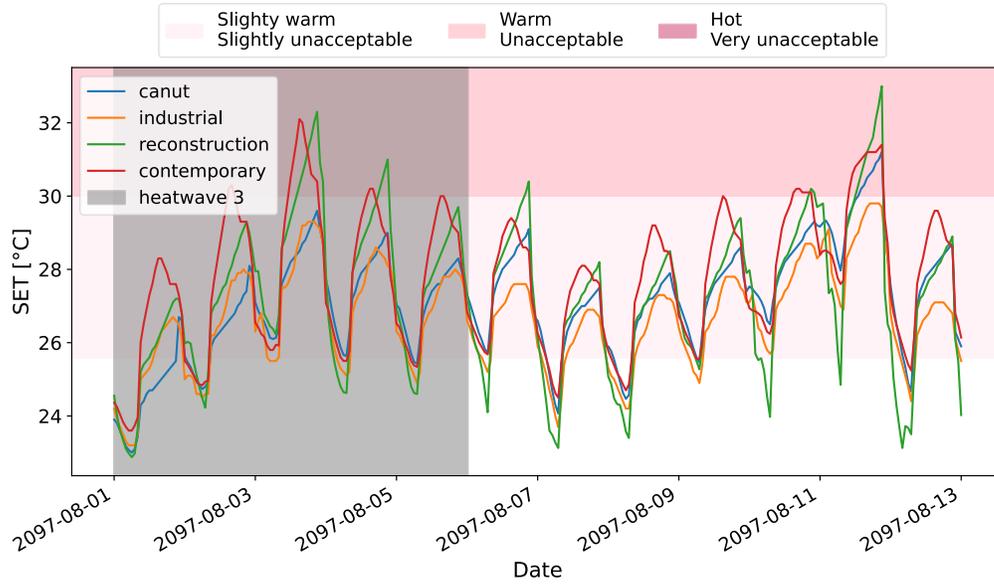


Figure A-26: Evolution temporelle de la moyenne spatiale de SET pondérée par l'occupation pour la canicule 3 pour les quatre cas d'étude

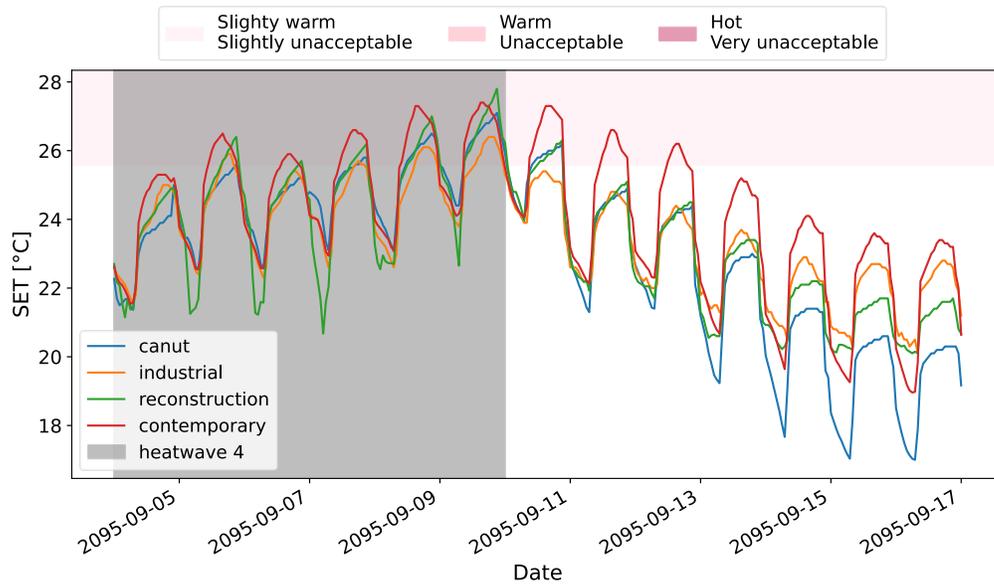


Figure A-27: Evolution temporelle de la moyenne spatiale de SET pondérée par l'occupation pour la canicule 4 pour les quatre cas d'étude

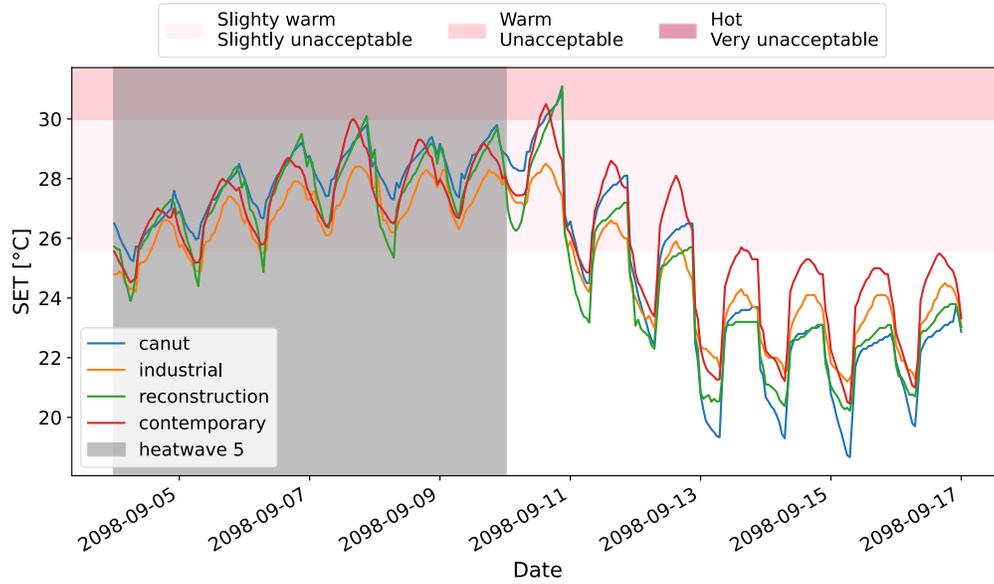


Figure A-28 : Evolution temporelle de la moyenne spatiale de SET pondérée par l'occupation pour la canicule 5 pour les quatre cas d'étude

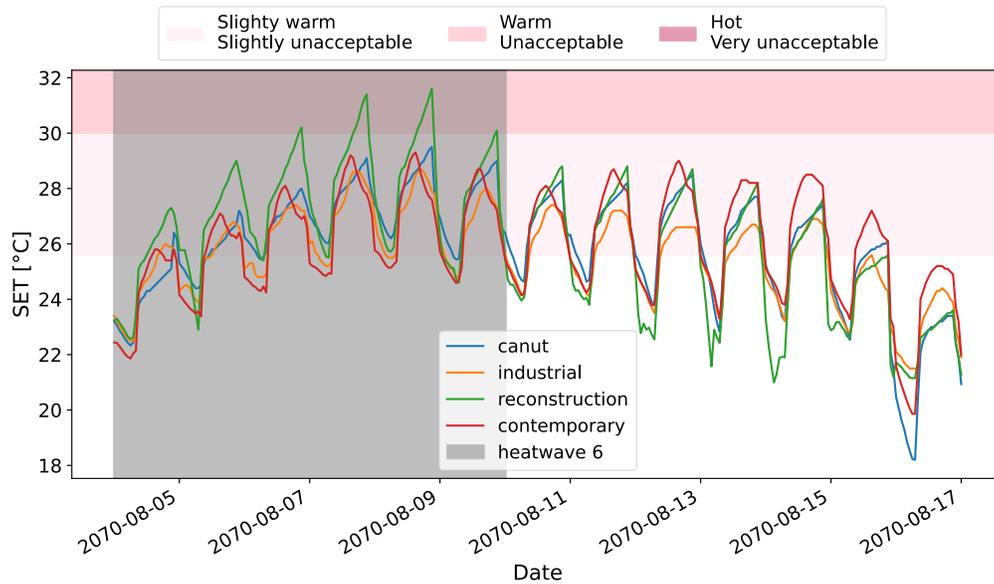


Figure A-29 : Evolution temporelle de la moyenne spatiale de SET pondérée par l'occupation pour la canicule 6 pour les quatre cas d'étude

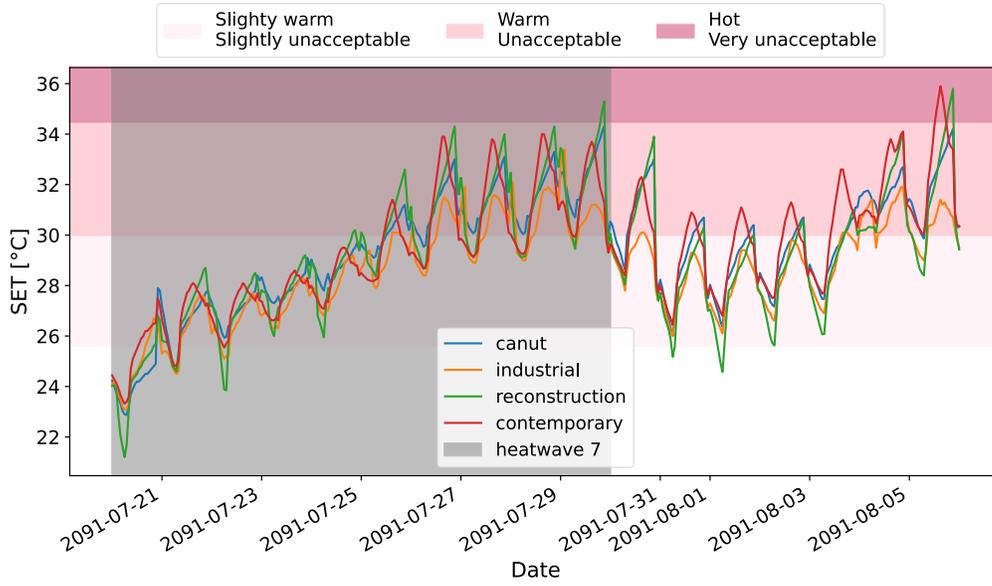


Figure A-30 : Evolution temporelle de la moyenne spatiale de SET pondérée par l'occupation pour la canicule 7 pour les quatre cas d'étude

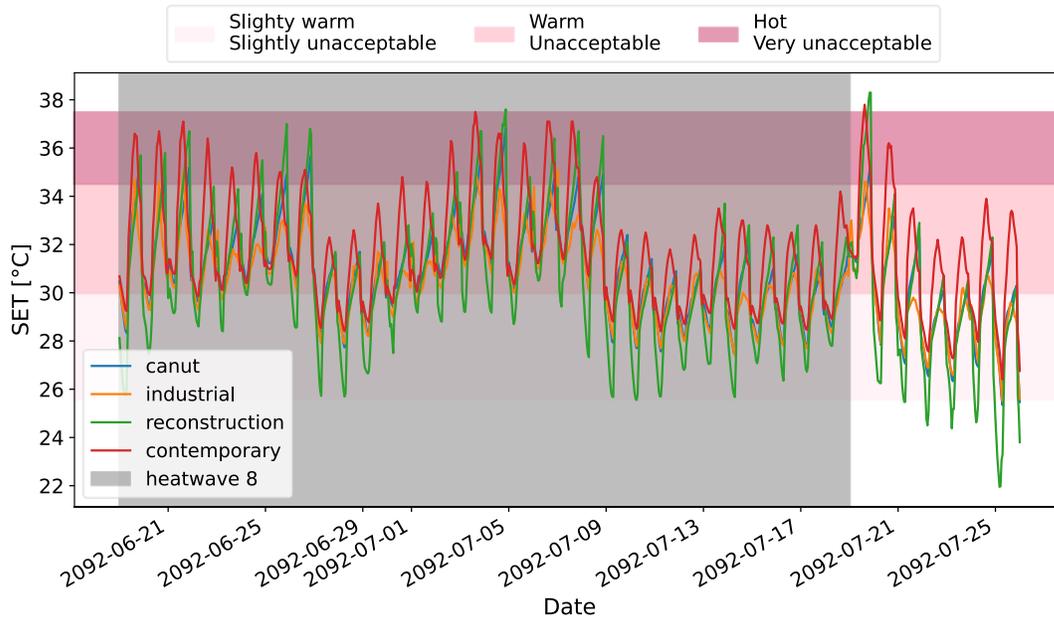


Figure A-31 : Evolution temporelle de la moyenne spatiale de SET pondérée par l'occupation pour la canicule 8 pour les quatre cas d'étude

Bibliographie

- Ali-Toudert, Fazia, et Sven Böttcher. 2018. « Urban Microclimate Prediction Prior to Dynamic Building Energy Modelling Using the TEB Model as Embedded Component in TRNSYS ». *Theoretical and Applied Climatology* 134 (3-4): 1413-28. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2621-3>.
- Andersen, Rune, Valentina Fabi, Jorn Toftum, Stefano P. Corgnati, et Bjarne W. Olesen. 2013. « Window Opening Behaviour Modelled from Measurements in Danish Dwellings ». *Building and Environment* 69 (novembre): 101-13. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.07.005>.
- ASHRAE. 2017. *ASHRAE Handbook - Fundamentals*. https://www.techstreet.com/ashrae/standards/ashrae-55-2017?product_id=1994974.
- Attia, Shady, Ramin Rahif, Vincenzo Corrado, Roonen Levinson, Aziz Laouadi, Leon Wang, Behzad Sodagar, et al. 2021. « Framework to Evaluate the Resilience of Different Cooling Technologies ». <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33998.59208>.
- Avanzini, Marcello, Joana Ortiz, Thibault Péan, Elisenda Cleries, Luca Borghero, et Jaume Salom. 2022. « Assessing natural ventilation strategies to improve thermal resilience to extreme temperatures of the residential buildings in Barcelone ». In , 10. Rotterdam.
- Baker, Nick, et Mark Standeven. 1996. « Thermal Comfort for Free-Running Buildings ». *Energy and Buildings*, PLEA '94 International Conference, 23 (3): 175-82. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(95\)00942-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(95)00942-6).
- Belcher, S.E., J.N. Hacker, et D.S. Powel. 2005. « Constructing design weather data for future climates ». *Building Services Engineering Research and Technology*. <https://doi.org/10.1191/0143624405bt112oa>.
- Belding, H. S., et T. F. Hatch. 1955. « Index for evaluating Heat Stress in Terms of resulting Physiological Strains. » *Heating, Piping and Air Conditioning* 27 (8): 129-36.
- Bertsch, Robert, Vassilis Glenis, et Chris Kilsby. 2022. « Building Level Flood Exposure Analysis Using a Hydrodynamic Model ». *Environmental Modelling & Software* 156 (octobre): 105490. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105490>.
- Bilbao, Julia, Argimiro De Miguel, José Franco, et Arturo Ayuso. 2004. « Test Reference Year Generation and Evaluation Methods in the Continental Mediterranean Area ». *Journal of Applied Meteorology - J APPL METEOROL* 43 (février): 390-400. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0390:TRYGAE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0390:TRYGAE>2.0.CO;2).
- Borgeson, Sam, et Gail Brager. 2011. « Comfort Standards and Variations in Exceedance for Mixed-Mode Buildings ». *Building Research & Information* 39 (2): 118-33. <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.556345>.
- Bröde, Peter, Dusan Fiala, Krzysztof Błażejczyk, Ingvar Holmér, Gerd Jendritzky, Bernhard Kampmann, Birger Tinz, et George Havenith. 2012. « Deriving the Operational Procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI) ». *International Journal of Biometeorology* 56 (3): 481-94. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>.
- Bröde, Peter, Eduardo L. Krüger, Francine A. Rossi, et Dusan Fiala. 2012. « Predicting Urban Outdoor Thermal Comfort by the Universal Thermal Climate Index UTCI—a Case Study in Southern Brazil ». *International Journal of Biometeorology* 56 (3): 471-80. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0452-3>.
- Brücker, G. 2005. « Vulnerable Populations: Lessons Learnt from the Summer 2003 Heat Waves in Europe ». *Eurosurveillance* 10 (7): 1-2. <https://doi.org/10.2807/esm.10.07.00551-en>.
- Bruse, Michael, et Heribert Fleer. 1998. « Simulating Surface–Plant–Air Interactions inside Urban Environments with a Three Dimensional Numerical Model ». *Environmental Modelling & Software* 13 (3): 373-84. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00042-5).
- Bueno, B., G. Pigeon, L. K. Norford, K. Zibouche, et C. Marchadier. 2012. « Development and Evaluation of a Building Energy Model Integrated in the TEB Scheme ». *Geoscientific Model Development* 5 (2): 433-48. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-433-2012>.
- Bueno, Bruno, Leslie Norford, Julia Hidalgo, et Grégoire Pigeon. 2013. « The Urban Weather Generator ». *Journal of Building Performance Simulation* 6 (4): 269-81. <https://doi.org/10.1080/19401493.2012.718797>.

- Bueno, Bruno, Leslie Norford, Grégoire Pigeon, et Rex Britter. 2011. « Combining a Detailed Building Energy Model with a Physically-Based Urban Canopy Model ». *Boundary-Layer Meteorology* 140 (3): 471-89. <https://doi.org/10.1007/s10546-011-9620-6>.
- Bui, Rudy, Matthieu Labat, et Sylvie Lorente. 2019. « Impact of the Occupancy Scenario on the Hygrothermal Performance of a Room ». *Building and Environment* 160 (août): 106178. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106178>.
- « Buildings and Climate Change Adaptation: A Call For Action ». 2021. Global Alliance For Buildings and Construction & OID.
- Butera, Federico M. 1998. « Chapter 3—Principles of Thermal Comfort ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2 (1): 39-66. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(98\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(98)00011-2).
- Carlucci, S., L. Bai, R. de Dear, et L. Yang. 2018. « Review of Adaptive Thermal Comfort Models in Built Environmental Regulatory Documents ». *Building and Environment* 137 (juin): 73-89. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.053>.
- Carlucci, Salvatore. 2013. *Thermal Comfort Assessment of Buildings*. Springer Briefs in Applied Science and Technology. Milan: Politecnico de Milano : Springer.
- Carlucci, Salvatore, et Lorenzo Pagliano. 2012. « A Review of Indices for the Long-Term Evaluation of the General Thermal Comfort Conditions in Buildings ». *Energy and Buildings* 53 (octobre): 194-205. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.015>.
- Chan, Steven C., Ron Kahana, Elizabeth J. Kendon, et Hayley J. Fowler. 2018. « Projected Changes in Extreme Precipitation over Scotland and Northern England Using a High-Resolution Regional Climate Model ». *Climate Dynamics* 51 (9): 3559-77. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4096-4>.
- Chartered Institution of Building Services Engineers. 2010. *Environmental Design*. London: CIBSE.
- Coccolo, Silvia, Jérôme Kämpf, Jean-Louis Scartezzini, et David Pearlmutter. 2016. « Outdoor Human Comfort and Thermal Stress: A Comprehensive Review on Models and Standards ». *Urban Climate* 18 (décembre): 33-57. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.08.004>.
- David, Damien, Adrien Toesca, Kevyn Johannes, et Michel Lussault. 2022. « Retours sur l'évaluation de la précision d'une chaîne d'outil dédiée à la simulation du confort thermique dans les bâtiments urbains », 8.
- Dear, R. de, J. Xiong, J. Kim, et B. Cao. 2020. « A Review of Adaptive Thermal Comfort Research since 1998 ». *Energy and Buildings* 214 (mai): 109893. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109893>.
- Dear, Richard J. de, et Gail S. Brager. 2002. « Thermal Comfort in Naturally Ventilated Buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55 ». *Energy and Buildings* 34 (6): 549-61. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00005-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00005-1).
- Djongyang, Noël, René Tchinda, et Donatien Njomo. 2010. « Thermal Comfort: A Review Paper ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (9): 2626-40. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.040>.
- Du, H, CP Underwood, et JS Edge. 2012. « Generating Design Reference Years from the UKCP09 Projections and Their Application to Future Air-Conditioning Loads ». *Building Services Engineering Research and Technology* 33 (1): 63-79. <https://doi.org/10.1177/0143624411431775>.
- Eames, M., T. Kershaw, et D. Coley. 2011. « On the Creation of Future Probabilistic Design Weather Years from UKCP09 ». *Building Services Engineering Research and Technology* 32 (2): 127-42. <https://doi.org/10.1177/0143624410379934>.
- El Kadri, Mohamad. 2020. « Modèle thermo-neurophysiologique du corps humain pour l'étude du confort thermique en conditions climatiques hétérogènes et instationnaires ». LaSIE: Université de La Rochelle.
- Elert, Kerstin, et Carlos Rodriguez-Navarro. 2022. « Degradation and Conservation of Clay-Containing Stone: A Review ». *Construction and Building Materials* 330 (mai): 127226. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127226>.
- Enescu, Diana. 2017. « A Review of Thermal Comfort Models and Indicators for Indoor Environments ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79 (novembre): 1353-79. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.175>.
- Epstein, Yoram, et Daniel S. Moran. 2006. « Thermal Comfort and the Heat Stress Indices ». *Industrial Health* 44 (3): 388-98. <https://doi.org/10.2486/indhealth.44.388>.

- Eurostat. 2020. « Population Distribution by Type of Dwelling, 2020 ». 2020. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Living_conditions_in_Europe_-_housing.
- Fabi, Valentina, Rune Vinther Andersen, Stefano Corgnati, et Bjarne W. Olesen. 2012. « Occupants' Window Opening Behaviour: A Literature Review of Factors Influencing Occupant Behaviour and Models ». *Building and Environment* 58 (décembre): 188-98. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.07.009>.
- Falasca, Serena, Virgilio Ciancio, Ferdinando Salata, Iacopo Golasi, Federica Rosso, et Gabriele Curci. 2019. « High Albedo Materials to Counteract Heat Waves in Cities: An Assessment of Meteorology, Buildings Energy Needs and Pedestrian Thermal Comfort ». *Building and Environment* 163 (octobre): 106242. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106242>.
- Fanger, P. O. 1970. *Thermal comfort.: Analysis and applications in environmental engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press.
- Fernández, M. D., J. C. López, E. Baeza, A. Céspedes, D. E. Meca, et B. Bailey. 2015. « Generation and Evaluation of Typical Meteorological Year Datasets for Greenhouse and External Conditions on the Mediterranean Coast ». *International Journal of Biometeorology* 59 (8): 1067-81. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0920-7>.
- Ferreira, Mauricio Jonas, Amauri Pereira de Oliveira, Jacyra Soares, Georgia Codato, Eduardo Wilde Bárbaro, et João Francisco Escobedo. 2012. « Radiation Balance at the Surface in the City of São Paulo, Brazil: Diurnal and Seasonal Variations ». *Theoretical and Applied Climatology* 107 (1-2): 229-46. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0480-2>.
- Fiala, Dusan. 1998. « Dynamic Simulation of Human Heat Transfer and Thermal Comfort ». Institute of Energy and Sustainable Development de MontFort University Leicester.
- Fiala, Dusan, George Havenith, Peter Bröde, Bernhard Kampmann, et Gerd Jendritzky. 2012. « UTCI-Fiala Multi-Node Model of Human Heat Transfer and Temperature Regulation ». *International Journal of Biometeorology* 56 (3): 429-41. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0424-7>.
- Field, Christopher B., Vicente Barros, Thomas F. Stocker, et Qin Dahe, éd. 2012. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245>.
- Frayssinet, Loïc, Lucie Merlier, Frédéric Kuznik, Jean-Luc Hubert, Maya Milliez, et Jean-Jacques Roux. 2018. « Modeling the Heating and Cooling Energy Demand of Urban Buildings at City Scale ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81 (janvier): 2318-27. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.040>.
- Gaetani, Isabella, Pieter-Jan Hoes, et Jan L. M. Hensen. 2016. « Occupant Behavior in Building Energy Simulation: Towards a Fit-for-Purpose Modeling Strategy ». *Energy and Buildings* 121 (juin): 188-204. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.038>.
- Gagge, A P, J A J Stolwijk, et Ysaunobu Nishi. 1971. « An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response ». *ASHRAE, Vol. 77(1)*, 21-36.
- Gonzalez, R. R., Y. Nishi, et A. P. Gagge. 1974. « Experimental Evaluation of Standard Effective Temperature a New Biometeorological Index of Man's Thermal Discomfort ». *International Journal of Biometeorology* 18 (1): 1-15. <https://doi.org/10.1007/BF01450660>.
- Google Maps. 2022. « Lyon ». <https://www.google.fr/maps/@45.7725035,4.8493709,5592m/data=!3m1!1e3>.
- Grimmond, C. S. B., M. Blakett, M. J. Best, J. Barlow, J.-J. Baik, S. E. Belcher, S. I. Bohnenstengel, et al. 2010. « The International Urban Energy Balance Models Comparison Project: First Results from Phase 1 ». *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 49 (6): 1268-92. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2354.1>.
- Gros, Adrien, Emmanuel Bozonnet, Christian Inard, et Marjorie Musy. 2016. « Simulation Tools to Assess Microclimate and Building Energy – A Case Study on the Design of a New District ». *Energy and Buildings, SI: Countermeasures to Urban Heat Island*, 114 (février): 112-22. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.032>.
- Gunay, H. Burak, William O'Brien, et Ian Beausoleil-Morrison. 2013. « A Critical Review of Observation Studies, Modeling, and Simulation of Adaptive Occupant Behaviors in Offices ». *Building and Environment* 70 (décembre): 31-47. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.07.020>.
- Guo, Siyue, Da Yan, Tianzhen Hong, Chan Xiao, et Ying Cui. 2019. « A Novel Approach for Selecting Typical Hot-Year (THY) Weather Data ». *Applied Energy* 242 (mai): 1634-48. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.065>.

- Hall, I., R. Prairie, H. Anderson, et E. Boes. 1978. « Generation of a Typical Meteorological Year. » *Proceedings of the 1978 Annual Meeting of the American Section of the International Solar Energy Society, Vol.2*, 669-71.
- Hamdy, Mohamed, Salvatore Carlucci, Pieter-Jan Hoes, et Jan L.M. Hensen. 2017. « The Impact of Climate Change on the Overheating Risk in Dwellings—A Dutch Case Study ». *Building and Environment* 122 (septembre): 307-23. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.031>.
- Havenith, George, Dusan Fiala, Krzysztof Błazejczyk, Mark Richards, Peter Bröde, Ingvar Holmér, Hannu Rintamaki, Yael Benshabat, et Gerd Jendritzky. 2012. « The UTCI-Clothing Model ». *International Journal of Biometeorology* 56 (3): 461-70. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0451-4>.
- Hensen, J. L. M. 1990. « Literature Review on Thermal Comfort in Transient Conditions ». *Building and Environment* 25 (4): 309-16. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(90\)90004-B](https://doi.org/10.1016/0360-1323(90)90004-B).
- Herrera, Manuel, Sukumar Natarajan, David A Coley, Tristan Kershaw, Alfonso P Ramallo-González, Matthew Eames, Daniel Fosas, et Michael Wood. 2017. « A Review of Current and Future Weather Data for Building Simulation ». *Building Services Engineering Research and Technology* 38 (5): 602-27. <https://doi.org/10.1177/0143624417705937>.
- Holmes, Seth H., Thomas Phillips, et Alex Wilson. 2016. « Overheating and Passive Habitability: Indoor Health and Heat Indices ». *Building Research & Information* 44 (1): 1-19. <https://doi.org/10.1080/09613218.2015.1033875>.
- Hong, Tianzhen, Da Yan, Simona D'Oca, et Chien-fei Chen. 2017. « Ten Questions Concerning Occupant Behavior in Buildings: The Big Picture ». *Building and Environment* 114 (mars): 518-30. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.006>.
- Hoof, J. van. 2008. « Forty Years of Fanger's Model of Thermal Comfort: Comfort for All? » *Indoor Air* 18 (3): 182-201. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2007.00516.x>.
- Höppe, P. 1999. « The physiological equivalent temperature - A universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment ». *International Journal of Biometeorology* 43 (2): 71-75. <https://doi.org/10.1007/s004840050118>.
- Huang, Y.J., F. Su, Donghyun Seo, et Moncef Krarti. 2014. « Development of 3012 IWEC2 weather files for international locations (RP-1477) ». *ASHRAE Transactions* 120 (janvier): 340-55.
- Humphreys, Michael. 1978. « Outdoor Temperatures and Comfort Indoors ». *Batiment International, Building Research and Practice* 6 (2): 92-92. <https://doi.org/10.1080/09613217808550656>.
- Humphreys, Michael A, et J. Fergus Nicol. 2002. « The Validity of ISO-PMV for Predicting Comfort Votes in Every-Day Thermal Environments ». *Energy and Buildings, Special Issue on Thermal Comfort Standards*, 34 (6): 667-84. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00018-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00018-X).
- ISO 7730. 2005. « Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria ». International Organisation for Standardisation.
- Jendritzky, Gerd, Richard de Dear, et George Havenith. 2012. « UTCI—Why Another Thermal Index? » *International Journal of Biometeorology* 56 (3): 421-28. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0513-7>.
- Jenkins, G.J., J. M. Murphy, D. M. H. Sexton, J. A. Lowe, P. Jones, et C.G. Kilsby. 2009. « UK Climate Projections: Briefing report ». Met Office Hadley Center, Exeter, UK.
- Jentsch, Mark F, Matt E Eames, et Geoff J Levermore. 2015. « Generating Near-Extreme Summer Reference Years for Building Performance Simulation ». *Building Services Engineering Research and Technology* 36 (6): 701-27. <https://doi.org/10.1177/0143624415587476>.
- Ji, Lili, Abdelaziz Laouadi, Chang Shu, Abhishek Gaur, Michael Lacasse, et Liangzhu (Leon) Wang. 2022. « Evaluating Approaches of Selecting Extreme Hot Years for Assessing Building Overheating Conditions during Heatwaves ». *Energy and Buildings* 254 (janvier): 111610. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111610>.
- Jiménez-Pulido, Cristina, Ana Jiménez-Rivero, et Justo García-Navarro. 2022. « Improved Sustainability Certification Systems to Respond to Building Renovation Challenges Based on a Literature Review ». *Journal of Building Engineering* 45 (janvier): 103575. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103575>.
- Katić, Katarina, Rongling Li, et Wim Zeiler. 2016. « Thermophysiological Models and Their Applications: A Review ». *Building and Environment* 106 (septembre): 286-300. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.031>.
-

- Kershaw, T., M. Eames, et D. Coley. 2010. « Comparison of Multi-Year and Reference Year Building Simulations ». *Building Services Engineering Research and Technology* 31 (4): 357-69. <https://doi.org/10.1177/0143624410374689>.
- Ketchen Jr., David J., et Christopher L. Shook. 1996. « The Application of Cluster Analysis in Strategic Management Research: An Analysis and Critique ». *Strategic Management Journal* 17 (6): 441-58. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0266\(199606\)17:6<441::AID-SMJ819>3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0266(199606)17:6<441::AID-SMJ819>3.0.CO;2-G).
- Laaidi, Karine, Aymeric Ung, Vèrène Wagner, Pascal Beaudeau, et Mathilde Pascal. 2012. « Système d'alerte canicule et santé: principes, fondements et évaluation ». Santé Public France. <https://www.santepubliquefrance.fr/content/download/181825/2305099?version=1>.
- Laouadi, A., M. Bartko, et M. A. Lacasse. 2020. « A New Methodology of Evaluation of Overheating in Buildings ». *Energy and Buildings* 226 (novembre): 110360. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110360>.
- Laouadi, A., A. Gaur, M. A. Lacasse, M. Bartko, et M. Armstrong. 2020. « Development of reference summer weather years for analysis of overheating risk in buildings ». *Journal of Building Performance Simulation* 13 (3): 301-19. <https://doi.org/10.1080/19401493.2020.1727954>.
- Lassandro, Paola, et Silvia Di Turi. 2019. « Multi-Criteria and Multiscale Assessment of Building Envelope Response-Ability to Rising Heat Waves ». *Sustainable Cities and Society* 51 (novembre): 101755. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101755>.
- Lauzet, Nicolas, Auline Rodler, Marjorie Musy, Marie-Hélène Azam, Sihem Guernouti, Dasaraden Mauree, et Thibaut Colinart. 2019. « How Building Energy Models Take the Local Climate into Account in an Urban Context – A Review ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 116 (décembre): 109390. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109390>.
- Levermore, G J, et J B Parkinson. 2006. « Analyses and Algorithms for New Test Reference Years and Design Summer Years for the UK ». *Building Services Engineering Research and Technology* 27 (4): 311-25. <https://doi.org/10.1177/0143624406071037>.
- Levermore, Geoff J., Alan M. Jones, et Andrew J. Wright. 2000. « Simulation of a Naturally Ventilated Building at Different Locations ». *AIVC#12,978*. https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_12978.pdf.
- Machard, Anaïs. 2021. « Towards mitigation and adaptation to climate change: Contribution to Building Design ». Université de La Rochelle.
- Machard, Anaïs, Christian Inard, Jean-Marie Alessandrini, Charles Pelé, et Jacques Ribéron. 2020. « A Methodology for Assembling Future Weather Files Including Heatwaves for Building Thermal Simulations from the European Coordinated Regional Downscaling Experiment (EURO-CORDEX) Climate Data ». *Energies* 13 (13): 3424. <https://doi.org/10.3390/en13133424>.
- Malchaire, J., A. Piette, B. Kampmann, P. Mehnert, H. Gebhardt, G. Havenith, E. den Hartog, et al. 2001. « Development and validation of the predicted heat strain model ». *The Annals of Occupational Hygiene* 45 (2): 123-35. <https://doi.org/10.1093/annhyg/45.2.123>.
- Malchaire, J.B.M. 2006. « Occupational Heat Stress Assessment by the Predicted Heat Strain Model ». *Industrial Health* 44 (3): 380-87. <https://doi.org/10.2486/indhealth.44.380>.
- María Calama-González, Carmen, Rafael Suárez, et Ángel Luis León-Rodríguez. 2022. « Mitigation of Climate Change in Mediterranean Existing Social Dwellings through Numerical Optimization of Building Stock Models ». *Energy and Buildings* 266 (juillet): 112109. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112109>.
- Masson, Valéry. 2000. « A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models ». *Boundary-Layer Meteorology* 94 (3): 357-97. <https://doi.org/10.1023/A:1002463829265>.
- Masterton, J.M., et F.A. Richardson. 1979. « Humidex, A method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity ».
- Mavrogianni, A., M. Davies, J. Taylor, Z. Chalabi, P. Biddulph, E. Oikonomou, P. Das, et B. Jones. 2014. « The Impact of Occupancy Patterns, Occupant-Controlled Ventilation and Shading on Indoor Overheating Risk in Domestic Environments ». *Building and Environment* 78 (août): 183-98. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.008>.
- Merlier, Lucie, Loïc Frayssinet, Frederic Kuznik, Gilles Rusaouen, Kevyn Johannes, Jean-Luc Hubert, Maya Milliez, Univ Lyon, INSA de Lyon, et Université Lyon. 2017. « Analysis of the (Urban) Microclimate Effects on the Building Energy Behaviour », 8.

- Ministère de la transition écologique. 2021a. *Arrêté du 4 août 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine et portant approbation de la méthode de calcul prévue à l'article R. 172-6 du code de la construction et de l'habitation*.
- . 2021b. « Cartographie de l'exposition des maisons individuelles au retrait-gonflement des argiles — Juin 2021 », 52.
- Motuzienė, Violeta, Artur Rogoża, Vilūnė Lapinskienė, et Tatjana Vilutienė. 2016. « Construction Solutions for Energy Efficient Single-Family House Based on Its Life Cycle Multi-Criteria Analysis: A Case Study ». *Journal of Cleaner Production* 112 (janvier): 532-41. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.103>.
- Moujalled, Bassam. 2007. « Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés », 330.
- Musy, Marjorie, Laurent Malys, Benjamin Morille, et Christian Inard. 2015. « The Use of SOLENE-Microclimat Model to Assess Adaptation Strategies at the District Scale ». *Urban Climate*, Cooling Heat Islands, 14 (décembre): 213-23. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.07.004>.
- Nairn, John, et Robert Fawcett. 2014. « The Excess Heat Factor: A Metric for Heatwave Intensity and Its Use in Classifying Heatwave Severity ». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 12 (1): 227-53. <https://doi.org/10.3390/ijerph120100227>.
- Nicol, J. F., et M. A. Humphreys. 2002. « Adaptive Thermal Comfort and Sustainable Thermal Standards for Buildings ». *Energy and Buildings*, Special Issue on Thermal Comfort Standards, 34 (6): 563-72. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00006-3).
- Nicol, J. Fergus, Jake Hacker, Brian Spires, et Hywel Davies. 2009. « Suggestion for New Approach to Overheating Diagnostics ». *Building Research & Information* 37 (4): 348-57. <https://doi.org/10.1080/09613210902904981>.
- Nielsen, Anne N., Rasmus L. Jensen, Tine S. Larsen, et Søren B. Nissen. 2016. « Early Stage Decision Support for Sustainable Building Renovation – A Review ». *Building and Environment* 103 (juillet): 165-81. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.009>.
- O'Donovan, Adam, Theofanis Psomas, et Paul D. O'Sullivan. 2022. « Evaluating the present day ambient warming resilience of passively cooled dwellings in Ireland: A data-driven approach ». In , 237-47. Rotterdam.
- Oke, T. R., G. Mills, A. Christen, et J. A. Voogt. 2017. *Urban Climates*. Cambridge University Press.
- Open Data Of the Métropole of Lyon. 2014. « Bâtiments de la Métropole de Lyon ». <https://data.grandlyon.com/>.
- Ouzeau, G., J. -M. Soubeyroux, M. Schneider, R. Vautard, et S. Planton. 2016. « Heat Waves Analysis over France in Present and Future Climate: Application of a New Method on the EURO-CORDEX Ensemble ». *Climate Services* 4 (décembre): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2016.09.002>.
- Palme, M., L. Inostroza, G. Villacreses, Andrea Lobato-Cordero, et C. Carrasco. 2017. « From Urban Climate to Energy Consumption. Enhancing Building Performance Simulation by Including the Urban Heat Island Effect ». *Energy and Buildings* 145 (juin): 107-20. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.069>.
- Panagiotidou, Maria, Lu Aye, et Behzad Rismanchi. 2021. « Optimisation of Multi-Residential Building Retrofit, Cost-Optimal and Net-Zero Emission Targets ». *Energy and Buildings* 252 (décembre): 111385. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111385>.
- Parsons, Ken. 2002. *Human Thermal Environments: The Effect of Hot, Moderate And*. London: CRC Press. <http://public.eblib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=180466>.
- Pascal, Mathilde, Karine Laaidi, Martine Ledrans, Elsa Baffert, Céline Caserio-Schönemann, Alain Le Tertre, Jacques Manach, Sylvia Medina, Jérémie Rudant, et Pascal Empereur-Bissonnet. 2006. « France's Heat Health Watch Warning System ». *International Journal of Biometeorology* 50 (3): 144-53. <https://doi.org/10.1007/s00484-005-0003-x>.
- Peeters, Leen, Richard de Dear, Jan Hensen, et William D'haeseleer. 2009. « Thermal Comfort in Residential Buildings: Comfort Values and Scales for Building Energy Simulation ». *Applied Energy* 86 (5): 772-80. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.07.011>.
- Perkins, S. E., et L. V. Alexander. 2013. « On the Measurement of Heat Waves ». *Journal of Climate* 26 (13): 4500-4517. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00383.1>.

- Piselli, Cristina, et Anna Laura Pisello. 2019. « Occupant Behavior Long-Term Continuous Monitoring Integrated to Prediction Models: Impact on Office Building Energy Performance ». *Energy* 176 (juin): 667-81. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.005>.
- Pushkar, S., R. Becker, et A. Katz. 2005. « A Methodology for Design of Environmentally Optimal Buildings by Variable Grouping ». *Building and Environment* 40 (8): 1126-39. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.09.004>.
- Ramakrishnan, Sayanthan, Xiaoming Wang, Jay Sanjayan, et John Wilson. 2017. « Thermal Performance of Buildings Integrated with Phase Change Materials to Reduce Heat Stress Risks during Extreme Heatwave Events ». *Applied Energy* 194 (mai): 410-21. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.084>.
- Robinson, Darren, Frédéric Haldi, Philippe Leroux, Diane Perez, Adil Rasheed, et Urs Wilke. 2009. « CITYSIM: Comprehensive Micro-Simulation of Resource Flows for Sustainable Urban Planning ». Proceedings of the Eleventh International IBPSA Conference. 2009. <http://infoscience.epfl.ch/record/148717>.
- Rochard, Ulrich, Santhiah Shanthirablan, Camille Brejon, et Maëlle Chateau Le Bras. 2015. « Bâtiments résidentiels: Typologie du parc existant et solutions exemplaires pour la rénovation énergétique en France ».
- Rodler, Auline, Sihem Guernouti, Marjorie Musy, et Julien Bouyer. 2018. « Thermal Behaviour of a Building in Its Environment: Modelling, Experimentation, and Comparison ». *Energy and Buildings* 168 (juin): 19-34. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.008>.
- Rothfus, Lans P. 1979. « The Heat Index “Equation” (or, More Than You Ever Wanted to Know About Heat Index) », 2.
- Rousseuw, Peter J. 1987. « Silhouettes: A Graphical Aid to the Interpretation and Validation of Cluster Analysis ». *Journal of Computational and Applied Mathematics* 20 (novembre): 53-65. [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7).
- Rupp, Ricardo Forgiarini, Natalia Giraldo Vásquez, et Roberto Lamberts. 2015. « A Review of Human Thermal Comfort in the Built Environment ». *Energy and Buildings* 105 (octobre): 178-205. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.047>.
- Russo, Simone, Alessandro Dosio, Rune G. Graversen, Jana Sillmann, Hugo Carrao, Martha B. Dunbar, Andrew Singleton, Paolo Montagna, Paulo Barbola, et Jürgen V. Vogt. 2014. « Magnitude of Extreme Heat Waves in Present Climate and Their Projection in a Warming World ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 119 (22): 12,500-12,512. <https://doi.org/10.1002/2014JD022098>.
- Sahabi ABED, Salah, et Mehdi Kerrouche. 2017. « Indices Bioclimatiques : Etude du cas de la Vague de Chaleur en Algérie, Dans la Perspective de l'Elaboration de Cartes de Vigilance : « Humidex » et « PET » », mars.
- Salvati, Agnese, et Maria Kolokotroni. 2022. « Urban microclimate impact on ventilation and thermal performance of multi-family residential buildings: two case studies in different climates and urban settings ». In , 227-36. Rotterdam.
- Salvati, Agnese, Helena Coch Roura, et Carlo Cecere. 2015. « Urban Morphology and Energy Performance: The Direct and Indirect Contribution in Mediterranean Climate », 8.
- Sanquer, Stéphane, Guillaume Caniot, et Sachin Bandhare. 2015. « Wind Assessment in Urban Area with CFD Tools: Application to Natural Ventilation Potential and Outdoor Pedestrian Comfort ». *Building Simulation Conference 2015 (IBPSA), Hyderabad*, 8.
- Santamouris, Mat. 2019. *Cooling Energy Solutions for Buildings and Cities*. WORLD SCIENTIFIC. <https://doi.org/10.1142/10901>.
- Santé Publique France. 2008. « Estimation du temps passé à l'intérieur du logement de la population française. Journées de Veille Sanitaire, Paris, 26-28 novembre 2008 ». 2008. <https://www.santepubliquefrance.fr/notices/estimation-du-temps-passe-a-l-interieur-du-logement-de-la-population-francaise.-journées-de-veille-sanitaire-paris-26-28-novembre-2008>.
- . 2022. « Bilan canicule et santé : un été marqué par des phénomènes climatiques multiples et un impact sanitaire important ». 2022. <https://www.santepubliquefrance.fr/presse/2022/bilan-canicule-et-sante-un-ete-marque-par-des-phenomenes-climatiques-multiples-et-un-impact-sanitaire-important>.
- Schweiker, Marcel, Frédéric Haldi, Masanori Shukuya, et Darren Robinson. 2012. « Verification of stochastic models of window opening behaviour for residential buildings ». *Journal of Building Performance Simulation* 5 (1): 55-74. <https://doi.org/10.1080/19401493.2011.567422>.

- Shaposhnikov, Dmitry, Boris Revich, Tom Bellander, Getahun Bero Bedada, Matteo Bottai, Tatyana Kharkova, Ekaterina Kvasha, et al. 2014. « Mortality Related to Air Pollution with the Moscow Heat Wave and Wildfire of 2010 ». *Epidemiology* 25 (3): 359-64. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000090>.
- Skougaard Kaspersen, Per, Nanna Høegh Ravn, Karsten Arnbjerg-Nielsen, Henrik Madsen, et Martin Drews. 2017. « Comparison of the Impacts of Urban Development and Climate Change on Exposing European Cities to Pluvial Flooding ». *Hydrology and Earth System Sciences* 21 (8): 4131-47. <https://doi.org/10.5194/hess-21-4131-2017>.
- Solar Energy Laboratory, Transsolar, et CSTB. 2007. « TRNSYS 16 Documentation - Multizone Building Modeling with Type56 and TRNBuild ».
- Steadman, R. G. 1979. « The Assessment of Sultriness. Part I: A Temperature-Humidity Index Based on Human Physiology and Clothing Science ». *Journal of Applied Meteorology (1962-1982)* 18 (7): 861-73.
- Summers, Peter W. 1964. « An Urban Ventilation Model Applied To Montreal ». Montreal: Department of Meteorology, McGill University.
- Taesler, Roger, et Cari Andersson. 1984. « A Method for Solar Radiation Computations Using Routine Meteorological Observations ». *Energy and Buildings* 7 (4): 341-52. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(84\)90080-X](https://doi.org/10.1016/0378-7788(84)90080-X).
- Tavakoli, Elahe, Adam O'Donovan, Maria Kolokotroni, et Paul D. O'Sullivan. 2022. « Evaluating the Indoor Thermal Resilience of Ventilative Cooling in Non-Residential Low Energy Buildings: A Review ». *Building and Environment* 222 (août): 109376. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109376>.
- Tena-Colunga, Arturo, et Horacio de Jesús Nanguillasmú-Hernández. 2023. « Resilient Seismic Design of Reinforced Concrete Framed Buildings with Metallic Fuses Including Soil-Structure Interaction Effects ». *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 164 (janvier): 107589. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107589>.
- Tremeac, Brice, Pierre Bousquet, Cecile de Munck, Gregoire Pigeon, Valery Masson, Colette Marchadier, Michele Merchat, Pierre Poeuf, et Francis Meunier. 2012. « Influence of Air Conditioning Management on Heat Island in Paris Air Street Temperatures ». *Applied Energy* 95 (juillet): 102-10. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.015>.
- United Nations. 2018. « 2018 Revision of World Urbanization Prospects ». Multimedia Library - United Nations Department of Economic and Social Affairs. 2018. <https://www.un.org/development/desa/publications/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>.
- U.S. Department of Energy. 2021. « EnergyPlus Version 9.6.0 Documentation - Auxiliary Programs », septembre, 257.
- Van Hooff, T., et B. Blocken. 2010. « On the Effect of Wind Direction and Urban Surroundings on Natural Ventilation of a Large Semi-Enclosed Stadium ». *Computers & Fluids* 39 (7): 1146-55. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2010.02.004>.
- Wang, Zhe, Tianzhen Hong, et Han Li. 2021. « Informing the Planning of Rotating Power Outages in Heat Waves through Data Analytics of Connected Smart Thermostats for Residential Buildings ». *Environmental Research Letters* 16 (7): 074003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac092f>.
- Watkins, R., GJ Levermore, et JB Parkinson. 2011. « Constructing a Future Weather File for Use in Building Simulation Using UKCP09 Projections ». *Building Services Engineering Research and Technology* 32 (3): 293-99. <https://doi.org/10.1177/0143624410396661>.
- Watkins, R, GJ Levermore, et Jb Parkinson. 2013. « The Design Reference Year – a New Approach to Testing a Building in More Extreme Weather Using UKCP09 Projections ». *Building Services Engineering Research and Technology* 34 (2): 165-76. <https://doi.org/10.1177/0143624411431170>.
- Whitman, S, G Good, E R Donoghue, N Benbow, W Shou, et S Mou. 1997. « Mortality in Chicago attributed to the July 1995 heat wave. » *American Journal of Public Health* 87 (9): 1515-18. <https://doi.org/10.2105/AJPH.87.9.1515>.
- Yang, Xiaoshan, Lihua Zhao, Michael Bruse, et Qinglin Meng. 2012. « An Integrated Simulation Method for Building Energy Performance Assessment in Urban Environments ». *Energy and Buildings* 54 (novembre): 243-51. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.042>.
- Yaqubi, Obaidullah, Auline Rodler, Sihem Guernouti, et Marjorie Musy. 2022. « Creation and Application of Future Typical Weather Files in the Evaluation of Indoor Overheating in Free-Floating Buildings ». *Building and Environment* 216 (mai): 109059. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109059>.

Zhang, Chen, Ogun Berk Kazanci, Shady Attia, Ronnen Levinson, Sang Hoon Lee, Peter Holzer, Agnese Salvati, et al. 2021. « IEA EBC Annex 80 - Dynamic Simulation Guideline for the Performance Testing of Resilient Cooling Strategies ». *Aalborg University*, 27.

Zhao, Qiantao, Zhiwei Lian, et Dayi Lai. 2021. « Thermal Comfort Models and Their Developments: A Review ». *Energy and Built Environment* 2 (1): 21-33. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.05.007>.

THESE DE L'UNIVERSITE DE LYON OPEREE AU SEIN DE L'UCBL

NOM : TOESCA

DATE de SOUTENANCE : 0//2023

Prénoms : Adrien Michel

TITRE : Evaluer les performances des bâtiments urbains passifs face aux canicules à venir

Ecole doctorale : MEGA

RESUME :

Dans le contexte du réchauffement climatique, les événements climatiques extrêmes tels que les canicules seront plus longs, plus fréquents et plus intenses. Ces canicules sont amplifiées en ville par le phénomène d'îlot de chaleur urbain et risquent d'impacter une majorité de la population mondiale puisque plus de la moitié des humains sur Terre vivent dans des zones urbaines, avec une augmentation au cours des dernières décennies. Par ailleurs, en Europe les bâtiments résidentiels sont actuellement très peu équipés de systèmes de climatisation et les avantages sociaux d'une augmentation du taux de pénétration des systèmes de climatisation sont discutables. Une majorité d'humain risque donc d'être vulnérable face aux canicules à venir.

Ce constat révèle la nécessité de répondre à la problématique suivante : comment évaluer les performances des bâtiments résidentiels urbains passifs pendant les canicules attendues durant les décennies à venir ?

Cette thèse a consisté à définir les différents éléments d'un protocole d'évaluation permettant de répondre à cette problématique.

Tout d'abord des outils de simulations pertinents ont été définis. Ces outils ont été confrontés avec des mesures in-situ réalisées à Lyon pendant l'été 2020. La confrontation révèle que les outils modélisent avec précision les ambiances thermiques intérieures des bâtiments résidentiels urbains passifs.

Ensuite une méthodologie a été développée pour constituer des jeux de données météorologiques de canicules, qui soient représentatifs de la diversité des canicules que pourraient subir les bâtiments durant les décennies à venir.

Des travaux de recensement bibliographiques ont été menés afin d'identifier des indicateurs pertinents pour évaluer la sensation de chaleur dans les ambiances intérieures des bâtiments.

Pour finir, le protocole d'évaluation a été testé pour 4 cas d'étude situés dans la ville de Lyon. Les résultats montrent que les performances des bâtiments sont variées vis-à-vis de la diversité des canicules à venir. Certaines canicules sont problématiques puisqu'elles entraînent des sensations thermiques extrêmes à l'intérieur des bâtiments. Pour d'autres canicules, les bâtiments testés sont toujours capables d'offrir des ambiances intérieures saines.

MOTS-CLÉS : Canicules, bâtiments urbains passifs, changement climatique, simulation

Composition du jury :

CIUPERCA Gabriela	Maître de conférences HDR	UCBL1	Examinatrice
DAVID Damien	Maître de conférences	UCBL1	Encadrant de thèse
DUBREUIL Vincent	Professeur	Université de Rennes	Examineur
JOHANNES Kévin	Maître de conférences HDR	UCBL1	Directeur de thèse
LUSSAULT Michel	Professeur	ENS	Co-Directeur de thèse
MACHARD Anaïs	Ingénieure de Recherche	CSTB	Examinatrice
MORA Laurent	Professeur	Université de Bordeaux	Rapporteur
WOLOSZYN Monika	Professeure	Université SMB	Rapporteuse