



HAL
open science

Analyse et représentation des épisodes de caniculaires en zones urbaines denses : de la durée à la conception d'un indice de dangerosité

Laura Pinson

► To cite this version:

Laura Pinson. Analyse et représentation des épisodes de caniculaires en zones urbaines denses : de la durée à la conception d'un indice de dangerosité. Géographie. Université Paris-Est, 2016. Français. NNT : 2016PESC1061 . tel-01540378

HAL Id: tel-01540378

<https://theses.hal.science/tel-01540378v1>

Submitted on 16 Jun 2017

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.

Thèse

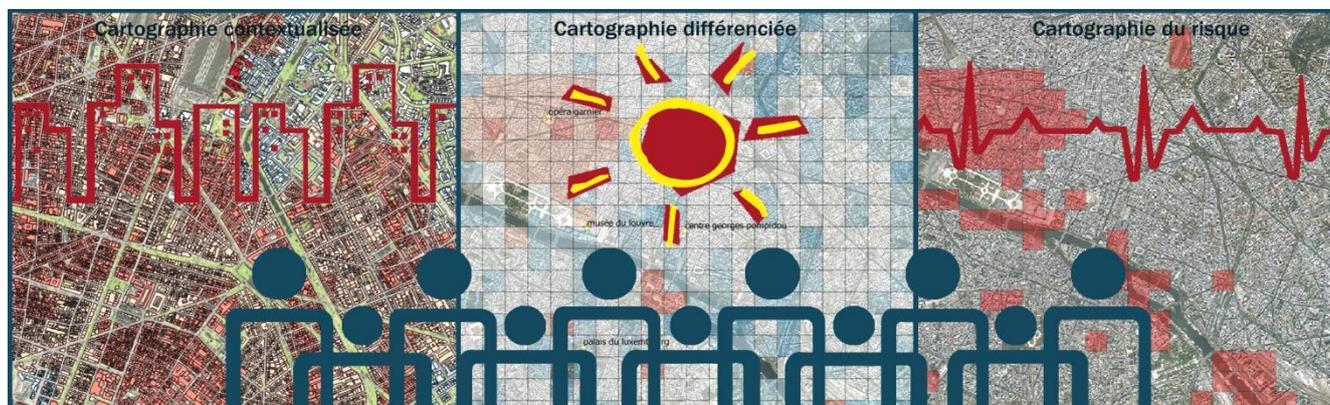
Pour obtenir le grade de docteur de l'université Paris-Est
Mention : Science de l'information géographique

Analyse et représentation des épisodes caniculaires en zones urbaines denses

De la mesure à la conception d'un indice de dangerosité

—

Laura PINSON



Soutenue prévue le 24 novembre 2016 devant le jury composé de :

Françoise Gourmelon, Directrice de Recherche, CNRS, LTG Géomer, Brest.....Rapporteur
Sylvain Bigot, Professeur, LTHE, Université Grenoble Alpes, Grenoble..... Rapporteur
Malika Madelin, Maître de conférences, PRODIG, Paris 7.....Examinatrice
Karine Laaidi, Epidémiologue, Santé publique France, Saint-Maurice..... Examinatrice
Katia Chancibault, Chercheur (CR), Eau et Environnement, IFSTAR, Nantes.....Examinatrice
Valéry Masson, ICPEF (HDR), Météo-France, Toulouse.....Co directeur
Anne Ruas, ICPEF (HDR), IFSTAR, Marne la Vallée..... Directrice

Cette thèse a été préparée :

Au laboratoire LISIS de l'institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de
l'Aménagement et des Réseaux

Cité Descartes

14-20 Bd Newton

77 447 Marne-la-Vallée Cedex2

Projet APR Risque Décision Territoire

<http://rdt-risques.fr/?p=233>



Projet RepExtrem

Analyse et représentations des épisodes caniculaires en zones urbaines denses

Analysis and Mapping of heat waves in urban areas



Partenaires

IFSTTAR	Laboratoire LISIS	Géomatique, Analyse et représentation des phénomènes
	Laboratoire EE	Hydrologie urbaine
CNRS-METEO FRANCE	Laboratoire GAME	Modèle de climatologie urbaine



Résumé

Le GIEC (Groupe d'expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) dans leur 4ème rapport souligne que les villes européennes seront impactées par des épisodes caniculaires plus fréquents et plus intenses dû aux modifications climatiques ayant lieu au cours du XXI^{ème} siècle. La ville, espace climatique particulier, sensiblement plus chaud que son espace environnant amplifie le phénomène de l'îlot de chaleur urbain (ICU). Pour la ville de Paris, les îlots de chaleur urbains peuvent dépasser de 8 à 10°C les températures relevées quelques kilomètres plus loin. Cet effet est d'autant plus néfaste lors de période caniculaire comme a connu la France en 2003, 2006, 2010 ou bien même en 2015. La connaissance sur le phénomène de la canicule nécessite de mettre en relation des données autant spatiales que temporelles afin de définir des zones à risques.

Pour pouvoir simuler une canicule, le modèle SURFEX-TEB, conçu par Météo-France, CNRS, a été choisi. Il permet d'estimer la température en ville à partir de conditions climatiques des plus hautes atmosphères. Ces prévisions sont importantes notamment en période de canicule où les écarts de température entre la ville et sa banlieue peuvent dépasser 8°C. Le risque caniculaire, induit par les ICU, est complexe à appréhender et à représenter.

Pour caractériser, appréhender et représenter la canicule, avec l'aide du modèle SURFEX-TEB, nous avons effectué une fusion de données avec des mesures réalisées pendant la canicule de 2015 sur Paris. Cette fusion de données met en évidence par exemple les phénomènes d'accumulation et l'impact des configurations des appartements sur les températures intérieures et extérieures. Nos différentes configurations ont permis de confirmer l'importance de considérer les températures intérieures lors de périodes caniculaires.

Ce travail de recherche propose donc un éclairage spécifique et technique de la représentation des canicules. Son objectif est une meilleure représentation des canicules et l'estimation de leur dangerosité en fonction de la durée du phénomène, de son intensité et des caractéristiques urbaines et humaines. Des cartes décrivant la canicule et sa dangerosité sont mises en valeur grâce à l'élaboration d'un site web grand public.

Les résultats de cette recherche soulèvent une interrogation sur les seuils de canicule. Ils soulignent l'importance d'introduire un seuil de canicule intérieur et démontrent le rôle de la configuration urbaine et en particulier des types d'habitation pour mieux prendre en compte la dangerosité des canicules et espérer mieux atténuer leurs effets.

Abstract

In its 4th report, the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) underlines that European cities will be impacted by more frequent and more intense scorching episodes due to the climatic modifications taking place during the XXIth century. The city, as a specific climatic area, is appreciably hotter than its surrounding space and amplifies the urban heat island (UHI) phenomenon. For the city of Paris, the urban isles of heat can exceed by 8 or 10°C the temperatures measured some kilometers away. This effect is all the more fatal during heat wave period as France knew in 2003, 2006, and 2010 and even in 2015. The knowledge on the phenomenon of the heat wave requires to put in relation of data so spatial as temporal to define high-risk areas.

To be able to simulate a heat wave, the SURFEX-TEB model, designed by Météo-France, CNRS, was chosen. It allows to estimate the temperature in town from weather conditions of the highest atmospheres. These forecasts are important in particular in period of heat wave where temperature differences between the city and its suburb can exceed 8°C. The risk of heat wave, result of the UHI, is complex to understand and to represent.

To characterize, understand and represent the heat wave with the SURFEX-TEB model, we fused data with measures realized during the heat wave of 2015 on Paris. This data fusion highlights the phenomena of accumulation and the impact of the apartments configuration on both inside and outside temperatures. Our various configurations allowed to confirm the importance of taking internal temperatures into account during heat waves periods.

Thus, this research proposes a specific and technical perspective of the representation of heat waves. It aims at a better representation of heat waves and a better estimation of their dangerousness according to the duration of the phenomenon, its intensity and both urban and human characteristics. Maps describing the heat wave and its dangerousness are highlighted thanks to the elaboration of a consumer Web site.

The results of this research give rise to an interrogation on the thresholds of heat wave. They underline the importance to introduce an internal threshold of heat wave and demonstrate the role of the urban configuration, more specifically, the types of house to better take into account the dangerousness of heat waves and better tackle their effects.

Remerciements

Une « parenThèse » de 3 ans se ferme...une tranche de vie intense où s'est succédée 3 automnes, hivers, printemps et étés (dont 2 canicule !)

Si le temps et le climat baignent notre quotidien, ils ont été chronophages pour moi ces 3 dernières années ! La météorologie et la climatologie ont envahi mes jours, agité mes nuits et noirci les 421 pages de ma thèse !

Mon travail doctoral fût une expérience incroyable et singulière. Ce fût d'abord et avant tout un défi personnel, devant composer avec les moments de doute, d'agitation ou d'anxiété. Mais ce fût aussi et surtout une aventure solidaire et un travail collectif, qui ont engendré de belles rencontres, fait naître de solides amitiés et crée de grandes émotions.

J'aimerais donc à travers ces quelques lignes exprimer mes plus chaleureux remerciements à celles et ceux qui, à leur manière, m'ont aidée, soutenue et réconfortée...car je n'aurais jamais pu réaliser ce travail colossal sans leur soutien indéfectible !

Puisque le temps et le climat ont été les 2 protagonistes de l'une des plus belles périodes de ma vie, il devenait évident qu'ils soient au cœur de mes remerciements sous forme métaphorique et selon l'idiome météorologique.

En premier lieu, je tiens à remercier chaleureusement ma directrice de thèse, Anne Ruas, pour sa confiance, son aide, ses conseils et pour toutes les heures consacrées à diriger cette recherche. Elle a su orienter mes recherches aux bons moments, me faisant découvrir la géomatique et les schémas de données, tout en tirant parti de ma formation de géographe. Je tiens à lui dire également à quel point j'ai apprécié ses qualités humaines, son écoute et la compréhension dont elle a fait preuve à mon égard. Anne a fait de mes années de thèse un véritable terrain de jeu et d'apprentissage. Je lui suis éminemment reconnaissante de m'avoir accompagnée avec constance, exigence et enthousiasme dans mes premiers pas de doctorante. Je suis ravie d'avoir travaillé en sa compagnie toujours lumineuse.

Merci à Valery Masson, mon co-directeur, pour le temps consacré à faire tourner le modèle SURFEX-TEB et à m'expliquer patiemment son modèle et les paramètres d'entrées. Je le remercie également ainsi que toute son équipe pour le chaleureux accueil qu'ils m'ont réservée au sein du laboratoire TURBAU.

Je tiens à remercier l'ensemble de la commission d'examen constitué de F Gourmelon et S Bigot pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de rapporter ce travail, ainsi que K Chancibault, M Madelin et K Laaidi pour avoir accepté les rôles d'examineurs. Merci pour le temps que vous avez consacré à lire et à apporter vos remarques à ce manuscrit.

Je remercie l'ensemble de mes professeurs de l'IGA et tout particulièrement Sandra et Sylvain qui maintiennent sur cette faculté un champ anticyclonique. Merci de m'avoir transmis votre passion.

Merci à mes anciens camarades de promotions de master : Flo, Cha, Pauline, Virginie, Camille... qui même lorsque des kilomètres nous séparent m'ont soutenues qui malgré la distance qui nous sépare n'ont jamais cessé de me soutenir. Merci pour votre présence et vos passages qui ont ensoleillé mes journées pluvieuses !

Un grand remerciement aux doctorants (ou non) du LISIS : Elias, Ha, Pierre, Zahra et Janelle avec qui j'ai passé d'excellents moments à parler de tout, sauf de la pluie et du beau temps ! Merci à tous mes collègues de travail, Gonzague, Jean-Luc, Julien, Stéphane, Eric, Philippe....mes intermèdes ensoleillés de la pause-café !

Merci à ma Didoune qui a réussi à me souffler un air frais et revigorant tout au long de ma thèse. Un arc en ciel qui a su rendre les passages pluvieux lumineux et colorés. Merci d'avoir adouci les moments brumeux par ta présence et ton réconfort.

Je remercie tout particulièrement Ménine et Moucha, mes lectrices, pour le temps passé, quelquefois électrique, à lire et relire mon travail. Je remercie Moucha d'avoir soutenu et encouragé mes choix durant ma scolarité en me fournissant un climat doux et studieux. Merci à Tom, une bouffée d'air frais et fraternel, la bouffée d'oxygène dont j'avais besoin quelquefois...

Pépé, Mama, Roger, Killian, Didier,.... la tornade Quinchez Pierre, Roselyne, Seb, Lili, Pascale, Francois, Xav' et j'en passe) merci pour vos sourires, votre soutien et vos paroles chaleureuses. Le temps était toujours au beau fixe, avec eux. 1000 MERCI

Mes chers Pinson, Pa' Mamie, Cathy, Just', Caro, Jeanine, Abdou, Selma, Sami... merci pour vos pépiements affectueux, vos compliments et vos encouragements.

Nicolas, qui n'est pas né de la dernière pluie, un grand merci à toi qui a toujours cru en moi ! Merci pour ta patience, ta générosité et ta bienveillance.

Un agradecimiento y un reconocimiento especial a mi familia del alma Ernesto, Fernanda y Mariella por estar siempre a mi lado. Que a pesar de la distancia siempre estuvieron a mi lado para saber como iba mi proceso. Las palabras nunca seran suficientes para testimoniar mi aprecio y mi agradecimiento.

On dit que la météo joue sur notre moral...alors, je tiens à remercier tout particulièrement mon précieux rayon de soleil, mi Rana, cacahuète, carino... pour m'avoir réchauffée les jours de grosses giboulées et m'avoir supportée en périodes de très grandes turbulences ! Tu es à jamais mon coup de foudre. Je t'aime

Je dédie cette thèse à Maddly et Souris qui sont, maintenant, les cumulus d'un ciel de traîne dispersés aux quatre coins du monde.

Acronymes

ACCLIMAT	Adaptation au Changement CLIMatique de l'Agglomération Toulousaine
ACGIH	Association Advancing Occupational and Environmental Health
ALADIN	Modèle atmosphérique « Aire limitée, adaptation dynamique, développement internationale »
APUR.....	Atelier Parisien d'Urbanisme
AROME	Applications de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Echelle
ARPEGE.....	Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle
ARS.....	Agences Régionale de Santé
ASHRAE.....	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CAH.....	Classification Ascendante Hierarchique
CIT.....	Climate Index for Tourism
CLA.....	Couche Limite Atmosphérique
CLC.....	Couche Limite de Canopée
CLS	Couche Limite de Surface
CLU.....	Couche Limite Urbaine
CNRM.....	Centre National de Recherche Météorologique
COGIC	COmité de Gestion Interministériel des Crises
CORRUSS.....	Centre Opérationnel de Réception et de Régulation des Urgences Sanitaires et Sociales
COS.....	Coefficient d'Occupation du Sol
COSTIC	Génie Climatique et de l'Equipement Technique du Bâtiment
CSTB.....	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
CU	Canopée Urbaine
DGS	Direction Générale de la Santé
EHU	Element Hydrologique Urbain
ENVI-met	ENVIronmental meteorology
EPICEA	Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Echelle de l'Agglomération
ESCOMPTE	Expérience sur site pour contraindre les modèles de pollution atmosphérique et de transport d'émissions
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (IPCC, en anglais)
GRC.....	Groupe de Recherche en Climatologie
IBM	Indicateur BioMétéorologiques
ICU	Ilot de Chaleur Urbain
IFSTTAR.....	Institut Français des Sciences Technologie des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux
IGN.....	Institut Géographie National
INSEE.....	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
INSERM.....	Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale internationale
InVS.....	Institut de Veille Sanitaire - Santé public France
ISBA.....	Interactions Between Soil, Biosphere, and Atmosphere

ISBA.....	Interactions between Soil, Biosphere, and Atmosphere
ISO	International Organization for Standardization
LUMPS.....	Local-scale Urban Meteorological Parametrization Scheme
MIGA.....	Mise en Garde et Actions
OMM	Organisation Météorologique Mondiale
OMS.....	Organisation Mondiale de la Santé (WHO : World Health Organization)
ONEMA.....	Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques
ONU	Organisations des Nations unies
ORSEC	ORganisation des SECours
PDD	Predicted Percentage Dissatisfied
PET	Physiological Equivalent Temperature
PGCD.....	Plan de Gestion d'une Canicule Départementale
PLU.....	Plan Local d'Urbanisme
PMV	Predicted Mean Vote
PNC	Plan National Canicule
PT	Perceived Temperature
RTE	Réseau de Transport d'Electricité
SACS.....	Système d'Alerte Canicule et Santé
SGBD.....	Système de gestion de Base de Données
SIG.....	Systèmes d'information Géographique
SM2-U.....	Soil Model for submeso-scales Urbanized
SOLWEIG.....	SOLar LongWave Environmental Irrandiance Geometry model)
SURFEX	SURFace EXternalisée
TEB.....	Town Energy Budget
TEB-BEM	Town Energy Budget – Building Energy Model
TEB-UTCI.....	Town Energy Budget - Universal Thermal Climate Index
TUF-3D.....	Temperatures of Urban Facets in 3D
UTCI	Universal Thermal Climate Index
VURCA	Vulnérabilité URbaine aux épisodes Caniculaires et stratégies d'Adaptation
WBGT.....	WET Bulb Globe Temperature
WHOE	World Health Organization Europe

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	19
PARTIE A - ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE.....	27
CHAPITRE 1 - CLIMATOLOGIE, INDICES ET MODELISATION DU CLIMAT ET DES PHENOMENES SPATIO-TEMPORELS	29
1. <i>La climatologie.....</i>	32
2. <i>Canicule, plans et risques sanitaires</i>	46
3. <i>Confort thermique</i>	57
4. <i>Modèles de simulations développés pour la climatologie urbaine</i>	82
PARTIE B - DE LA DONNEE BRUTE A LA DANGEROUSITE	109
CHAPITRE 2 - DE LA MESURE A L'INDICE	111
1. <i>Contexte.....</i>	113
2. <i>Priorités de la thèse</i>	117
3. <i>Méthodologie</i>	120
CHAPITRE 3 - INTEGRATION ET CONTEXTUALISATION DES DONNEES SURFEX-TEB	131
1. <i>Présentation de données pour les simulations SURFEX-TEB.....</i>	134
2. <i>Traitement des données</i>	155
3. <i>Représentation et visualisation des données.....</i>	165
CHAPITRE 4 - CAMPAGNES DE MESURES ET DIFFERENTIATION DES COMPORTEMENTS PAR TYPE D'APPARTEMENTS.....	181
1. <i>Les capteurs de températures</i>	184
2. <i>Campagne 2014 : analyse intra-immeuble.....</i>	193
3. <i>Campagne 2015 : analyse entre appartements.....</i>	213
4. <i>Amélioration de l'estimation des températures</i>	273
CHAPITRE 5 - REPRESENTATION DE LA CANICULE ET CONSTRUCTION DE L'INDICE DE DANGEROUSITE	287
1. <i>Le climat, un enjeu de santé</i>	290
2. <i>Caractériser la canicule comme phénomène spatio-temporel</i>	297
3. <i>Représentation de la canicule.....</i>	304
4. <i>Indice de dangerosité.....</i>	311
5. <i>Localisation des hot-spots</i>	331
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	337
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	337
ANNEXES.....	350
TABLE DES FIGURES.....	382
TABLE DES TABLEAUX.....	390
PUBLICATIONS	393
BIBLIOGRAPHIE	395

Introduction générale

We are the first generation to feel the impact of climate change, and the last generation that can do something about it.

Obama B. Climate Summit 2014

Les villes sont des lieux de développement économique et de transformation culturelle. Cependant, depuis le début du XXI^{ème} siècle, l'avenir de nos villes est en jeu. L'urbanisation croissante et le contexte de globalisation entraînent de fortes mutations au sein de nos métropoles et engendrent des déséquilibres environnementaux, sociaux, politiques et économiques. On parle de métropolisation. Dans nos villes des enjeux planétaires cruciaux se jouent pour l'avenir de l'humanité : pénurie d'eau, dégradation de l'environnement, pauvreté, changements climatiques, etc.

La répétition des tempêtes, des sécheresses, et des canicules sont signes du réchauffement de la planète. En 10 ans, la fréquence d'évènements extrêmes a doublé par rapport au chiffre moyen de 200 cas annuels observés à travers le monde. Selon le GIEC, plusieurs scénarii sont possibles pour les 100 prochaines années. Le réchauffement de la planète pourrait s'accroître de 1°C à 8°C en cas d'augmentation de la consommation des combustibles fossiles. A l'échelle du bassin parisien, Lemonsu *et al.*, (2013) prévoient un réchauffement compris entre 2°C à 2,4°C en hiver et 3,5°C à 5°C en été, à l'horizon 2100, par rapport à la période historique. L'année 2003 a marqué et frappé les esprits par l'intensité et la durée de la canicule, les conditions de stress thermique ont provoqué en France, près de 15 000 décès. Au-delà des enseignements tirés de cette canicule, l'anticipation et la prise de conscience, à tous les niveaux, nécessitent une meilleure connaissance des risques météorologiques. Ces épisodes caniculaires devraient se multiplier avec la hausse des températures liées au changement climatique. Météo-France estime qu'en 2050, une canicule comme 2003 se reproduira tous les 2 à 3 ans et qu'une augmentation très probable du nombre de jour de vagues de chaleur est estimée entre 0 à 5 à l'horizon 2021-2050¹. La difficulté n'est pas le changement climatique à proprement parlé, c'est sa rapidité. La question est de savoir s'il serait possible d'adapter nos sociétés, nos villes, notre agriculture à des transformations si rapides ?

L'artificialisation et les activités humaines dans les villes engendrent des phénomènes climatiques auxquels une attention particulière est portée notamment dans ce contexte de changement climatique. Les villes contribuent au réchauffement observé et il est amplifié dans les centres urbains par un microclimat désigné sous le nom d'îlot de chaleur urbain (Oke, 1987). Cet îlot entraîne une augmentation locale de la température de 4°C la nuit pour un été standard à 8°C en période caniculaire pour la région parisienne. En concentrant ses activités en ville, l'homme modifie les différents paramètres de son microclimat : température moyenne plus élevée, vitesse du vent plus faible, modification des précipitations, nébulosité due à la pollution de l'air, etc. L'importance de la

¹ Rapport "Le climat de la France au 21^e siècle" « Scénarios régionalisés édition 2014 » publié par le Ministère de l'Écologie

Introduction générale

prise en compte des valeurs locales du microclimat est souhaitable puisqu'elle peut induire des différences significatives pour l'évaluation du confort à l'intérieur comme à l'extérieur. Aujourd'hui, les données météorologiques dont nous disposons proviennent de stations météorologiques en site périphérique ; comment tenir compte alors des configurations spatiales et thermiques dans nos représentations ? Il est indispensable d'évaluer le microclimat local d'un lieu surtout lorsqu'il s'agit d'un site urbain dense.

Aujourd'hui, plus de la moitié de la population mondiale vit en ville, et plus de 75% dans les pays développés ; ce phénomène ne cesse de croître. Il est donc crucial de s'intéresser au cadre de vie de cette population et plus particulièrement vis-à-vis des risques sanitaires encourus lors d'épisodes caniculaires. La canicule comme tout autre événement extrême entraîne des conséquences sanitaires, économiques et écologiques dramatiques. La question sanitaire et en particulier le bien-être de la personne est primordial dans le contexte du changement climatique. Dans les dernières décennies, les alertes répétées aux canicules ont attiré l'attention des pouvoirs publics sur l'importance de mieux connaître les températures intérieures et extérieures et ses conséquences sur la qualité du bien-être des personnes. Le projet VURCA (Vulnérabilité Urbaine aux épisodes Caniculaires et stratégies d'Adaptation), par exemple, souligne que le niveau de confort ou stress thermique subi par les habitants durant une période caniculaire est un indicateur pertinent pour définir la vulnérabilité d'une ville face aux canicules (tout comme la consommation énergétique).

Si l'étude du microclimat est progressivement prise en compte dans la conception urbaine, le confort thermique reste une préoccupation majeure en raison de l'urbanisation et du réchauffement climatique. Au cours du XX^{ème} siècle, l'étude du confort thermique est analysée de manière approfondie par de nombreux scientifiques et chercheurs. Haldane en 1905, Houghten et Yaglou en 1923 mais surtout Fanger dans les années 1970 ont fortement contribué à l'évolution de ces connaissances. Le confort n'est pas une simple préoccupation des thermiciens. D'autres disciplines s'intéressent aux conséquences et impacts dus à la thermique du bâtiment. La forme du bâtiment, son orientation, l'isolation, la ventilation sont des facteurs agissant sur le bien-être de l'occupant et pouvant limiter ou non les impacts dus aux fortes chaleurs. En plus des impacts sur l'économie ou l'environnement, la santé humaine est également touchée. Dans un contexte de réchauffement climatique rapide et de l'intensification des vagues de chaleur, l'habitat construit il y a des années n'est plus adapté au climat en cours de transformation. L'objectif aujourd'hui est de penser la conception bioclimatique² non plus seulement à l'échelle du bâtiment mais aussi à l'échelle du quartier.

La problématique du confort intérieur devient une préoccupation majeure dans la planification ou la reconstruction urbaine. L'urbanisation s'intensifie en raison du nombre croissant de personnes vivant en ville. Elle entraîne de l'artificialisation, une consommation de ressources énergétiques et une modification locale du climat. Le faible pourcentage de végétation en ville, l'absorptivité solaire des matériaux conduisent à des températures en ville pouvant être de 4 à 8°C plus élevées que dans les zones périphériques. Cet effet d'îlot de chaleur urbain pose des problèmes au niveau énergétique (hausse de l'utilisation des climatiseurs) mais également au niveau de la santé publique. Les populations à risques (personnes âgées ou fragilisées) sont les premières touchées. Une surmortalité est présente en raison des épisodes caniculaires subis. Si rien n'est fait, ces problèmes s'aggraveront

² La conception bioclimatique prend à profit les conditions climatiques favorables en se protégeant de celles néfastes. Cette conception permet de s'adapter au mieux au site afin d'obtenir un meilleur confort thermique.

Introduction générale

puisque le climat planétaire connaît une évolution des températures à la hausse comme le montre les différents scénarii du GIEC (5^{ème} rapport d'évaluation du GIEC : Climate Change).

Ces différents points rappellent l'importance de la prise en compte des canicules pour la santé et le confort humain. Le suivi, l'alerte et l'aménagement devraient permettre de mieux vivre les canicules en ville. Cependant, la principale difficulté en période caniculaire est la prise en compte des composantes urbaines, spatiales et temporelles. Les températures sont en effet variables spatialement et temporellement. Une canicule est vécue différemment en fonction de la santé de l'habitant, de son logement, du lieu de résidence et de la durée de l'épisode. La durée est un facteur impactant et, est à prendre en considération lorsque l'on étudie les canicules. Comment représenter et comment intégrer la durée et la dangerosité pour le phénomène caniculaire ? Actuellement, la canicule n'est décrite que par des Indices Bio-météorologiques (IBM) pour des seuils extérieurs et pour un même appartement. Nous constaterons que ce modèle est insuffisant pour décrire avec précision le vécu caniculaire au sein d'un centre urbain dense où des variations importantes sont constatées.

La représentation temporelle n'est pas le seul problème. Météo-France propose des cartes vigilance canicule à l'échelle du département pour des températures extérieures. Cela nous conduit tout naturellement à nous interroger sur la canicule vécue à l'intérieur des appartements. Comment et par quel moyen peut-on estimer et représenter la température intérieure ? Comment représenter plusieurs scénarii de canicule en fonction du type d'appartements et de l'occupant ? L'étude de la canicule, de sa dangerosité et de sa représentation permet une meilleure compréhension et communication de la localisation des risques.

Aujourd'hui, des modèles existent calculant les températures intérieures et extérieures dans les îlots et estiment le microclimat urbain. Nous proposons dans cette thèse, et dans le contexte du projet RepExtrem (projet Appel RDT³), de partir des sorties de ces modèles pour étudier de façon plus précise les risques caniculaires en ville et notamment d'intégrer la notion de durée pour estimer la dangerosité. Des méthodes et analyses plus précises sont mises en place et développées pour la représentation de la canicule et de sa dangerosité en fonction des quartiers et du profil des personnes.

Le CNRM-GAME étudie le climat à l'échelle de la ville depuis plusieurs années. Ces études sont basées sur une plateforme de modèles (Masson *et al.*, 2013) calculant les interactions entre les différents types de surfaces (urbaines, naturelles et hydrologiques) et l'atmosphère. Ces modèles sont couplés à des modèles atmosphériques permettant l'étude de processus spécifiques sur des périodes temporelles courtes. Le modèle TEB (Town Energy Balance) développé par Masson (2000) couplé au modèle SURFEX permet de décrire une multitude de processus tels que l'énergétique des bâtiments, la vulnérabilité thermique, etc. De ces modèles météorologiques, notre question est de savoir comment exploiter et utiliser les sorties du modèle SURFEX-TEB pour mieux estimer la dangerosité ?

³ Les projets Risque Décision et Territoire (RDT) du Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer (MEEM) visent à développer des recherches sur les risques naturels (inondations, sécheresses, séismes, canicules, etc.) technologiques et industrielles (marées noires, risques nucléaires, pollutions chimiques, etc.)

Introduction générale

Dans un contexte de changement climatique, la thèse porte sur l'importance de la communication et de la représentation des épisodes caniculaires (Fig.1). Pour traiter ce problème, nous cherchons à introduire une fonction portant sur un indice de dangerosité. Nous mettons au point une démarche originale en mobilisant des notions issues des domaines de la géographie, de la climatologie, et de la géomatique. La démarche proposée consiste en une réalisation de cartographies des températures, intérieures et extérieures par quartier, pendant un épisode de canicule permettant d'identifier les quartiers les plus exposés et les plus vulnérables. La thèse vise donc un double objectif, à la fois thématique et méthodologique.

La zone d'application est la ville de Paris. Les données utilisées proviennent de campagnes de mesures réalisées dans le centre urbain dense de Paris et des sorties du modèle SURFEX-TEB.

L'enjeu est de caractériser le centre urbain de Paris en identifiant les zones les plus vulnérables aux épisodes de canicules. Pour appréhender la durée et l'intensité des canicules, nous développons une fonction de dangerosité basée sur des seuils de températures et sur le profil de la personne.

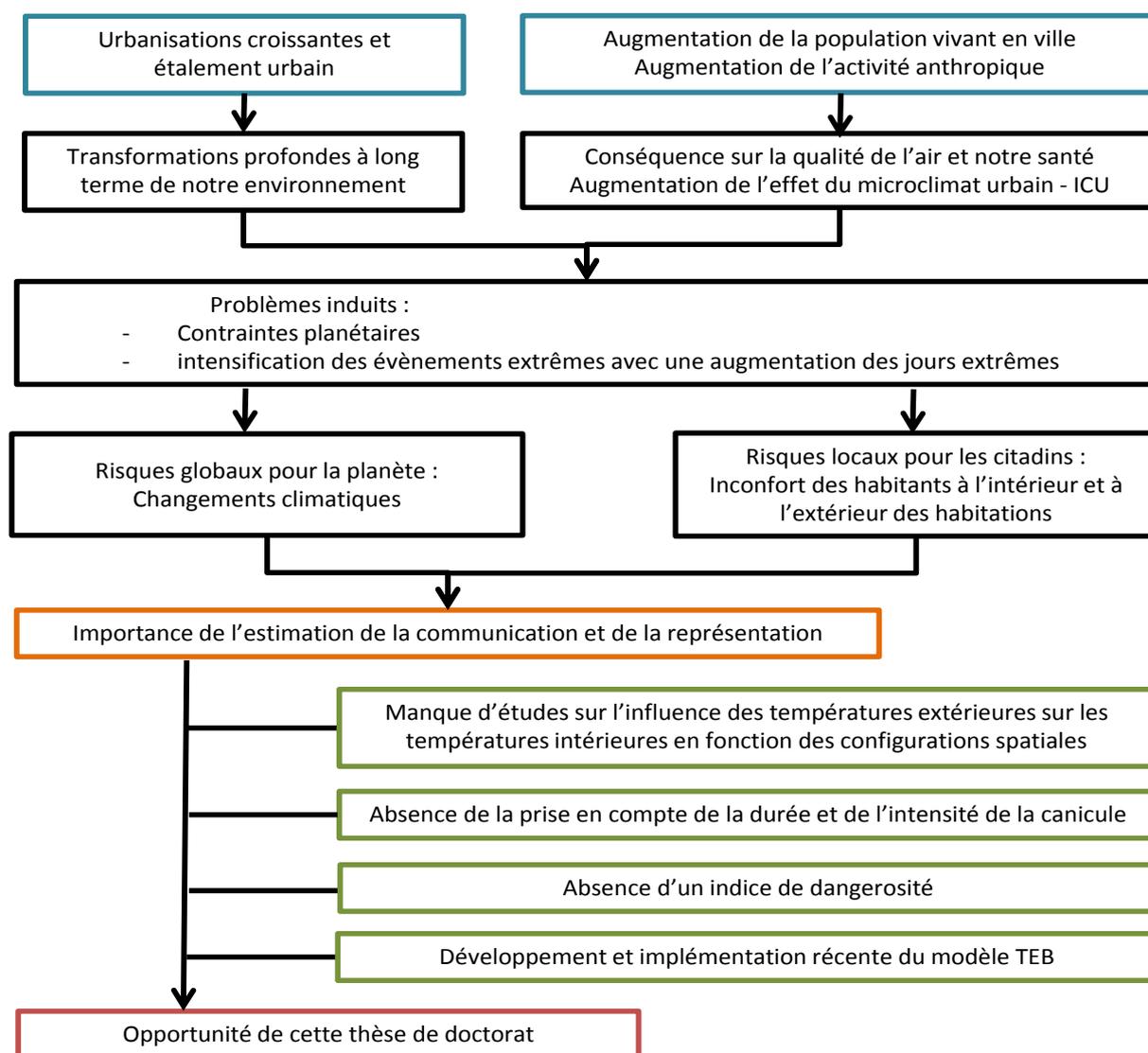


Figure 1: Enjeux de la thèse - Analyse et représentation des épisodes caniculaires en zones urbaines denses

Introduction générale

Nous voulons insister sur le fait que la ville n'est pas un bloc homogène et que la température intérieure, lors de périodes caniculaires, est tout aussi importante à prendre en considération que la température extérieure. A partir des éléments que nous venons de souligner, l'objectif de cette thèse est de résoudre la problématique sur l'estimation et la représentation de la dangerosité, en période caniculaire. Pour répondre à cet objectif, cette thèse s'organise en deux grandes parties.

La **partie A** « *Analyse bibliographique* » s'attache à apporter des connaissances sur le climat et sa modélisation, en particulier sur le phénomène de la canicule et de ses risques. Cette partie définit des concepts liés à la climatologie et aux risques. Nous verrons quelle distinction on peut faire entre les concepts de la météorologie et de la climatologie. Le chapitre « *Climatologie, indices et modélisation du climat et des phénomènes spatio-temporels* » apporte un état de l'art non exhaustif des trois thèmes dominants notre thèse. Le thème sur la climatologie permet d'apporter des informations sur la formation du micro climat urbain et de l'effet de l'ICU (Ilot de Chaleur Urbain). Les différentes échelles d'étude utilisées en géographie sont commentées. Le thème sur les risques caniculaires et le confort thermique définit le phénomène caniculaire, ses conséquences et les impacts (sanitaires, environnementaux et économiques) survenus les années précédentes. Le confort thermique met en avant les différents indices intérieurs et extérieurs existants et utilisés pour définir le confort. La dernière partie de ce chapitre, s'intéresse aux modèles météorologiques et présente le modèle SURFEX-TEB.

La partie B « *De la donnée brute à la dangerosité* » porte sur les différentes étapes de la méthodologie mise en place pour la représentation de la dangerosité de la canicule et les résultats. Elle se divise en quatre chapitres :

- Le chapitre 2 : *De la mesure à l'indice* positionne cette thèse et donne les objectifs principaux. Ce chapitre présente la problématique et la méthodologie mises en place au cours de cette thèse. Il précise le déroulement de notre démarche.

Les trois derniers chapitres présentent le cœur de notre travail. Ceux-ci répondent à la question générale de la représentation de la canicule et de sa durée en zone urbaine dense. Nous décomposons la question en 3 sous-questions, chacune traitée dans un chapitre est le résultat d'une cartographie.

- Le chapitre 3 : *Intégration et contextualisation des données SURFEX-TEB* aborde la problématique de la contextualisation des sorties du modèle. Pour cela, ce chapitre s'attache à définir avec plus de précisions le modèle météorologique utilisé (SURFEX-TEB) pour l'étude et la visualisation de ses sorties dans la zone d'étude : Paris. Nous présentons la méthodologie pour arriver au développement d'une **cartographie contextualisée**.
- L'analyse statistique et cartographique des températures intérieures est présentée au chapitre 4 : *Campagnes de mesures et différenciation des comportements par type d'appartements*. Ce chapitre s'organise autour de deux axes. Nous analysons statistiquement des données réalisées sur les campagnes de mesures dans Paris. Cette analyse permet de mettre en avant différents scénarii et comportements thermiques obtenus. De ces résultats et des travaux de référence, nous créons des types d'appartements. De ces types et des sorties du modèle SURFEX-TEB (présenté au chapitre 3), nous proposons une méthode de

Introduction générale

fusion de données pour obtenir une **cartographie différenciée** selon les types d'appartements créés.

- Le chapitre 5 : *Représentation de la canicule et construction de l'indice de dangerosité*. Nous nous intéressons à la question suivante : comment représenter la durée et l'intensité d'une canicule à partir des données météorologiques ? Nous y répondons en deux temps. D'abord, à partir d'un état de l'art sur la représentation des phénomènes spatio-temporels, nous présentons notre schéma de données visant à représenter nos données avec une dimension temporelle et spatiale. Pour identifier les zones vulnérables, nous nous intéressons ensuite à la notion de dangerosité et nous proposons une fonction pour la création d'un indice de dangerosité. Nous verrons sur quoi se base l'indice de dangerosité. Les résultats et la comparaison entre les données issues des campagnes de mesures et du modèle démontrent l'importance de prendre en considération la température intérieure et la durée lors d'épisodes caniculaires. L'impact des configurations spatiales sur les températures et sur les conditions de confort est mis en valeur. La création **d'une cartographie du risque et de la canicule** est mise en avant dans ce chapitre.

Partie A

Analyse bibliographique

Chapitre 1

Climatologie, indices et modélisation du climat et des phénomènes spatio-temporels

Les objectifs de cette partie sont :

- Identifier les niveaux d'échelles utilisés en climatologie
- Comprendre l'impact des canicules sur la société
- Explorer et identifier la relation entre l'îlot de chaleur urbain et la canicule
- Connaître les différents modèles pour simuler le climat urbain

TABLE DES MATIERES

CLIMATOLOGIE, INDICES ET MODELISATION DU CLIMAT ET DES PHENOMENES SPATIO-TEMPORELS	29
1. <i>La climatologie</i>	32
1.1. Naissance, science pluridisciplinaire et évolution	32
1.2. Les différentes échelles spatio-temporelles	33
1.3. Spécificité et formation du climat urbain	36
1.3.1. Les effets mécaniques	37
1.3.2. Les effets thermiques	38
1.3.2.1. Le flux conductif	38
1.3.2.2. Le flux convectif.....	38
1.3.2.3. Le flux par rayonnement thermique	38
1.3.3. Modification du bilan d'énergie thermique de la ville.....	38
1.3.4. L'îlot de chaleur urbain, « un microclimat »	40
1.3.4.1. Caractéristique de l'îlot de chaleur urbain	41
1.3.4.2. ICU sur Paris	43
1.3.5. Synthèse	44
2. <i>Canicule, plans et risques sanitaires</i>	46
2.1. Définition, historisation et vulnérabilité urbaine	46
2.1.1. La canicule : un phénomène climatique extrême.....	46
2.1.2. Historisation de la canicule.....	47
2.1.2.1. Avant 1950	48
2.1.2.2. En 1976.....	48
2.1.2.3. En 1983.....	48
2.1.2.4. En 2003.....	48
2.1.2.5. En 2006.....	49
2.1.2.6. Après 2010	49
2.1.3. Vulnérabilité urbaine	50
2.2. Canicule et risques	50
2.2.1. Risque sanitaire et social	50
2.2.2. Risque environnemental et consommation énergétique	51
2.2.3. Risque économique	51
2.2.4. Populations touchées	52
2.3. Plan Canicule	52
2.3.1. Principe et objectifs.....	53
2.3.2. Niveaux d'alerte	53
2.3.3. A l'international.....	56
3. <i>Confort thermique</i>	57
3.1. Une notion difficile à cadrer	57
3.1.1. Subjectivité et évolution du terme	57
3.1.2. Cadre réglementaire.....	58
3.1.3. Paramètres et critères du confort thermique	59
3.1.3.1. La température ambiante de l'air (Ta)	61
3.1.3.2. La température moyenne radiante des parois (Tp).....	61
3.1.3.3. L'humidité relative de l'air (HR).....	61
3.1.3.4. La vitesse relative de l'air	61
3.1.3.5. Le métabolisme	62
3.1.3.6. L'habillement.....	62
3.1.4. Bilan thermique	62
3.2. Le rôle de la thermique du bâtiment dans le confort.....	64
3.2.1. L'inertie thermique.....	64
3.2.2. L'effusivité thermique	64
3.2.3. Simulation du confort d'été.....	65
3.2.3.1. Simulation dans un immeuble : état initial.....	66

Analyse bibliographique

3.2.3.2.	Simulation dans un immeuble rénové.....	67
3.2.3.3.	Conséquences pour l'isolation thermique du bâtiment.....	67
3.3.	Les indices de confort humain.....	68
3.3.1.	Principaux indices de confort intérieur.....	68
3.3.1.1.	Indice d'inconfort de <i>Thom</i> (THI) (Thom, 1959).....	69
3.3.1.2.	Indice de globe noir WBGT (WET Bulb Globe Temperature) (Yaglou and Minard, 1957).....	69
3.3.1.3.	Température radiative moyenne.....	70
3.3.1.4.	Température effective (ET Effective Température index) (1923, Houghtan et Yaglou).....	70
3.3.1.5.	La température opérative (Operative temperature) ou température résultante sèche.....	71
3.3.2.	Principaux indices de confort extérieur.....	71
3.3.2.1.	Heat Index.....	71
3.3.2.2.	Humidex.....	72
3.3.2.3.	Windchill ou indice de refroidissement éolien (IRE).....	74
3.3.2.4.	PT : Perceived Temperature.....	76
3.3.2.5.	PET : Physiological Equivalent Temperature (Höppe, 1999).....	76
3.3.2.6.	PMV : Predicted Mean Vote.....	77
3.3.2.7.	IBM : Indicateurs BioMétéorologiques.....	78
3.3.2.8.	UTCI.....	80
4.	<i>Modèles de simulations développés pour la climatologie urbaine</i>	82
4.1.	Modèle climatique : méso-échelle à échelle locale.....	83
4.1.1.	Le modèle SM2-U (Soil Model for submeso-scales Urbanized) (DUPONT 2001).....	85
4.1.2.	Le modèle NARP-LUMPS « Net all-ware Radiation Parametrization / Local-scale Urban Meteorological Parametrization Scheme » (GRIMMOND et OKE 2002).....	87
4.1.3.	Le modèle TUF-3D (Temperatures of Urban Facets in 3D) (Krayenhoff et Voogt, 2007).....	88
4.1.4.	Le modèle TEB (Town Energy Budget) (MASSON 2000).....	89
4.1.5.	Synthèse.....	91
4.2.	Modèle climatique : échelle d'un quartier à la rue.....	91
4.2.1.	Le modèle Thermo-radiatif « SOLENE » (GROLEAU 1987).....	91
4.2.2.	Le modèle SOLWEIG (SOlar LongWave Enviromental Irrandiance Geometry model) (Lindberg <i>et al.</i> , 2008).....	93
4.2.3.	Le modèle ENVI-met (Environmental Meteorology) (BRUSE 1999).....	94
4.2.4.	Synthèse globale.....	96
4.3.	Le modèle choisi : SURFEX-TEB.....	96
4.3.1.	SURFEX.....	96
4.3.1.1.	Bases de données.....	98
4.3.1.2.	Représentation.....	98
4.3.2.	Le modèle TEB.....	99
4.3.2.1.	Le principe de canyon urbain.....	99
4.3.2.2.	Morphologie urbaine et paramètres de TEB.....	100

Il y a un cours général de la nature dans les actions humaines, aussi bien que dans les opérations du soleil et du climat.

David Hume

Cette thèse, à caractère pluridisciplinaire s'inscrit dans une volonté de mieux estimer, comprendre et représenter les phénomènes caniculaires. Afin de pouvoir répondre à notre problématique, ce chapitre propose une vue d'ensemble dans le domaine de la climatologie en passant de sa naissance à son évolution et à ses phénomènes extrêmes à l'exemple des canicules. Nous nous basons sur une analyse bibliographique dans le domaine de la climatologie urbaine. Cette connaissance est approfondie ensuite, par la définition du terme et des caractéristiques de la canicule et ses risques. Puis, nous nous attachons à décrire le confort thermique afin d'identifier et recueillir les différents indices de confort humain, intérieur comme extérieur. Une synthèse des principaux modèles de simulations développés pour la climatologie urbaine est présentée pour se focaliser sur le modèle choisi pour notre étude.

1. La climatologie

1.1. Naissance, science pluridisciplinaire et évolution

L'histoire de la climatologie est peu étudiée tant au niveau national qu'international (Olivier et Fairbridge, 1987). Selon Beltrando et Chemery (en 1995), la climatologie est une discipline récente mais qui a eu une évolution rapide surtout après la seconde guerre mondiale. Entre la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle et la première moitié du XX^{ème} siècle, la climatologie apparaît et se développe grâce aux météorologues (Douguedroit A., 2005). La distinction entre le temps et le climat est confuse durant plusieurs années. Von Hann, météorologue autrichien publie en 1882 « Handbuch der Klimatologie », puis le livre (traduit en anglais du russe) « Climates of the Earth, Particularly Russia » de Voyeykov sort un an après, en 1884. Angot, météorologue français, travaille sur les observations faites en France entre 1851 et 1900. Il donne naissance aux fondements des études portant sur les climats régionaux (Peguy, 1970).

La distinction entre la discipline de la météorologie et de la climatologie se fait progressivement durant la première moitié du XX^{ème} siècle. La météorologie est la science de l'atmosphère. Elle étudie les processus physiques qui déterminent l'évolution et rend compte des phénomènes essentiellement observés dans sa partie la plus basse. Ces phénomènes interactifs avec les milieux connexes de l'atmosphère (océan, cryosphère, biosphère, etc.) sont analysés et traités à toutes les échelles du temps.

Le climat est l'ensemble des paramètres météorologiques⁴ (température, pression, vent, précipitations, etc.) caractérisant l'état moyen de l'atmosphère et son évolution dans un lieu donné. Le climat est donc un sous-ensemble de la météorologie. Dans cette discipline, on ne retient que les

⁴ Les paramètres ou phénomènes météorologiques se définissent par la température, la pluie, le vent à savoir ce que l'on peut mesurer. L'ensemble de ces paramètres ou phénomènes caractérisent les conditions météorologiques ou paramètres climatiques. En fonction du domaine d'étude, les termes employés se distinguent. Les définitions sont ambiguës

Analyse bibliographique

caractéristiques moyennes (sur un mois, au moins). Elle donne une description systématique et une explication de la répartition des climats en rassemblant les données compilées de la météorologie. La climatologie est définie par l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale) comme une « période donnée qui concourt à donner caractère et individualité météorologique à un domaine spatial déterminé ». Le climat est caractérisé par différents critères statistiques des paramètres météorologiques. La climatologie et les paramètres caractérisant les climats sont en perpétuelle évolution du fait de l'importance et du recours à des méthodes variées et au nombre grandissant de données. Cette discipline emprunte beaucoup de notions ou de résultats à d'autres sciences : la physique, l'hydrologie, l'informatique ou les statistiques. Elles sont précieuses pour résoudre les problématiques liées aux climats.

En France, le premier ouvrage est une thèse portant sur le climat des Alpes françaises, en 1926 par Bénévent.

C'est seulement à partir de la seconde guerre mondiale que l'éclosion de la climatologie a lieu. Elle est de plus grande ampleur lorsque le questionnement du changement climatique apparaît. Ouvrages, recherches, atlas, revues (International Journal of Climatology) mais aussi programmes mondiaux (Programme mondial de recherche sur le climat, OMM) font leur apparition. Peguy, en 1967 commence l'élaboration de la carte climatique détaillée de la France au 1/200 000^{ème}. Enfin, un des principaux jalons de ces dernières années est la création du GIEC (Groupement International du Changement Climatique ou IPCC, en anglais) par l'ONU et l'OMM, en 1989.

Le renforcement des études croisées autour du climat entre sciences de la terre et sciences de l'homme, et à des échelles spatiales adaptées est une priorité. Les physiciens, les géographes, les architectes ou les urbanistes étudient (de loin ou de près) à la climatologie. Chaque spécialité s'approprie le terme de la climatologie selon leurs échelles et leurs objets d'études (Toudert, 2005). Les géographes ou plus précisément les climatologues géographes ont une problématique, généralement plus portée sur le climat urbain contrairement aux architectes, qui eux, étudient davantage l'impact des conditions climatiques et environnementales sur les bâtiments.

Selon Colombert (2008), cette pluridisciplinarité et cet échange avec les différents acteurs (architectes, urbanistes, sociologues, géographes, physiciens, etc.) sont bénéfiques pour traiter les problèmes plus généraux que sont l'environnement et la qualité de vie.

Météorologie et climatologie ont été longtemps confondues, jusqu'au XX^{ème} siècle. La climatologie est une science récente et développée après la seconde guerre mondiale mais avec quelques références de travaux ou recherches dans le passé. Cette spécialité fait intervenir de nombreuses disciplines : géographie, architecture, physique, etc.

1.2. Les différentes échelles spatio-temporelles

Les phénomènes⁵ climatiques sont de types très variés : sécheresses, canicules, vagues de froid, fortes pluies. Tous ces phénomènes se différencient par leurs caractéristiques et par leurs échelles de variations spatiales (verticales mais surtout horizontales) et temporelles. Par exemple, les fortes

⁵ Un phénomène se caractérise par un fait naturel (et peut être amplifié par des activités anthropiques) observé, constaté et étudié. Il est susceptible de se reproduire et s'amplifier (cf partie 2)

pluies se produisent à courte échelle de temps, les phénomènes à basses ou hautes couches comme les anticyclones ne durent que quelques jours (Fig. 1.1).

Un phénomène peut s'étendre de quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres de diamètre (voire plus). Le temps et l'espace sont intimement liés dans les processus météorologiques. L'atmosphère urbaine est décomposée en plusieurs couches qui traduisent chacune l'effet d'une échelle spatiale de la surface urbaine. Ainsi, pour savoir quel type de phénomène est présent, il est nécessaire, en climatologie, de préciser l'échelle spatiale et temporelle. C'est ce que l'on appelle définir une échelle spatio-temporelle. Les phénomènes associés à ces échelles ne sont pas indépendants. On est amené à définir plusieurs échelles en fonction de leurs dimensions horizontales (L) et les échelles temporelles (t) associées (Lambert D.).

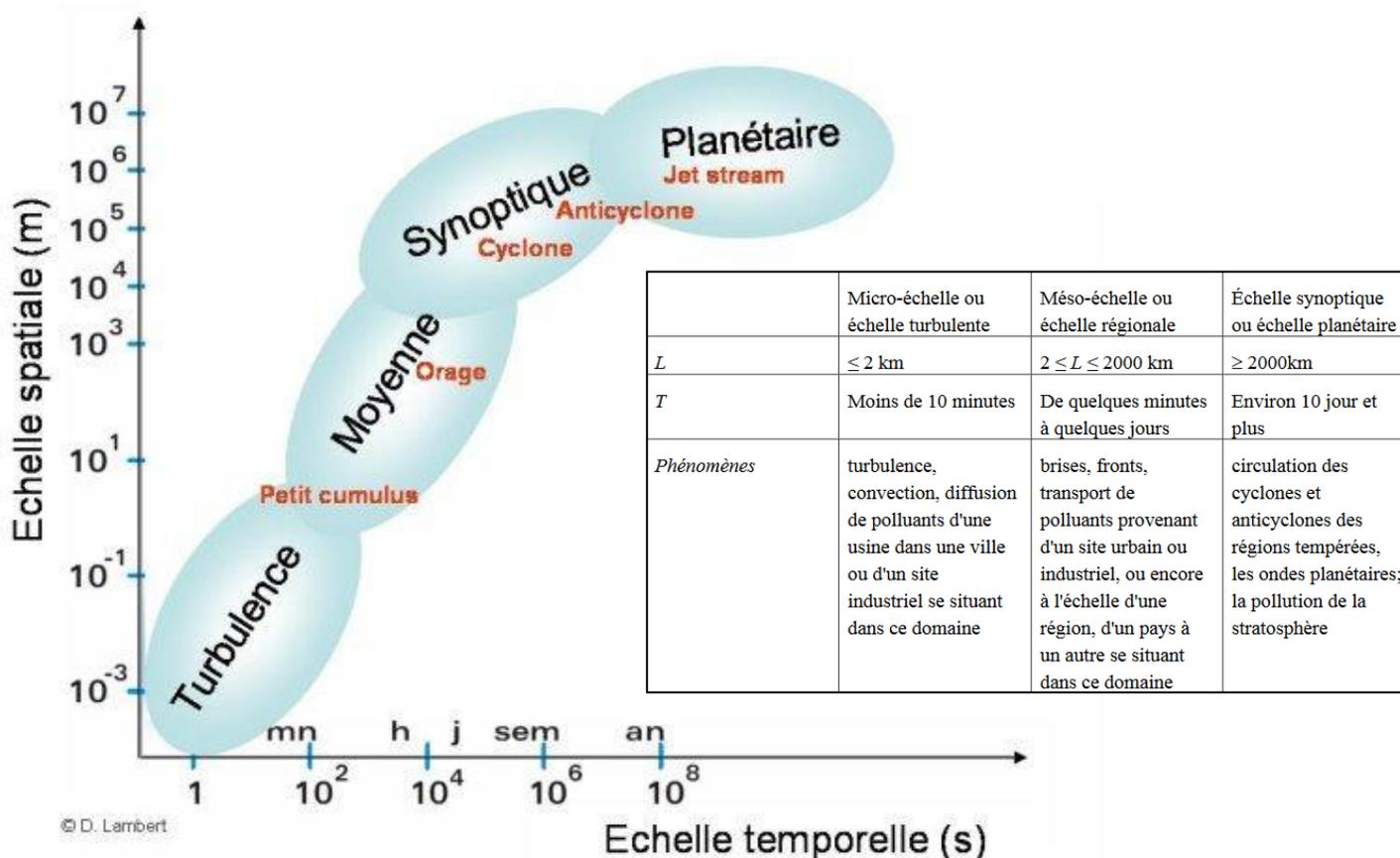


Figure 1.1 : Les échelles spatio-temporelles (source : Lambert. D)

Les valeurs représentatives des éléments du climat sont fonction de la période et du domaine spatial étudiés. Généralement, quatre échelles spatiales sont associées à quatre termes désignant le climat (Choisnel, 1987). Chaque échelle peut être subdivisée en plusieurs autres sous échelles en fonction des phénomènes physiques prépondérants (Lambert D., 2009). Ces échelles sont associées à des champs d'influences verticaux sur l'atmosphère urbaine représentées par une stratification de couches. IL est important de noter que la nomenclature des échelles dépend de la discipline.

- L'échelle globale ou planétaire est associée au terme climat global de 10 000km à tout le globe, cette échelle est adaptée pour l'observation de la circulation générale et des

Analyse bibliographique

variations du bilan radiatif. Le phénomène représentant cette échelle est par exemple, les ondes de Rossby.

- L'échelle méso est associée au terme climat régional (Fig. 1.2 a). Elle est comprise entre 100 et 10 000km environ. Elle correspond à un phénomène dont la durée peut varier entre quelques heures et quelques jours, en moyenne. Cette échelle est utilisée pour décrire les perturbations ou les anticyclones. La surface terrestre influence la couche limite atmosphérique⁶ (CLA) c'est-à-dire la partie inférieure de la troposphère. Cette échelle est associée aussi à la couche limite urbaine⁷ (CLU). La CLU est un cas particulier de la CLA lorsque l'air circule au-dessus d'une ville. La climatologie urbaine s'intéresse à la couche limite de surface (CLS), partie inférieure de la CLA. Elle représente environ 10% de la hauteur totale de la CLA (Robitu, 2005). En zone rurale, l'expansion verticale de la CLS est déterminée par les conditions de l'échelle régionale alors qu'en ville c'est plutôt les effets internes qui déterminent son étendue. La différence entre les deux couches provient de l'existence d'un îlot de chaleur urbain⁸ (ICU).
- L'échelle locale est associée au terme climat local (Fig. 1.2 b). Elle est généralement comprise entre 1 et 100km, elle peut être représentée par les phénomènes de brise de mer ou encore des ondes de relief. Cette échelle représente les influences d'une ville sur les paramètres climatiques et sur les conditions météorologiques. La CLS se décompose en trois sous couches : la sous-couche inertielle (ou sous-couche d'équilibre), la sous-couche de rugosité⁹, la couche limite de canopée (CLC). Cette couche est influencée par la surface urbaine dépendant des conditions atmosphériques et des conditions générales de rugosité.
- La micro-échelle (la petite échelle) associée au terme microclimat s'étend de quelques centimètres à quelques kilomètres (Fig. 1.2 c). L'échelle temporelle associée est l'échelle horaire. Cette échelle comprend une multitude de processus à l'exemple du frottement ou de la turbulence. Le microclimat est défini par l'influence d'éléments isolés comme les rues, la végétation (arbres, jardins, etc.), les bâtiments. Les effets microclimatiques sont localisés au niveau de la couche de canopée urbaine¹⁰ (CU), c'est-à-dire entre le sol et le sommet des bâtiments, arbres, etc. Ces effets ont une durée limitée puisqu'après un « brassage », dû à la magnitude du microclimat urbain et à la vitesse du vent, ces effets passent sur la couche appelée *sous-couche de rugosité*. Cette couche commence au niveau des éléments de rugosité jusqu'où la canopée n'a plus d'effet sur la couche supérieure (échelle méso).

⁶ La couche limite atmosphérique se définit par une structure où son épaisseur varie de quelques centaines de mètres en période nocturne à quelques kilomètres en période diurne (Dupont, 2001)

⁷ La couche limite urbaine est définie comme la partie de la couche limite atmosphérique où les caractéristiques évoluent en fonction des activités anthropiques

⁸ L'îlot de chaleur urbain est caractérisé par la différence entre les températures entre la ville et les zones rurales

⁹ La sous-couche de rugosité s'étend de quelques mètres au-dessus des obstacles. Les sillages créés par les éléments de rugosité les plus hauts et accidentés interagissent entre eux. Cette interaction crée une turbulence importante

¹⁰ La canopée urbaine se définit par l'air présent entre les éléments de rugosité urbains (bâtiments, végétation)

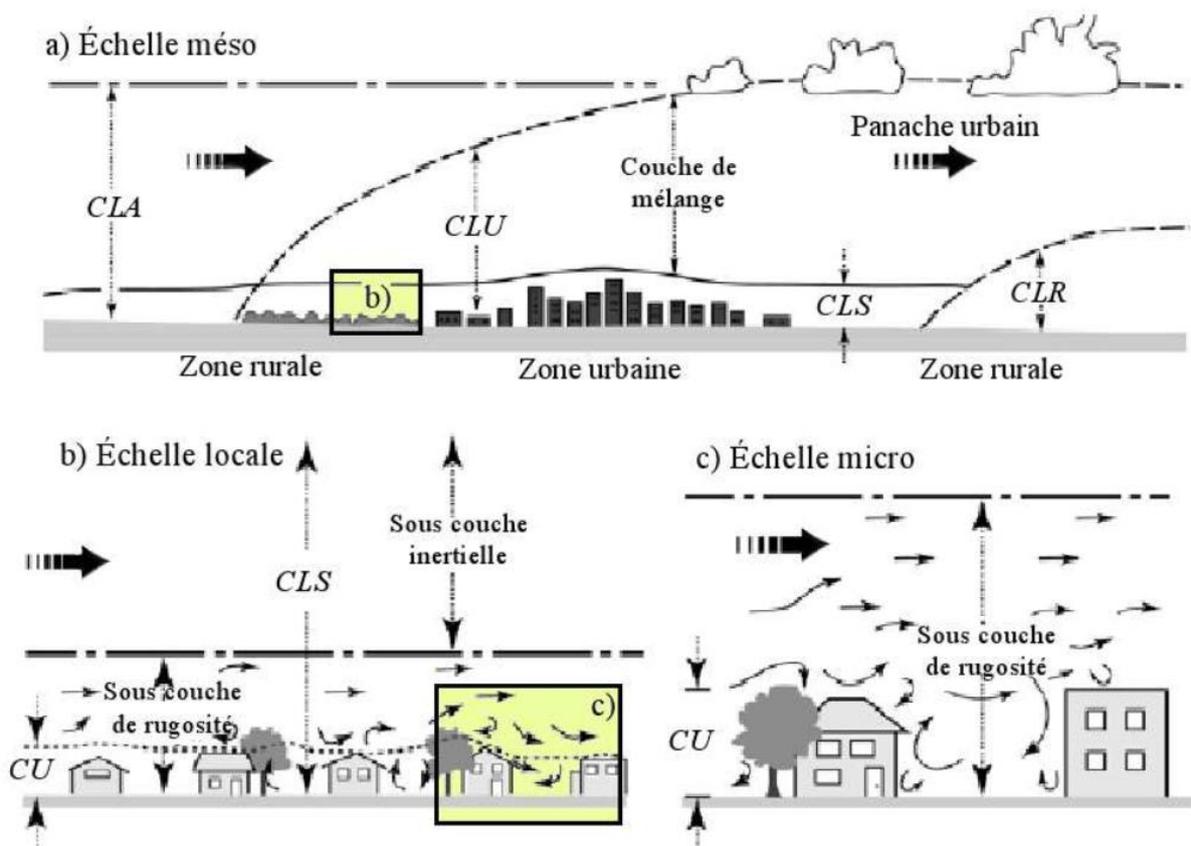


Figure 1.2 : Représentation des différentes échelles climatiques et atmosphériques, adaptée de Oke, 1987

L'étude du climat urbain se structure par ces différentes échelles spatiales. Ces échelles ont des limites approximatives. Trouver et fixer les limites justes pour chaque type d'échelle est ardu. Les effets des processus à une échelle peuvent être modifiés par une activité d'une autre échelle. Cependant il est nécessaire de discerner les phénomènes et événements à des échelles appropriées de temps et d'espace.

Les phénomènes ne sont pas forcément définis dans une seule catégorie d'échelle puisque des transferts d'énergie et de mouvements continus sont présents entre les échelles successives. C'est pour cette raison que la conception de modèles de prévision du temps doit être différente, en fonction de l'échelle spatio-temporelle considérée et de la dimension de la taille des phénomènes.

Notre échelle d'étude, dans notre recherche, est l'échelle microclimatique.

L'étude du climat urbain distingue différentes échelles verticales et horizontales. A l'échelle horizontale, quatre échelles d'étude sont recensées : globale, locale, méso et micro-échelle.

1.3. Spécificité et formation du climat urbain

Aujourd'hui, de nombreuses études se focalisent sur le climat urbain. Cela s'explique par le fait que plus de la moitié de la population mondiale vit, de nos jours, en ville et ce chiffre atteint plus de 80% dans les pays riches. Le climat urbain est défini par Monteiro *et al.*, (2003) comme « un système qui englobe le climat d'un espace terrestre déterminé et son urbanisation ». Pour Andrade (2005), cette notion résulte directement des interactions des « facteurs urbains avec le climat régional et avec le milieu physique préexistant ». Ainsi, les rues, les bâtiments, les activités sont à l'origine des

Analyse bibliographique

perturbations microclimatiques multiples. Elles ne sont pas identiques à celles formées par les quartiers voisins. Elles peuvent être étudiées à l'échelle locale ou régionale.

Un microclimat spécifique est présent dans les villes, dû à la forme urbaine affectant ainsi la circulation du vent et de l'humidité. Le climat actuel est fortement dépendant de la situation géographique, de sa structure, de la météorologie régionale et des activités anthropiques (Mestayer *et al.*, 1994). Plusieurs phénomènes, moteur du climat urbain, sont générés à l'échelle de la rue et du bâtiment. Ils peuvent être divisés en deux groupes : les effets mécaniques et les effets thermiques. Pour parler du microclimat urbain, on peut citer les travaux d'Oke 1987, d'Akbari 1992 et de Mestayer *et al.*, 1994. Oke détaille les différentes échelles climatiques et atmosphériques. Il définit l'échelle locale qui traduit les variations introduites par les éléments de l'environnement. Il caractérise l'Ilot de Chaleur Urbain (ICU). Akbari *et al.* (1992), après avoir défini le micro climat et l'effet de l'ICU, étudie le revêtement des couleurs claires pour la diminution de l'ICU. Mestayer *et al.*, (1994) spécifient les processus thermodynamiques et dynamiques conditionnant la formation de la couche limite urbaine. Ces travaux de références liés à la climatologie permettent de définir les spécificités du climat urbain.

1.3.1. Les effets mécaniques

L'écoulement de l'air connaît une accélération ou une décélération en fonction de l'espace (la position, la hauteur des bâtiments et la disposition des rues). Zhang *et al.*, (2005) observent, par simulation, que le vent dépend fortement de la configuration spatiale de la zone. D'autres études constatent une augmentation de la vitesse du vent lorsque les bâtiments sont en position parallèle (Blocken *et al.*, 2007). Cet écoulement, assez perceptible du microclimat urbain, exerce une grande influence sur le confort thermique (extérieur comme intérieur dû à la ventilation naturelle), bénéfique en été, mais source de nuisance en hiver.

L'évapotranspiration fait partie d'un autre phénomène perceptible à l'échelle de la ville. Elle se caractérise par l'importance de la présence de végétation et de la porosité des sols, absorbant la chaleur et créant un rafraîchissement. C'est le flux latent. Ce dernier s'intensifie en fonction du pourcentage de végétation. En effet, le changement de phase de l'eau liquide en vapeur d'eau consomme de l'énergie conduisant à un rafraîchissement. Ce phénomène est facteur de deux mécanismes conduisant à la perte d'eau par la végétation : l'évaporation au niveau des feuilles et la transpiration. En ville, ce phénomène est moins fort qu'à la campagne, puisque le revêtement des surfaces urbaines restreint le tapis végétal. La végétation et donc les zones de « fraîcheur » se limitent aux parcs, aux allées arborées ainsi qu'aux jardins privés ou collectifs.

En plus de l'évapotranspiration, d'autres effets sont perceptibles sur le climat. La végétation produit un effet d'ombrage, les zones hydrauliques rafraîchissent l'air. La réduction du rayonnement absorbé et la modification de l'écoulement de l'air ont un effet sur le climat urbain.

Le dernier effet mécanique que l'on peut citer est l'apport anthropique de chaleur. Celui-ci peut être de plusieurs natures : chauffage, climatisation, circulation automobile, éclairage, industries, etc. Ce sont autant de facteurs faisant augmenter les températures et souvent la pollution. Ce flux anthropique est propre à la ville. Les apports de chaleur anthropique les plus importants sont émis par les véhicules, les climatiseurs et l'activité industrielle (Giguère, 2008). Ils peuvent être plus importants dans certains quartiers en fonction de la densité de population et du potentiel

économique et industriel de la ville (Bozonnet *et al.*, 2006). De plus, Oke (1987) constate que cet apport est plus volumineux dans les villes développées de l'hémisphère Nord.

1.3.2. Les effets thermiques

Au niveau des effets thermiques, la géométrie de la ville amplifie le piégeage du rayonnement solaire. Il est réfléchi en partie vers l'atmosphère en milieu naturel alors qu'il rebondit sur les bâtiments et s'emmagasine dans certains milieux urbains. Colombert (2008) souligne que le rayonnement solaire réfléchi par les différentes parois, ne parvient à ressortir vers l'atmosphère que partiellement. Le rayonnement absorbé par une paroi se transforme en chaleur et élève la température de sa surface. Il est impossible d'empêcher ce phénomène d'échange. C'est la principale source d'énergie des surfaces extérieures. La paroi échange alors avec son environnement, suivant les trois modes fondamentaux d'échanges : par conduction à l'intérieur de la paroi, par convection avec l'air environnant et par rayonnement vers les parois voisines.

1.3.2.1. Le flux conductif

La conduction est définie comme un transfert de chaleur existant dans un milieu donné sans qu'il y ait déplacement apparent de matière. La conduction a lieu seulement s'il existe des écarts de températures entre les parois. Dans le cas contraire, le milieu est en équilibre thermique et aucun transfert de chaleur ne peut se produire. La propagation de la chaleur se réalise avec plus ou moins de facilité suivant la nature, les caractéristiques (résistances thermiques, etc.), l'épaisseur et la géométrie du matériau, ce qui entraîne une forte variabilité du flux conductif. Ainsi, plus le matériau est isolant moins il y a de conduction. Dans la majorité des cas, le signe du flux conductif s'inverse entre le jour (où le flux va dans le sens de la profondeur) et la nuit (où le flux est évacué vers la surface où les températures sont plus faibles qu'à l'intérieur du matériau).

1.3.2.2. Le flux convectif

L'échange de chaleur sensible par convection thermique est dû aux transferts aérodynamiques de chaleur entre les surfaces solides et la masse d'air. Au contact de l'élément chaud, l'air se met en mouvement et se déplace vers l'élément froid qui va perdre sa chaleur, créant ainsi un mouvement généralement vertical. Ainsi plus l'air est immobile moins il y a de convection et inversement, plus la vitesse de l'air est élevée plus les échanges thermiques sont importants. Cette convection peut être naturelle (courant d'air) ou forcée (force externe comme le vent).

1.3.2.3. Le flux par rayonnement thermique

Un corps chauffé émet de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. C'est le transfert de chaleur d'un élément à un autre par onde électromagnétique sans contact direct. Une des particularités de ce rayonnement, dit thermique, est qu'il peut se propager dans le vide ; ce type de transfert ne nécessite pas de support matériel. Le rayonnement thermique se déplace vers les courtes longueurs d'ondes lorsque la température du corps augmente. Ainsi plus l'émissivité du matériau est faible, moins il y aura de transfert par rayonnement.

1.3.3. Modification du bilan d'énergie thermique de la ville

Un bilan d'énergie thermique (ou bilan d'énergie, bilan énergétique ou bilan thermique) de surface est utilisé pour représenter la chaleur produite et stockée par la ville. Ce bilan prend en compte tous

Analyse bibliographique

les échanges d'énergie (Fig. 1.3). L'apport d'énergie provient principalement du soleil ($K\downarrow$) et de l'atmosphère ($L\downarrow$) mais aussi des rejets de chaleur provenant des activités humaines et des rejets thermiques (Q_F).

Ces derniers sont à l'origine du processus radiatif et des flux de chaleur sensible et latente. Comme nous l'avons déjà précisé, ces transferts de chaleur se font par conduction, convection ou par rayonnement (de grandes longueurs d'ondes). Ce bilan radiatif (Q_R) représente donc le flux de rayonnement sur l'ensemble du spectre électromagnétique (soit le rayonnement net).

$$Q_r = K\downarrow + L\downarrow - K\uparrow - L\uparrow \quad (1)$$

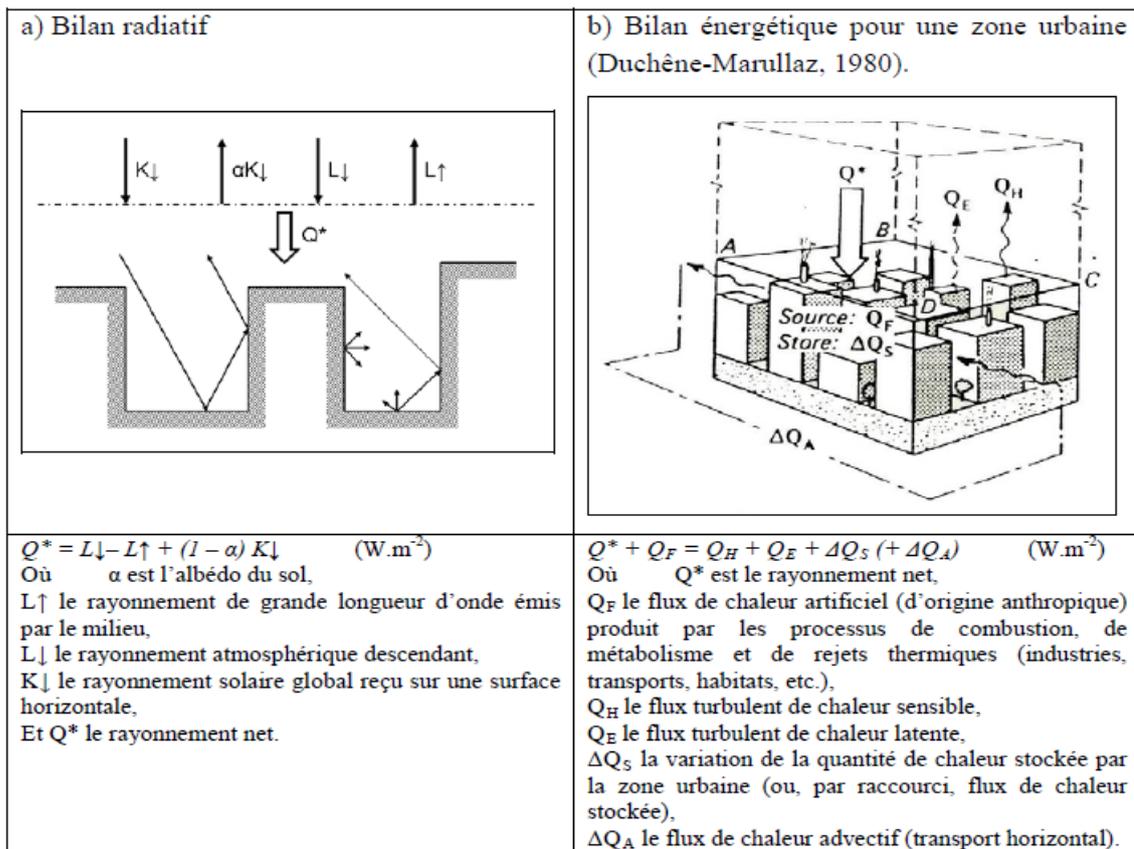


Figure 1.3 : Les bilans radiatifs et énergétiques

Les différents facteurs exposés, dans cette partie, sont étudiés par de nombreux auteurs afin de mieux comprendre le rôle de chacun dans le bilan d'énergie. Le bilan énergétique (mais aussi le bilan hydrique) sont essentiels pour comprendre la formation du climat urbain et les échanges énergétiques.

Sthülpnagel (1987), Taha (1996), Bernatzky (1982), Oke (1979), projet ACCLIMAT¹¹ et bien d'autres focalisent leur attention sur l'influence des arbres et des espaces végétalisés notamment sur la température. D'après les recherches de Sthülpnagel (1987) pour perdre 1°C, il faut 10ha d'espace vert.

¹¹ Le projet ACCLIMAT vise à étudier les interactions entre les processus de développement urbain et de micro-climat urbain pour quantifier certains impacts du changement climatique (<http://www.cnrm-game-meteo.fr/acclimat/spip.php?rubrique46>)

Fan et Sailor (2005), Ichinose *et al.*, (1999), ou encore Taha *et al.*, (1992), évaluent l'intensité des rejets de chaleur anthropiques et leur influence sur l'îlot de chaleur. Taha *et al.*, (1992) montrent par exemple qu'au centre d'une grande ville Q_F peut avoir des conséquences sur l'intensité de l'îlot de chaleur à hauteur de 2-3°C aussi bien le jour que la nuit.

D'autres auteurs s'intéressent aux propriétés thermiques et radiatives des matériaux. Le comportement thermique du béton ou de l'asphalte et du sol nu est étudié par Asaeda *et al.*, (1996). Pomerantz (2000) travaille sur les effets des températures des chaussées, sur la température de l'air. Taha (1997), augmente l'albédo¹² de 0,15 et de 0,30 des surfaces minérales. Il observe, dans le cas extrême, une diminution de température de 4,5°C sur le bassin d'étude.

En fonction des situations géographiques et climatiques, les termes du bilan énergétique sont modifiés¹³ (Q^* , Q_H , ΔQ_S , Q_E , Q_F) et contribuent à la formation de l'îlot de chaleur urbain. Ce bilan est étudié dans différentes situations géographiques et climatiques (Mexico : Oke *et al.*, 1992 ; Marseille : Roberts *et al.*, 2003). D'après de nombreux auteurs (Oke, 1987), (Guyot, 1999), (Arnfield, 2003), le bilan d'énergie en régime permanent d'une maille surfacique réelle d'un objet urbain, en densité surfacique de flux (Wm^{-2}), s'écrit :

$$Q_R = Q_H + Q_L + Q_C \quad (2)$$

Avec :

- Q_H : le flux convectif (Wm^{-2})
- Q_L : flux latent (Wm^{-2})
- Q_C : flux conductif (Wm^{-2})

1.3.4. L'îlot de chaleur urbain, « un microclimat »

La caractéristique principale du climat urbain est l'îlot de chaleur urbain. Ce phénomène est décrit comme une différenciation de températures entre le centre urbain et sa périphérie (zones rurales environnantes) (Oke, 1987). Les îlots de chaleur urbains désignent des élévations localisées de températures, plus précisément des températures maximales, diurnes et nocturnes, enregistrées en milieu urbain par rapport aux zones rurales (Parmentier, 2010). Ce phénomène est observé dès 1820 par Luke Howard sur la ville de Londres. Les villes étant en quasi-totalité artificielles, elles peuvent facilement devenir source de surchauffe, rendant alors les épisodes de forte chaleur estivale plus difficilement supportables. En effet, les ICU ne se manifestent pas toute l'année, et sont favorisés par certains phénomènes météorologiques : ciel dégagé et vent faible, sur une période pouvant aller du printemps à la fin de l'automne. Les mois où l'ICU est le plus présent sont juillet et août, si l'effet de l'ICU est favorable lorsque les températures sont faibles. Pour les périodes de vague de chaleur, l'effet devient négatif pour les populations.

¹² Lorsque le rayonnement solaire arrive sur le sol de notre planète, il est en partie réfléchi. C'est le rapport de l'énergie lumineuse réfléchie à l'énergie lumineuse incidente. Cette réflexion, qui dépend de la couleur et de la matière de la surface concernée, est nommée « albédo ». (<http://www.actu-environnement.com>). C'est une grandeur sans dimension, comparable à la réflectance, mais d'application plus spécifique, utilisée notamment en astronomie, climatologie et géologie. C'est une valeur comprise entre 0 et 1 : un corps noir parfait absorbant toutes les longueurs d'ondes sans en réfléchir aucune, aurait un albédo nul, tandis qu'un miroir parfait réfléchissant toutes les longueurs d'ondes, sans en absorber une seule, aurait un albédo égal à 1

¹³ Pour la ville de Mexico (Mexique) : Oke *et al.*, (1992) et Oke *et al.*, (1999). Pour Bonn (Allemagne) : Kerschgens et Kraus (1990). Pour Marseille : Roberts *et al.*, (2003) et Roberts *et al.*, (2004)

L'ICU est le principal phénomène spécifique de la climatologie urbaine. Il est visible à grande échelle mais il est engendré par des phénomènes propres à l'échelle microclimatique.

1.3.4.1. Caractéristique de l'îlot de chaleur urbain

De nos jours, la différence de température dû à l'ICU peut atteindre plus de 10°C pour les grandes agglomérations. La végétation en zone rurale et la structure urbaine se comportent différemment en ce qui concerne l'énergie et les échanges d'eau avec l'atmosphère. Ce phénomène est plus important la nuit que le jour, il est essentiellement nocturne. Lorsque l'on passe à la phase nocturne, l'apport en énergie solaire cesse. En périphérie, cette absence d'énergie est signe d'un arrêt de l'évapotranspiration. En ville, les surfaces imperméables restituent à l'atmosphère urbaine l'énergie accumulée durant toute la journée. Ces surfaces stockent beaucoup d'énergie. A la tombée de la nuit, l'air au-dessus de la ville se refroidit plus lentement qu'en zone périphérique puisque les surfaces urbaines plus chaudes limitent ce refroidissement (Fig. 1.4). L'îlot de chaleur urbain se crée parce que l'air urbain se refroidit plus lentement et non parce que l'air urbain se réchauffe plus rapidement.

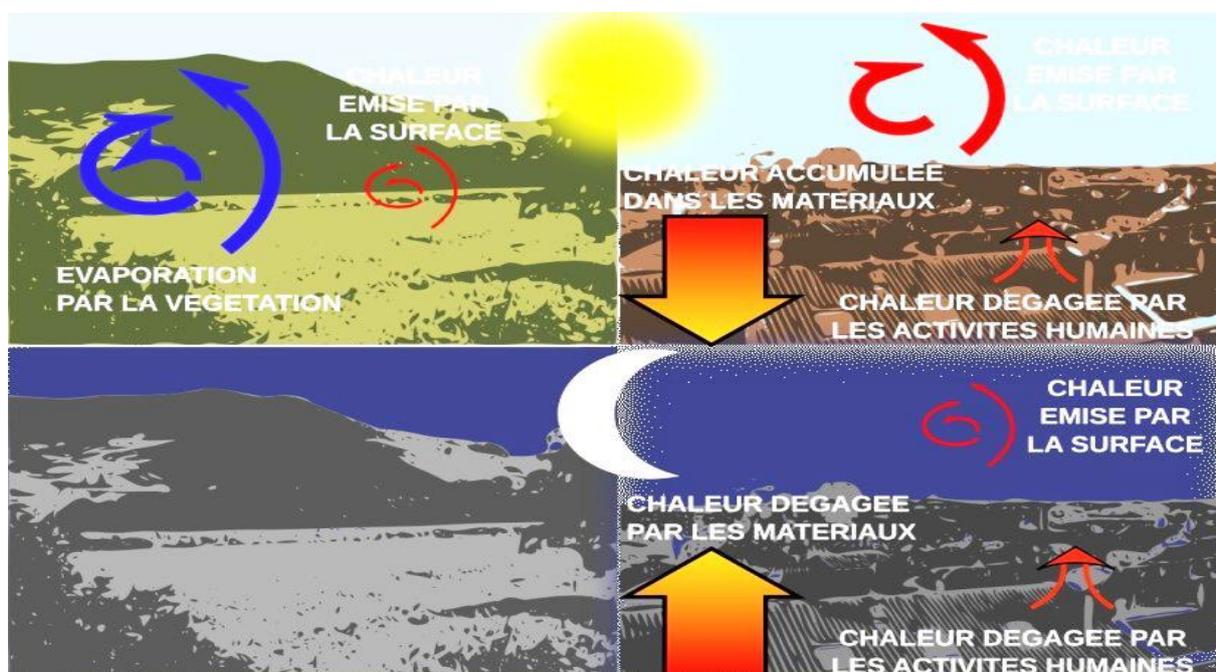


Figure 1.4 : Représentation des phénomènes jouant sur la différence de température nuit/jour et ville/ campagne, extrait du site web : <http://www.cnrm-game-meteo.fr>

L'intensité de l'ICU est donc plus forte la nuit que le jour. Les premiers travaux portant sur ce constat datent des recherches de Renou en 1862 (Renou, 1872). Pour parler d'ICU, il faut réunir les conditions suivantes : 50% d'insolation, vent inférieur à $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ et une pression supérieure à 1010 hPa (Cantat, 2004). La formation de l'ICU est due à l'impact de plusieurs processus (Oke 1987, Mestayer *et al.*, 1994) :

- accumulation de chaleur dans les constructions. La ville absorbe plus de « calories » solaires

Climatologie, indices et modélisation du climat et des phénomènes spatio-temporels

- transformation du bilan d'eau (réduction de l'évapotranspiration), du bilan radiatif et du cycle diurne des flux de chaleur sensible¹⁴ (par rayonnement et conduction)
- production de chaleur sensible due aux activités humaines (industries, circulation, chauffage/climatisation, etc.)
- réduction de la vitesse du vent due à la présence des bâtiments. Le vent est facteur de rafraîchissement, si le vent s'intensifie à une vitesse supérieure de $7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, l'ICU tend à disparaître
- topographie locale et écoulements aérauliques locaux : certaines villes ont une géométrie facilitant les écoulements de vent (exemple : Brest)

En plus de ces différents processus, d'autres effets viennent s'additionner pour augmenter davantage la chaleur en ville (Mestayer *et al.*, 1994) :

- l'augmentation de l'absorption du rayonnement solaire par les matériaux urbains avec un faible albédo
- l'augmentation de la densité de flux par rayonnement et du stockage de chaleur par les surfaces urbaines
- la diminution de la consommation de chaleur latente (due à la réduction de la végétation) et de la réflexion du rayonnement solaire (avec les effets de piégeage radiatif)
- Les sources anthropogéniques de chaleur et d'énergie. En effet, qu'il s'agisse de l'activité industrielle, des transports, de l'utilisation d'appareils électriques, du chauffage de l'eau, ou encore de la climatisation, le procédé est le même : l'Homme opère une transformation d'énergie dont une des principales conséquences finales se traduit par une échappée de chaleur. Cette dernière contribue à l'augmentation des températures environnementales et participe donc à l'ICU (estimé à 20% par l'APUR¹⁵)

Rizwan *et al.*, (2008), définissent l'îlot de chaleur urbain comme le résultat de plusieurs facteurs contrôlables et non contrôlables (Fig. 1.5). « *Les facteurs contrôlables et incontrôlables peuvent également être classés comme des variables à effet temporaire, comme la vitesse du vent et la couverture nuageuse, des variables à effet permanent comme les espaces végétalisés, les matériaux des bâtiments et le facteur de vue du ciel, et des variables à effet cyclique comme le rayonnement solaire et les sources de chaleur anthropique* » (Rizwan *et al.*, 2008).

¹⁴ Le flux de chaleur sensible entre la surface terrestre et l'atmosphère correspond à la quantité de chaleur échangée par conduction

¹⁵ APUR, Les îlots de chaleur urbains à Paris, Cahier#1 ; décembre 2012. 35 p

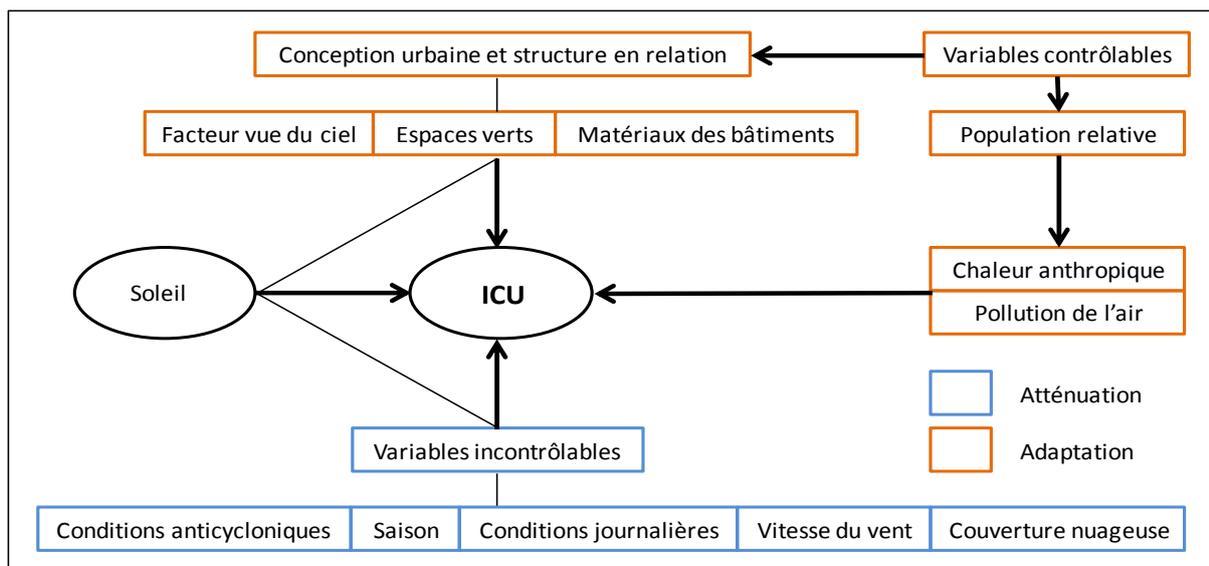


Figure 1.5 : Formation de l'îlot de chaleur urbain (d'après Rizwan *et al.*, 2008)

L'îlot de chaleur urbain affecte la qualité de vie en ville ce qui résulte d'inconfort thermique pour les habitants et des risques sanitaires pour les personnes les plus fragiles. L'augmentation de la fréquence de ces phénomènes extrêmes tels que les canicules risque d'aggraver cet effet thermique dans les prochaines décennies. Au-delà des questions de confort urbain, les métropoles peuvent devenir à long terme des espaces littéralement invivables. C'est donc un fort enjeu urbain et il convient de le prendre en compte comme outil à l'aménagement du territoire.

La morphologie urbaine peut être source de phénomènes radiatifs et aérodynamiques. La diversité des critères, les phénomènes en jeu font que l'impact de la morphologie urbaine sur le climat est un phénomène complexe. L'ICU est un des effets majeurs de la forte densité de bâtis et de population dans un même territoire.

1.3.4.2. ICU sur Paris

Paris, avec sa forte densité urbaine est une des villes où l'ICU est présent. Cette ville possède un climat plus doux que le reste de la région Ile-de-France avec des différences nocturnes de 2 à 3°C en moyenne annuelle entre Paris et les zones environnantes (APUR). Comme nous l'avons déjà dit, l'effet de l'ICU est bien plus marqué la nuit et pendant les périodes de canicule. La figure 1.6, représente une différence de 4°C, entre le centre urbain de Paris et ses départements frontaliers, en période non caniculaire et de 8°C en période de canicule.

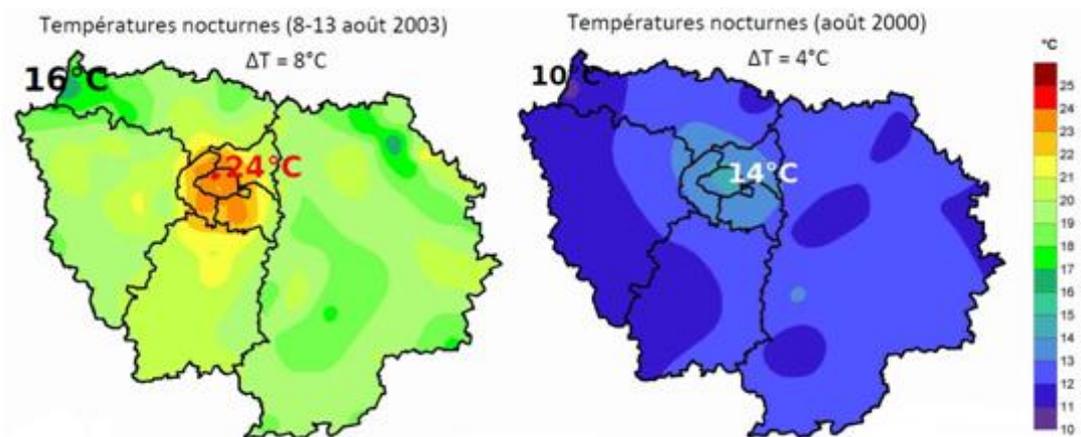


Figure 1.6 : Cartographie de l'îlot de chaleur urbain nocturne en août 2003 et 2000 en Ile-de-France (Source : Météo-France)

Si la moyenne annuelle de l'ICU en Ile-de-France est comprise entre 2 et 3°C, elle peut évoluer tout au long de l'année en raison des conditions anticycloniques. En effet, lorsque le vent descend en-dessous de la barre des 2 à 3 m.s⁻¹ et que le ciel est dégagé, alors l'ICU, dans la région parisienne peut atteindre près de 10°C. C'est en été que l'on enregistre en moyenne le plus de jour d'ICU supérieur à 3°C. On recense 12 jours par mois durant l'été contre 4 jours par mois en hiver (moyenne annuelle de référence 1981-2010, source Météo-France, EPICEA).

1.3.5. Synthèse

Les progrès de recherche sur l'observation du climat urbain, sa modélisation plus ou moins fine des phénomènes physiques et des capacités de calcul font que la formation du climat urbain est de plus en plus précisément connue. Les climatologues étudient des échelles plus fines mettant en avant l'importance de la géométrie urbaine et des propriétés physiques des matériaux de construction.

Concernant l'îlot de chaleur urbain et l'influence des différents facteurs urbains sur ce phénomène, des recherches visent à le diminuer, même si cela risque de prendre encore du temps. Plusieurs modélisations et recherches sont en cours pour vérifier et tester la sensibilité du climat et de l'îlot de chaleur urbain à certaines actions (végétalisation, augmentation de l'albédo, etc.). Le projet EPICEA simule l'utilisation de matériaux capables de réfléchir le rayonnement solaire sur l'ensemble des façades et toitures d'immeubles parisiens.

La figure 1.7, représente une simulation des flux quotidien de rayonnement visible réfléchi pour la journée du 10 août 2003. Le zinc est pris comme matériau pour cette simulation. Même si la couverture du zinc peut être vue comme une source d'inconfort pour les parisiens¹⁶, à l'échelle urbaine, elle est vue comme un avantage par rapport aux toits terrasses. Le zinc, très réfléchissant, est capable de renvoyer vers l'espace une part du rayonnement solaire incident.

¹⁶ Les structures en zinc sont légères. Elles transmettent très bien la chaleur solaire à l'intérieur des combles. Une surchauffe est présente et impacte les habitants des derniers étages

Analyse bibliographique

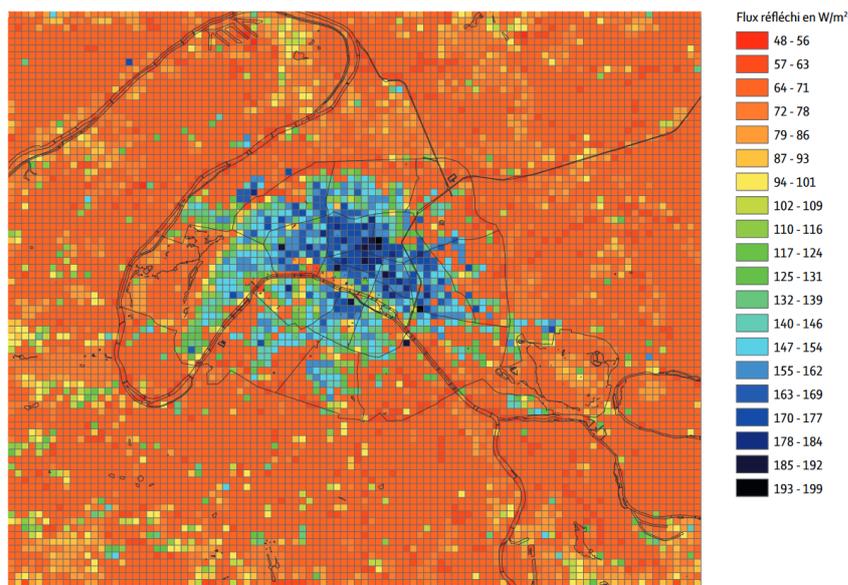


Figure 1.7 : Flux quotidien de rayonnement visible réfléchi le 10 août 2003 où le bâti est majoritairement recouvert de zinc. Source : Projet EPICEA

Tout comme le type de matériau, la végétation possède un impact important sur le climat urbain. D'après les simulations du projet EPICEA¹⁷, la végétation joue un rôle sur le climat urbain. En période nocturne, les zones les plus fraîches sont celles où la densité de végétation est la plus élevée (Fig. 1.8). Le végétal par son évapotranspiration, par sa densité (volumétrie) permet de rafraîchir l'air et de créer des zones de confort dans l'espace urbain dense. Dû au vent thermique dominant, l'ICU se décale vers le Nord-Est.

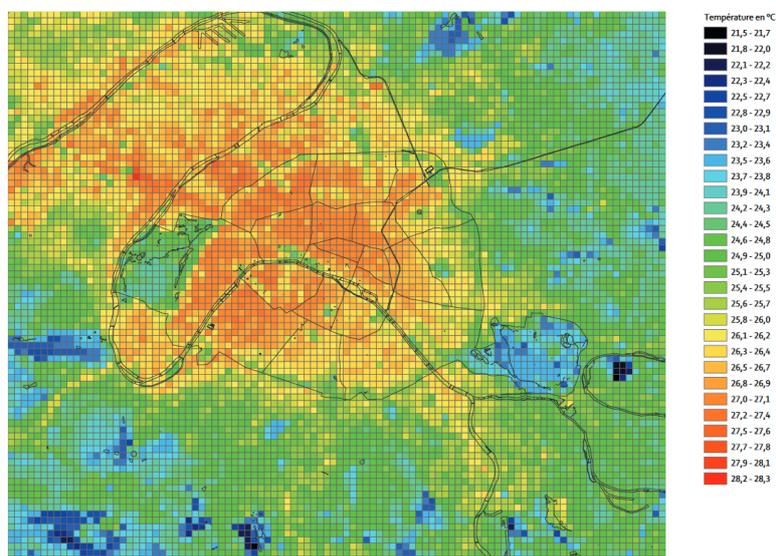


Figure 1.8 : Température de l'air à 2m du sol le 10 août 2003 à 6h du matin (4h UTC). Source : Projet EPICEA

¹⁷ EPICEA : Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Echelle de l'Agglomération parisienne : étude de la canicule 2003 pour évaluer l'impact du changement climatique à l'échelle de la ville et estimer l'influence du bâti sur le climat urbain (<http://www.cnrm-game-meteo.fr>)

2. Canicule, plans et risques sanitaires

2.1. Définition, historisation et vulnérabilité urbaine

2.1.1. La canicule : un phénomène climatique extrême

Aux différents types d'événements climatiques¹⁸ sont associés des écarts à la normale climatologique pouvant être qualifiés comme extrêmes. Ces événements sont intensément étudiés ces dernières décennies, dû notamment et malheureusement, à l'augmentation des pertes économiques et au nombre de victimes (Munich Re, 2006). Cependant, une définition universelle d'événements climatiques n'existe pas. Selon Beniston et Stephenson (2004) la définition de l'événement climatique extrême se base sur trois caractéristiques. Elles reposent sur des notions bien distinctes :

- la rareté du phénomène climatique en considérant sa fréquence d'occurrence
- l'intensité du phénomène en considérant des dépassements de seuil par des variables climatiques
- l'impact du phénomène en s'appuyant sur des dégâts socio-économiques

Dans le quatrième rapport du GIEC (IPCC 2007), deux caractéristiques principales des phénomènes extrêmes sont définies : leur fréquence et leur intensité « Un phénomène climatique extrême est un phénomène rare dans le cadre de sa distribution de référence statistique à un endroit spécifique ». Les définitions de « rare » varient, mais un phénomène climatique extrême serait normalement aussi rare ou plus rare que le 10^{ème} ou le 90^{ème} percentile. Les études climatiques recourent le plus souvent à des indicateurs ou à des indices afin d'analyser les extrêmes climatiques. Des définitions et des formules sont proposées pour évaluer l'évolution des événements extrêmes pendant les 20^{ème} et 21^{ème} siècles (Jones *et al.*, 1999 ; Frich *et al.*, 2002 ; Kiktev *et al.*, 2003 ; Alexander *et al.*, 2006).

Par ces définitions, on caractérise la canicule et la vague de chaleur comme un phénomène climatique extrême. On peut considérer qu'une canicule est un type de vague de chaleur particulier par son intensité et sa durée. La canicule et la vague de chaleur sont peu différenciées dans les ouvrages et il n'existe pas de définition universelle. Elles sont identifiées comme ayant des températures anormalement élevées , observées pendant plusieurs jours consécutifs (Soubeyroux, 2015). Une vague de chaleur est caractérisée par plusieurs critères :

- sa rareté : moins de 10% des jours
- son intensité : définie par une intensité maximale du pic de température (Soubeyroux *et al.*, 2015)
- sa sévérité avec des conséquences sanitaires, environnementales, socio-économiques, etc.
- sa durée : comprise au minimum entre 2 et 6 jours selon les auteurs (Steadman, 1979 ; Russo *et al.*, 2014 ; Kent *et al.*, 2014)

Les seuils de température et la durée de l'épisode varient en fonction des régions du monde et des domaines considérés (dispositif vigilance, activité de recherche, etc.). La différence entre ces deux termes peut se faire au niveau de la durée et de l'intensité du phénomène. Ainsi, on peut dire que la période de fortes chaleurs peut donner lieu à des canicules. Pour caractériser la canicule, au niveau

¹⁸ Un événement climatique est un phénomène climatique localisé et à caractère exceptionnel

Analyse bibliographique

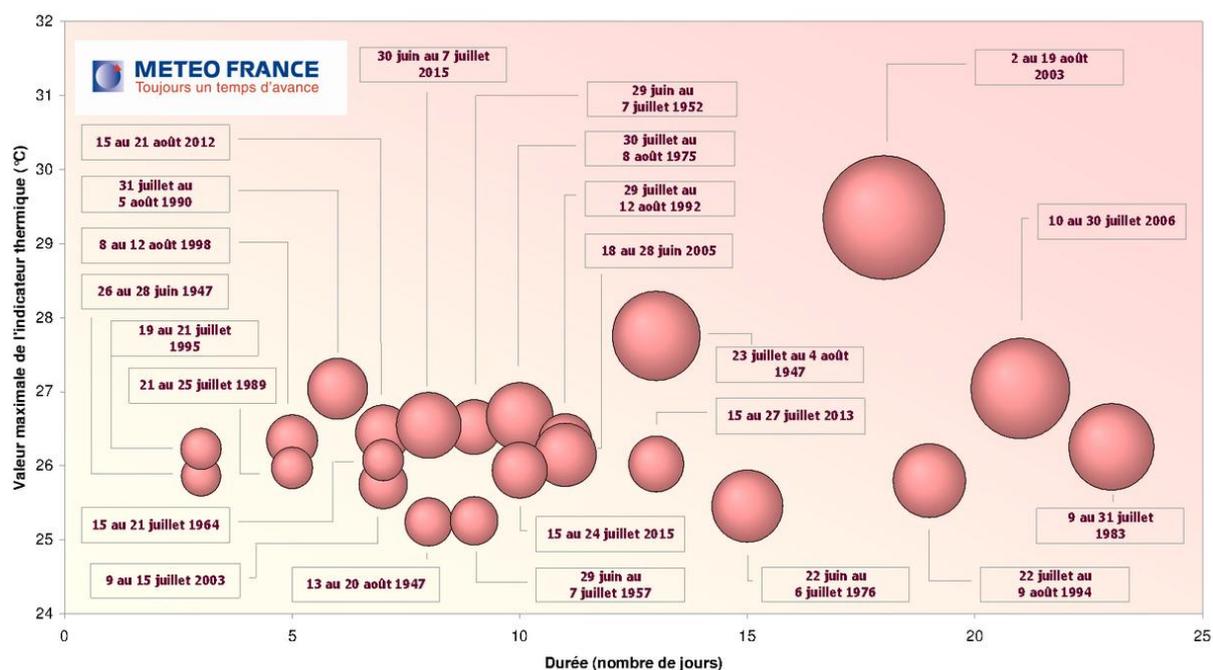
national Météo-France et l'InVS ont mis en place un Indice BioMétéorologique (cf partie 3.3.2.6). Les températures de référence sont appelées « seuils d'alerte ». Ils ne sont pas les mêmes pour toutes les régions en raison de la grande diversité des climats locaux et de la capacité d'adaptation, des administrations régionales et de leurs habitants face aux fortes chaleurs. Pour les hommes, le principal danger de la canicule réside dans le coup de chaleur : une situation d'hyperthermie majeure (température corporelle supérieure à 40°C. Ces canicules ont des effets souvent plus sévères en ville, en raison du phénomène d'îlot de chaleur urbain. La ville est vue comme une zone à fort enjeu compte tenu de la densité de personnes y résidant.

Ces conditions météorologiques sont difficiles à supporter, notamment au début de la période puisque le corps n'a pas eu le temps de s'adapter et s'habituer aux températures élevées et soudaines.

Une canicule est un épisode de températures élevées pendant plusieurs jours, de jour comme de nuit. Les niveaux de températures et la durée de l'épisode permettant de la caractériser varient selon les régions. La définition de la canicule repose donc sur deux paramètres : la chaleur et la durée. Une canicule est une vague de chaleur.

2.1.2. Historisation de la canicule

Après la deuxième moitié du XX^{ème} siècle, la France (outre les périodes limitées de grande chaleur) connaît un certain nombre de canicules (Fig. 1.9) dont 4 de forte intensité : 1976, 1983, 2003 et 2006.



La surface des sphères symbolise l'intensité globale des vagues de chaleur, les sphères les plus grandes correspondant aux vagues de chaleur les plus sévères

Figure 1.9 : Graphique représentant les vagues de chaleur en France entre 1947 et 2015 (l'axe des ordonnées représente l'indicateur thermique en degrés Celsius et l'axe des abscisses représente le nombre de jours de canicule)

2.1.2.1. Avant 1950

Avant 1950, plusieurs canicules sont enregistrées à l'instar de l'été 1947 qui connaît 3 vagues de chaleur successives notables : du 26 au 28 juin (faible intensité), du 22 juillet au 4 août (forte intensité) et du 14 au 20 août (intensité modérée). La seconde vague du 22 juillet au 4 août constitue sans aucun doute le second épisode caniculaire le plus intense depuis l'après-guerre, après août 2003. La figure 1.6, confirme l'intensité et la fréquence des vagues de chaleur en France. De plus, par ce recensement des vagues de chaleur depuis 1947, on peut caractériser les effets du réchauffement climatique sur ce type d'évènements extrêmes.

2.1.2.2. En 1976

En 1976, de fin juin à la mi-juillet, les températures battent des records. Cela ne s'était pas vu depuis 1921 (où l'on peut trouver de semblables conditions climatiques). Les températures relevées atteignent les 38°C en Aquitaine, 37°C à Toulouse et 36°C en Lorraine. Concernant les impacts sanitaires, une vingtaine de départements voient leur mortalité s'élever de près de 10%, selon Météo-France. En plus de cette augmentation de mortalité, la France souffre d'un déficit pluviométrique dont les conséquences sur l'agriculture sont désastreuses (et par conséquent, l'économie française, aussi). L'indemnisation des victimes de la sécheresse s'élevant à plus de 6 milliards de francs est financée, en partie, par une majoration exceptionnelle de l'impôt sur le revenu (www.meteo-paris.com/chronique/annee/1976).

2.1.2.3. En 1983

Entre le 9 et le 31 juillet 1983, une très longue vague de chaleur est présente sur toutes les régions françaises. Des pics de températures sont enregistrés le 11 juillet à Nantes et à Cognac avec un maximum de 36°C et à Carcassonne de 35°C. A Paris, la température atteint quasi les 33°C contre 35,2° en 1921. Sur l'ensemble de la France, on dénombre plus de 4 700 morts entre juin et juillet 1983 dont 300 décès dans la seule région de Marseille, avec une température avoisinant les 38°C et les 41°C fin juillet (www.meteo-paris.com/chronique/annee/1983).

2.1.2.4. En 2003

L'été 2003 est la période estivale la plus chaude depuis des siècles (Wahl *et al.*, 2005). La chaleur et la sécheresse sont catastrophiques (notamment dans la région Rhône Alpes et en Auvergne). La sécheresse débute dès le milieu du printemps. De début juin à fin août, les fortes chaleurs accablent la France et aggravent la sécheresse sévissant depuis le mois de mars. C'est entre le 3 et le 13 août que la France connaît des journées historiques avec des températures dépassant les 35°C, pendant 10 jours consécutifs. Des records sont enregistrés à Toulouse, Bordeaux, Limoges et Montauban, dépassant les 40°C le 4 août. Des feux de forêts se sont déclenchés dans tout le Sud durant plusieurs semaines. (www.meteo-paris.com/chronique/annee/2003).

Une étude de Grazzini *et al.*, (2003) situe l'anomalie maximale de température sur la France et les régions alpines avec des valeurs comprises entre +3°C et +6°C par rapport à la période climatologique de 1958-2001. Cette canicule exceptionnelle est la plus médiatisée, étudiée et prise comme référence. Elle entraîne en France une surmortalité estimée à près de 15 000 décès, particulièrement dans la région Centre et en Ile-de-France (Hémon *et al.*, 2003). La France n'a jamais été confrontée à de telles conséquences sanitaires engendrées par une canicule. Le drame met en évidence les dysfonctionnements des services de santé en août, ainsi que l'isolement des personnes âgées,

principales victimes de la canicule. De ce fait, cet événement révèle la nécessité d'adapter le dispositif national de prévention et de soins, à la survenue de ce type de phénomène climatique, en élaborant en 2004 un Plan National Canicule (PNC), ensuite actualisé chaque année et révisé en 2013. De plus, cette canicule est remarquable du fait de son extension autant temporelle que spatiale. Elle s'étend sur toute l'Europe de l'Ouest. Cela n'a jamais été observé auparavant. (Trigo *et al.*, 2005).

2.1.2.5. En 2006

Durant le mois de juillet 2006, la France connaît un autre épisode important de canicule, bien que de moindre intensité qu'en 2003. A partir du 10 juillet, la chaleur va s'intensifier. Un maximum de 37°C à Carcassonne est recensé et sur le quart Sud-Est, les valeurs de températures sont comprises entre 32 et 38°C. C'est pendant ce mois, que Météo-France, enregistre, à la station Montsouris, les températures maximales depuis au moins 150 ans (pour le mois de juillet). Il s'agit du deuxième mois le plus chaud de l'histoire après août 2003. Une étude menée conjointement par l'Institut de Veille Sanitaire (InVS) et l'Institut National de la Santé Et de la Recherche Médicale (INSERM) montre que l'excès de mortalité, de la canicule 2006, est trois fois moins important que le modèle température-mortalité prévoyait, fondée sur des données antérieures à 2003, montrant l'efficacité du Plan Canicule. La chaleur aurait entraîné une surmortalité de plus de 2 000 décès en France en juillet, si le Plan Canicule n'avait pas été mis en place¹⁹.

2.1.2.6. Après 2010

En août 2012, juillet 2015 et août 2016, des épisodes de canicule courts et de faible à forte intensité touchent de nombreux départements français (34 départements déclenchent le niveau « Mise en Garde et Actions » (MIGA)). Selon l'InVS ces canicules même remarquables ont un impact sanitaire faible en termes de morbidité²⁰ et de mortalité. Ce faible impact est principalement dû à la collaboration des différents acteurs et à l'efficacité de la mise en place du Plan National Canicule (PNC).

En ce qui concerne le mois de juillet 2013, on constate des températures élevées, continues et marquées aussi par une alternance de pics de chaleur et de perturbations orageuses. Ce mois fait l'objet de plusieurs épisodes de vigilance *jaune canicule*, et d'un épisode *orange canicule* pour l'Isère et le Rhône. Pour 2015, deux épisodes de vagues de chaleur concernent la France du 30 juin au 7 juillet et du 15 au 22 juillet. Entre ces deux dates, un léger rafraîchissement du 8 au 14 est observé sur la quasi-totalité des régions. Des pics de chaleur en région Rhône-Alpes et Auvergne sont enregistrés, les 6 et le 7 juillet.

Pour les canicules 2012 et 2015, l'impact sanitaire de la vague de chaleur est faible, tant sur la morbidité (où il ne concerne que les pathologies directement en lien avec la chaleur : hyperthermies²¹, déshydratations²² et hyponatrémies²³) que sur la mortalité restée dans les fluctuations habituelles.

¹⁹ Estimation de la surmortalité observée et attendue au cours de la vague de chaleur du mois de juillet 2006. Rapport disponible sur les sites de l'Inserm (<http://www.inserm.fr>)

²⁰ La morbidité est associée au nombre de personnes souffrant d'une maladie donnée pendant un temps donné

²¹ L'hyperthermie est définie par l'élévation de la température du corps au-dessus de sa valeur normale (37°C chez l'Homme)

²² La déshydratation renvoie à un ensemble de troubles résultant d'une perte d'eau excessive dans l'organisme

Une augmentation du risque caniculaire est prévue par les projections climatiques du GIEC. En effet, selon Météo-France qui a effectué des simulations sur la base d'un scénario d'émissions du GIEC (scénario A1), il est fort possible que les températures estivales mesurées en 2003 deviennent habituelles à partir de 2050. D'après le 4^{ème} rapport du groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du climat, un réchauffement prononcé durant les 150 dernières années permet de prévoir un climat plus extrême et un accroissement de la température de 1,4°C à 5,8°C durant le XXI^{ème} siècle). Il est important de rappeler que les canicules ne sont pas en soi, des événements climatiques attribuables au changement climatique, mais il aura tendance à les rendre plus probables encore à l'avenir, jusqu'à devenir un événement récurrent. Les villes seront les premières touchées au niveau des conséquences et seront particulièrement vulnérables du fait de l'existence d'îlots de chaleur urbain et du nombre de personnes y habitant.

Plusieurs canicules sont recensées depuis la deuxième moitié du XX^{ème} siècle. L'été 2003 est le plus connu pour sa canicule. Ces dernières années, le phénomène s'est intensifié (2012, 2013, 2015 et 2016) et va continuer du fait du réchauffement climatique prévu par le GIEC.

2.1.3. Vulnérabilité urbaine

La vulnérabilité urbaine s'explique, notamment par la forte densité de population et par l'altération de la distribution des flux de chaleur de surfaces en zone urbaine. De plus, l'effet de l'îlot de chaleur urbain avec ses températures de nuits élevées amplifie les effets de la chaleur sur l'organisme. D'après Besancenot (2002) et Tan *et al.*, (2010), ce changement climatique vers des températures plus extrêmes (notamment nocturnes) peut faire doubler la mortalité de la population, dans les grandes agglomérations, en moins de 20 ans. Ainsi, il devient essentiel d'anticiper les conséquences (sanitaires mais aussi environnementales ou économiques) des canicules dans les villes.

2.2. Canicule et risques

Les canicules ont des conséquences importantes tant sur le plan social économique et environnemental : la mort de milliers de personnes âgées vulnérables, la destruction par le feu de vastes zones forestières, des pertes au niveau de la production agricole, etc.

2.2.1. Risque sanitaire et social

De la canicule, le plus dangereux est la chaleur nocturne qui est plus néfaste que la chaleur diurne puisqu'elle empêche l'organisme humain de récupérer. C'est pour cela que la canicule est particulièrement dangereuse la nuit et qu'il ne faut pas négliger son étude. De plus, l'exposition d'une personne à une température extérieure (et même intérieure) élevée sans interruption, pendant plusieurs jours, est susceptible d'entraîner des complications. Les risques sanitaires dépendent principalement de l'intensité de la chaleur et de l'humidité relative de l'air, de la durée d'exposition et de la vulnérabilité des personnes. Les facteurs de vulnérabilité à la canicule font l'objet de nombreuses recherches, notamment depuis 2003 (Vandentorren *et al.*, 2004 ; Lorente *et al.*, 2005). Même si nous nous intéressons au territoire urbain français, la canicule touche de très nombreux pays. L'Inde, en 2015, connaît sa deuxième année la plus meurtrière avec plus de 2 200

²³ L'hyponatrémie est la diminution de la quantité de sodium contenue dans le sang. Elle renvoie à un état d'hyperhydratation des cellules

décès en raison de la chaleur. Au Pakistan, plus de 1 000 morts sont enregistrés dû à un épisode caniculaire historique.

2.2.2. Risque environnemental et consommation énergétique

Les fortes températures et le manque de précipitations affectent en priorité le domaine agricole. La production agricole est en nette baisse avec comme secteur le plus touché le fourrage. Au niveau des impacts faunistique, les canicules font baisser le niveau des rivières et des lacs et élever les températures de l'eau. Ces deux facteurs entraînent une forte dégradation de la qualité des eaux, un stress thermique et une asphyxie des poissons²⁴. L'augmentation de la température de l'eau accélère aussi les phénomènes d'eutrophisation²⁵ et le développement de cyanobactéries. Ces phénomènes impactent la qualité de l'eau. A plus longue échelle, le changement climatique et la hausse des températures entraînent un changement des aires de répartition pour les poissons et menacent des espèces endogènes.

Le secteur énergétique est aussi durement affecté avec l'utilisation massive de la climatisation. Pendant la canicule 2003, la France, principal exportateur d'électricité en Europe, coupe plus de la moitié de ses exploitations, car le fonctionnement des centrales nucléaires est réduit par le manque d'eau dans certains cas, et par le dépassement du seuil de température de l'eau de refroidissement rejetée dans les fleuves ou autres (Tressol, 2008). Malgré tout, quelques-unes de ces centrales ont l'autorisation de continuer leur fonctionnement, même si la température des eaux usées dépasse les normes. Les faibles débits fluviaux, de ce fait, sont une conséquence du manque de précipitations printanières.

Tout comme le pic de mortalité est corrélé avec le pic de température (Basu et Samet, 2002), des températures élevées sont corrélées aussi avec les fortes concentrations d'ozone. Plusieurs recherches tentent d'exprimer une relation entre la concentration d'ozone en milieu urbain et les conditions météorologiques (Bloomfield *et al.*, 1996) et (Camalier *et al.*, 2007).

Pour la consommation énergétique la canicule se traduit par un recours accru à la climatisation. Ce recours se traduit par un accroissement de la consommation électrique. 1°C de plus, en période estivale entraîne une augmentation de 400MW soit la consommation de la ville de Nantes²⁶. Durant la canicule 2013, une hausse de près de 2 000MW de la consommation électrique est enregistrée²⁷. Cependant, c'est lors de périodes hivernales extrêmes que la consommation électrique est la plus importante.

2.2.3. Risque économique

La canicule a aussi des conséquences sur l'économie. En effet, les fortes températures et le manque de précipitations affectent directement le secteur agricole. Le pourcentage de fourrage mais aussi la production céréalière diminuent fortement.

²⁴ Rapport de l'ONEMA : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques

²⁵ L'eutrophisation est définie par la détérioration d'un écosystème aquatique par la prolifération de certains végétaux (algues)

²⁶ Communiqué de presse, le 4 juin 2015, Le réseau de l'intelligence électrique

²⁷ Source : Réseau de Transport d'Electricité RTE

Lors de la canicule 2003, les pertes de la production céréalière (par rapport à l'année 2002) sont de l'ordre de 10%, soit une perte de 10 à 11 milliards d'euros (De Bonot *et al.*, 2004).

2.2.4. Populations touchées

Lors d'épisodes caniculaires, certaines personnes sont plus vulnérables que d'autres. Les personnes les plus fragiles et les plus vulnérables peuvent être catégorisées selon certains critères. Cela dépend principalement de leur âge, de leur condition physique mais aussi de leur lieu de travail. Tous les épisodes récents de canicule montrent que les victimes sont, pour la majorité des cas, des personnes âgées. Ces dernières, en plus de leur fragilité, n'éprouvent pas la sensation de chaleur et ne ressentent donc pas le besoin de se protéger et de s'hydrater. Chez les personnes âgées, une élévation proche de 5°C de sa température cutanée est évaluée contre 0,5°C chez un adulte plus jeune, pour une même augmentation de température de l'air. La transpiration est peu présente chez les personnes âgées et le corps a donc du mal à se maintenir à 37°C et celles-ci peuvent avoir une température supérieure à 40°C. En 2003, les personnes âgées de plus de 75 ans représentant moins de 6 % de la population francilienne, constitue plus de 80 % des personnes décédées d'hyperthermie à l'hôpital pendant la première quinzaine d'août, lors de la canicule 2003.

Les personnes ayant des problèmes respiratoires, cardio-vasculaires ou des pathologies psychiatriques sont aussi des personnes vulnérables lors de fortes chaleurs (Laaidi *et al.*, 2015). De plus, les personnes exposées à la chaleur, par exemple les personnes travaillant sur des chantiers, sont aussi en danger lors de canicule en raison du risque de déshydratation.

Depuis 2003, afin de faire face à un risque de canicule, les villes françaises se mobilisent pour assurer la sécurité des personnes vulnérables. Cette sécurité passe par la mise en place d'une période de veille saisonnière (entre le 1^{er} juin et le 31 août) développée dans le Plan National Canicule (PNC).

Plusieurs risques sont liés à la canicule. Les risques sanitaires et sociaux, environnementaux et économiques. Le risque sanitaire est défini comme l'exposition d'une personne à une température extérieure élevée entraînant de graves complications voire le décès. Les personnes âgées sont les plus vulnérables.

2.3. Plan Canicule

Différents systèmes de prévention de vagues de chaleur sont développés à l'échelle locale ou régionale (Kalkstein *et al.*, 1996; Michelozzi, 2004; World Health Organization Europe, 2003; US EPA, 2006) au niveau mondial. Un grand nombre de villes du Canada mais aussi des Etats-Unis développent leurs propres plans d'action afin de faire face aux épisodes de canicules. Ces plans sont tous différents et leur utilisation n'est possible que dans le pays natif, puisque la définition des seuils d'avertissement et d'alerte est caractéristique du pays concerné. Une des difficultés principales pour la mise en place de ces plans concerne le choix des indicateurs d'alerte et la définition du seuil d'alerte. Ces différents indices biométéorologiques sont développés pour mesurer la sensation de chaleur ressentie par le corps humain.

En France, pour mieux répondre et agir face aux effets et aux conséquences des vagues de chaleur, le ministère chargé de la Santé développe un Plan National Canicule (PNC), qui intègre un Système d'Alerte Canicule et Santé (SACS), après la canicule vécue par la France durant l'été 2003. Ce système

d'alerte est conçu par l'Institut national de Veille Sanitaire (InVS) en collaboration avec Météo-France. L'objectif de ce plan est de définir des actions (à moyen et long termes) dans les domaines de la prévention et de la gestion de crise. Ces actions ont pour but de réduire les effets sanitaires et les conséquences mortelles. Les scénarii de prévention sont évalués et évoluent constamment afin de s'adapter aux changements.

2.3.1. Principe et objectifs

Pour identifier l'impact d'une vague de chaleur et ses potentielles conséquences sanitaires, le SACS est développé. Son objectif est la mise en place de mesures de prévention et de gestion de l'événement plus rapide et plus efficace. Une évaluation des deux risques (météorologique et sanitaire) est conjointement réalisée par Météo-France et l'InVS. Ce dernier assure une surveillance sur la situation sanitaire (basée sur des indicateurs de mortalité et de morbidité) et Météo-France prévoit les risques de dépassement des seuils des températures (propres à chaque département métropolitain) sur une période minimale de trois jours.

2.3.2. Niveaux d'alerte²⁸

Le PNC, mis en place en 2004 permet de prévenir les impacts sanitaires majeurs lors d'épisodes de vague de chaleur. Il met en place des actions pour protéger les personnes vulnérables en cas de fortes chaleurs. Ce plan se décline au niveau départemental (PGCD : Plan de Gestion d'une Canicule Départementale) et prévoit des mesures d'information, de prévention et de gestion de crise. Cette graduation du PNC s'appuie sur le SACS²⁹. Les niveaux 2, 3 et 4 entraînent des actions de réponses graduées. Ils sont fondés sur des seuils biométéorologiques départementaux (Annexe 1). La carte est construite sur quatre niveaux progressifs (Fig. 1.10).

La carte de vigilance signale si un danger menace un ou plusieurs départements dans les vingt-quatre heures à venir à l'aide de quatre couleurs (vert, jaune, orange, rouge). Ces couleurs indiquent le niveau de vigilance. Cette carte est disponible en permanence sur le site internet de Météo-France (<http://vigilance.meteofrance.com/>). La carte se destine à l'ensemble de la population française. Le pictogramme de la canicule apparaît dès le niveau orange.

²⁸ Basés sur le rapport du Plan de gestion d'une canicule départementale (juin 2014)

²⁹ Système d'Alerte Canicule et Santé

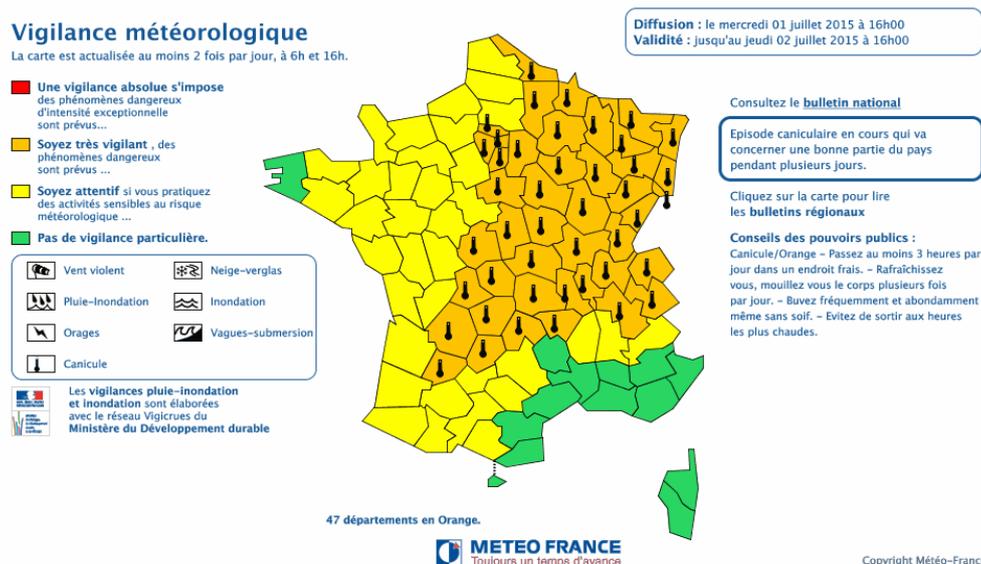


Figure 1.10 : Carte de vigilance météorologique caniculaire (période du 1^{er} au 2 juillet 2015) Météo-France®

Les niveaux du PNC sont en cohérence avec les couleurs de la vigilance (Tab. 1.1) :

Carte de vigilance	Niveaux du PNC
Vert	<i>niveau 1 : veille saisonnière</i>
Jaune	<i>niveau 2 : avertissement chaleur</i>
Orange	<i>niveau 3 : mise en garde et actions : alerte canicule</i>
Rouge	<i>niveau 4 : mobilisation maximale</i>

Tableau 1.1 : Tableau des correspondances entre la carte de vigilance et les niveaux du PNC (4 niveaux)

- Le *niveau de veille saisonnière* comporte la mise en œuvre d'un dispositif d'information préventive. Il est déclenché automatiquement et est opérationnel du 1^{er} juin au 31 août. Ce niveau a pour objectif de vérifier la fonctionnalité des interfaces d'alerte, mais aussi le repérage des personnes vulnérables, à différentes échelles. Le préfet peut informer les maires sur les pratiques en matière d'assistance et de soutien aux personnes isolées.
- Le *niveau d'avertissement chaleur* (carte vigilance jaune) correspond à trois situations : un pic de chaleur ponctuel limité à 2 jours, à des IBM³⁰ proches des seuils, avec des prévisions météorologiques annonçant une intensification de la chaleur. Le préfet du département est informé par l'ARS (Agences Régionale de Santé) des dispositions prises. Il s'agit d'une première mobilisation des services publics locaux et nationaux (secteur sanitaire et sociale). Pour la troisième situation (IBM proches des seuils avec des prévisions météorologiques annonçant une intensification de la chaleur), les acteurs locaux sont informés par la préfecture des risques et sont invités à prévoir un dispositif plus large en vue du déclenchement du niveau 3.

³⁰ Indices BioMétéorologiques : définis et expliqués dans la partie 3.3.2.7

Analyse bibliographique

- Le *niveau de mise en garde et actions* (Miga) est corrélé à la vigilance orange canicule de Météo-France. Il correspond à un dépassement des seuils biométéorologiques pendant plus de 3 jours. Le COmité de Gestion Interministériel des Crises (COGIC) centralise les informations et diffuse les instructions dans les départements concernés. Il évalue la situation et les mesures mises en place, quelques heures après le déclenchement de l'alerte. Ce niveau 3 est déclenché, maintenu ou levé par les préfets des départements visés avec l'appui de l'ARS et sur l'expertise locale de Météo-France (Fig. 1.11). Les services locaux et nationaux mettent en œuvre des mesures sanitaires et sociales d'information et de prise en charge des personnes. Une remontée d'information des mesures mises en œuvre par le préfet et les collectivités territoriales est renseignée au plus tard pour 17h. Une diffusion des messages aux ARS et aux partenaires est faite par la DGS (Direction Générale de la Santé) sur les mesures mises en place et les informations nécessaires à l'efficacité du plan.

Lorsque les situations météorologiques et sanitaires sont vues à la baisse, le préfet décide, en lien avec l'ARS un retour au niveau 2 (Fig. 1.12). L'information relative au changement de niveau est communiquée via le portail ORSEC (ORganisation des SECours) ainsi qu'aux acteurs concernés.

- Le *niveau de mobilisation maximale* (carte de vigilance rouge) est déclenché au niveau national par le premier ministre. Il peut « confier la conduite opérationnelle de la crise à un ministre qu'il désigne en fonction de la nature des événements, du type de crise ou de l'orientation politique qu'il entend donner à son action »³¹. Alors, des mesures exceptionnelles sont mises en œuvre afin de faire face à l'événement. Lorsque les températures baissent, le niveau 4 peut être maintenu pour des raisons autres que météorologiques alors que la carte vigilance sera d'une couleur autre que rouge. La levée du dispositif est décidée par le Premier ministre. Cette information est communiquée aux départements et acteurs concernés.

³¹ Circulaire de 2 janvier 2012 relative à l'organisation gouvernementale pour la gestion de crises majeures

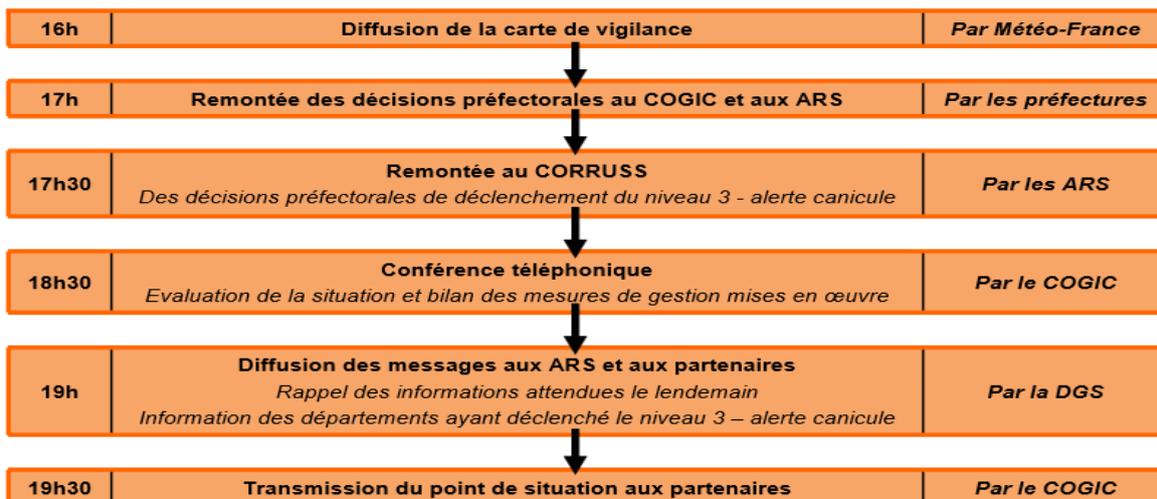


Figure 1.11 : Schéma de déclenchement de l'alerte canicule



Figure 1.12 : Schéma de maintien ou levée de l'alerte canicule

Ainsi, ce plan intègre une multitude d'organismes et d'acteurs nationaux, mais aussi une fiche d'actions pour chacun d'eux, des messages d'informations types, etc.

Le PNC, développé après la canicule 2003 anticipe l'arrivée d'une canicule et définit les actions à mettre en place à différents niveaux d'interventions. Il existe 4 niveaux d'alerte. Ces niveaux sont diffusés par Météo-France sur une carte de vigilance. Le SACS, inclus dans le PNC, est un système de surveillance et d'alerte pour identifier les vagues de chaleurs et leurs impacts sanitaires.

2.3.3. A l'international

Chaque pays a son propre système d'alerte avec ses caractéristiques. A l'échelle européenne et mondiale, il existe aussi des systèmes d'alerte, ou/et des indices globaux. En Europe, le projet Euroheat (Regional Office for Europe) permet de les recenser et de les comparer pour les évaluer. De plus, au niveau international/ des comparaisons avec des mêmes jeux de données sur quatre types de système d'alerte (synoptique aux Etats-Unis, moyennes de températures en France, température

perçue en Allemagne, Humidex au Canada) montrent qu'il y a peu de cohérence entre les jours considérés à risque par les différents systèmes et que globalement le SACS donne de bons résultats (Hajat S. *et al.*, 2010). Cela permet de confirmer que les indicateurs du SACS sont performants dans l'identification des jours associés à une surmortalité importante.

3. Confort thermique

Le bien-être de la personne devient une notion et un sujet de plus en plus présent dans les domaines de la santé, de l'énergie mais aussi de la climatologie. Cet intérêt se fonde sur les rapports d'échanges qu'entretient l'homme avec son environnement, qu'il soit naturel ou construit. Il va de soi qu'à l'extérieur ou à l'intérieur, on souhaite un certain confort thermique. Cependant, l'addition entre l'urbanisation massive, l'augmentation de la population, l'effet de chaleur urbain et les phénomènes climatiques extrêmes de plus en plus fréquents, n'aident pas à maintenir ce confort souhaité. Dans le cadre du bâti, le confort est lié aux conditions d'ambiances intérieures et/ou extérieures. Cette partie a donc pour objectif de définir ce confort et de lister quelques normes (cadre réglementaire) et indices en matière de confort thermique autant à l'intérieur qu'à l'extérieur d'un bâtiment.

3.1. Une notion difficile à cadrer

La notion de confort est complexe puisqu'elle fait intervenir une sensation de bien-être par rapport à un sens. C'est pour cela que l'on parle de confort visuel, acoustique, thermique et olfactif. Seul le confort thermique nous intéresse. Dans la littérature, une multitude de définitions du confort thermique existe. Cependant, comme le démontre Depecker *et al.*, (1989), il n'existe pas une définition universelle du confort thermique ; en d'autres termes la sensation de confort thermique reste une notion subjective, dans la mesure où les individus sont différents et vont donc avoir un jugement divergent sur le ressenti de la chaleur.

3.1.1. Subjectivité et évolution du terme

L'expression « confort thermique » est depuis longtemps utilisée. A l'époque de Socrate, le confort thermique dans les bâtiments existait déjà. Il rappelait le bienfait de la bonne configuration spatiale du bâtiment. Il évoquait la bonne orientation des pièces à vivre, au soleil de midi, afin de profiter des apports solaires l'hiver et de conserver une température fraîche pendant les périodes estivales. L'étude scientifique du confort thermique débute à partir du XX^{ème} siècle seulement. Haldane en 1905 propose une première tentative d'intégrer dans une même valeur plusieurs paramètres de l'ambiance thermique. Yaglou en 1927 définit un indice empirique sur des bases psycho-physiques avec l'indice « Effective Temperature ».

C'est à partir de 1970 et avec les travaux de Fanger que l'étude du confort thermique explose. Ses recherches contribuent fortement à l'évolution de nouvelles connaissances. Il est cité aujourd'hui dans de nombreux ouvrages pour la détermination des paramètres (influençant le confort thermique) ainsi que des normes. Ainsi, Fanger, en 1973, définit le confort thermique comme subjectif en précisant qu'une même ambiance climatique, en même temps, n'est pas perçue et ressentie de la même manière par tous les individus présents. Le bien-être est propre au ressenti de chaque personne.

Slater K. (1985) indique que « le confort est un terme si nébuleux à définir, et si subjectif, qu'un consensus universel sur son sens est presque impossible à obtenir ». Toutefois, il le définit comme étant « *un état agréable d'harmonie physiologique, psychologique et physique entre un être humain et l'environnement* ».

Enfin, si on se base sur la norme 55-56 de 1966 (de la société ASHRAE), la notion de subjectivité est encore présente. Cette norme définit le confort thermique d'une personne comme « l'état d'esprit de satisfaction par rapport à l'environnement thermique » (that condition of mind which expresses satisfaction with the thermal environment).

Ainsi, de par ces premières définitions, on peut appréhender le confort comme une notion subjective et étroitement liée à la sensation de bien-être et ne possédant pas de définition arrêtée. De plus, la notion de confort est en perpétuelle évolution. Elle n'est pas figée dans le temps et dans l'espace. Cette notion évolue dans le temps (selon les périodes), varie selon les sociétés (culture, représentations sociales, etc.) et se distingue géographiquement (selon les régions). Le confort est une construction culturelle s'élaborant et se transformant selon les mythes et les valeurs dominantes de la culture dans laquelle il se déploie (Belakenal 2012).

3.1.2. Cadre réglementaire

Au niveau réglementaire, plusieurs articles du code du travail traitent directement ou indirectement du problème des ambiances thermiques. Il est alors possible de se référer à un ensemble de normes. Les normes disponibles, élaborées par des scientifiques et des ergonomes constituent des recommandations. Il existe un grand nombre d'indices et de normes permettant d'évaluer et d'objectiver la contrainte thermique³² et non le confort thermique. Au niveau mondial il existe plus de 60 indices référencés. Les normes ISO, relatives à l'ergonomie de l'environnement thermique se divisent en trois catégories : les environnements chauds, modérés et froids. Le tableau 1.2 résume les principales normes françaises (NF EN ISO) en fonction des trois environnements. Pour l'environnement chaud, les normes NF EN 27243 et 12515 sont citées dans la majorité des rapports. Elles se basent sur les contraintes thermiques. La norme NF ES ISO 11079 s'applique pour les ambiances froides. Elle interprète la contrainte liée au froid en utilisant l'isolement thermique requis des vêtements. L'ambiance modérée regroupe deux principales normes : la norme NF EN ISO 7730 et 10551. Ces normes traitent de l'ergonomie des ambiances thermiques.

³² Exposition de l'Homme à des conditions susceptibles de créer un risque pour sa sécurité ou sa santé en raison de la chaleur ou du froid. La valeur limite d'exposition pour les contraintes thermiques est établie par l'ACGIH (Association Advancing Occupational and Environmental Health dans sa publication : Threshold Limit Value for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Indices

Environnement CHAUD	Environnement MODERE	Environnement FROID
<p>27243 : (1994) Température de bulbe humide, estimation de la contrainte thermique de l'homme au travail (basé sur l'indice WBGT). Il est, aussi, utilisé par la FIFA lors de match internationaux (pour reporter le match)</p> <p>12515 : Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de la sudation requise</p>	<p>7730 : (2006) : prévision de la sensation thermique générale et du degré d'inconfort. Détermination des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique</p> <p>10551 : (2001) Evaluation de l'influence des ambiances thermiques à l'aide d'échelles de jugement subjectif</p> <p>15265 : Stratégie d'évaluation du risque pour la prévention de la contrainte ou de l'inconfort dans des conditions de travail thermiques</p>	<p>11079 : (2008) : évaluation de la contrainte thermique liée au froid. Détermination de l'isolement vestimentaire requis (IREQ)</p>

Tableau 1.2 : Récapitulatif des normes internationales existantes relatives au confort thermique (d'après le site Santé Sécurité au travail dans les fonctions publiques : <http://www.intefp-sstfp.travail.gouv.fr/>)

Pour mieux comprendre le confort, on décide de se référer à la norme ISO 7730 puisqu'elle appartient aux environnements modérés et qu'elle est la plus proche de notre étude. De plus, elle présente des méthodes de prévision de la sensation thermique générale et du degré d'inconfort (dans des environnements thermiques modérés). Elle prescrit aussi les conditions d'ambiances thermiques acceptables pour le confort des personnes en bonne santé. Selon cette norme, on peut dire qu'il y a situation de confort si deux conditions sont satisfaisantes :

- le bilan thermique de l'individu est équilibré sans que le corps ne soit trop sollicité par ses mécanismes autorégulateurs
- Il n'existe pas d'indicateurs d'inconforts locaux dus :
 - à la sensation de courant d'air
 - à l'asymétrie du rayonnement
 - au gradient vertical de température
 - à la température du sol

3.1.3. Paramètres et critères du confort thermique

Le confort thermique résulte d'une interaction entre les paramètres microclimatiques et les paramètres relatifs à l'individu, ainsi que des facteurs contributeurs (Auliciems et Szokolay, 1997), (Norme ISO 7730). Ces paramètres sont récapitulés dans le tableau 1.3.

Facteurs climatiques	Température (air ambiant, des parois et ressenti), rayonnement, humidité relative (se mesure en pourcentage), mouvement d'air (il réduit la température ressentie puisqu'il accélère les échanges thermiques), vitesse de l'air...
Facteurs personnels	Métabolisme, habillement
Facteurs contributeurs	Alimentation, boisson, acclimatation, forme corporelle, âge, sexe...

Tableau 1.3 : Facteurs intervenant dans le confort thermique (d'après Auliciems et Szokolay, 1997)

Le confort hygrothermique est caractérisé par les valeurs suivantes (pour une personne au repos)³³ :

- en confort d'hiver : $T_{\text{air}} \sim 20^{\circ}\text{C}$ pour une humidité de 40 à 60%
- en confort d'été : $T_{\text{air}} \sim 25^{\circ}\text{C}$ si la température extérieure est inférieure à 30°C
en confort d'été : $T_{\text{air}} = (T_{\text{ext}} - 5^{\circ})$ si la température extérieure est supérieure à 30°C
- en différence de température de surface des parois et la température ambiante ne doivent pas dépasser 8°C pour les parois vitrées et 5°C pour les parois opaques (avec une base de température extérieure de 0°C)
- la vitesse de l'air ne doit pas dépasser 0.3 à 0.5m/s

Une zone de confort est établie (Fig. 1.13) :

- zone 1 : à éviter au niveau des problèmes de sécheresse
- zone 2 : à éviter pour le développement des bactéries et champignons
- zone 3 : à éviter pour le développement des acariens
- zone 4 : polygone de confort hygrothermique

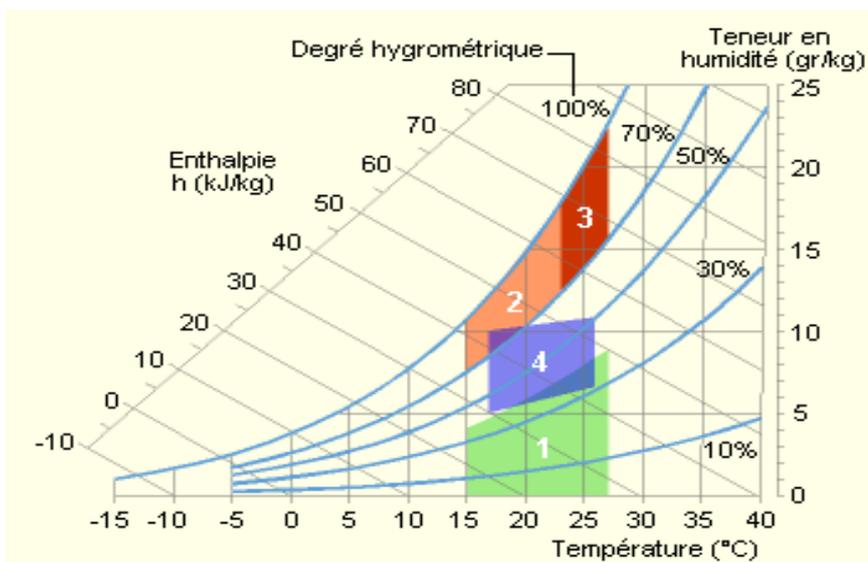


Figure 1.13 : Zone de confort (établie par le COSTIC³⁴, d'après le Memento Technique du bâtiment : le confort thermique ; Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, juillet 2012

³³ Memento Technique du bâtiment : le confort thermique ; Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, juillet 2012

³⁴ Génie Climatique et de l'Équipement Technique du Bâtiment

Analyse bibliographique

Pour Fanger (1973) le confort thermique dépend des 6 paramètres présentés ci-dessous.

3.1.3.1. La température ambiante de l'air (T_a)

La température ambiante de l'air T_a fait partie des paramètres météorologiques. Ce terme désigne la température de l'air mesurée à l'abri de tout rayonnement.

3.1.3.2. La température moyenne radiante des parois (T_p)

La température moyenne radiante des parois T_p (et les asymétries de rayonnement des parois froides/chaudes) représente la moyenne des températures de surface des parois entourant une personne. Le rayonnement solaire transmis à travers les parois vitrées est aussi pris en compte. Ce paramètre a un impact sur le niveau de confort thermique (surtout dans les espaces ouverts urbains). Ce critère intègre les flux de courte et de grande longueur d'onde absorbés par le corps humain. Ils influencent le bilan énergétique de la personne. Cette température radiante peut être contrôlée. Pour cela, il est nécessaire de choisir des matériaux de construction et les agencer de façon à obtenir une paroi présentant un coefficient de conductibilité thermique valable (≤ 1.2). Un bon confort thermique nécessite que la différence de température entre la paroi et l'air ambiant ne dépasse pas les 5°C.

3.1.3.3. L'humidité relative de l'air (HR)

Le troisième paramètre fait référence aussi à un paramètre météorologique. L'humidité relative de l'air (HR ou pression de vapeur d'eau dans l'air) est définie par le rapport (en %) entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température T_a (pression partielle de vapeur d'eau de l'air) et la quantité maximale d'eau contenue à la même température (pression de vapeur d'eau saturante de l'air) :

$$\text{Humidité relative} = \frac{P_{vap}}{P_{vap}^{sat}} \quad (3)$$

Plus la masse d'air est chaude, plus elle peut absorber de vapeur d'eau. L'air ambiant peut contenir de la vapeur d'eau de 0 à 100%. L'individu ressent un inconfort de 30°C, alors qu'il ne fait que 20°C lorsque l'humidité relative est de 60%. En effet, une forte humidité relative est difficilement supportable pour le corps humain puisqu'elle empêche la transpiration naturelle du corps (Balandraux. M., 2007). L'humidité relative ambiante influence ainsi la capacité de notre corps à éliminer une chaleur excédentaire.

3.1.3.4. La vitesse relative de l'air

La vitesse relative de l'air influence les échanges de chaleur par convection. Cette vitesse représente le déplacement de l'air sur un corps humain. Les mouvements d'air présents modifient les échanges dus à la convection entre le corps et son environnement. De cela résulte des sensations de froid. Cependant, ces sensations sont très évolutives et aléatoires, car elles dépendent fortement du niveau d'activité ainsi que du climat et de la saison. Pour exemple, dans un bâtiment, les vitesses de l'air ne dépassent généralement pas les 0.2m/s, en dessous de cette valeur, l'impact sur le confort des occupants est négligeable. La vitesse de l'air a donc un impact important sur la température de l'air (par convection) et sur l'humidité de l'air (par évaporation). Les courants d'air (par exemple générés par un ventilateur) réduisent la sensation de chaleur.

3.1.3.5. Le métabolisme

Le métabolisme définit l'ensemble des transformations physico-chimiques ayant lieu dans un organisme vivant ; comme tout être vivant, à sang chaud, l'homme conserve une température interne quasi constante, malgré les fluctuations de températures extérieures. Le métabolisme est le mécanisme interne du corps humain permettant de maintenir celui-ci autour de 36,7°C. Le métabolisme dépend des caractéristiques de chaque personne : taille, poids, sexe, âge et activité thyroïdienne. Le métabolisme correspond aux besoins essentiels de l'organisme. Pour une personne moyenne de 70Kg et 1.70m, la valeur est de 80W³⁵ pour un corps au repos et jusqu'à 700W pour un métabolisme au travail et dépend du sexe et de la pénibilité du travail.

3.1.3.6. L'habillement

L'habillement représente une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement. Il rajoute au corps humain une isolation thermique. Cela entraîne une diminution de la température de surface en contact avec l'air ambiant. Le but essentiel des vêtements est donc de créer un microclimat. Les vêtements courants sont perméables à la vapeur d'eau et restent sans incidence sur la transpiration. Les tenues vestimentaires sont évaluées par leur résistance thermique, c'est-à-dire leur aptitude à s'opposer au passage de la chaleur.

3.1.4. Bilan thermique

Le corps échange de la chaleur avec son environnement à travers plusieurs mécanismes différents (conduction, convection, rayonnement). Mais il ne faut pas oublier également que le corps produit lui-même de l'énergie thermique, après un effort sportif par exemple. Ainsi, 5 modes de transmission sont possibles pour réduire la chaleur intérieure de la personne (Liébard A. et De Herde A., 2005) :

- la **respiration (évaporation)**, est le premier mode de transmission permettant une perte de chaleur. En effet, la circulation d'air ambiant à l'intérieur de nos poumons permet de réduire la chaleur interne. Elle est proportionnelle au métabolisme et donc aux caractéristiques d'une personne, puisque cette perte de chaleur est directement proportionnelle au débit d'air respiré. A une activité normale en intérieur, cette perte reste faible, de l'ordre de 3 à 10W
- le deuxième mode est dû à la **transpiration** résultant de la sueur. Cette transpiration permet de diminuer notre température corporelle puisque la sueur traverse la peau et s'évapore à sa surface
- la **convection**, autre mode de transmission, est définie par le contact entre l'air ambiant et la peau ou les vêtements. Les mouvements de convection facilitent l'élimination de la sueur et donc le refroidissement extérieur du corps. Ce mode dépend directement de la vitesse relative de l'air par rapport au corps humain. Ainsi, si la vitesse relative est nulle, la convection le sera également
- le **rayonnement** se produit de la surface de la peau ou des vêtements vers les surfaces froides environnantes. Un échange inverse et simultané peut être présent si la température de la surface est supérieure à celle de la peau ou des vêtements

³⁵ 1 cal = 4,18J ; 1 kcal/min = 4,18*1000/60 = 80W

Analyse bibliographique

- la **conduction**, la chaleur quitte le corps par les parties en contact avec des surfaces froides. Ce mode de transfert a une influence plus faible que les précédents. En effet, l'homme n'a généralement que ses pieds en contact avec le sol ce qui représente une infime partie refroidissant le corps

Le corps doit dissiper la totalité de la quantité de chaleur interne produite par son métabolisme afin d'avoir un équilibre thermique. Cet équilibre est atteint lorsque le bilan est nul (charge thermique). Le bilan thermique humain est défini comme suit (Najjar, 2014) :

$$M + W + R + C + E_D + E_{R-E} + E_{S-W} + S = 0 \quad (4)$$

- M : le niveau de métabolisme (production interne d'énergie)
- W : l'activité physique
- R : Le rayonnement solaire
- C : le flux de chaleur dû à la convection et les flux de chaleur latente
- E_D : le flux de chaleur latente
- E_{R-E} : la somme des flux de chaleur pour le chauffage et l'humidification de l'air inspiré
- E_{S-W} : le flux de chaleur dû à l'évaporation de la sueur
- S : le flux d'énergie pour chauffer ou rafraîchir le corps (chaleur stockée). Par exemple si S est supérieur à 0, alors la température du corps aura tendance à dépasser légèrement les 37°C et inversement

L'énergie interne produite par le corps (M) moins le travail externe (W) sont évacués dans le milieu environnant par la respiration (C_{res} ; E_{res}) et au niveau de la peau par les échanges de chaleur par conduction (K), par convection (C), par rayonnement (R) et par évaporation (E).

Le sens des échanges thermiques est en fonction de la différence de température. Cela veut dire qu'il y a des déperditions (négatif), si la température opérative est inférieure à la température cutanée, sinon ce sont des gains thermiques (positif) qui s'ajoutent à l'homme. Ainsi, on parlera d'équilibre thermique lorsqu'un individu peut avoir un bilan thermique nul en faisant intervenir des réactions de thermorégulation.

C'est à partir de ce bilan thermique que Fanger développe des indices à l'origine élaborés pour des bâtiments ventilés mécaniquement. Ce scientifique met au point deux indices, toujours utilisés aujourd'hui pour quantifier le confort des usagers dans un bâtiment : PMV (Predicted Mean Vote) et le PDD (Predicted Percentage of Dissatisfied).

De par les différentes définitions et normes, on définit le confort thermique comme une fonction de divers paramètres imposés par le milieu (température, humidité, etc.) ou propre aux individus (métabolisme, âge, etc.). Les conditions climatiques ont une grande influence sur la santé et la longévité de l'homme (comme souligné pour les risques sanitaires dus à la canicule). Huntington, en 1924, était l'un des premiers chercheurs à énumérer les effets du climat sur le développement de la civilisation. La conclusion est que la santé de l'homme est optimale à une température et à une humidité relative données. Dans le même sens, Markham (1947) démontre que les conditions climatiques idéales ne sont pas étrangères à l'occurrence des premières civilisations d'Égypte et de Palestine.

Les conditions climatiques et microclimatiques imposées par le milieu ne sont donc pas les seules à influencer le confort thermique qui dépend aussi de plusieurs autres facteurs psychologiques et physiologiques. Le corps cherchera à rétablir un équilibre s'il est trop exposé aux conditions extérieures par des mécanismes de transpiration, par exemple. Ce réajustement de la température interne du corps est produit par deux procédés bien distincts. Le premier est dit comportemental (changement de posture, de vêtements, etc.), le second est physiologique (frissons, transpiration, etc.). Toutefois, il est difficile de définir des conditions « optimales » puisque les paramètres physiques, physiologiques et psychologiques varient d'un individu à l'autre.

3.2. Le rôle de la thermique du bâtiment dans le confort

3.2.1. L'inertie thermique

L'inertie thermique est un facteur important du confort thermique intérieur. Elle est définie comme la capacité d'un matériau à stocker l'énergie, traduite par sa capacité thermique. Le matériau met plus ou moins de temps à se refroidir ou à se réchauffer en fonction de sa caractéristique. Plus l'inertie est importante et plus le matériau va restituer des quantités importantes de chaleur (ou de fraîcheur) avec un décalage horaire par rapport aux variations thermiques extérieures. Cette capacité du matériau permet d'atténuer les variations de températures extérieures, permettant ainsi de limiter un refroidissement ou une surchauffe trop importante à l'intérieur. Cependant, elle n'est pas toujours adaptée. L'inertie permet de stabiliser les amplitudes journalières de températures intérieures face aux oscillations des températures extérieures.

Pour mieux utiliser l'inertie du bâtiment, il faut s'intéresser à la diffusivité thermique. Cette dernière représente la vitesse de réponse des matériaux à transmettre une variation thermique (Fig. 1.14).

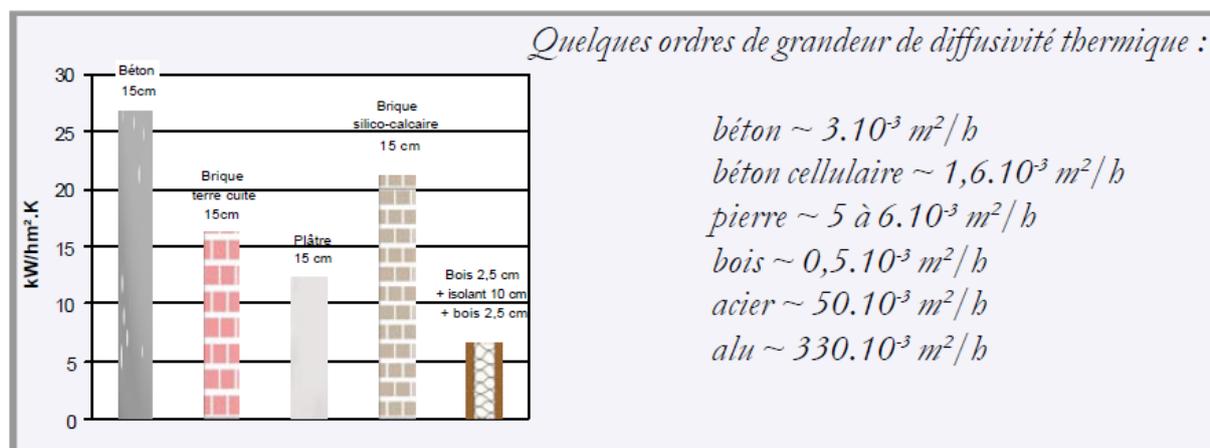


Figure 1.14 : Ordres de grandeurs de diffusivité thermique (Memento Technique du bâtiment : le confort thermique ; Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, juillet 2012)

3.2.2. L'effusivité thermique

L'effusivité thermique est la rapidité avec laquelle la température superficielle d'un matériau s'élève. Plus elle est élevée, plus le matériau absorbe rapidement les apports de chaleur (interne et externe). Ainsi, dans un climat tempéré à froid, les revêtements à effusivité faible sont plus appréciés comme le bois. En fonction du matériau utilisé dans la construction du logement, la grandeur de l'effusivité thermique change (Fig. 1.15).

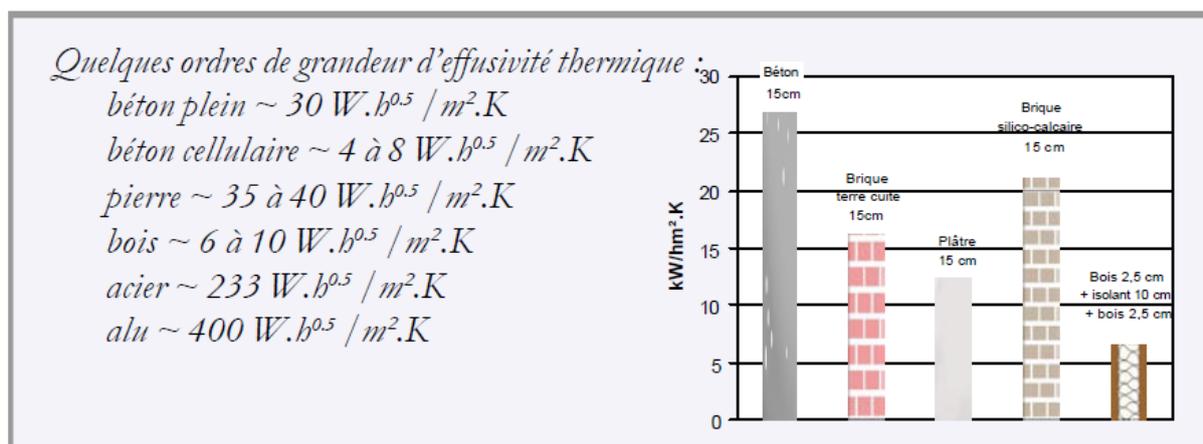


Figure 1.15 : Ordres de grandeur d'effusivité thermique (Memento Technique du bâtiment : le confort thermique ; Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, juillet 2012)

3.2.3. Simulation du confort d'été

Le confort d'été dans les logements est une préoccupation majeure face à l'augmentation des températures en période estivale, surtout dans les centres urbains. La notion de confort thermique est subjective. En effet, la sensation de fraîcheur et de chaleur varie, selon l'occupant et de multiples facteurs, comme la température opérative. Cette dernière correspond à la moyenne de la température de l'air et de la température des surfaces de la pièce. Dans les appartements, cette température opérative est influencée par :

- les apports solaires à travers les surfaces vitrées
- la transmission de chaleur à travers les murs et la toiture
- le renouvellement d'air
- les sources de chaleur interne
- la masse thermique accessible
- d'éventuels systèmes de refroidissement

Le CSTB³⁶ réalise une simulation thermique dynamique dans un séjour, pour un appartement en période estivale. Cette simulation permet de montrer différents scénarii de températures en fonction de la rénovation ou non de l'appartement et de la protection solaire. Celle-ci se définit par toutes les techniques permettant de limiter l'entrée excessive d'énergie solaire, allant de l'ombrage des arbres aux stores fixes. Le CSTB se base sur la température opérative, se rapprochant le plus de la température ressentie par les occupants.

Ces différentes simulations sont réalisées sur un immeuble de type haussmannien, avec une surface de séjour de 35m² dans un logement à double exposition d'environ 80m². Pour correspondre à la moyenne des appartements, le taux des surfaces vitrées n'est pas surdimensionné, avec 3 fenêtres de 2m². Les apports solaires sont en conséquence relativement faibles. Dans cette simulation, le CSTB suppose que les fenêtres sont ouvertes de 17h à 7h du matin (pour une surventilation nocturne) ou seulement de 17h à 22h. De plus, les simulations prennent en compte la présence d'occupants entre 17h et 22h et les apports internes dégagés par l'utilisation d'appareils électriques

³⁶ Guide ABC : Amélioration thermique des bâtiments collectifs construits de 1850 à 1974. EDIPA, 2011, 350 p

(télévision, téléphone, etc.) soit une consommation moyenne de 140W. L'appartement est traversant avec des fenêtres ouvertes de chaque côté du logement.

3.2.3.1. Simulation dans un immeuble : état initial

Par cette simulation thermique (Fig.1.16), on constate des comportements différents des températures en fonction de la ventilation et des protections solaires. Trois courbes de températures mettent en évidence les différents scénarii :

- Protection solaire intérieure avec surventilation nocturne (courbe mauve) : ici, les apports solaires sont importants et font augmenter la température diurne de la pièce. De nuit, par la surventilation, la température refroidit ; cependant dû à l'inertie, une hausse de la température apparaît dès le troisième jour.
- Protection solaire extérieure sans surventilation nocturne (courbe violette) : par cette courbe, on constate que la température de la pièce croît tout au long de la journée mais elle augmente moins vite que sur la première courbe. Cependant, sans surventilation, les parois extérieures ont du mal à refroidir suffisamment la masse thermique afin de baisser la température à l'intérieur du logement. Une faible amplitude des températures est notable.
- Protection solaire extérieure avec surventilation nocturne (courbe rose) : tout comme les variantes précédentes, la température augmente mais elle est moins prononcée. Pendant la nuit, la masse thermique va se refroidir, grâce à la surventilation. On retrouve une amplitude moyenne d'environ 5°C entre le jour et la nuit.

La température intérieure, avec une protection solaire sans ventilation, n'est pas représentée puisque l'on obtiendrait des températures au-delà des 30°C.

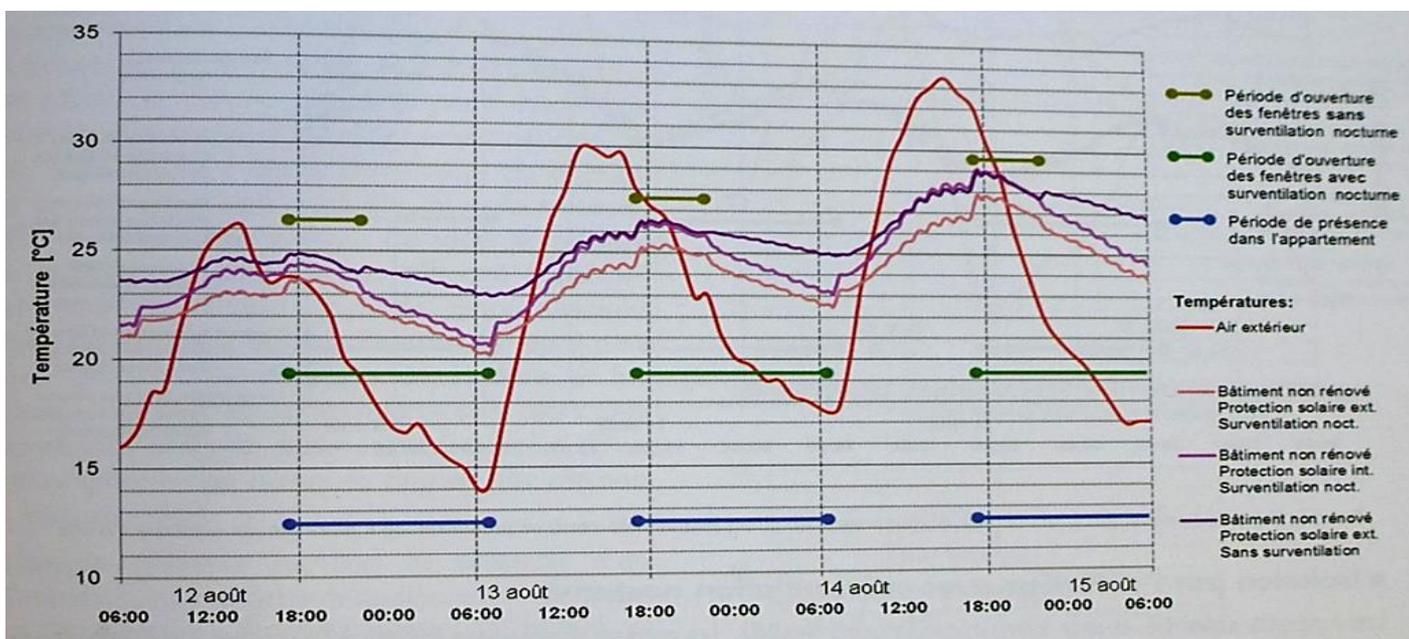


Figure 1.16 : Graphique représentant les températures sur des scénarii dans un immeuble non rénové. Source Guide ABC, CSTB

3.2.3.2. Simulation dans un immeuble rénové

Une deuxième simulation est réalisée (en conservant les mêmes variantes) mais sur un appartement rénové et donc isolé (Fig. 1.17). Toutes les variantes enregistrent des courbes de températures similaires, c'est-à-dire avec une hausse des températures en journée et une baisse pendant la période nocturne, avec une amplitude moyenne de 5,5°C entre le jour et la nuit. Une courbe se distingue des 4 premières, c'est la courbe marron (isolation extérieure et sans surventilation nocturne). L'appartement stocke la chaleur et sa masse thermique n'est pas déchargée durant la nuit.

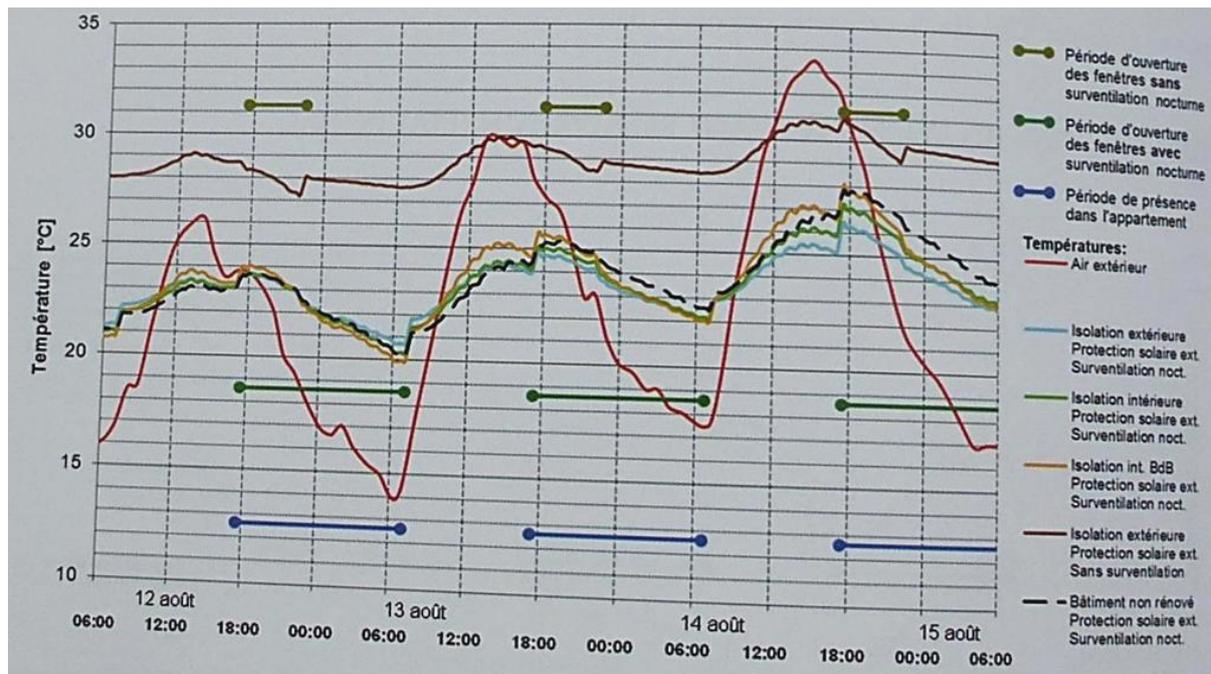


Figure 1.17 : Graphique représentant les températures sur des scénarii dans un immeuble rénové. Source Guide ABC, CSTB

3.2.3.3. Conséquences pour l'isolation thermique du bâtiment

D'après des études réalisées par le CSTB³⁷, l'isolation thermique d'un immeuble ou d'un appartement n'est pas forcément néfaste pour le confort d'été. Ce dernier peut même être amélioré si une surventilation nocturne est présente afin de refroidir la masse thermique accumulée durant la journée. La masse thermique est donc en corrélation directe avec le confort puisque, tant que la masse thermique est régulièrement refroidie, l'inertie va jouer un rôle crucial pour le confort d'été. Pour les bâtiments avec des murs extérieurs lourds, à l'instar des bâtiments haussmanniens, l'isolation par l'extérieur est, pour cette raison, le meilleur choix du point de vue confort d'été.

Cette isolation thermique sur les parois extérieures du bâtiment réduit les apports par transmission (notamment pendant les heures les plus chaudes). Néanmoins, cette isolation va également empêcher le refroidissement durant la nuit ; il faut donc évacuer davantage de chaleur par une surventilation nocturne. Si malheureusement cette dernière est impossible (des raisons de sécurité, de nuisances sonores, etc.) ou peu efficace (appartement non traversant), l'inertie ne peut donc plus jouer son rôle de stockage de chaleur et les conséquences sur les températures intérieures sont alors

³⁷ Guide ABC : Amélioration thermique des Bâtiments Collectifs construits de 1850 à 1974. Décembre 2010

plus importantes dans les bâtiments bien isolés. Ces températures vont être de quelques degrés de plus qu'un bâtiment non isolé.

Le CSTB³⁸ réalise une étude pour démontrer l'influence de l'isolation. L'exemple présenté ici, tiré des travaux du CSTB, montre les températures intérieures d'un séjour dans un bâtiment haussmannien. Il est important de spécifier que le matériau (brique, pierre ou béton) et l'épaisseur (entre 20 et 40cm) n'ont pas une grande influence et les conclusions peuvent être généralisées pour la plupart des bâtis haussmanniens. Cependant, il est important de comprendre que plusieurs facteurs influencent les résultats :

- les apports solaires augmentent pour les pièces possédant un fort taux de fenêtres et/ou orientées ouest
- l'inertie diminue pour des appartements avec des cloisons légères et faux plafonds
- l'emplacement géographique et altitudinal du logement. Par conséquent, un appartement situé au rez-de-chaussée, sous la toiture ou ombragé par d'autres constructions influence les apports de l'extérieur et donc les températures
- les horaires d'occupation et l'utilisation d'appareils électroménagers. Ces facteurs ne doivent pas être négligés puisqu'ils influencent fortement les températures intérieures. Les personnes âgées, présentes de manière permanente dans le logement, peuvent avoir des apports internes durant la journée plus importants que des personnes travaillant à l'extérieur de leur domicile

3.3. Les indices de confort humain

Les sections précédentes illustrent que le confort thermique est la résultante d'une interaction entre plusieurs paramètres climatiques, personnels et caractéristiques aux espaces et aux bâtiments. Ainsi, afin de simplifier la prise en compte de ces paramètres et avoir un référent, la création d'indices de confort s'est développée.

Il existe un nombre non négligeable d'indices, plus de 160 indices (au niveau international). Les scientifiques cherchent donc à les regrouper et les quantifier (De Freitas *et al.*, 2014). Depuis les années 1960, plus d'une vingtaine d'études essaient de les classer en fonction de leurs objectifs et des paramètres utilisés. Mais la notion de subjectivité des auteurs est au cœur du problème de cette classification. Certains indices par exemple, sont destinés aux touristes (CIT : Climate index for Tourism), d'autres sont spécifiques à certaines régions du monde et ne sont donc applicables qu'à certaines conditions (WCT : Wind Chill Temperature) ou d'autres encore se basent sur le caractère subjectif du confort (PMV : Predicted Mean Vote).

Cette partie présentera un certain nombre d'indices de confort humain. Ces derniers seront présentés en deux parties : les indices de confort extérieur et les indices de confort intérieur. Afin de suivre notre fil rouge, il est important de relever également que ces indices s'utilisent en fonction du degré de précision et des objectifs poursuivis.

3.3.1. Principaux indices de confort intérieur

Les indices directs de confort intérieur sont basés, pour la plupart, sur la mesure de variables environnementales (généralement la température). Du fait de la seule utilisation des paramètres

³⁸ Guide ABC

Analyse bibliographique

climatiques, ces indices sont simplistes et donc peuvent être biaisés par d'autres paramètres extérieurs. Nous présentons ci-dessous les indices les plus cités :

3.3.1.1. Indice d'inconfort de *Thom* (THI) (Thom, 1959)

L'indice d'inconfort se base sur des paramètres climatiques : la température d'air (ou de bulbe, c'est-à-dire sur la température donnée par un thermomètre sec et la température de bulbe humide³⁹) et l'humidité relative. Ces paramètres sont associés à l'indice de refroidissement éolien (K) combinant la température et la vitesse du vent. La température et l'humidité sont mesurées dans une pièce avec un courant d'air, mais protégées des rayonnements extérieurs (pour ne pas influencer la température vers le haut). Cet indice permet de caractériser la contrainte thermique du milieu. Son équation, dérivée de la formule de Thom (Laaidi K., 1997) :

$$THI = T - [(0.55 - 0.0055U\%)(T - 14.5)] \quad (5)$$

Avec :

- T = température
- U% = humidité relative (%)

3.3.1.2. Indice de globe noir WBGT (WET Bulb Globe Temperature) (Yaglou and Minard, 1957)

WBGT est une température (exprimée en °C) traduisant des charges thermiques pesant sur un être humain durant son activité. Cet indice est utilisé pour les conditions de travail à la chaleur. C'est une approximation de la température effective corrigée. Elle dépend de la somme pondérée de la température de bulbe humide (T_h), de la température opérative (T_{op}) s'il n'y a pas d'influence du rayonnement solaire sur l'environnement. Ces deux températures sont susceptibles d'erreurs de mesure, pour une reproductibilité faible. Ainsi, cet indice est assez limité.

$$\text{Sans rayonnement solaire : } WBGT = 0,7T_h + 0,3T_{op} \quad (6)$$

Si les rayonnements frappent la surface, le WBGT dépend de ces deux paramètres ainsi que de la température de l'air T_a . Cet indice permet de savoir si un environnement chaud est confortable ou non pour les personnes travaillant.

$$\text{Avec rayonnement solaire : } WBGT = 0,7T_h + 0,2T_{op} + 0,1T_a \quad (7)$$

Cet indice est utilisé par la norme ISO 7243 pour évaluer la protection des salariés dans la législation. Cette norme déclare que cet indice est applicable sur l'évaluation de l'effet moyen de la chaleur sur l'homme, durant une période représentative de son activité, mais non pour l'évaluation de la contrainte thermique durant de courtes périodes ni pour des conditions proches de la zone de confort. WBGT ne doit pas être confondu avec une température. Le tableau 1.4 permet de donner quelques ordres de grandeur dans des situations de bureau et industrielles.

³⁹ La température bulbe humide ou température humide est la température indiquée par un thermomètre dit « à bulbe humide ». Il permet de mesurer le taux d'humidité d'un local. Aujourd'hui, ce thermomètre est remplacé par les appareils de mesures électroniques

Situation	T _a (°C)	T _{op} (°C)	HR(%)	V _a (m/s)	WBGT
Bureau en hiver	22	22	40	0.15	16.8
Bureau en été	30	30	30	0.15	22.2
Atelier fermé	35	35	20	0.15	26.3
Atelier ensoleillé	35	51	36	0.10	35

Tableau 1.4 : Ordre de grandeur de l'indice WBGT dans des situations de bureau (source : www.deparisnet.be)

La réglementation stipule des valeurs maximales de WBGT en fonction de la charge de travail.

3.3.1.3. Température radiative moyenne

La température radiative moyenne représente la moyenne pondérée des températures des différentes parois. Elle intègre les échanges thermiques par rayonnement avec l'environnement. Cette valeur peut être mesurée à l'aide d'un thermomètre de globe noir ou d'un capteur de température globe noir (T_g)⁴⁰ qui s'additionne à la température sèche (T_s) et à la vitesse de l'air (V_a).

$$T_{rm} = T_g + 0,24 (T_g - T_s) V_a^{1/2} \quad (8)$$

La température globe noir est égale à la température moyenne radiante si V_a est nulle. Cet indice permet donc d'évaluer et vérifier les charges thermiques radiantes qui sont extrêmement importantes pour l'analyse en ambiance dite « chaude » (Javier Neila Gonzalez F., 2004).

3.3.1.4. Température effective (ET Effective Temperature index) (1923, Houghtan et Yaglou)

La température effective est un indice empirique. Elle permet de montrer une détermination des effets relatifs de la température et de l'humidité de l'air sur le confort. *ET* combine dans une seule valeur les effets des températures sèches, l'humidité et les mouvements de l'air (en lien avec la sensation de chaleur ou de froid). Sur le diagramme de l'air humide, il est représenté par un ensemble de lignes « d'iso-confort ». Il est aujourd'hui obsolète, bien qu'encore présent dans certains travaux. A l'origine, l'indice couvrait une plage de température allant de 1°C à 45°C (indice appréciable pour les zones tempérées). Cependant, il est utilisé pour évaluer le niveau de stress thermique, donc dans des gammes de températures assez élevées (Blazejczyk *et al.*, 2010).

Cet indice est adapté en 1933 par Missenard. Il est utilisé en Allemagne de l'Est, en Pologne, etc. Encore utilisé en Allemagne, il est progressivement remplacé par d'autres indices plus fiables. Sa formule a été améliorée, il y a quelques années par Missenard) :

$$ET = 37 - \frac{37 - T}{0.68 - 0.0014 \cdot RH + \frac{1}{1.76 + 1.4 \sqrt{0.35}}} - 0.29 \cdot T \cdot (1 - 0.01 \cdot RH) \quad (9)$$

⁴⁰ Sonde fabriquée selon la norme ISO7726

3.3.1.5. La température opérative (Operative temperature) ou température résultante sèche

Les effets combinés de l'air et de la température moyenne radiante peuvent être combinés en un seul indice, la température opérative (T_{op}), définie comme la moyenne entre la température radiante moyenne (T_{mrt}) et la température de bulbe sec T_a . Cette moyenne est pondérée par les coefficients de convection respectifs : h_c (convection) et h_r (rayonnement). Deux paramètres météorologiques sont absents : l'humidité et la vitesse de l'air.

$$T_{op} = \frac{h_c T_{mrt} + h_r T_a}{h_c + h_r} \quad (10)$$

Cependant, l'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) propose de simplifier l'équation par une moyenne arithmétique. Cette dernière donne des résultats acceptables :

$$T_{op} = \frac{h_c T_{mrt} + h_r T_a}{2} \quad (11)$$

3.3.2. Principaux indices de confort extérieur

L'influence des paramètres climatiques, physiologiques et psychologiques sur les conditions de confort extérieur est intensivement étudiée. De nombreuses recherches mettent en relation les conditions climatiques extérieures et le bien-être de la personne. Le principal facteur influençant le confort est l'apport d'énergie thermique dû aux rayonnements solaires directs, diffus et réfléchis. En l'absence de rayonnement, la température de l'air est le principal paramètre. L'humidité et le rayonnement infrarouge, quant à eux, jouent un rôle secondaire (Pénicaud, 1978).

Cependant, il est important de rappeler que l'étude du confort extérieur devient un sujet de recherche, il y a seulement quelques décennies. Ainsi, un certain nombre d'indices voient le jour. Les premiers, empiriques sont simples et rapides à calculer. Les indices analytiques eux, basés sur la modélisation des flux et des échanges thermiques chez l'individu (De Oliveira 2007) sont plus complexes. Ici, sont développés les indices les plus applicables utilisés pour définir le confort extérieur.

3.3.2.1. Heat Index

L'indice combine la température ambiante et l'humidité relative de l'air. Il est élaboré par Steadman (1979) et, est utilisé par le *National Weather Service* américain. Son objectif est de donner un niveau d'inconfort dû à la température et à une humidité élevée. Le Heat Index est principalement utilisé aux Etats-Unis. Plus l'humidité est grande, plus la sensation d'inconfort liée à la température est grande. Son calcul se base sur ces deux paramètres :

$$HI = c1 + c2T + c3R + c4TR + c5T^2 + c6R^2 + c7T^2R + c8TR^2 + c9T^2R^2 \quad (12)$$

- $c1 = -42,379$; $c2 = 2,049$, $c3 = 10$, 143
- $c4 = -0,225$; $c5 = -6,838 \cdot 10^{-3}$; $c6 = -5,482 \cdot 10^{-2}$
- $c7 = 1,229 \cdot 10^{-3}$; $c8 = 8,529 \cdot 10^{-4}$; $c9 = -1,99 \cdot 10^{-6}$
- HI : l'indice de chaleur en °F
- R : l'humidité relative notée de 0 à 100

- T : la température atmosphérique en °F

Différents niveaux d’alerte sont notés en fonction de la valeur notée sur le graphique (Fig. 1.18) :

- valeur de 80 à 90 : fatigue
- valeur de 91 à 103 : coup de soleil, crampes musculaires et épuisement physique
- valeur 104 à 125 : épuisement, coup de chaleur possible
- valeur de 125 et plus : risque élevé de coup de chaleur

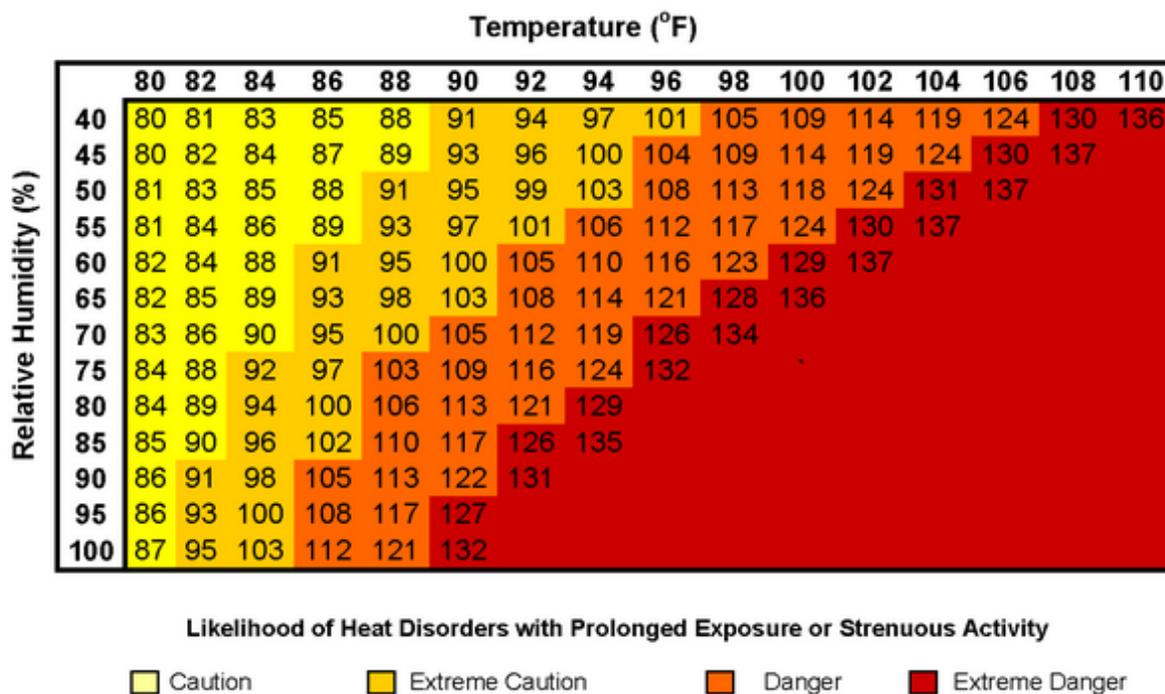


Figure 1.18 : Valeur de Heat Index en fonction de la température et de l’humidité relative. Ces valeurs peuvent être reliées à un niveau d’inconfort selon un code de couleurs allant du jaune clair au rouge. (Source : National oceanic and Atmospheric Administration, INRS)

3.3.2.2. Humidex

L’Humidex (ou indice d’humidité) est développé par le Canada et, est utilisé pour la première fois en 1965. Les météorologues canadiens, développeurs de cet indice, l’ont proposé et utilisé afin d’indiquer de quelle manière le temps chaud et humide est perçu par la moyenne des habitants du pays. Il est ensuite modifié en 1979 par Masterson et Richardson (Blazejczyk *et al.*, 2010). L’Humidex nous permet d’avoir une idée de la sensation d’inconfort en fonction de la température et de l’humidité extérieure élevée. Il mesure la chaleur ressentie. Cet indice est exprimé en °C (même si à l’origine, l’unité est absente).

Cet indice de confort combine la température et l’humidité relative. Leurs relations, suivant un diagramme, nous permet de déterminer l’Humidex. Il est calculé pour une température supérieure à 25°C et pour une humidité supérieure à 40%. Ainsi, d’après le diagramme (Fig. 1.19) si la température est de 30 °C et l’humidité relative est de 70 %, l’indice Humidex est de 41. Ce niveau est considéré comme une classe de « sensation de malaise généralisé » et les efforts devraient être évités.

Analyse bibliographique

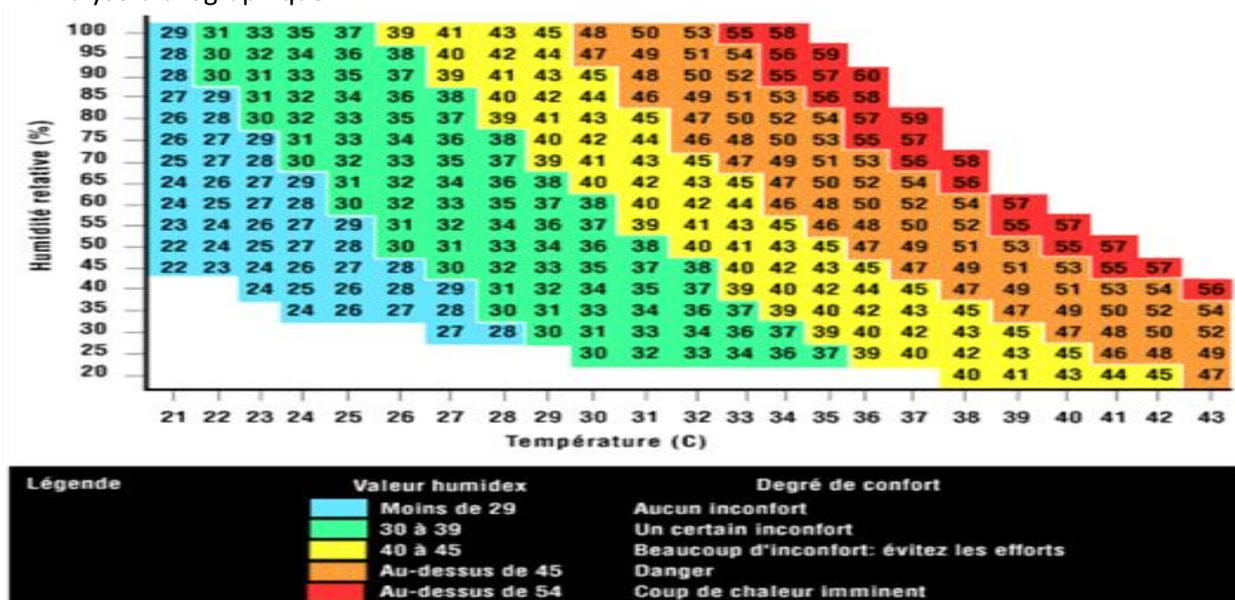


Figure 1.19 : Humidex : lecture de la température de l'air ambiant en degrés Celsius (à la verticale) et de l'humidité relative en pourcentage (à l'horizontale). Extrait du site web : Environnement Canada : http://www.msc.ec.gc.ca/cd/brochures/humidity_cfm

Ainsi, plusieurs degrés de confort sont décrits :

- en dessous de 29 : peu de gens sont incommodés
- de 30 à 34 : sensation de malaise plus ou moins grande
- de 35 à 39 : sensation de malaise assez grande. Prudence. Ralentir certaines activités en plein air
- de 40 à 45 : sensation de malaise généralisé. Danger. Éviter les efforts
- de 46 à 53 : danger extrême. Arrêt de travail dans de nombreux domaines
- au-dessus de 54 : coup de chaleur imminent (danger de mort)

La manière de calculer Humidex est basée sur les travaux de J.M. Masterson et F.A. Richardson (1979). Son calcul est basé sur la température ambiante, la pression de vapeur et le point de rosé. Son équation est la suivante :

$$\text{Humidex} = \text{Temp} + h \quad (13)$$

- Temp = air température en C°
- $h = (0.5555) * (e - 10.0)$
- $e = 6.11 * \exp(5417.7530 * ((1/273.16) - (1/T_w^{41})))$
- e = pression de la vapeur en millibars (mb)

La relation entre Humidex et le bien-être est subjective. En effet, le bien-être varie largement selon les individus. De plus, cette sensation d'inconfort diffère selon l'âge, la forme et la santé de la personne, son physique, le type de vêtements portés et toutes les autres conditions météorologiques. Cependant, malgré ses limitations, Humidex reste un bon moyen rapide de

⁴¹ Tw : le point de rosé est la température à laquelle un gaz (comme l'air) se liquéfie pour former des gouttelettes d'eau. Plus l'humidité d'un gaz est importante, plus le point de rosé est élevé

déterminer la sensation d'inconfort chez la personne et cet indice est facilement exploitable pour toutes les personnes voulant l'utiliser.

3.3.2.3. Windchill ou indice de refroidissement éolien (IRE)

Tout comme l'indice Humidex, le Windchill, basé sur le ressenti de la température, a également été développé par les services canadiens. Il est défini comme une température fictive ressentie par le corps, dans des conditions de températures faibles et de vent plus ou moins fort. La température extérieure et la vitesse du vent sont les deux paramètres climatiques intervenant dans le calcul du Windchill. L'objectif principal est la détermination de la sensation de froid, c'est-à-dire d'inconfort dû aux très faibles températures extérieures. Il est considéré comme un facteur essentiel afin de prévoir les risques de gelures et d'hypothermie. En période hivernale et lors de vagues froid, le Windchill est utilisé et vu comme la seconde valeur la plus comparée par les amateurs de météorologie, après la température ambiante. Comme cet indice représente la sensation du froid sur la peau, il ne s'agit pas d'une température réelle. Il s'exprime donc sans unité mais repose tout de même sur l'accentuation de la température ressentie. Cet indice est facile d'utilisation et de lecture grâce à son diagramme (Fig. 13) et à son annexe décrivant les risques encourus (Tab. 1.5).

Vitesse du vent (km/h)	Température (° C)																				
	0	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14	-16	-18	-20	-22	-24	-26	-28	-30	-32	-34	-36	-38	-40
10	-3	-6	-8	-10	-13	-15	-18	-20	-22	-25	-27	-30	-32	-34	-37	-39	-42	-44	-46	-49	-51
15	-4	-7	-9	-12	-14	-17	-19	-22	-24	-27	-29	-32	-34	-36	-39	-41	-44	-46	-49	-51	-54
20	-5	-8	-10	-13	-15	-18	-20	-23	-25	-28	-30	-33	-36	-38	-41	-43	-46	-48	-51	-53	-56
25	-6	-8	-11	-14	-16	-19	-21	-24	-26	-29	-32	-34	-37	-39	-42	-44	-47	-50	-52	-55	-57
30	-6	-9	-12	-14	-17	-20	-22	-25	-27	-30	-33	-35	-38	-40	-43	-46	-48	-51	-53	-56	-59
35	-7	-10	-12	-15	-18	-20	-23	-25	-28	-31	-33	-36	-39	-41	-44	-47	-49	-52	-55	-57	-60
40	-7	-10	-13	-15	-18	-21	-23	-26	-29	-31	-34	-37	-39	-42	-45	-48	-50	-53	-56	-58	-61
45	-8	-10	-13	-16	-19	-21	-24	-27	-29	-32	-35	-37	-40	-43	-46	-48	-51	-54	-56	-59	-62
50	-8	-11	-14	-16	-19	-22	-24	-27	-30	-33	-35	-38	-41	-44	-46	-49	-52	-54	-57	-60	-63
55	-8	-11	-14	-17	-19	-22	-25	-28	-30	-33	-36	-39	-41	-44	-47	-50	-52	-55	-58	-60	-63
60	-9	-12	-14	-17	-20	-23	-25	-28	-31	-34	-36	-39	-42	-45	-48	-50	-53	-56	-59	-62	-64
65	-9	-12	-15	-17	-20	-23	-26	-29	-31	-34	-37	-40	-43	-45	-48	-51	-54	-56	-59	-62	-65
70	-9	-12	-15	-18	-21	-23	-26	-29	-32	-35	-37	-40	-43	-46	-49	-51	-54	-57	-60	-63	-65

Figure 1.20 : Windchill : Tableau de calcul du refroidissement éolien avec la température (en degrés Celsius, à la verticale) et de la vitesse du vent (en km/h, à l'horizontale)

Température équivalente	Effets de la « froideur du vent »	Risques pour la santé
-1°C et plus	Frais, faiblement inconfortable	
-10°C à -1°C	Froid, inconfortable	Légère augmentation de l'inconfort
-18°C à 10°C	Très froid	Inconfortable Risque d'hypothermie si la personne se trouve à l'extérieur pendant de longues périodes sans protection adéquate
-29°C à -18°C	Zone 1 : froid cinglant. Danger faible	Risque de gelure grave en cas d'exposition prolongée (1h)
-50°C à -29°C	Zone 2 : Froid intense. Danger considérable	Gelure grave possible en 10 minutes Risque d'hypothermie si la personne se trouve à l'extérieur pendant de longues périodes sans vêtements adéquats
-50°C à -55°C	Zone 3 : Froid extrême. Danger très important	Gelure grave possible en moins de 2 minutes, surveiller l'engourdissement ou la blancheur du visage et des extrémités Risque sérieux d'hypothermie
-55°C et plus froid	DANGER ! Les conditions extérieures sont dangereuses	

Tableau 1.5 : Tableau de lecture des effets et du risque du refroidissement éolien : température en °C / vitesse du vent en km/h

Le Windchill est calculé à partir du moment où la température est inférieure à 5°C et la vitesse du vent supérieure à 5km/h. Son équation est présentée ci-dessous :

$$IRE = 13,12 + 0,6215 \cdot T_{amb} - 11,37 \cdot V^{0,16} + 0,3965 \cdot T_{amb} \cdot V^{0,16} \quad (14)$$

- IRE : Température équivalente (°C)
- T_{amb} : Température ambiante de l'air (°C)
- V : Vitesse du vent (km/h) mesurée à 10m

Comme présenté ci-dessus, il est important de voir que cet indice ne prend pas en compte l'effet du rayonnement solaire pouvant éventuellement compenser l'effet de refroidissant du vent. Ainsi, la valeur du Windchill peut être plus élevée. En effet, « *bien que la température équivalente de refroidissement éolien était supposée être la température qui aurait causé le même refroidissement par vent léger, ce n'était pas le cas [...]* » service Environnement Canada⁴².

⁴² <https://www.ec.gc.ca/meteo-weather/>

Ainsi le service Environnement Canada décide donc de tenir en avril 2000 un Atelier Internet sur cet indice afin qu'il soit plus adapté à la réalité. « *Le nouvel indice est fondé sur un modèle de la rapidité avec laquelle le visage humain perd sa chaleur. Nous avons choisi la figure parce qu'elle est la partie du corps la plus souvent exposée au temps dangereux hivernal en supposant que des vêtements convenant au temps couvrent le reste du corps* ».

Ces deux premiers indices (Windchill et Humidex) présentés ici sont annoncés, de façon régulière pendant les saisons d'hiver et d'été, à la suite de la température, dans les bulletins météorologiques du Canada. Ces indices sont communs et familiers aux habitants du Canada.

Référence : Site WEB d'Environnement Canada : <https://www.ec.gc.ca/meteo-weather/> (consultée le 20.07.16).

3.3.2.4. PT : Perceived Temperature

La température perçue PT est la température de l'air d'un environnement de référence dans lequel la perception de chaleur ou de fraîcheur serait la même que dans les conditions actuelles. Cet indice utilise les valeurs PMV (pour les climats chauds et humides, expliqué en 3.3.2.5) de Fanger permettant d'évaluer le confort thermique. Cet indice est défini par la norme allemande VDI 3787 permettant de qualifier le confort ressenti par une personne normale, marchant à l'extérieur. Pour déterminer le confort de la personne, le bilan thermique et son environnement sont pris en considération. L'environnement de référence est caractérisé par plusieurs paramètres dont les principaux sont la température de l'air, la température radiante moyenne (prenant en compte le rayonnement solaire direct, diffus et infrarouge), la vitesse du vent et l'émissivité de la peau et des vêtements (Staiger *et al.*, 1997).

3.3.2.5. PET : Physiological Equivalent Temperature (Höppe, 1999)

Le PET est un des indices les plus récents du confort thermique. C'est un indice dit relationnel puisqu'il se base principalement sur l'équation du bilan thermique humain de Najjar (Najjar, 2014). Cet indice est défini comme la température de l'air à laquelle (avec ou sans rayonnement solaire), le bilan énergétique du corps est égal aux températures internes du corps et de la peau, que celles obtenues en conditions extérieures (Höppe 1999/2002). Pour être plus précis, il donne la température d'air d'un environnement de référence dans lequel les flux de chaleur seraient les mêmes que dans l'environnement actuel.

Ainsi, l'indice PET est un indice dérivé du bilan énergétique humain. Il est basé sur un modèle thermique complet du corps humain décrivant les processus physiologiques en détail (habillement et activités humaines). Il tient compte aussi de tous les paramètres climatiques, tout comme l'indice UTCI (décrit dans la partie suivante). Il est basé sur un modèle physiologique de l'individu et sur les variables climatiques extérieures. Il est donc indépendant du ressenti de chaque individu puisqu'il est basé sur un bilan physiologique. La littérature ne donne pas la formule concernant son calcul, cependant le modèle RayMan (Matzarakis, 2010) permet de l'obtenir.

Höppe décrit plusieurs scénarii en fonction de la saison. Sur le tableau 1.6, on remarque pour une journée estivale au soleil, que la valeur de PET est de 43°C. Cette température signifie que si un

Analyse bibliographique

individu se trouve dans une pièce à 43°C, alors son état thermique serait le même que dans ces conditions extérieures. En revanche, si la personne vient à se déplacer dans un endroit ombragé, alors le PET diminuerait de 14°C pour atteindre les 29°C. T_{air} est égal à T_{mrt} (température radiante moyenne) pour une pièce typique.

Scénarii	T_{air} (°C)	T_{mrt} (°C)	U (m/s)	P (hPa)	PET (°C)
Pièce typique	21	21	0,1	12	21
Hiver, au soleil	-5	40	0,5	2	10
Hiver à l'ombre	-5	-5	5	2	-13
Été, au soleil	30	60	1	21	43
Été, à l'ombre	30	30	1	21	29

Tableau 1.6 : Exemple de PET pour différents scénarii (avec : T_{air} = température de l'air, T_{mrt} = température radiante moyenne, U= vitesse du vent, P= pression atmosphérique) (Hoppe 1999)

Cet indice est basé sur un bilan physiologique de la personne, en conséquence, il ne tient pas compte du ressenti des individus.

3.3.2.6. PMV : Predicted Mean Vote

L'indice PMV (Predicted Mean Vote) de Fanger permet d'évaluer le confort thermique en calculant le vote moyen de sensation thermique d'un groupe important de personnes en se référant à une échelle. Cet indice est développé par Jendritzky (pour l'extérieur)⁴³. Ce dernier introduit le rayonnement absorbé par une personne dans la valeur de la température moyenne de surface.

Cet indice est décrit par la norme ISO-7730. L'objectif du PMV est donc de prévoir la valeur moyenne des votes sur l'échelle de perception thermique à 9 points (Fig. 1.21) dans un environnement extérieur.

PMV	Sensation thermique	Charge thermophysiological	Température Équivalente Physiologique PET en °C	Température perçue PT in °C
$PMV \geq 3,5$	trop chaud	stress thermique extrême	$PET \geq +36$	$PT \geq +38$
$2,5 \leq PMV \leq 3,5$	très chaud	grand stress thermique	$+32 \leq PET < +36$	$+32 \leq PT < +38$
$1,5 \leq PMV \leq 2,5$	chaud	stress thermique modéré	$+28 \leq PET < +32$	$+26 \leq PT < +32$
$0,5 \leq PMV \leq 1,5$	légèrement chaud	stress thermique léger	$+24 \leq PET < +28$	$+20 \leq PT < +26$
$-0,5 \leq PMV \leq 0,5$	confortable	confort	$16 < PET < +24$	$0 < PT < +20$
$-1,5 \leq PMV \leq -0,5$	légèrement frais	léger stress dû au froid	$12 < PET \leq 16$	$-13 < PT \leq 0$
$-2,5 \leq PMV \leq -1,5$	froid modéré	stress dû au froid	$8 < PET \leq 12$	$-26 < PT \leq -13$
$-3,5 \leq PMV \leq -2,5$	froid modéré	stress dû au froid important	$4 < PET \leq 8$	$-39 < PT \leq -26$
$PMV \leq -3,5$	très froid	stress dû au froid extrême	$PET \leq 4$	$PT \leq -39$

Figure 1.21 : Echelle PMV et comparaison avec les indices PT et PET

⁴³ Une extension de l'indice PMV a été développée pour l'intérieur (Serres, 1997)

La zone de confort thermique se situe entre les valeurs -1,5 à 1,5 soit entre les sensations de légère fraîcheur à légère chaleur. Une valeur de PMV 0 représente donc une sensation de confort thermique optimale. Plus la valeur de cet indice sera négative ou positive, plus la sensation thermique est inconfortable. Cet indice se base sur des calculs statistiques. Ainsi, il se définit comme suit :

$$PMV = (0,303^{\exp-0,036M} + 0,028)*L \quad (15)$$

- M représente la production d'énergie du métabolisme de la personne donné pour différents scénarii, exprimé en W/m^2
- L représente l'écart entre la chaleur produite et perdue, soit le bilan thermique de la personne

Cet indice est généralement couplé au pourcentage prévisible d'insatisfaits (PDD Predicted Percentage Dissatisfied). Ce dernier précise le pourcentage de personnes insatisfaites par rapport à la situation puisque le PMV ne le permet pas. Cet indice met en évidence qu'aucune condition thermique ne peut satisfaire 100% des personnes, puisque même dans le cas le plus favorable, 4% sont insatisfaites. Enfin, la norme ISO7730 préconise de limiter le PDD à 10% c'est-à-dire limiter le PMV à -0,5 et +0,5.

3.3.2.7. IBM : Indicateurs BioMétéorologiques

IBM, indice français, est mis en place pour répondre aux phénomènes caniculaires et vagues de chaleur (Laaidi *et al.*, 2012). Il est développé par l'InVS en collaboration avec Météo-France et est mis en place par le Système d'Alerte Canicule et Santé (SACS). Cet indice est élaboré à partir d'une analyse fréquentielle de trente années de données quotidiennes de mortalité et des seuils d'alerte départementaux. Pour construire cet indice, des indicateurs météorologiques et des seuils sont calculés dans 14 grandes agglomérations françaises (Grenoble, Lyon, Marseille, Nantes, etc.). La période d'étude prise en compte pour réaliser cet indice s'étend de 1973 à 2003. De ces villes pilotes, une grande hétérogénéité des variables climatiques est observée. Ces données météorologiques sont par la suite comparées avec la surmortalité journalière, estimée à partir des données de mortalité journalière (INSEE) pour la même période. Ainsi, la surmortalité journalière est calculée du 1^{er} juin au 31 août selon cette équation (exprimée en %) :

$$S[i, j] = 100 * \frac{\text{mortalité}[i, j] - \text{base}[i, j]}{\text{base}[i, j]} \quad (16)$$

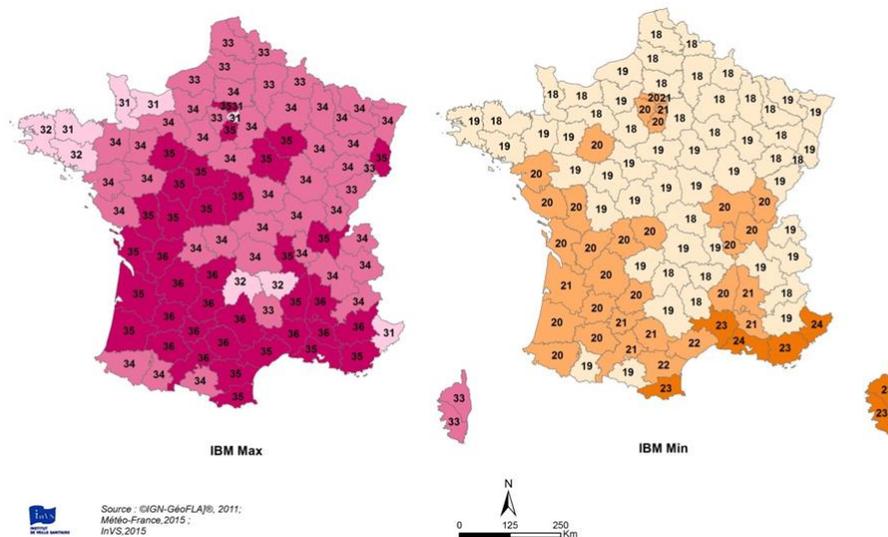
- i = un jour donné
- j = 1 année donné
- base : mortalité moyenne sur les trois années précédentes de la mortalité journalière lissée où la base est différente de 0

A partir de ces deux données (météorologiques et pourcentage de surmortalité journalière), des tests sont menés dans chaque ville afin de définir l'indicateur le plus adapté aux caractéristiques de chaque ville, se situant entre bonne spécificité et bonne sensibilité. L'indicateur le plus pertinent, commun à toutes les villes, est la combinaison des températures minimales et maximales moyennées sur trois jours. Il est retenu et est noté IBM.

Analyse bibliographique

L'IBM est donc la moyenne glissante sur trois jours consécutifs (l'IBM du jour J est la moyenne de J, J+1, et J+2) des températures minimales (IBMmin) et maximales (IBMmax). Ainsi, pour chaque département, un calcul de probabilité de dépassement de seuils est déterminé. Il s'agit d'un seuil double : moyenne des températures minimales (nocturne) et maximales (diurne) sur trois jours. Il est défini comme étant le plus pertinent pour identifier les épisodes de canicule en France métropolitaine.

La probabilité de dépassement simultané des seuils par les IBMmin et IBMmax, pour un département donné, constitue le critère de base pour choisir la couleur de la carte de vigilance par Météo-France. Par exemple à Paris, les seuils sont de 21°C et de 31°C (pour les températures minimales et maximales, de nuit et de jour). Chaque département est décrit par une couleur de vigilance pour le paramètre canicule. Les seuils d'alerte canicule ne sont publiés qu'une fois dans le rapport : <http://www.invs.sante.fr/Publications-et-outils/Rapports-et-syntheses/Environnement-et-sante/2012/Systeme-d-alerte-canicule-et-sante-principes-fondements-et-evaluation>. Les couleurs permettent de différencier les seuils les plus élevés des seuils les plus faibles. La couleur verte correspond aux seuils les plus faibles et la couleur rouge désigne les seuils les plus forts. Ils sont cependant régulièrement réactualisés du fait par exemple de changements de stations météorologiques ou de recalcul des percentiles servant de base aux seuils. Pour certaines villes, à l'exemple de Marseille, les seuils ont été vus à la hausse. Le nombre d'alertes généré était trop élevé. et certaines villes sont mieux adaptées à la chaleur. Une carte des seuils actualisés pour l'été 2015 est présentée en figure 1.22.



IBMmin : moyenne des températures maximales nocturnes sur trois jours

IBMmax : moyenne des températures maximales diurnes sur trois jours

Figure 1.22 : Seuils des indicateurs BioMétéorologiques maximaux et minimaux (IBMmax et IBMmin) pour l'année 2015 (Source Météo-France)

Pour le choix de la station météo de référence pour Paris, la station Saint-Maur, plus représentative de Paris et sa petite couronne, remplace la station Paris Montsouris. D'autres stations sont encore à définir pour mieux prendre en compte l'effet d'îlot de chaleur urbain.

D'autres indicateurs météorologiques considérés comme des facteurs aggravants (écart aux seuils de température permettant d'estimer l'intensité de la canicule, humidité relative de l'air et la durée de la canicule) ainsi que les éventuels retours sanitaires fournis par les services de la santé (InVS, ARS), peuvent également être pris en compte.

3.3.2.8. UTCI

L'UTCI, indice de confort extérieur est développé dans le but de pallier les faiblesses des autres indices tel que le métabolisme, la contrainte vestimentaire ou la corrélation entre la vitesse du vent et la température de l'air, etc. Cet indice corrige la température de l'air pour estimer une température ressentie en fonction de l'humidité de l'air, du vent et de la température radiative.

Le principal objectif de l'UTCI est d'arriver à rendre facilement disponible un modèle d'évaluation de l'environnement thermique, à différents scénarii, en vue de consolider les applications et démarches liées au risque sanitaire, dans les domaines des services météorologiques, des systèmes de santé publique mais aussi de l'impact du changement climatique.

Cet indice, un des plus récents, est développé aussi dans le but d'être valable et précis pour tous les climats (tempéré, chaud ou froid), toutes les saisons et sur toutes les échelles spatiales et temporelles (pour une longue ou courte période d'exposition) (Jendritzky *et al.*, 2011). Il est indépendant des caractéristiques personnelles. De plus, cet indice se veut accessible par tous, d'où la création possible d'un site internet où on peut le calculer (<http://www.utci.org>). Qui plus est, c'est une procédure de calcul simple et rapide. L'UTCI est considéré comme l'indice de référence depuis qu'il est mis en place au niveau international

Cet indice est développé par 45 chercheurs de 23 pays. Il est complet et couple plusieurs modèles et données (Fig. 1.23) :

- un modèle physiologique (Fiala *et al.*, 2012, Boko *et al.*, 2013)
- un modèle d'habillement (Blazejczyk *et al.*, 2010, 2012, Bröde *et al.*, 2012)
- données météorologiques (humidité, température de l'air, vent, rayonnement)

Au contraire des indices présentés précédemment, l'indice UTCI est développé en utilisant un modèle thermorégulateur dynamique et stationnaire du corps humain. Cet indice permet la simulation des échanges thermiques ayant lieu à l'intérieur du corps humain, ainsi qu'entre l'intérieur et la surface, tout en tenant compte des particularités anatomiques, thermiques et des propriétés physiologiques (Fiala, 1999).

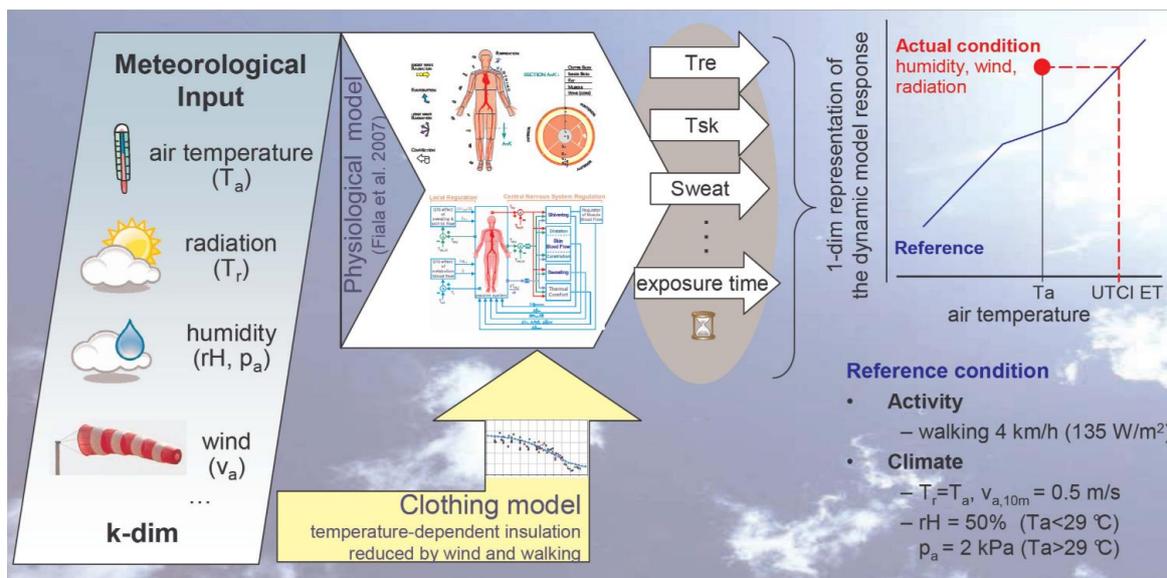


Figure 1.23 : Représentation schématique pour le calcul de l’UTCI (pour une condition réelle) où est définie la température de l’air de la condition de référence, en le couplant avec les propriétés physiologiques et thermiques (Bröde 2010)

Concernant les conditions météorologiques, la hauteur où l’on mesure la vitesse du vent est à 1,1m en fonction de l’ISO7726. De plus, pour cet indice, on fait l’hypothèse que le vent souffle de côté à 90° de l’individu. Une activité de référence est définie, avec une vitesse de marche de 4km/h, traduisant un niveau métabolique de 135W/m² et l’isolation par les vêtements se situe 0.4clo -2.6clo (dépendant de la température de l’air de manière non linéaire) (Jendritzky 2002).

L’UTCI étant basé sur des processus physiques, peut être utilisé pour des environnements chauds et froids, comme le montre l’échelle des niveaux de stress associés (établie par The Commission for Thermal Physiology of the International Union of Physiological Sciences (2003) (Fig. 1.24). Cette échelle de stress thermique est associée aux valeurs de l’UTCI, utilisée dans des recherches et études sur les fortes canicules ou dans le cas de grands froids.

UTCI (°C) range	Stress Category
above +46	extreme heat stress
+38 to +46	very strong heat stress
+32 to +38	strong heat stress
+26 to +32	moderate heat stress
+9 to +26	no thermal stress
+9 to 0	slight cold stress
0 to -13	moderate cold stress
-13 to -27	strong cold stress
-27 to -40	very strong cold stress
below -40	extreme cold stress

Figure 1.24 : UTCI : Echelle des niveaux de stress thermique (source : www.utci.org)

Tous les indices cités ont pour seul objectif de réduire la complexité du confort thermique. Ces indices sont plus ou moins précis, plus ou moins génériques. Les hétérogénéités spatiales ou temporelles sont encore très peu introduites dans ces indices. On peut donc se demander si les conséquences physiologiques seront les mêmes sur un même individu.

De surcroît, dû à la complexité des calculs par le nombre important de paramètres pouvant entrer en ligne de compte, ces indices sont difficilement utilisables. Les indices PET et l'UTCI sont les deux plus utilisés.

4. Modèles de simulations développés pour la climatologie urbaine

La modélisation des phénomènes physiques urbains devient un enjeu important. Cette modélisation s'additionnant à la connaissance constitue une aide à la décision environnementale, dans la politique d'aménagement urbain mais aussi pour étudier l'évolution de notre environnement. En revanche, les modèles doivent encore progresser pour dimensionner les mesures concrètes à prendre pour atténuer les risques.

Le climat urbain est aujourd'hui modélisé à différentes précisions sur les 3 échelles définies : micro, locale et méso-échelle. Ces modèles ont pour objectif d'améliorer la compréhension du climat urbain afin d'apporter différents scénarii sur le climat et le confort thermique. Le développement de ces modèles répond aussi à un besoin sociétal important puisqu'ils constituent souvent les seuls outils pouvant éclairer les décisions politiques concernant l'environnement global. Chaque modèle est développé avec des hypothèses et des portées qui leurs sont propres. Beaucoup d'entre eux évoluent pour s'adapter, notamment aux nouvelles hypothèses d'aménagement urbain et en intégrant des interactions physiques. Cette évolution se fait selon deux procédés : soit en l'intégrant directement dans les modèles existants, soit en réalisant des couplages entre modèles spécialisés.

La question de la représentativité physique et spatiale des phénomènes microclimatiques n'est que partiellement résolue. Ceci est dû à la complexité de la ville et à la variation temporelle et spatiale des phénomènes microclimatiques. En effet, si la représentation des phénomènes physiques urbains est relativement aisée, celle des multiples interactions l'est moins. Par ailleurs, la multitude de données terrain à définir pour spécifier ces modèles, est une limite.

Dans cette partie est proposé un état de l'art des recherches permettant de mieux appréhender la modélisation climatique urbaine. L'objectif de cet état de l'art n'est pas de recenser tous les modèles existants mais d'identifier, définir et mieux connaître les avantages, les limites et les portées de quelques modèles. Cette présentation permet d'argumenter sur la pertinence du choix de notre modèle pour cette étude.

Il est possible de classer ces modèles selon leur nature (physique ou empirique), et de les distinguer par leur échelle d'étude. Aux différentes échelles de description du climat urbain correspondent des objectifs différents. Pour étudier l'influence des villes sur l'atmosphère (avec le phénomène de l'îlot de chaleur urbain), les chercheurs développent des modèles permettant de reproduire les principaux échanges énergétiques et hydriques entre le milieu urbain et l'atmosphère. Cependant, lorsque l'on s'intéresse au confort de l'utilisateur, l'échelle change et devient proche de son environnement : rues, bâtiments, etc. Ces modèles à échelle locale décrivent les aménagements urbains et modélisent leur

impact sur la température, l'humidité, etc. Ces dernières varient donc de l'échelle microclimatique à l'échelle mésoclimatique soit de l'échelle du bâtiment, du quartier à l'échelle de la région.

4.1. Modèle climatique : méso-échelle à échelle locale

Le climat urbain résulte des échanges d'énergie (radiative, thermique et hydrique) entre les surfaces et l'atmosphère et des interactions aérodynamiques entre la couche de canopée et l'atmosphère. Ainsi l'étude du climat à cette échelle nécessite de représenter certaines des spécificités du milieu urbain ayant une influence sur le vent, la température et l'humidité de l'air, tel que la morphologie urbaine, la présence de surfaces imperméables.

L'échelle locale et l'échelle mésoclimatique sont présentes dans de nombreux modèles utilisant le bilan énergétique d'une surface urbaine. En effet, qu'ils soient à base empirique ou physique (dit *bulk*), tous les modèles de bilan énergétique des surfaces s'appuient sur un principe commun : le rayonnement net. Ils ont la particularité de pouvoir être couplés avec des modèles atmosphériques globaux. Les modèles atmosphériques donnent les conditions climatiques des couches supérieures, les modèles méso et micro les détaillent spatialement et font (ou non) un retour vers le modèle global. A cette échelle, il existe une multitude d'approches de modélisation (Tab.1.7) différentes en fonction de paramètres comme la prise en compte ou non de la végétation, des flux de chaleur stockée dans les matériaux urbains, mais aussi par la prise en compte de l'orientation des rues et des portées d'ombres, le calcul du flux de chaleur anthropique ou encore le nombre d'inter-réflexions (pour le piégeage radiatif).

Climatologie, indices et modélisation du climat et des phénomènes spatio-temporels

Nom	Publications	Type de modèle	Végétation	Flux de stockage	Orientatio n des rues	Ombres portées	Flux anthropique	Inter réflexions
Building Effect Parametrization	Martilli <i>et al.</i> , 2002	Multi-couches	Séparée	Diffusion	Oui	Façades et rues	Partiellement modélisée	Multiple
Community Land Model	Oleson <i>et al.</i> , 2008	Simple couche	Séparée ou intégrée	Diffusion	Non	Façades	Donnée d'entrée	Multiple
Green Cluster Thermal Time Constant Model	Shashua-Bar et Hoffman, 2002 Shashua-Bar et Hoffman, 2004	Simple couche	Intégrée	Flux radiatif	Oui	Façades	Donnée d'entrée	Multiple
Local-scale Urban Meteorological Parametrization Scheme	Grimmond <i>et al.</i> , 1991 Grimmond et Oke., 2002 Offerle <i>et al.</i> , 2003	Simple couche	Intégrée	Modèle empirique	Non	Aucune		Simple
Met-Office Reading Urban Surface Exchange Scheme	Harman <i>et al.</i> , 2004 Porson <i>et al.</i> , 2010	Simple couche	Séparée	Diffusion	Non	Aucune	Inclus	Multiple
Multi-layer Urban Canopy Model	Kando <i>et al.</i> , 2005	Multi-couches	Intégrée	Conduction	Non	Partielles	Modélisé	Double
Noah land surface model/Single-layer Urban Canopy Model	Kusaka <i>et al.</i> , 2011 Chen <i>et al.</i> , 2004	Simple couche	Séparée	Diffusion	Oui		Modélisé	Simple
Soil Model for Submeso- scales Urbanized	Dupont <i>et al.</i> , 2004 Dupont et Mestayer, 2006 Dupont <i>et al.</i> , 2006	Dalle	Séparée ou intégrée	Flux radiatif et conduction	Oui	Partielles	Donnée d'entrée	Simple
Slab Urban Energy Balance Model	Fortuniak, 2003	Dalle	Non traité	Diffusion	Non	Aucune	Inclus	Simple
Simple Urban Energy Balance Model for Meso- Scale Simulation	Kada <i>et al.</i> , 2005	Multi-couches	Séparée	Diffusion	Oui			Multiple
Town Energy Balance	Masson, 2000 Masson <i>et al.</i> , 2002 Lemonsu <i>et al.</i> , 2004	Simple couche	Séparée	Diffusion	Non	Aucune	Partiellement modélisée	Infinie
Temperature for Urban Facets 3D	Krayenhoff et voogt, 2007	Multi-couches	Non traité	Diffusion	Oui	Façades et rues	Partiellement modélisée	Multiple
Vegetated Urban Canopy Model	Lee et Park, 2008	Simple couche	Intégrée	Diffusion	Non		Donnée d'entrée	Triple

Tableau 1.7 : Caractéristiques de modélisation d'une sélection de modèles utilisant l'équation énergétique d'une surface urbaine (adapté de Grimmond *et al.*, 2009)

Les modèles de canopée urbaine présentés se divisent en deux groupes, les modèles simple couche et les modèles multicouches. La distinction vient de l'uniformité ou non de la température de l'air et de l'humidité à l'intérieur du canyon urbain. Ainsi, les modèles simple couche ont une température et une humidité uniforme, tandis que les modèles multicouches se modélisent avec plusieurs couches afin de traiter les équations énergétiques à différentes hauteurs. Les modèles utilisant le type dalle considèrent l'environnement urbain comme une dalle urbaine où ils attribuent des propriétés physiques.

Au vu du nombre important de modèles (sans considérer les modèles n'utilisant pas le bilan énergétique), seulement quatre seront présentés (simple couche, dalle, ou multicouches).

4.1.1. Le modèle SM2-U (Soil Model for submeso-scales Urbanized) (DUPONT 2001)

Le modèle SM2-U est une extension au milieu urbain du modèle de sol rural SM2-ISBA (Interactions between Soil, Biosphere, and Atmosphere). Il a été développé à l'Ecole Centrale de Nantes. L'ébauche théorique du modèle (Mestayer et Guilloteau, 1998) puis son amélioration (Guilloteau, 1999) ont servi de base à la nouvelle version de SM2-U. Dupont (2001a et b) a permis la détermination de la température de surface de la végétation et une nouvelle paramétrisation pour faire évoluer le modèle. L'objectif est de modéliser les échanges et flux afin de simuler la CLU (Couche Limite Urbaine) au-dessus de la canopée urbaine.

Ce modèle évalue les échanges hydriques, thermiques et radiatifs entre le sol et l'atmosphère, partant de l'échelle Sub-Méso (entre l'échelle locale et l'échelle Méso) jusqu'à l'échelle Méso. De plus, il détaille les flux de chaleur à l'interface canopée-atmosphère à l'échelle du quartier afin de simuler la CLU.

Pour résumer, ce modèle permet de simuler à la fois les échanges thermiques et hydriques : flux entre les interfaces supérieures (toits), inférieures (sol) et verticales (murs) et flux de chaleur sensible et d'humidité (sources anthropiques). La prise en compte des parois verticales et du piégeage radiatif à l'intérieur des rues canyon permet d'avoir une température moyenne des surfaces des rues. Il permet aussi d'estimer les flux de surface à haute résolution spatiale de la couche atmosphérique au-dessus de zones urbaines.

Le modèle comporte ainsi deux parties :

- La première caractérisée par le bilan hydrique est définie à travers les termes du bilan thermohydrique, l'évapotranspiration (le modèle intègre la transpiration des végétaux) du sol urbain et l'humidification de l'air par divers types de surfaces urbaines. La disponibilité en eau sur les surfaces de sol imperméables et sur les toitures est évaluée pour le calcul d'un réservoir d'eau au-dessus des surfaces (sol et toitures).
- La deuxième partie, représentant les échanges thermiques, évalue les températures de surfaces selon le mode de recouvrement du sol à partir des échanges des flux énergétiques (prise en compte des flux de chaleur sensible, latente et anthropique).

L'évolution du modèle permet de prendre en compte huit types de surface (Mestayer *et al.*, 2004) (Fig. 1.25) : un sol nu sans végétation (terre, sédiment, cailloux, sable, etc.), un sol nu localisé entre des éléments épars de végétation (situé au-dessous et/ou entre la végétation et, est influencé par celle-ci), de la végétation au-dessus d'un sol nu, de la végétation au-dessus d'une surface minérale (arbres sur trottoirs, parkings, etc.), des surfaces minérales localisées entre des éléments épars de végétation (routes, trottoirs), des surfaces minérales localisées en-dessous de la végétation, les toits des bâtiments (supposés imperméables) et des surfaces d'eau (lac, rivière ou mer). Ces surfaces sont notées sur la figure respectivement bare, nat, vegn, vega, pav, cova, roof et wat. La différenciation de 'vegn' et 'vega' permet de prendre en compte l'influence du sol au-dessous de la végétation sur les transferts thermiques et hydriques. La température de surface et l'humidité spécifique de l'air sont calculées pour chaque type de sol, puis une moyenne est effectuée pour l'ensemble.

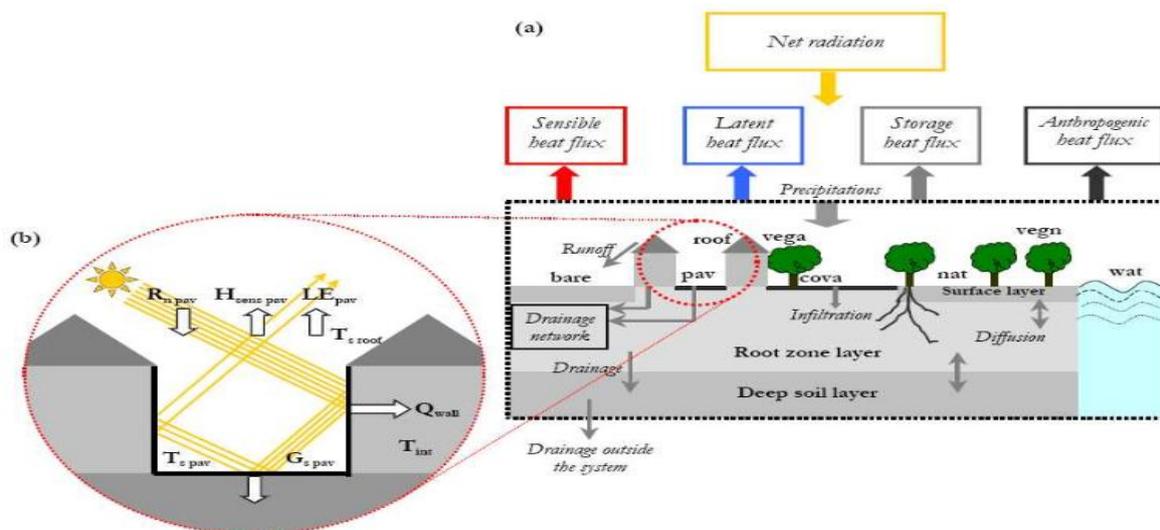


Figure 1.25 : Schéma représentant les modèles de bilan d'énergie et hydrique de SM2-U avec huit types de surface (pav, cova, bare, nat, roof, vega, vegn, wat) et 3 couches de sols (Mestayer *et al.*, 2004). Le cercle en pointillés correspond à la prise en compte des effets de la canopée urbaine

L'objectif premier de ce modèle est donc la prise en compte de l'effet de la canopée urbaine permettant d'évaluer le stockage et la libération de chaleur par les surfaces urbaines (parois verticales et piégeage radiatif).

La simulation à la fois des données hydriques, radiatives et thermiques est l'avantage principal de ce modèle. Cependant, l'absence d'information liée à l'épaisseur de la surface urbaine (donc sans prise en compte de la hauteur du bâti) et d'échanges horizontaux (en surface comme en profondeur) sont soulignés. Ces erreurs sont négligées, sauf pour les paramètres de l'eau de ruissellement et sur la réflexion des rayonnements.

Evolution du modèle SM2-U vers le modèle SM2U-3D (Dupont 2004)

Le modèle de sol urbain SM2-U évolue vers un modèle de sol appelé SM2U-3D visant à prendre en compte la troisième dimension de la surface urbaine qui permet d'obtenir, avec plus d'exactitude, les flux d'énergie et d'humidité émis par les éléments de la canopée, faiblement analysable dans la version SM2-U. L'épaisseur de la surface urbaine est principalement caractérisée par le concept de rue canyon. En effet, le modèle de sol 3D cherche à mieux prendre en compte les phénomènes de piégeage liés à l'existence du canyon.

C'est donc un modèle thermodynamique de la canopée urbaine prenant en compte la nature des surfaces et la hauteur des bâtiments (l'un des inconvénients de la précédente version). Le piégeage et les réflexions sont aussi pris en compte dans cette version 3D de SM2-U.

4.1.2. Le modèle NARP-LUMPS « Net all-ware Radiation Parametrization / Local-scale Urban Meteorological Parametrization Scheme » (GRIMMOND et OKE 2002)

Le modèle LUMPS correspond à un modèle empirique. Il est développé par Grimmond et Oke en 2002. C'est un modèle de flux superficiel utilisant des observations météorologiques standards et des caractéristiques de couverture de terrain. Il est basé sur le principe d'évaluation du bilan énergétique en prenant les rayonnements nets comme la principale source d'énergie, mais aussi les flux anthropiques et les flux de chaleur advectifs. Le modèle nécessite uniquement des données générales sur la surface urbaine telles que la hauteur moyenne des bâtiments ou bien même les fractions de surfaces occupées par chaque type de sol (*minéral* naturel, *végétal* eau, *bâti*). A partir des données météorologiques standards, de la couverture du sol et du rayonnement net, le modèle peut générer l'ensemble des termes du bilan d'énergie résultant de la surface urbaine. Il modélise la variabilité des flux spatialement et temporellement. Cependant, plusieurs étapes sont nécessaires au modèle pour arriver aux résultats (Fig. 1.26) :

- Q^* : le rayonnement net est estimé (soit par mesures soit par des observations météorologiques et des propriétés relatives à la surface tel que l'albédo ou l'émissivité)
- Q_H et Q_E : le flux turbulent de chaleur sensible et le flux turbulent de chaleur latente sont déterminés sur le rayonnement net et le flux de chaleur stockée. Les flux de chaleur anthropique sont englobés dans les flux de chaleur turbulents et stockés
- ΔQ_s : La variation de la quantité de chaleur stockée par la zone urbaine est estimée par un modèle théorique (Grimmond *et al.*, 1991)

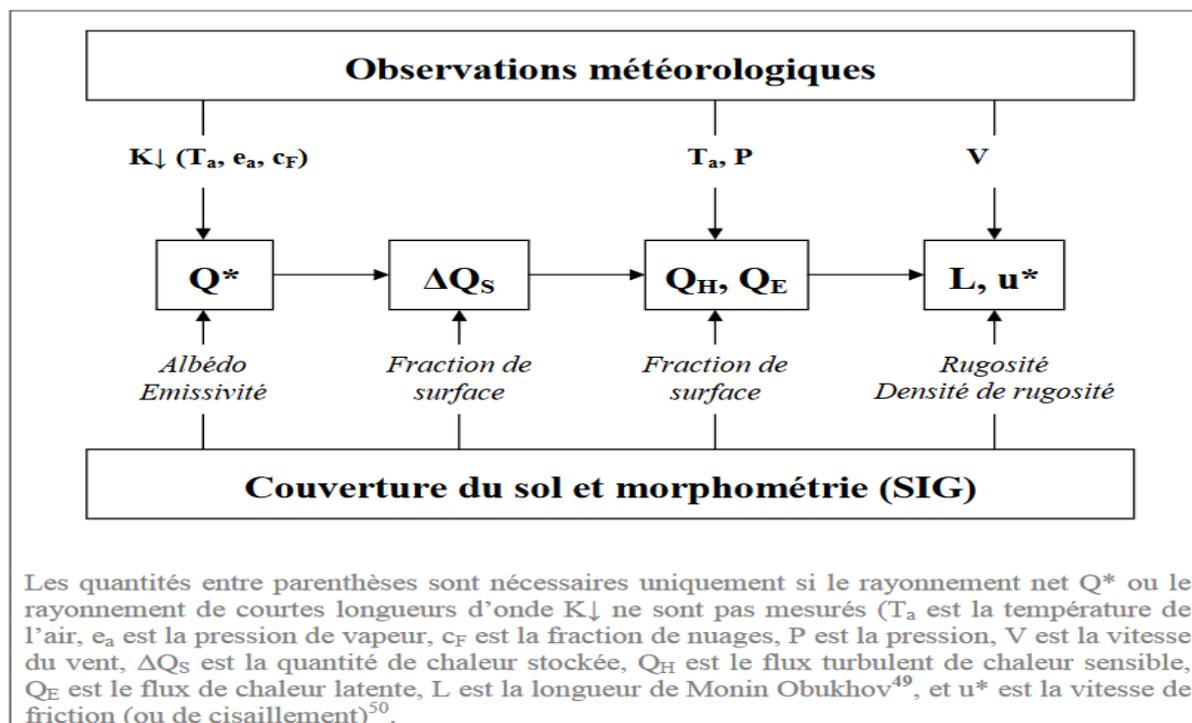


Figure 1.26 : Les différentes étapes nécessaires pour structurer le modèle NARP-LUMPS (d'après Grimmond et Oke, 2002)

L'objectif de ce modèle est donc de déterminer les flux de chaleur à l'interface canopée-atmosphère. Pour ce modèle, seulement 3 données d'entrée sont requises : le rayonnement net, la couverture du sol et les paramètres climatiques standards (température de l'air, humidité, pression et vitesse du vent). LUMPS est testé sur les données de différents quartiers urbains (7 villes d'Amérique du Nord).

Contrairement au modèle SM2-U, le modèle LUMPS prend en compte une hauteur moyenne de la surface urbaine (hauteur moyenne des bâtiments), mais sans considérer le phénomène de piégeage radiatif ou les réflexions dans les rues. Cependant, Masson (2006) précise que ce type d'approche reste possible sur des schémas extrêmement simples. L'un des inconvénients est que les statistiques sont effectuées sur des données de certains couverts et sont donc limitées par les conditions.

4.1.3. Le modèle TUF-3D (Temperatures of Urban Facets in 3D) (Krayenhoff et Voogt, 2007)

Voogt Krayenhoff (2005) puis Krayenhoff et Voogt (2007) proposent un modèle 3D de température de facettes urbaines. Le modèle TUF-3D est développé pour prévoir les températures de surfaces urbaines, suivant la géométrie et les propriétés de la surface, pour diverses conditions climatiques et différents angles solaires. Il permet d'obtenir le bilan d'énergie. Ce modèle sur la sensibilité des températures directionnelles se base sur des bâtiments de forme cubique (représentatifs de deux zones de la ville de Vancouver (Krayenhoff 2007)). TUF-3D prend en compte tous les phénomènes de rayonnement, de conduction et de convection qu'on peut retrouver dans le milieu urbain. On peut ainsi voir comment évolue la température (chaleur) à l'intérieur de la rue canyon. La représentation est assez simpliste (cellules cubiques aux faces rectangulaires). C'est un mode raster, structuré en cellules définies, en x et y (horizontales) et z (verticales). Chaque cellule a cinq orientations possibles. Les bâtiments (avec des toits plats) sont ainsi représentés par un groupe de cellules rectangulaires (Fig. 1.27). La scène est donc représentée par des cellules cubiques constituant des faces rectangulaires. Les calculs sont faits en chaque centre des faces des cellules.

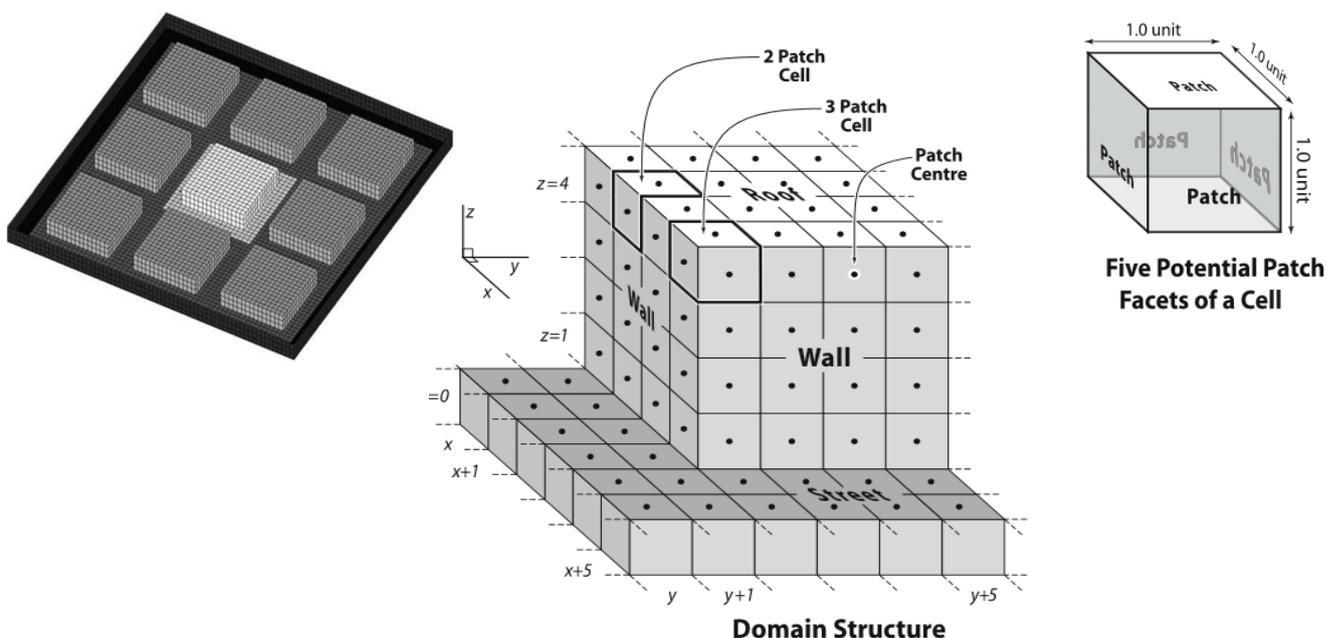


Figure 1.27 : Structure de base et assemblage des cellules rectangulaires du modèle TUF-3D (Krayenhoff et Voogt 2007a)

Au résultat, on retrouve une unité urbaine constituée d'un bâtiment entouré d'une route et répétée plusieurs fois (Fig. 1.28).

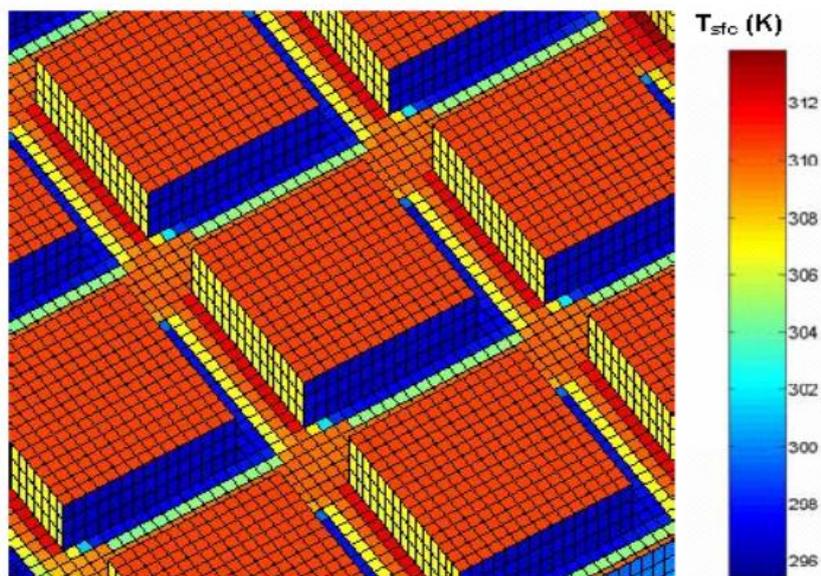


Figure 1.28 : Exemple d'une sortie du modèle TUF-3D (Krayenhoff et Voogt 2007a)

TUF-3D prend en compte tous les phénomènes de rayonnement, de conduction et de convection qu'il peut y avoir dans une zone urbaine.

La structure cellulaire 3D de ce modèle permet de calculer la température de surface pour les zones ensoleillées et ombragées et l'évaluation de la température des surfaces pour chaque cellule. Ce modèle est validé. Plusieurs applications sont réalisées dans des rues canyon (dans une zone industrielle à Vancouver en 1992 et dans d'autres sites en 2001). Cependant, le modèle TUF-3D est limité par la simplicité de la représentation 3D de la scène, au niveau géométrique.

4.1.4. Le modèle TEB (Town Energy Budget) (MASSON 2000)

L'acquisition d'une meilleure connaissance des échanges surfaces urbaines-atmosphère contribue directement aux améliorations des modèles numériques. C'est dans cette perspective qu'est développé le modèle TEB. Il a été conçu par V. Masson au CNRM de Toulouse.

Le modèle TEB (Masson, 2000) est un modèle physique dédié au calcul des échanges entre les surfaces urbanisées et l'atmosphère. Dans une première version du modèle, seules les surfaces imperméables sont simulées et la végétation urbaine est modélisée par ISBA (Interactions Sol-Biosphère-Atmosphère) mais sans interaction directe avec les bâtiments. Ce modèle traite du bilan énergétique d'une ville (ou d'une partie de ville). Son objectif est de simuler les flux turbulents à la surface du modèle atmosphérique Meso-échelle recouvert par les bâtiments, les routes ou toute autre matière minérale.

Ce modèle ne traite que des surfaces spécifiques du milieu urbain c'est-à-dire la rue, les murs et les toits (les bâtiments). Les surfaces végétalisées sont traitées par le modèle ISBA, sans interaction de la végétation sur les bilans énergétiques et hydriques des surfaces urbaines. Pour chacune des surfaces un bilan d'énergie est calculé. Ce modèle se base sur une unité de base : la rue canyon (Fig. 1.29). Ce concept de canyon urbain (Oke, 1978) définit le milieu urbain comme un groupe de rues identiques où toutes les directions sont équiprobables. Ce canyon est défini à partir de la largeur des rues, de la hauteur des murs et de la largeur des immeubles.

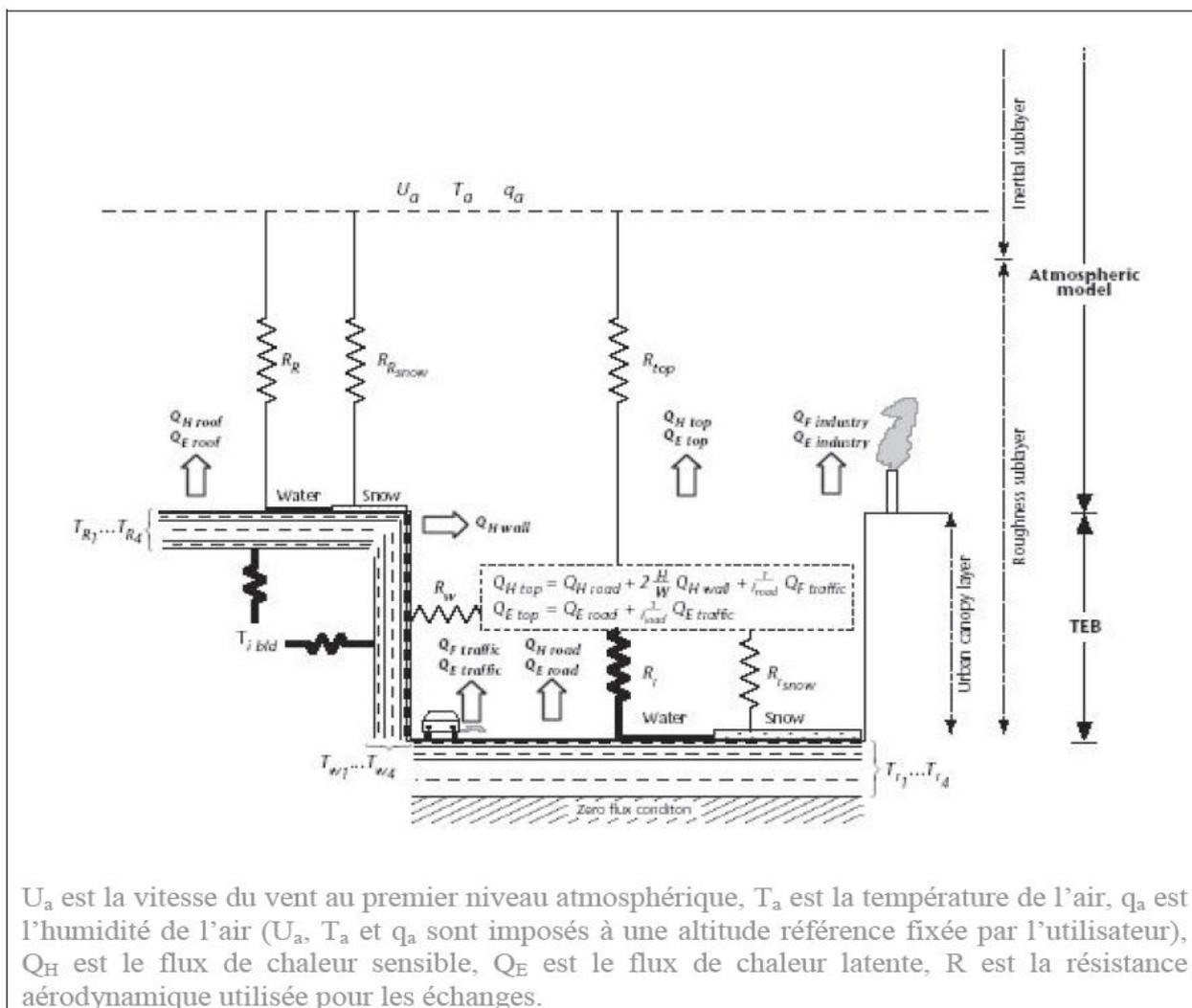


Figure 1.29 : Représentation schématique du modèle TEB (Masson, 2000)

En sortie du modèle TEB, on peut alimenter un modèle atmosphérique par les flux de chaleur, de vapeur d'eau et de quantité de mouvements. La température de la rue et l'humidité sont également calculées pour appréhender le microclimat urbain.

La validation du modèle est réalisée en comparant des résultats de simulation avec des mesures directes de températures de surface et de bilans d'énergie, sur plusieurs sites aux formes urbaines assez simples, avec des latitudes et des milieux naturels différents : Mexico (Masson *et al.*, 2002), Ouagadougou, Vancouver (Masson *et al.*, 2002), Paris, Marseille (dans le cadre de la campagne ESCOMPTE-CLU ; Lemonsu, 2003. Mestayer *et al.*, 2005), Melbourne.

Il est amélioré récemment, afin d'être également capable de simuler finement des impacts liés à la thermique du bâtiment ou du confort humain, ainsi que certains aménagements pouvant être mis en œuvre dans des stratégies d'adaptation au changement climatique (verdissement, climatisation, etc.). Ce modèle sera présenté, plus en détails dans la partie suivante avec le modèle SURFEX.

4.1.5. Synthèse

Une action de recherche internationale d'inter-comparaisons de ces différents modèles, (à échelle méso à locale) est menée (Grimmond *et al.*, 2010, 2011). Le but de cette action n'est pas d'évaluer les modèles mais de les classer sur l'approche la plus performante pour représenter les échanges entre canopée urbaine et atmosphère, de même que les processus physiques. Ainsi, sur les 33 modèles et sur 2 jeux de données expérimentales, il est dit qu'aucun modèle n'est plus performant pour tous les flux (justifié par la diversité des applications). Cependant, il est noté que la prise en compte de la végétation et des surfaces naturelles améliore le résultat global du modèle.

Une interrogation est soulevée concernant la représentation de la ville dans ces modèles. En effet, en fonction des échelles d'appréhension des phénomènes, la représentation de la ville n'est pas la même. Une représentation explicite de la géométrie de la ville, à l'aide de couches de données urbaines ou satellitaires est possible. Cependant la représentation à une résolution moindre (en fonction de la maille choisie ou de la limitation de calcul) est préférable. L'information n'est pas toujours disponible et utilisable par tous.

4.2. Modèle climatique : échelle d'un quartier à la rue

Les modèles représentant un fragment urbain ont vocation à étudier les hétérogénéités des facteurs physiques. Selon l'objectif et la spécialité, les modèles représentent en général mieux une partie des flux et ont une approche plus simplifiée, afin d'obtenir un bilan complet des différents flux de chaleur et de masse entre surface bâtie, sol, végétation et atmosphère.

Les interactions entre les surfaces, la végétation et l'atmosphère dans un environnement urbain sont complexes et difficiles à appréhender. Les effets sont nombreux et peuvent avoir des impacts néfastes sur l'environnement, la santé ou même sur l'économie du pays. Selon Vinet (2000), tous les changements ne peuvent pas se vérifier par une combinaison linéaire de phénomènes connus séparément. Seules les simulations numériques permettent une estimation de ces différents effets.

Cette échelle permet de détailler le climat à l'échelle d'un immeuble, d'une rue ou d'un quartier. Ces modèles permettent de définir la relation entre un fragment de bâti et son microclimat, tout en reproduisant les interactions entre les surfaces bâties, la végétation et l'atmosphère. Dans ces modèles dédiés à la ville, les surfaces ne peuvent plus être représentées explicitement, mais l'impact de la forme et des matériaux est paramétré. La plupart de ces modèles peuvent être classés parmi les modèles physiques, c'est-à-dire visant à résoudre un système d'équation.

4.2.1. Le modèle Thermo-radiatif « SOLENE » (GROLEAU 1987)

Le modèle SOLENE (Groleau, 1997) est conçu par le laboratoire CERMA (Centre de Recherche Méthodologique d'Architecture) à Nantes. Ce centre s'intéresse à l'ensemble des phénomènes physiques (des ambiances architecturales et urbaines). Des recherches sur les paramètres solaires, lumineux et radiatifs ont permis de développer le logiciel de simulation SOLENE qui repose sur une

modélisation 3D réaliste des phénomènes intégrant une multitude de calculs sur les effets solaires, lumineux, thermiques et le confort extérieur. Ainsi, il permet d'observer le comportement thermo-radiatif d'un ensemble bâti en le soumettant aux conditions météorologiques. Ce modèle analyse par conséquent les interactions entre la forme urbaine et les dimensions environnementales et climatiques, tout en prenant en compte les caractéristiques de la forme urbaine (type de bâti, densité, etc.) et les propriétés physiques de l'espace. L'aspect thermique concerne l'analyse des températures des surfaces de l'enveloppe des bâtiments. La simulation réalisée par SOLENE peut se faire à l'échelle de la rue, d'un bâtiment tout comme à l'échelle de l'îlot ou du quartier. Ainsi, il se positionne sur des échelles micro et locales.

L'application du logiciel SOLENE propose divers modes de visualisation rendant compte des comportements observés dans l'espace et dans le temps. Ainsi il permet, d'observer et de réaliser un tracé d'ombre, à partir d'une scène géométrique 3D complexe. Grâce à cette réalisation, il est possible de déterminer des durées d'ensoleillement mais aussi d'évaluer l'énergie solaire incidente, d'estimer l'éclairage naturel et de calculer l'énergie incidente en provenance du ciel. Par ces résultats et ces calculs, l'évaluation des inter-réflexions solaires et lumineuses (sur le principe de radiativité) (Musy *et al.*, 2006) est définie. Toutes ces applications permettent d'évaluer les températures de surface des parois et d'appréhender le niveau de confort extérieur.

Le logiciel SOLENE permet de simuler différentes grandeurs et divers phénomènes :

- les caractéristiques d'ensoleillement (tracé d'ombres, durée d'insolation, etc.)
- les différentes composantes du rayonnement solaire, flux directs et diffus, incidents sur chaque élément de la géométrie
- les problèmes de transmission lumineuse à l'intérieur des bâtiments
- les rayonnements thermiques avec les rayonnements solaires et infrarouges
- le flux de chaleur sensible entre les parois et l'atmosphère

Un certain nombre de paramètres d'entrée (tel que la température de l'air, le rayonnement incident, etc.) sont exigés afin de réaliser ces simulations.

La scène géométrique 3D est définie par un maillage triangulaire, où chaque maille ou facette est décrite par les propriétés optiques et thermiques du matériau qui la compose (Fig. 1.30). En fonction de la scène étudiée, les mailles peuvent varier de 10 cm à quelques mètres. Chaque maille est supposée homogène. Les calculs sont effectués au centre de chaque maille et les résultats sont attribués à la maille entière. SOLENE permet donc une représentation fine de la morphologie de la scène à simuler.

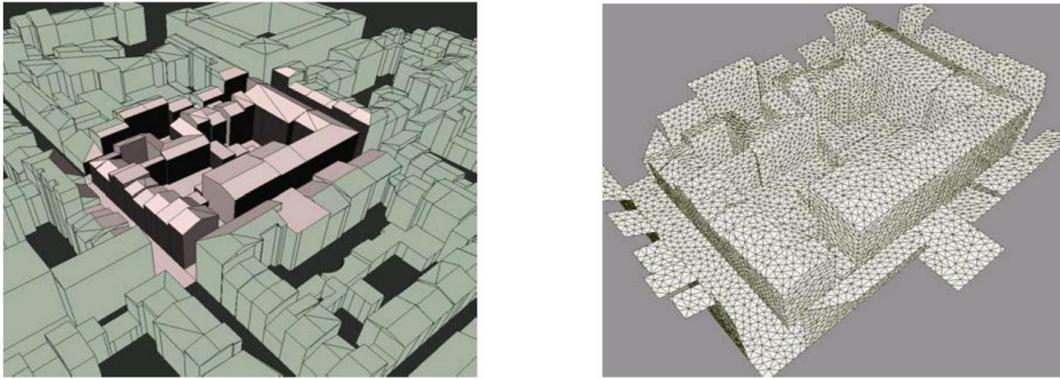


Figure 1.30 : Modèle 3D d'un îlot et des rues alentour (à gauche) et maillage du modèle avec Solène (à droite) (Groleau *et al.*, 2003)

Afin de valider la pertinence du modèle, notamment sur les aspects thermo-radiatifs, une application du modèle sur un îlot situé dans le centre de Marseille (Groleau *et al.* 2003) ou encore sur plusieurs sites de Strasbourg (Ringebach, 2004) est mise en place et, est concluante.

C'est un des premiers modèles donnant la possibilité de pouvoir importer un modèle géométrique en 3D. Ainsi la morphologie des bâtiments, les caractéristiques de surface des toits, murs, sols et végétation sont prises en considération afin de mieux simuler les échanges thermiques.

L'inconvénient du modèle provient de l'acquisition et de la préparation de toutes les données d'entrée. Cela peut prendre plusieurs journées suivant la taille de la scène. De plus, les résultats du modèle sont très sensibles à ces nombreuses données d'entrée. Une légère variation ou erreur sur une entrée peut entraîner de grands écarts sur les résultats.

De plus, ce modèle ne prend en compte ni le flux de chaleur latente, ni l'anthropie (Ringebach, 2004).

4.2.2. Le modèle SOLWEIG (SOlar LongWave Environmental Irradiance Geometry model) (Lindberg *et al.*, 2008)

Ce modèle permet d'approximer les températures de surfaces à partir de la température d'air et en fonction de l'exposition au soleil de la surface considérée, au cours du temps. Il permet également de simuler les variations spatiales de la température moyenne radiante et les flux de courtes et de grandes longueurs d'ondes, en 3D. Son calcul est donné par l'équation suivante :

$$T_s - T_a = 0,37 * N_{\max} - 3,41 \quad (17)$$

T_s : température de surface (°C)

T_a : température ambiante (°C)

N_{\max} : élévation maximale du soleil (degrés)

La différence entre les valeurs T_s et T_a est appelée T_{diffmax} . Cette dernière valeur est prise en compte 2h après que le soleil ait atteint sa hauteur d'élévation maximale. Le modèle est disponible sur une interface graphique pouvant être téléchargée gratuitement via le site (<http://gvc.gu.se>).

4.2.3. Le modèle ENVI-met (Environmental Meteorology) (BRUSE 1999)

ENVI-met (Environmental Meteorology) est un modèle microclimatique tridimensionnel développé par Michael Bruse, de l'institut de géographie à l'université de Bochum en Allemagne, au sein du groupe de recherche en Climatologie (GRC), en 1999.

Ce logiciel est utilisé pour simuler les interactions microclimatiques de la surface, de la végétation et de l'air de l'environnement urbain. Ainsi, l'analyse de l'impact, sur le microclimat des modifications de l'environnement urbain, est possible à petite échelle (cours intérieures, etc.) (Bruse, 1999). Seul le climat sur le quartier peut donc être modélisé. C'est un modèle 3D, non hydrostatique avec une grille géométrique (le maillage), permettant de couvrir une zone de 100mx100m jusqu'à 1kmx1km. Sa résolution horizontale est de 0.5 à 10m pour une maille et de 10s pour le temps (Colombert, 2008). Seul le climat sur le quartier peut donc être modélisé, ce modèle n'est pas conçu pour modéliser le climat à l'échelle d'une ville.

Ce logiciel est basé sur l'interaction d'une structure composée de quatre modules, selon Spangenberg (2004) :

- l'atmosphère avec la vitesse du vent, la température, l'humidité etc.
- le sol se définissant par sa température et son humidité
- la surface comprenant les flux des surfaces horizontales et verticales
- la végétation avec la température des feuillages, les échanges de chaleur sensible et latente

ENVI-met est un modèle de prévision basé sur les lois fondamentales de la dynamique des fluides et de la thermodynamique. Le modèle comprend la simulation :

- du flux autour et entre les bâtiments
- des processus d'échanges de chaleur et de vapeur d'eau sur le sol et les murs
- de la turbulence
- des paramètres de la végétation et les échanges effectués au niveau de la végétation
- de la bioclimatologie
- de la dispersion des particules

Ainsi, ENVI-met permet la simulation de l'interaction Surface-Végétation-Atmosphère. Pour réaliser la simulation, il suffit de définir la maille du modèle ainsi que les données d'entrée et le choix des données de sortie. L'interface utilisée pour entrer ces paramètres de simulation est assez simple d'utilisation et permet de visualiser en 2D la zone urbaine à modéliser (Fig. 1.31).

Analyse bibliographique

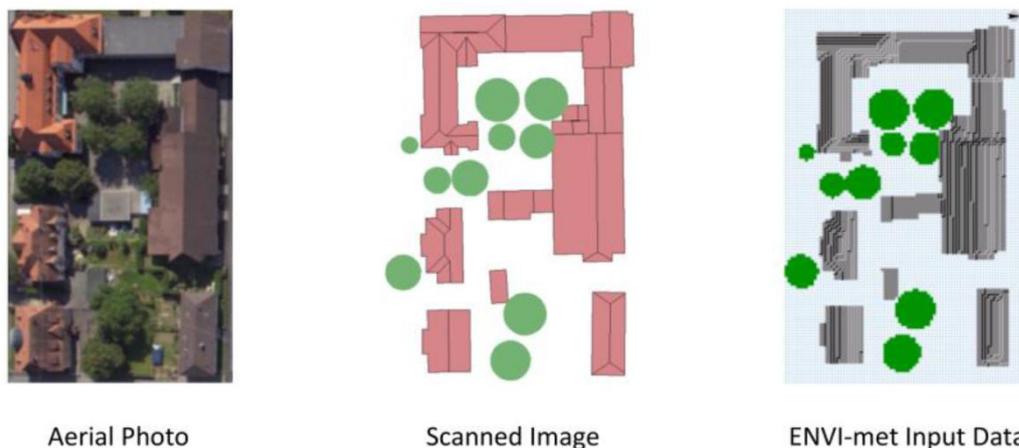


Figure 1.31 : Exemple de photo aérienne (orthophotos), images scannées et représentation dans le logiciel ENVI-net.
Source : Youssef, 2010

Le logiciel ENVI-net est associé au logiciel de visualisation, Léonardo 3.0, pour les résultats de la modélisation, en 2D comme en 3D (Fig. 1.32).

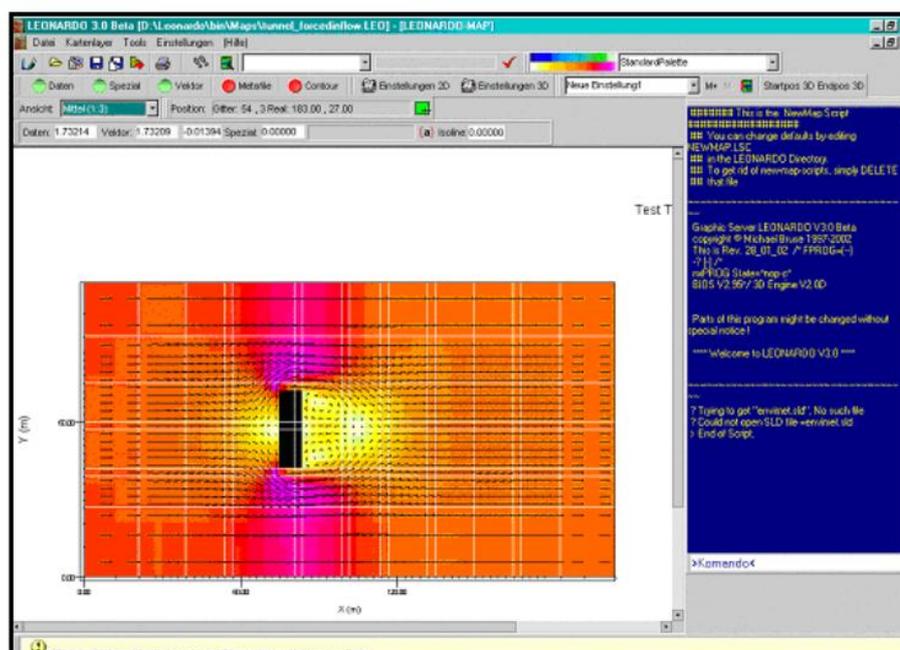


Figure 1.32 : Exemple de visualisation des résultats du modèle ENVI-net avec le logiciel Leonardo (Bruse, 2004)

Les domaines d'applications de ce logiciel sont la climatologie urbaine, l'architecture, l'urbanisme et la planification environnementale. Une communauté d'utilisateurs existe et les champs et exemples de l'usage de ce logiciel sont présents. De plus, ce modèle peut être utilisé librement et les explications sont accessibles directement sur le site www.envi-net.com/.

Cependant, il est important de noter qu'aucune évaluation complète de ce modèle n'est réalisée. Plusieurs essais de validations existent mais, du fait des faibles résultats dû au manque de données sur les zones étudiées, ce modèle n'est pas encore complètement validé. On ne peut donc pas savoir si la modélisation est fiable.

Une autre limite de ce modèle est qu'il ne prend pas en considération les rejets anthropiques (notamment liés au trafic routier) pouvant être importants dans certaines situations et qu'il a des difficultés à être significatif sans vent, d'après Michael Bruse (2000).

4.2.4. Synthèse globale

Il existe de nombreux modèles simulant le climat urbain. Cependant leur différence provient de par leur approche, leur formulation et leur échelle d'applications. Plusieurs de ces modèles nécessitent d'acquérir des compétences importantes en climatologie urbaine afin de pouvoir les utiliser sans biaiser l'information que l'on souhaite dégager. D'autres modèles, tels que des modèles empiriques, eux, ne sont parfois pas transposables d'une ville à une autre.

Comme nous le constatons, ces modèles adaptés aux échelles locales s'appuient sur une discrétisation spatiale (c'est-à-dire le maillage) relativement fine. Selon Colombert (2008), cette description du cadre du bâti permet une représentation relativement précise des qualités climatiques d'un lieu. Cependant, la simulation dépend énormément de la qualité des données d'entrée (input).

Il est important de noter que les modèles de microclimat urbain deviennent plus complets de par leur description plus détaillée de la composition urbaine. Ces modèles sont plus qu'importants pour comprendre et évaluer les différents impacts des variables urbaines (nature des bâtiments, occupation des sols, etc.), climatiques ou anthropiques.

Cependant, il faut trouver un compromis entre la précision de la modélisation, les capacités de calcul, la disponibilité de la donnée et l'effort nécessaire pour la fournir au modèle lorsque l'on parle d'échelles urbaines. De plus, il reste encore beaucoup de progrès à faire sur la modélisation de l'îlot de chaleur urbain afin de pouvoir proposer une information plus facilement utilisable et interprétable, autant par les acteurs locaux que par les aménageurs ou bien les habitants de la ville.

4.3. Le modèle choisi : SURFEX-TEB

L'évolution de l'atmosphère est calculée à partir d'un état initial basé sur des observations réelles. Les modèles établissent des prévisions numériques à l'échelle globale (Arpège en Europe) ou à l'échelle régionale (Arome pour l'Europe avec une résolution de 2.5km).

La modélisation surfacique dans la prévision météorologique (à des échelles spatiales de l'ordre du km) a toujours une place importante dans les activités du CNRM-GAME (Centre National de Recherches Météorologiques). Un grand nombre d'outils numériques voient le jour : ISBA (Noilhan and Planton (1989); Mahfouf and Noilhan (1996)) ou TEB (Masson 2000). Ils sont actuellement regroupés au sein d'une plate-forme appelée SURFEX (SURFace EXternalisée, Masson *et al.*, 2013). Afin d'améliorer les paramétrisations des processus physiques et être appliqués à de plus hautes résolutions, ces modèles sont améliorés et élargis.

4.3.1. SURFEX

SURFEX, SURFace EXternalisée, est un code autonome de surface représentant les processus de surface. SURFEX est donc une « surface externalisée ». SURFEX est conçu de manière modulaire et peut accueillir de nouvelles paramétrisations ou schémas. Il décrit les caractéristiques des surfaces

Analyse bibliographique

d'un domaine d'étude en fonction du type d'occupation du sol (surfaces urbaines, surfaces naturelles, surfaces d'eau). Il permet aussi de simuler les flux (de chaleur par exemple : rayonnement, conduction, convection) échangés entre la surface et l'atmosphère, pour des applications variées, et peut être exploité en mode couplé à d'autres modèles météorologiques ou être utilisé de manière autonome. Dans SURFEX, chaque maille est composite et un calcul des flux est fait pour chacune des sous-surfaces, ces flux étant ensuite agrégés. Les codes de surface (simulant les flux à l'interface surface/atmosphère) sont améliorés et validés en mode forcé⁴⁴. Le modèle est limité dans l'espace, aussi bien horizontalement que verticalement. Aux frontières de SURFEX, les valeurs des différents paramètres de description de l'atmosphère sont calculées afin que les prévisions de SURFEX servent pour un autre modèle plus grand.

Schémas physiques :

SURFEX décrit la surface comme une mosaïque composée de quatre principaux couverts (1. La mer et les océans, 2. Les lacs et rivières, 3. Les sols naturels et la végétation, 4. Les villes, les surfaces minéralisées) (Fig. 1.33). SURFEX est un code modulaire, ce qui permet à l'utilisateur de choisir certains schémas physiques, appliqués lors de la simulation selon les tuiles qui décrivent le sol. A titre d'exemple, l'utilisateur peut choisir les schémas suivants :

SURFEX			
			
Mers et océans: ECUME SST prescrites, formule de Charnock Modèle de couche mélangée océanique	Sol/Végétation: ISBA (Interaction Soil Biosphere Atmosphere) - Evolution des flux - Déformations	Ville: TEB (Town Energy Balance) - Approche "canyon" - Schéma radiatif détaillé - Stockage de chaleur dans les immeubles	Lacs: FLAKE Températures prescrites formule de Charnock

Figure 1.33 : Principaux couverts et schémas numériques adaptés du modèle SURFEX

La figure 1.33 permet de montrer que SURFEX se décompose en différents modules modélisant la surface d'un domaine. Le plus utilisé dans cette recherche est TEB pour les surfaces urbaines.

A chaque point de grille du domaine de simulation sont associées des fractions de couverture spatiale, pour chacun de ces types. Comme les mécanismes physiques qui régissent le fonctionnement de ces types de couverts sont différents, chaque type possède sa propre paramétrisation de surface pour calculer les échanges hydriques, énergétiques et turbulents entre le couvert considéré et l'atmosphère. Une fois les échanges calculés indépendamment pour chaque

⁴⁴ En climatologie, on parle de forçage pour caractériser les perturbations engendrant des changements de températures.

type de surface, ils sont agrégés à l'échelle de la maille du domaine, en fonction des fractions de couvertures associées.

4.3.1.1. Bases de données

Une simulation avec SURFEX nécessite l'utilisation de certaines bases de données qui renseignent sur les champs physiographiques, tels que :

- sable et argile : texture du sol (FAO, HWSD)
- orographie : relief (GTOPO30)
- lacs (profondeur)
- couverture du sol (ECOCLIMAP)

ECOCLIMAP I est une carte globale à 1km de résolution. ECOCLIMAP II couvre l'Europe et présente plus d'informations en termes de couvertures. Cette version combine des informations satellitaires et des cartes d'occupation des sols. Une troisième version est à venir ECOCLIMAP III, couvrant l'Afrique.

4.3.1.2. Représentation

SURFEX utilise une approche par type mosaïque (tuile). Au sein d'une grille, la surface est divisée en entités homogènes par le biais de fractions (respectivement de surfaces artificielles, sol nu/végétation, lacs et mers/océans). La surface est donc virtuellement divisée en 4 tuiles : Mers/Océans, Lacs, Sol nu/ Végétation et villes. Chaque tuile est divisée en patches c'est-à-dire en caractéristiques définissant la zone que l'on étudie. Par exemple, pour la tuile « sol nu/végétation » 12 « patches » sont définis : sol nu, roches, neige permanente, forêts de feuillus, culture C3, culture C4, culture irriguées, prairies, prairies tropicales, parcs et jardins/zones humides (Fig. 1.34).

Chaque entité va recevoir le même nombre de forçage atmosphérique⁴⁵ et chaque entité calcule ses flux d'entrée, par le schéma de surface correspondant au type de surface. Par la suite, les flux sont agrégés au prorata de leurs fractions de surface estimées du mode réel et renvoyés vers l'atmosphère (ou diagnostiqués). Il n'y a pas d'échange direct entre les entités. SURFEX peut fonctionner en mode « forcé » (off-line), c'est-à-dire avec des conditions atmosphériques prescrites au niveau donné (au-dessus de la canopée) ou bien en mode « couplé » avec un modèle atmosphérique. Le premier mode est celui où le temps de calcul est le plus faible mais nécessite le plus de données météorologiques.

⁴⁵ Les forçages atmosphériques proviennent du modèle AROME. Ils sont aux nombres de 8 : température, humidité, pression, force du vent, rayonnement solaire, rayonnement infrarouge, nébulosité (basse, haute et moyenne) et précipitations (pluie et neige)

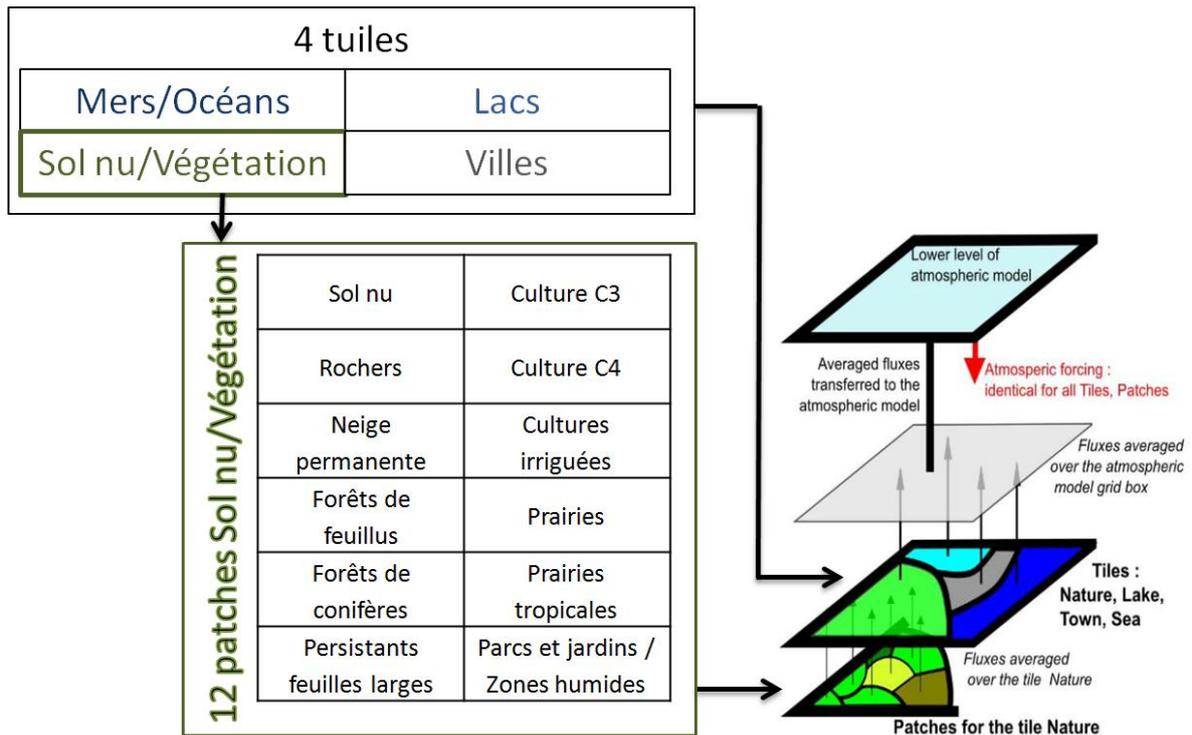


Figure 1.34 : Représentation schématique de la discrétisation de la surface en quatre tuiles dans SURFEX (d'après Masson *et al.*, 2013)

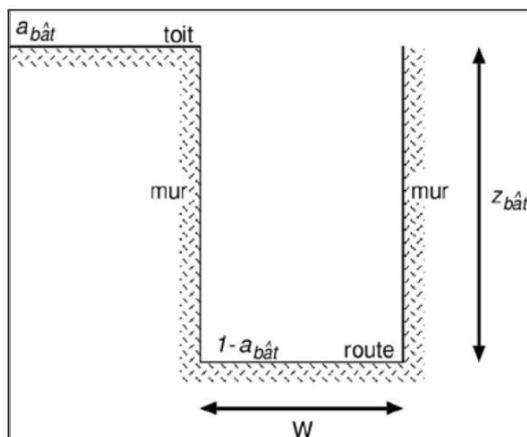
Pour les bâtiments, SURFEX s'appuie sur TEB. Celui-ci a pour but de paramétrer la dynamique atmosphérique propre à la ville ainsi que les interactions thermodynamiques.

4.3.2. Le modèle TEB

La présentation du schéma TEB s'appuie en grande partie sur l'article de Valéry Masson (2000). TEB repose sur une physique relativement complète.

4.3.2.1. Le principe de canyon urbain

TEB est le premier modèle se basant sur une approche de type « rue canyon » (Masson 2000 et Lemonsu *et al.*, 2004). Le canyon est défini à partir de la largeur des rues, de la hauteur des murs et de la largeur des immeubles (Fig. 1.35). Ces caractéristiques sont constantes sur une maille du schéma. TEB repose sur une géométrie urbaine simplifiée.



- W : largeur moyenne des rues
- $a_{bât}$: fraction de bâtiment (surface de toit/surface de toit et route)
- $z_{bât}$: hauteur moyenne des bâtiments

Figure 1.35 : Schématisation du canyon urbain dans TEB (Lemonsu, 2003)

Dans ce canyon urbain est modélisé le bilan d'énergie des trois surfaces urbaines considérées. Chaque surface urbaine est constituée de plusieurs couches successives de matériaux.

4.3.2.2. Morphologie urbaine et paramètres de TEB

Dans le modèle originel, les caractéristiques de la structure urbaine de la maille sont considérées comme homogènes. Sur un point de grille de surface urbanisée, les rues sont vues comme infiniment longues, sans interactions et toutes les directions des rues ont équiprobables. Le même constat est fait pour la hauteur des bâtiments, du rapport d'aspect à la rue, des propriétés radiatives et thermiques des bâtiments. La forme et les matériaux de construction sont autant de paramètres variant d'une ville à une autre. Ces hypothèses sont adaptées pour des tailles de maille pouvant descendre jusqu'à 200m.

Dans TEB, la surface urbaine est découpée uniquement selon un maillage horizontal et chaque maille possède ses propres caractéristiques s'appuyant sur le concept du canyon urbain. Ce dernier se caractérise d'un toit, d'une route et de deux murs se faisant face (Fig. 1.36). Ce principe permet d'évaluer les flux turbulents et radiatifs de la couverture urbaine en représentant avec une exactitude assez correcte les conditions du bilan d'énergie superficielle.

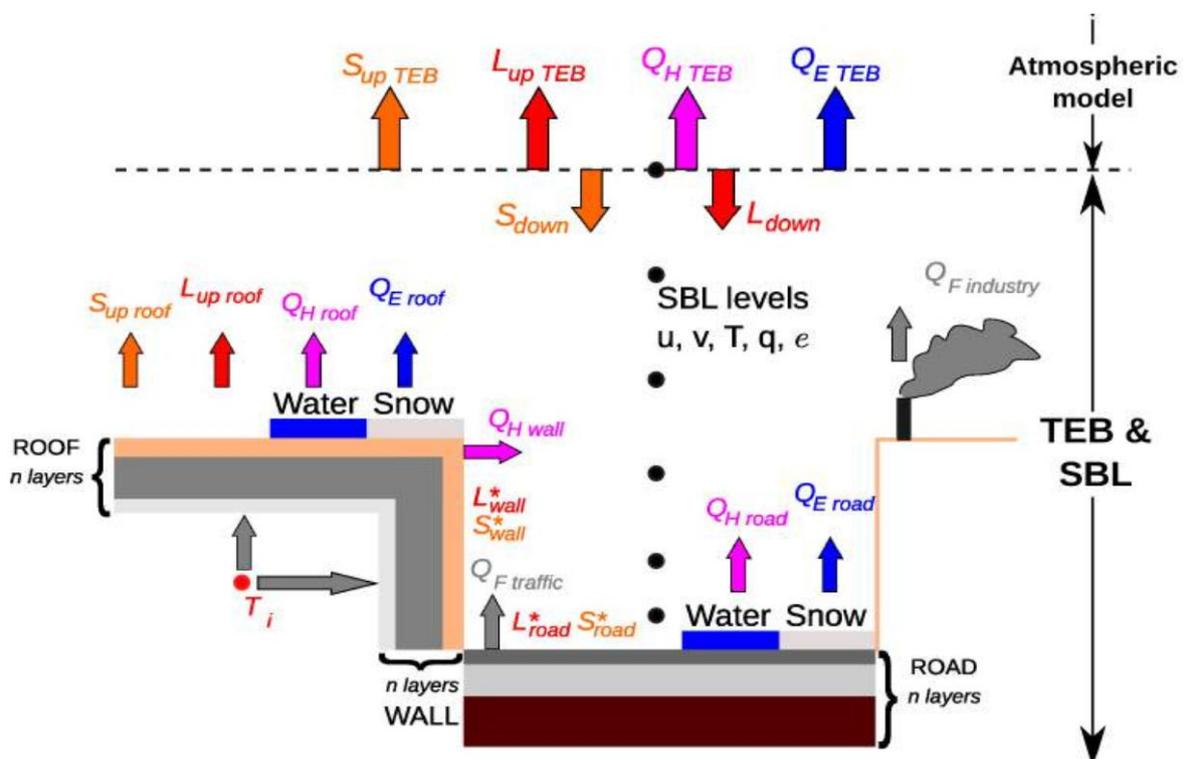


Figure 1.36 : Schématisation du modèle TEB (source : Masson, 2000)

TEB s'appuie sur des hypothèses pour représenter la ville :

1. les bâtiments ont la même hauteur et largeur
2. les bâtiments sont localisés le long de routes identiques. La longueur est plus importante que la largeur dans la maille. L'espace entre ces deux constructions (les deux faces de murs) est défini comme un canyon
3. n'importe quelle orientation de route est possible et toutes existent avec la même probabilité. Cette hypothèse permet le calcul d'un forçage moyen pour les surfaces routes et

Analyse bibliographique

murales. Autrement dit, quand l'orientation du canyon apparaît dans une formule (en ce qui concerne le soleil ou la direction du vent), une moyenne est effectuée en l'intégrant à 360°C ; de cette manière, aucune discrétisation n'est possible sur l'orientation

TEB prend en compte différents processus :

- les rayonnements solaires et infrarouges sont piégés dans le canyon ou réfléchis (S et L)
- les flux d'origine anthropique sont intégrés au bilan par les flux de chaleur sensible (des murs, toits et routes, Q_H) et les flux provenant du trafic et de l'industrie (Q_F)
- le stockage de chaleur et la conduction provenant des routes et des bâtiments sont intégrés et décrits par plusieurs couches pour simuler l'isolation des murs, par exemple
- l'interaction entre les bâtiments et l'air du canyon se modélise par l'ajout d'une force de traînée⁴⁶

Ces hypothèses, ainsi que les formulations physiques choisies permettent le développement d'un modèle relativement simple. Les paramètres descriptifs des surfaces urbaines et les variables du modèle TEB sont présentés et résumés en Annexe 2.

TEB est intégré dans le modèle atmosphérique de méso-échelle Meso-NH et dans le modèle de prévision du temps AROME (Seity *et al.*, 2011). Dans les dernières versions, de nouveaux paramétrages permettent au modèle TEB des études sur l'aménagement du territoire ou sur la consommation énergétique des bâtiments. Une amélioration de la modélisation et l'interaction des bâtiments est possible grâce à TEB-BEM (Pigeon *et al.*, 2014), TEB-CANOPY (Hamdi et Masson, 2008) et l'insertion des panneaux photovoltaïques (Masson *et al.*, 2014). L'amélioration de la végétation et des toits végétalisés et de l'hydrologie par l'extension du modèle TEB-Veg (Lemonsu *et al.*, 2012) et la prise en compte du confort thermique des habitats par l'intermédiaire de TEB-UTCI ont permis d'améliorer encore le modèle pour les études d'évaluation d'aménagement urbain.

Evolution du modèle TEB

TEB est amélioré afin de pouvoir simuler finement les impacts liés à l'énergétique du bâtiment ou le confort humain, ainsi que certains aménagements pouvant être mis en œuvre dans des stratégies d'adaptation au changement climatique (toits, végétalisation, verdissement, climatisation, etc.).

TEB-Veg : intégration de la végétation dans TEB

Pour intégrer les surfaces naturelles, le schéma urbain TEB nécessite d'être couplé avec un schéma dédié à ces surfaces, ISBA (Noilhan et Planton, 1989). Cependant ce couplage ne permet pas de décrire les interactions à micro-échelles entre le bâti et la végétation. Une nouvelle version du modèle TEB-Veg (Lemonsu *et al.*, 2012) permet d'intégrer explicitement la végétation basse (c'est-à-dire les jardins) dans les rues canyons, entre les bâtiments. Une distinction est faite entre la végétation dite « pure » qui n'est pas influencée par la présence de couvertures imperméables dans la même maille d'une grille (à l'instar de la forêt, de champs agricoles, etc.) et la végétation dite « urbaine » faisant partie du paysage urbain.

⁴⁶ Dans la version CANOPY, une force de traînée dans et au-dessus de la canopée est introduite pour prendre en compte les effets verticaux des bâtiments (Masson *et al.*, 2009 ; Hamdi *et al.*, 2008)

Dans TEB-Veg, la végétation à l'intérieur du canyon est toujours traitée par le modèle ISBA, mais une nouvelle architecture du code est présente, ainsi :

- pour fournir à ISBA les conditions atmosphériques, les flux turbulents sur la végétation sont calculés à partir du modèle TEB
- les contributions de la végétation sont générées par l'intermédiaire des variables micro-climatiques à l'intérieur du canyon (température, humidité, vent). Ce calcul se définit par la fraction de végétation urbaine à partir de son emprise de la surface ville. Plus précisément, les influences, et les contributions de la géométrie du canyon et des surfaces imperméables sont prises en compte en forçant ISBA. Les paramètres géométriques sont plus réalistes puisque le canyon urbain est représenté avec une largeur multipliée

Le modèle TEB-Veg agrège les flux surperficiels selon la part de chaque surface dans la maille (toits, murs, routes et jardins). Il calcule aussi la température de l'air et l'humidité dans le canyon associé aux murs, routes et jardins (ainsi que la chaleur anthropogénique).

De plus, il est possible de connaître l'orientation ainsi que de séparer le comportement thermique des deux murs du canyon.

Ce modèle est comparé avec TEB-ISBA, avec des données expérimentales collectées sur un site au sud d'Israël (Shashua-Bar *et al.*, 2009). Cette comparaison montre l'intérêt du couplage ville-végétation au sein d'un canyon pour les environnements urbains présentant un taux significatif d'espaces verts. La description de la végétation urbaine dans TEB est poursuivie avec la mise en place d'une paramétrisation pour les toitures végétalisées (De Munick, 2013). Cette nouvelle paramétrisation se nomme GREENROOF. Ce modèle combine donc le modèle de nature ISBA à TEB.

TEB-BEM : l'énergétique du bâtiment

TEB-BEM (Building Energy Model) constitue une nouvelle version, dans laquelle les processus physiques au sein des bâtiments sont mieux représentés et la simulation énergétique des bâtiments est plus réaliste. Développé par Bueno *et al.*, (2011), ce modèle est basé sur des hypothèses physiques et géométriques simples (Fig. 1.37). Cette version permet entre autre de calculer la consommation énergétique d'un bâtiment à l'échelle de la ville ou d'une maille. Les versions précédentes de TEB ne pouvaient pas calculer cette consommation, ni les émissions de chaleur perdue (associées aux systèmes HVAC *Heating, Ventilation and Air-Conditioning*, en français Chauffage, ventilation et climatisation).

TEB-BEM calcule la demande d'énergie d'un bâtiment en appliquant une méthode de bilan thermique. Il inclut des modèles spécifiques pour des systèmes de bâtiments actifs et passifs. Il est défini par une seule zone thermique. BEM suppose que tous les bâtiments (dans la zone urbaine) ont la même température de l'air intérieur et le même taux d'humidité. Cette approche est justifiée si l'objectif est de calculer la consommation d'énergie globale d'un bâtiment, plutôt que la performance énergétique :

- l'inertie thermique des matériaux de construction est représentée par une seule masse thermique
- un apport de chaleur par le rayonnement solaire à travers les fenêtres (en supposant un ratio vitrage/mur uniforme sur toutes les façades du bâtiment)

Analyse bibliographique

- un apport de chaleur par convection au travers des parois des bâtiments et un apport des équipements présents dans le bâtiment
- un rez-de-chaussée adiabatique. La version actuelle de BEM suppose que la surface du bâtiment en contact avec le sol est bien isolée
- échange de chaleur avec l'extérieur par infiltration d'air et de ventilation

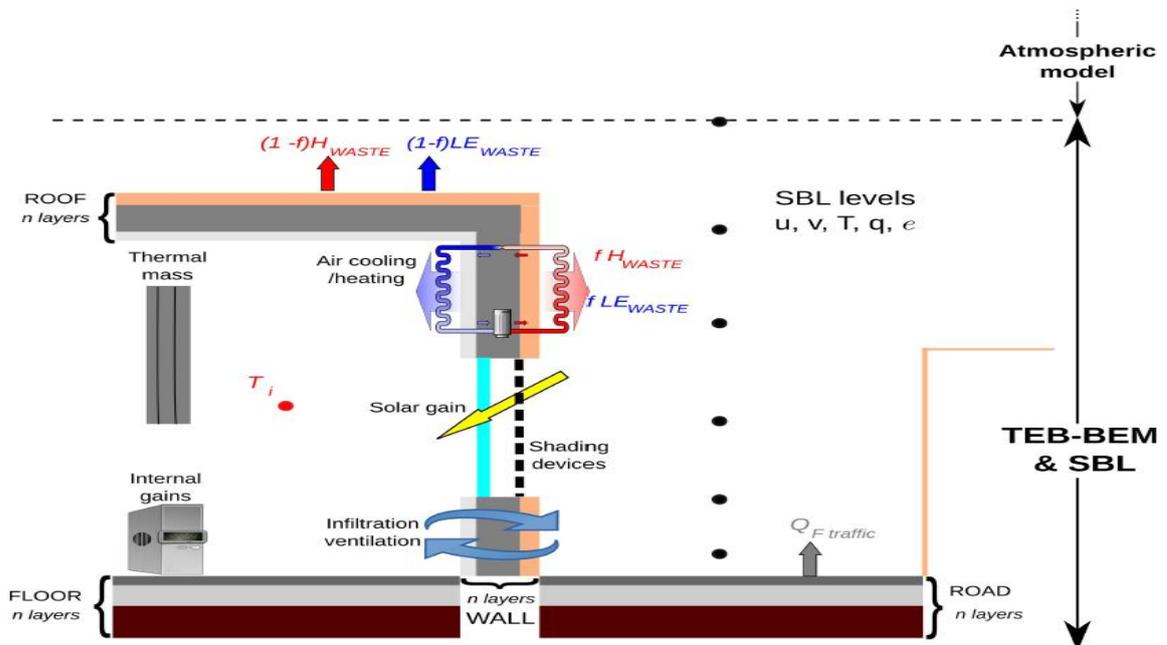


Figure 1.37 : Schéma représentant le concept de rue canyon de TEB et les principaux processus pris en compte par BEM, d'après Bueno *et al.*, 2012

Ce modèle est évalué et testé sur la campagne expérimentale Capitoul (Masson *et al.*, 2008) et par comparaison à une simulation de TEB couplée avec le modèle de bâtiment de référence EnergyPlus (Crawley *et al.*, 2001).

De plus, une étude de Pigeon *et al.*, (2014) permet le développement de TEB-BEM en comparant, pour cinq types de bâtiments représentatifs des bâtiments parisiens les performances énergétiques de TEB-BEM et d'EnergyPlus (pour 2 types de climats, Fig. 1.38). Ce développement permet d'affiner les paramétrisations de TEB-BEM et la simplification des bâtiments dans TEB.

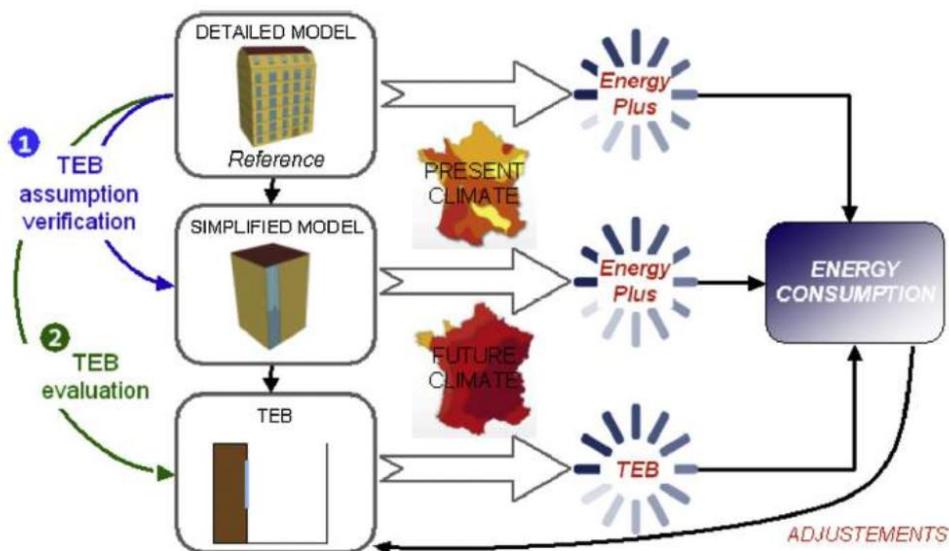


Figure 1.38 : Méthodologie utilisée pour l'évaluation de TEB-BEM (source Pigeon *et al.*, 2014)

TEB-CANOPY

Afin d'avoir une estimation des variables microclimatiques à l'intérieur et au-dessus du canyon urbain et cela à plusieurs niveaux verticaux, une nouvelle paramétrisation dans TEB est proposée (Fig. 1.39). Elle est développée afin d'améliorer les calculs sur les échanges verticaux dans cette couche limite de surface urbaine. CANOPY est développé par Hamdi et Masson (2008) et Masson et Seity (2009).

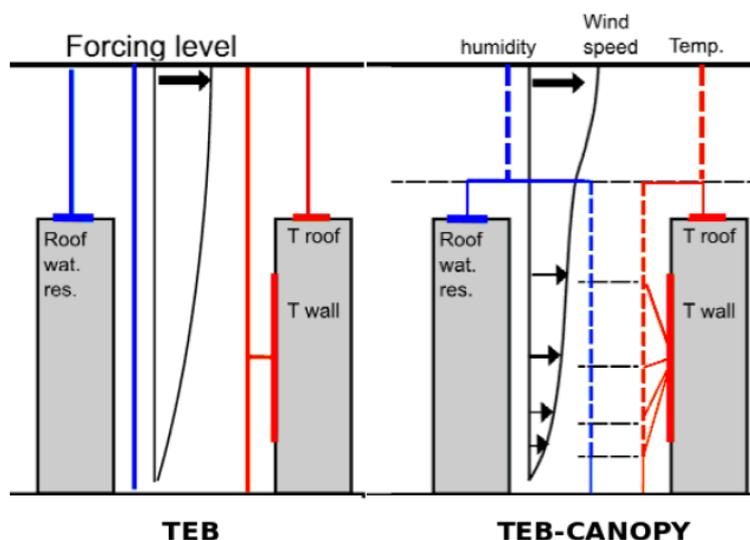


Figure 1.39 : Schéma représentant le couplage TEB avec l'atmosphère, sans Canopy (à gauche) et avec CANOPY (à droite), d'après Masson *et al.*, 2003

Cette nouvelle paramétrisation permet d'améliorer autant les profils de vitesse de vent, de friction, d'énergie turbulent que les flux de chaleur turbulent ainsi que la température potentielle par rapport au modèle à une seule couche.

TEB-UTCI : évaluation du confort thermique

Toutes ces nouvelles implémentations du modèle TEB permettent de décrire les variables microclimatiques pouvant contribuer à la visualisation des phénomènes de l'îlot de chaleur urbain. L'UTCI, quant à lui, permet d'estimer le confort thermique ressenti. L'UTCI est ajouté au modèle TEB afin d'avoir une analyse bioclimatique. Cet indice est introduit dans TEB par Pigeon (2011). Dans le cadre du projet VURCA (expliqué dans la partie 3.3.2.7), les codes de programmation sont disponibles en ligne (www.utci.org).

Grâce à sa physique et à toutes ses améliorations, le modèle TEB est un outil de simulation performant pour des applications en énergétique du bâtiment. De plus, TEB peut être forcé, soit par un modèle atmosphérique méso-échelle complet, soit par des données météorologiques sur le domaine étudié. Pour notre étude nous avons fait le deuxième choix. La première solution nécessite un temps de calcul lourd.

De plus, le calcul de l'UTCI est introduit dans le modèle TEB (présenté en partie 4.1.4) par Pigeon (2011) dans le cadre du projet VURCA. Ce modèle prend en compte trois études de cas différents considérés dans TEB (Fig. 1.40) :

- cas 1 : Une personne placée à l'extérieur au soleil. Son confort thermique est calculé à partir de la température et de l'humidité de l'air dans le canyon, de la somme du rayonnement solaire direct et du rayonnement solaire réfléchi et enfin du rayonnement infrarouge émis par les parois du canyon
- cas 2 : Une personne placée à l'extérieur et à l'ombre. On utilise les mêmes paramètres que précédemment à l'exception du rayonnement solaire direct
- cas 3 : Une personne placée à l'intérieur. L'UTCI est alors calculé à partir de la température et de l'humidité de l'air intérieur et des variables radiatives à l'intérieur du bâtiment

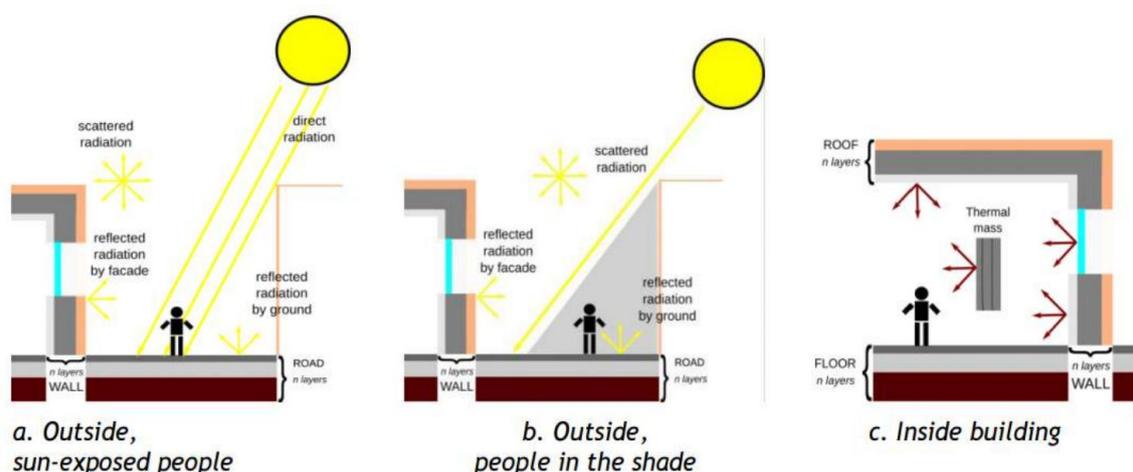


Figure 1.40 : Description des trois environnements considérés dans TEB pour le calcul de l'UTCI : a = un individu à l'extérieur exposé au soleil, b = un individu à l'extérieur exposé à l'ombre, c = un individu à l'intérieur d'un bâtiment (Pigeon 2011)

Synthèse du chapitre 1

A partir de l'observation du climat urbain et du phénomène caniculaire jusqu'à la modélisation plus ou moins fine des phénomènes physiques en jeu, les climatologues, géographes et météorologues ont pu décrire et comprendre avec de plus en plus de précision la formation du climat urbain et du phénomène de l'ICU. Ce phénomène est observé globalement sur toute l'agglomération. Aujourd'hui, les différentes spécialités se sont intéressées à d'autres échelles inférieures à la ville. L'échelle micro, à savoir l'échelle de la rue, montre l'importance de la géométrie urbaine et des propriétés physiques des matériaux. Les mécanismes physiques mis en jeu à cette échelle engendrent des phénomènes à l'échelle de la ville, explicités au travers du bilan radiatif et énergétique. La ville influence donc l'ensemble des phénomènes et la formation du climat urbain favorisés par des facteurs naturels (les saisons, la vitesse du vent, etc.), urbains (surfaces végétales, hydrologiques), la structure urbaine (morphologie du cadre bâti, matériaux de construction, etc.) et les activités humaines (rejet de chaleur anthropique et polluants).

L'ampleur de la littérature portant sur les impacts de l'activité humaine en milieu urbain montre que même si ce n'est pas un thème de recherche nouveau, il continue d'être en plein développement. De manière générale, la plupart des études relevées dans la littérature mettent en évidence les impacts négatifs du phénomène caniculaire, comme tous les autres phénomènes extrêmes. Les recherches concernant l'impact du phénomène caniculaire permettent de mettre en évidence les risques environnementaux, économiques mais aussi sanitaires et sociaux. Cela pose des questions sur le confort des citoyens. Plusieurs indices sont développés dans le but d'évaluer le confort thermique, à l'intérieur et à l'extérieur des habitations. L'indice IBM a été développé dans le but de répondre aux phénomènes caniculaires et de mettre en place des mesures de prévention afin de réduire les risques encourus par les citoyens. Cet indice est utilisé dans le PNC pour distinguer les niveaux de dangerosité utilisés dans les cartes de vigilance météorologique caniculaire réalisées par Météo-France.

Nous avons recensé dans cette partie quelques études parmi de nombreuses confirmant l'importance de l'interaction entre le microclimat, le confort et/ou le phénomène caniculaire. La problématique du confort du citoyen pendant un phénomène extrême est moins abordée. Ainsi, pour compléter la connaissance par les différentes études menées jusqu'à présent sur le phénomène caniculaire, nous avons décidé d'effectuer nos propres tests de dangerosité sur le phénomène caniculaire par des cartographies contextualisées, différenciées et portant sur le risque et la représentation de la canicule. Ces différentes cartographies et notre méthodologie mis en place sont expliquées dans le chapitre 2.

Partie B

De la donnée brute à la dangerosité

Objectifs :

- Acquérir des connaissances sur les températures par une analyse spatiale et temporelle
- Identifier les principales étapes pour la construction d'un indice de dangerosité
- Proposer un schéma de données spatiales et temporelles permettant de structurer les données météorologiques et les données topographiques
- Proposer un indice de dangerosité prenant en compte la temporalité
- Produire un corpus de cartographies des températures afin de mieux comprendre l'impact des configurations spatiales
- Représentation de la canicule

Chapitre 2

De la mesure à l'indice

Les objectifs de ce chapitre sont de :

- Contextualiser le projet RepExtrem est le sujet d'étude de cette thèse
- Identifier les principales étapes de la méthodologie
- Définir un schéma de données

TABLE DES MATIERES

DE LA MESURE A L'INDICE	111
1. <i>Contexte</i>	113
1.1. Positionnement de la thèse.....	113
1.2. Approche pluridisciplinaire.....	115
1.2.1. Le rôle de la géographie	115
1.2.2. Le rôle de la climatologie.....	116
1.2.3. Le rôle de la géomatique	116
1.3. Problématique.....	116
2. <i>Priorités de la thèse</i>	117
2.1. Un nouvel indice de dangerosité.....	117
2.2. Faire de la cartographie pour mieux analyser et communiquer	118
3. <i>Méthodologie</i>	120
3.1. Organisation de la partie B.....	120
3.2. Les différentes étapes de la méthodologie	124

Il n'y a pas une méthode unique pour étudier les choses

Aristote

Notre objectif est d'analyser et de représenter les épisodes caniculaires en zones urbaines denses à grande échelle (échelle du quartier). Nous cherchons à apporter des méthodes d'analyses et de représentations pour comprendre les phénomènes (causalité, fonctionnement) et la dangerosité des épisodes de canicule. Ce chapitre présente le contexte de notre recherche, nos objectifs ainsi que la méthodologie globale suivie. Nous nous appuyons sur la description et l'analyse de températures intérieures et extérieures en zones urbaines denses, pendant une période de canicule. En revisitant le modèle SURFEX-TEB des cartographies sont réalisées en prenant en compte la durée, pour passer à la notion de dangerosité et en déduire les « hot-spots ».

1. Contexte

1.1. Positionnement de la thèse

La ville est aujourd'hui au cœur des problématiques environnementales. Plus de la moitié de la population mondiale vit en ville et environ 80% de la population française est urbaine (d'après l'INSEE)⁴⁷. Dû à l'actuelle prise de conscience de la réalité du réchauffement climatique, une plus grande attention est portée au réchauffement urbain dont l'effet d'ICU et à l'étude de phénomènes extrêmes tels que les canicules. Comme détaillé au chapitre 1, l'îlot de chaleur urbain, entraîne une exposition de la population urbaine à des températures plus élevées. Plusieurs études estiment que l'ICU augmente le risque de mortalité pendant les vagues de chaleur, comme par exemple à Berlin (rapport InVS, Laaidi, 2012). Cet effet additionnel accentue le stress hydrique déjà ressenti par les habitants lors d'épisodes de vagues de chaleur, ce qui est particulièrement néfaste la nuit lorsque l'organisme est en période de récupération (Koukoku-Arnaud *et al.*, 2012). Il pose et posera des questions sanitaires essentielles, aussi du fait du vieillissement de la population. C'est typiquement ce qui s'est produit durant la canicule de l'été 2003. Cet été, le plus chaud que la France ait connu, est placé parmi les plus graves catastrophes sanitaires.

Décrire et comprendre les interactions entre le milieu urbain et son environnement apparaît donc comme un défi devant faire appel à des approches diversifiées et pluridisciplinaires. La climatologie urbaine est au cœur des problématiques d'ambiances climatiques et d'îlots de chaleur urbain.

Le CNRM (Laboratoire Météo-France CNRS) étudie au cours des projets interdisciplinaires les impacts croisés du changement climatique et de l'expansion urbaine sur de grandes agglomérations jusqu'à l'échelle du quartier (MUSCADE, ACCLIMAT, EPICEA). Pour simuler une canicule, un modèle de calcul des îlots de chaleur urbain (ICU), TEB, a été conçu par Météo-France et le CNRS. Ce modèle permet ainsi de représenter la ville de manière théorique et dispose d'informations plus fines que la maille tels que la température des murs ou des routes, (cf chapitre I) peu exploitées de nos jours.

⁴⁷ Le découpage en unités urbaines de 2010 - Clanché F., Rascal O., août 2011, INSEE

De la mesure à l'indice

Pour Paris, l'enjeu repose tout d'abord sur l'obtention de données microclimatiques fines et intra-urbaines qui n'existent pas à ce jour. Cela se vérifie par le faible nombre de stations Météo-France opérationnelles à l'échelle parisienne (Fig.2.1). Cependant, certaines problématiques, comme l'étude de l'îlot de chaleur urbain, demandent une précision spatio-temporelle plus grande, à l'échelle du quartier ou de la rue, voire même des bâtiments.

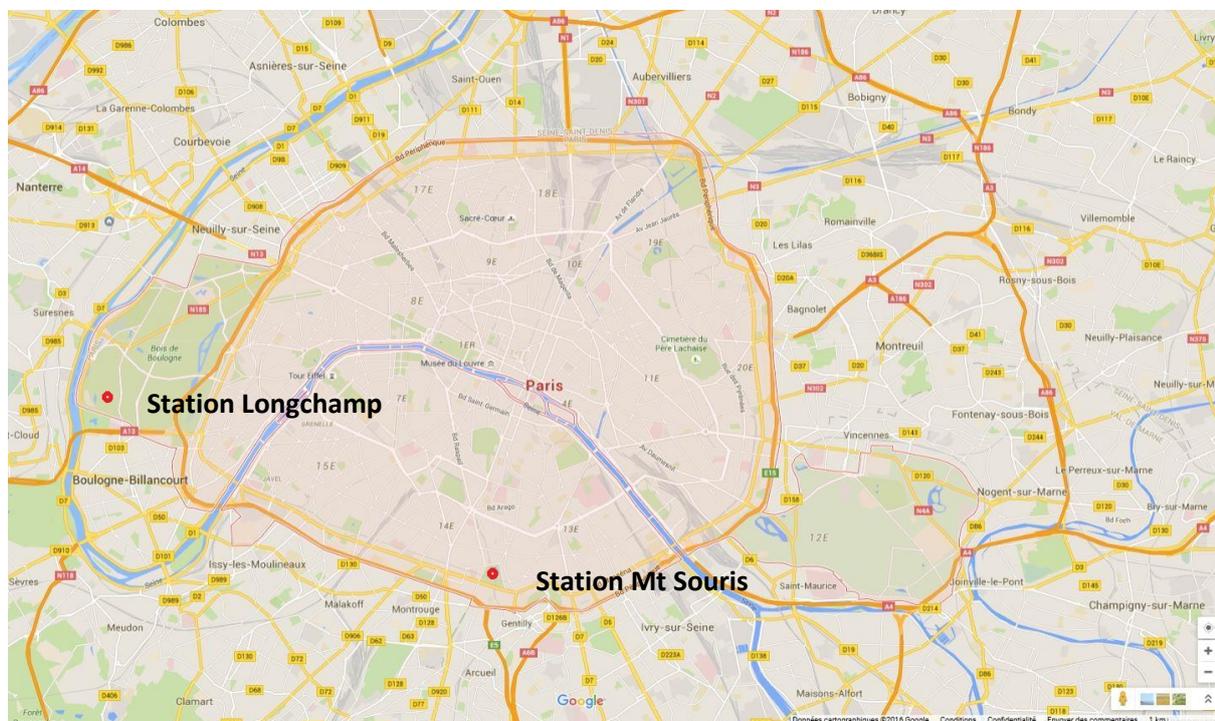


Figure 2.1 : Localisation des deux stations météorologiques (point rouge) gérées par Météo-France, en activité en 2016 dans Paris (carte créée à partir du portail Publithèque)

La recherche que nous présentons est menée dans le cadre du projet RepExtrem (www.lisis.ifsttar.fr/projet/repextrem), financé par le programme RDT⁴⁸ (Risques-Décision-Territoire) du MEEM (Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer), conjointement avec Météo-France (laboratoire CNRM Centre National de Recherche Météorologique) et l'IFSTTAR (Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux). Dans ce projet, le laboratoire CNRM fournit les simulations de canicule. L'analyse, la représentation cartographique de la canicule et le processus global sont l'objet de mon sujet de recherche à l'IFSTTAR. Cette recherche vise à améliorer l'estimation des canicules et leurs représentations fondées sur la différenciation entre les températures intérieures et extérieures dans les bâtiments. Dans ce contexte et dans le cadre du projet RepExtrem, on s'intéresse à l'amélioration du calcul et à la représentation de ce risque caniculaire en zones urbaines denses. Cette recherche doit mieux répondre à la question du lieu (où sont précisément les zones à risques dans une ville) et de la dangerosité. Elle vise à concevoir des cartes de dangerosité liées au risque de canicule à l'échelle des quartiers, en prenant en compte la durée. La prise en compte de la notion de durée pour l'évaluation de la dangerosité est essentielle puisqu'elle est une caractéristique forte du phénomène de canicule sur les personnes à risque. Il est important de montrer que les valeurs ne sont pas homogènes dans l'espace et ont une certaine durée.

⁴⁸ <http://rdt-risques.fr>

De la donnée brute à la dangerosité

Ainsi, notre méthodologie permet de mieux estimer les températures à l'intérieur et à l'extérieur d'un bâtiment lors d'épisode caniculaire. Pour cela, nous proposons de coupler le modèle SURFEX-TEB avec des données de validation provenant de capteurs sur une zone étudiée. Additionner la mesure climatique in situ avec la modélisation pour obtenir des connaissances et des informations plus précises, voire plus robustes, reste un des enjeux climatiques.

Changement climatique, expansion urbaine, intensification des canicules, îlot de chaleur urbain, modélisation et outil d'analyse du microclimat sont mots clés de notre recherche. Cette thèse les met en relation tout en les agrémentant de concepts climatiques et géomatiques dans le but de répondre à notre problématique.

1.2. Approche pluridisciplinaire

Cette recherche a un caractère pluridisciplinaire. Elle est à l'interface entre la géographie, la climatologie et la géomatique (Fig.2.2). La démarche globale et transversale du projet RepExtrem permet d'approfondir et d'acquérir de nouvelles connaissances dans les différentes spécialités.

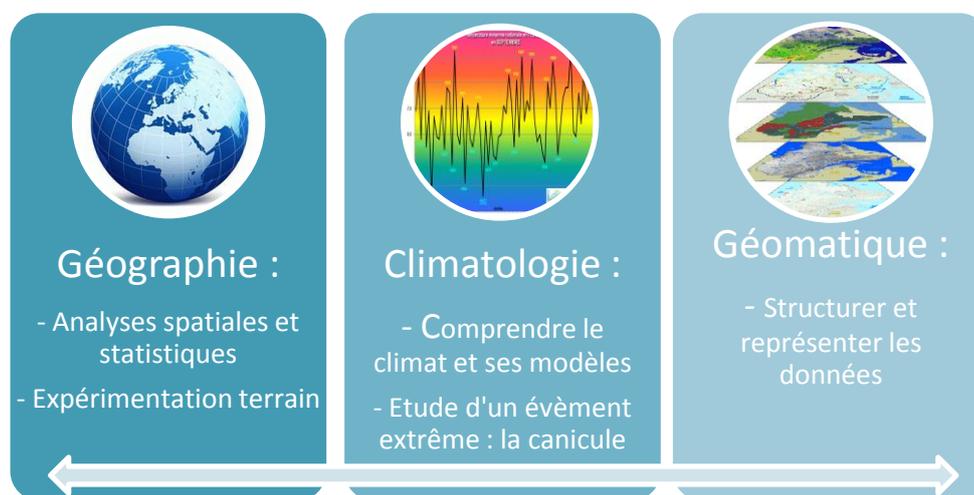


Figure 2.2 : Multidisciplinarité de la thèse – Analyse et représentation des épisodes caniculaires en zones urbaines denses

Quelques concepts et notions de thermique du bâtiment sont utilisés. Ils nous permettent d'approfondir nos connaissances et notre analyse sur les bâtiments de Paris.

1.2.1. Le rôle de la géographie

La problématique de la thèse s'inscrit dans un espace géographique donné : l'espace urbain dense (Paris, pour notre étude). La ville est un espace décrit par des formes urbaines variées. Chaque forme intègre des fonctions urbaines (habitats, loisirs, zones d'activité, etc.) et, est définie par une densité. La densité est caractérisée par le coefficient d'occupation des sols (COS)⁴⁹. L'INSEE utilise une typologie européenne « degré d'urbanisation »⁵⁰ permettant de caractériser les villes. Une ville est densément peuplée si la part de la population dans les mailles urbaines denses est supérieure à 50% de la densité surfacique. Paris est donc caractérisée comme une ville dense. Paris dispose de

⁴⁹ Le COS calcule la densité de construction sur une parcelle.

⁵⁰ Fondée sur des calculs de densité et de population selon un principe d'agrégation de carreaux de 1km de côté.

De la mesure à l'indice

quasiment toutes les formes urbaines marquées par son histoire : bâti ancien, cité ouvrière, ville nouvelle, etc. Paris a été choisi pour nos expérimentations. Plusieurs bâtiments de cette ville ont été équipés de capteurs Tinytag. Grâce aux nombreux traitements statistiques (via le logiciel R) empruntés à l'univers de la géographie, les résultats de ces expérimentations montrent que les configurations urbaines agissent sur la qualité de vie et sur le climat. L'analyse spatiale et statistique est utilisée tout au long de notre recherche.

1.2.2. Le rôle de la climatologie

Paris, ville densément peuplée est caractérisée par l'effet de l'ICU. Des processus radiatifs, hydrologiques, anthropiques différents de ceux observés en milieu naturel sont présents. La description et l'explication de la variabilité du climat à diverses échelles de temps et d'espace passent par des simulations. Le modèle SURFEX-TEB nous permet de simuler ces différents processus lors de périodes caniculaires. Ces simulations soulignent notamment que la ville n'est pas un bloc homogène. Les analyses de ces simulations assimilées avec les mesures réalisées sur Paris apportent de nouveaux résultats.

1.2.3. Le rôle de la géomatique

Depuis quelques années, les systèmes d'informations géographiques, par leurs capacités à manipuler, stocker et représenter une information spatiale attirent les climatologues. Cette discipline, à l'interface entre la géographie et l'informatique, permet de répondre à des besoins en climatologie. Pour travailler sur des données spatio-temporelles, les SIG (Systèmes d'Information Géographiques) sont dès lors de puissants outils permettant d'analyser et de cartographier des phénomènes locaux et spatiaux tels que les canicules. Ils permettent de fournir des représentations visuelles mais aussi de constituer des bases de données spatiales via des logiciels de stockage. Nous utilisons les SIG pour stocker et visualiser les données. Nous développons des outils et méthodes grâce à la géomatique. Les outils proposés sont informatiques avec une dimension spatiale.

Le projet se localise à l'intersection de trois domaines : la climatologie, la géographie et la géomatique. En climatologie, nous nous basons sur les effets à grande échelle en focalisant notre attention sur les phénomènes caniculaires. En géographie, notre espace de travail est l'espace urbain dense, à savoir Paris. En géomatique, les SIG nous permettent de représenter spatialement et temporellement nos données.

1.3. Problématique

Comme nous l'avons énoncé, les descriptions des impacts du changement climatique et l'expansion urbaine sont décrites à l'échelle régionale, nationale et mondiale. Il reste maintenant à affiner la description de ces impacts à échelle plus fine, tout en gardant les effets de plus grande échelle, comme l'ICU. Nous concentrons notre étude sur la question suivante : comment mieux analyser et cartographier la canicule dans un espace dense afin de mettre en avant la dangerosité de ce phénomène climatique?

De cette problématique, nous avons identifié trois défis majeurs exposés sous forme de questionnement :

De la donnée brute à la dangerosité

- Le modèle SURFEX-TEB dispose d'informations plus fines à l'échelle d'une maille de 250*250m à l'exemple de la température des murs, de la rue ou des toits. Si on couple le modèle SURFEX-TEB à des connaissances sur les types de bâtiment dans les zones urbaines, peut-on améliorer les prévisions localement ?
- Les modèles climatiques, comme SURFEX-TEB, sont destinés aux experts. Ils ne sont pas tournés vers la communication. Peut-on mieux donner à voir les données des sorties du modèle ?
- Le phénomène caniculaire, comme d'autres phénomènes, devient dangereux en fonction du temps. L'IBM, indice de référence en France pour caractériser la canicule (Partie A), ne prend pas en compte les températures intérieures, alors que l'on passe plus de 80% de notre temps dans des lieux clos, ni la durée pour caractériser la dangerosité de l'évènement. L'espace ne peut plus être vu comme une réalité objective. L'espace est perçu, ressenti et vécu. Dans notre recherche on souhaite intégrer la notion d'espace vécu (Fremont A., 1974). Pour cela, des campagnes de mesures sont réalisées sur Paris dans des appartements habités. Ces mesures mettent en avant la différence entre les températures intérieures et extérieures et l'accumulation de la chaleur dans les bâtiments. Peut-on mieux appréhender le risque caniculaire en se focalisant sur un type d'appartement ? Peut-on mettre en avant le ressenti de la canicule ? Peut-on concevoir un nouvel indice prenant en compte la dangerosité du phénomène caniculaire à l'intérieur d'un appartement ? Peut-on améliorer la représentation de l'intensité du phénomène caniculaire ?

2. Priorités de la thèse

2.1. Un nouvel indice de dangerosité

Cette recherche vise à apporter des réponses à un problème particulièrement inquiétant : le risque caniculaire. Lemonsu *et al.*, (2003) prévoient une augmentation de la fréquence des canicules dans les sociétés très urbanisées et vieillissantes.

La spécificité du risque de canicule que nous étudions est la suivante :

- Ce n'est pas uniquement la température dépassant une valeur seuil à un instant donné qui conditionne l'alerte, mais plutôt la durée pendant laquelle une valeur seuil est dépassée. Le risque canicule apparaît progressivement, peut s'intensifier, s'étendre spatialement et disparaître. Le risque doit donc être caractérisé par son intensité et sa durée.
- La température et la vulnérabilité varient en fonction de l'altitude. En théorie il faudrait prendre en compte les variations entre le sol et le sommet des habitations.

Nous nous concentrons sur une zone urbaine dense qui est un espace contraint.

L'objectif de la recherche est de concevoir un indice de dangerosité plus pertinent, pour les périodes de canicule, en exploitant au mieux les sorties du modèle SURFEX-TEB, en zones urbaines denses. L'indice de confort de l'UTCI (intégré à SURFEX-TEB) ne prend pas en compte la durée et les spécificités locales. Il est moyenné, par le modèle SURFEX-TEB, sur une maille de 250*250m. L'indice de dangerosité conçu doit prendre en compte les caractéristiques des bâtiments (des spécificités

locales) et la vulnérabilité des personnes. L'enjeu est d'améliorer les informations simulées par SURFEX-TEB, par des campagnes de mesures.

Cet objectif passe par l'intégration des campagnes de mesures et par l'analyse de la durée des phénomènes de canicule. Les campagnes de mesures permettent la création de types d'appartements, à priori plus vulnérables aux épisodes de chaleur, par leurs caractéristiques mais aussi par leur localisation. La création de types d'appartements améliore les sorties SURFEX-TEB et propose une différenciation locale des températures.

2.2. Faire de la cartographie pour mieux analyser et communiquer

Comme nous l'avons déjà précisé, les sorties du Modèle SURFEX-TEB et les phénomènes caniculaires sont peu différenciés à l'intérieur même d'une ville alors que la température est différente selon l'altitude, l'orientation des rues, etc. En fonction des configurations spatiales (rues canyons, orientation, etc.), des lieux se différencient localement par leur température. Ainsi, notre travail de recherche consiste à récupérer ces informations, les replonger dans un espace géographique pour analyser les composantes spatiales et temporelles et améliorer la précision spatiale en prenant en compte des hypothèses sur les gradients de températures en période de canicule (Fig.2.3).

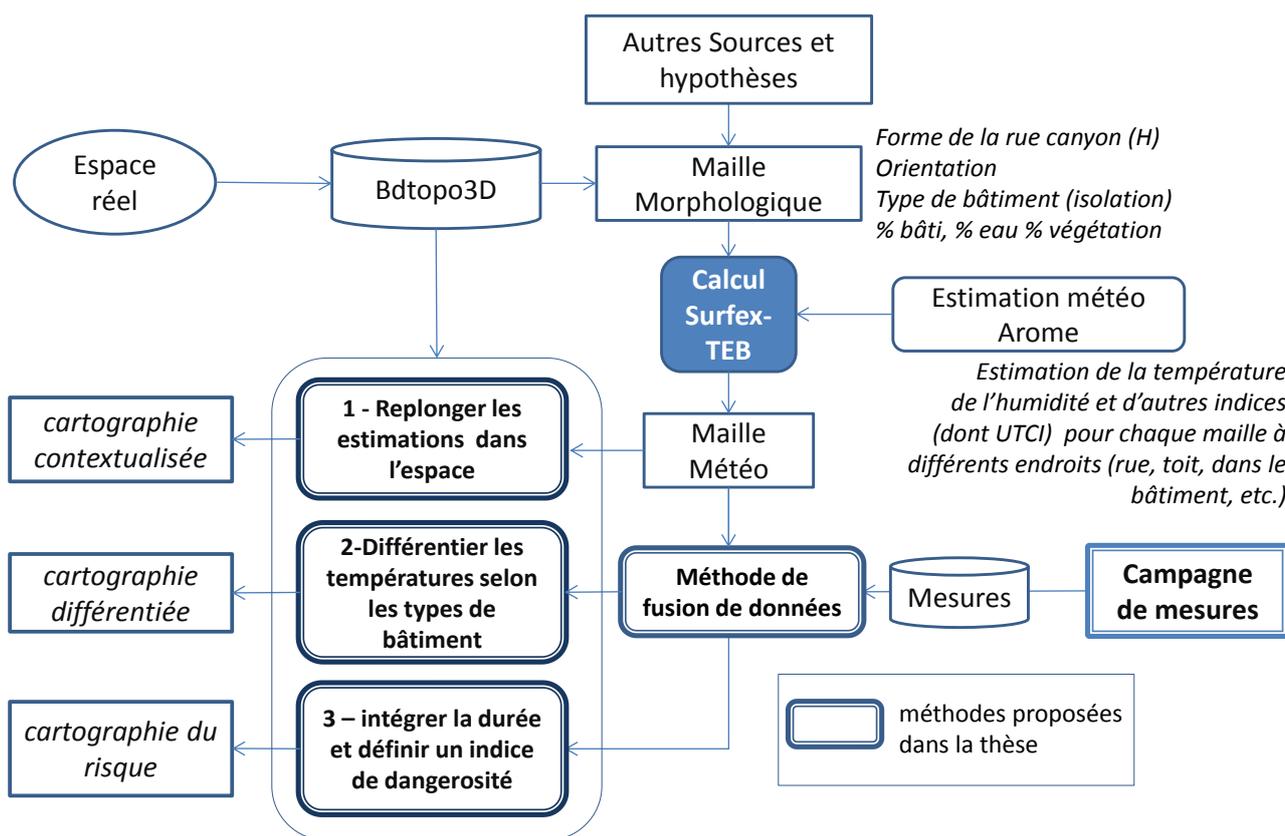


Figure 2.3 : Schéma décrivant les différentes étapes, outils et méthodologies utilisés pour la recherche de la thèse - De TEB à la représentation cartographique du phénomène caniculaire

Pour estimer la température en ville, TEB décompose la ville en mailles régulières et caractérise chaque maille par un ensemble d'indices dont, entre autre, la fraction surfacique d'immeubles, de routes, de végétations, l'orientation principale des bâtiments, etc. Ces indices permettent, en

De la donnée brute à la dangerosité

fonction de données météo environnantes et calculées par un modèle météorologique simulant l'ensemble de l'atmosphère, dont l'atmosphère de la maille (comme le modèle de prévision de Météo-France AROME, ou le modèle de recherche haute résolution Meso-NH), d'estimer les températures dans la maille. Ainsi, à partir de la maille (simulée par SURFEX-TEB), nous proposons la création de trois cartographies afin d'obtenir une meilleure représentation et appréhension des épisodes caniculaires. Cela permet d'évaluer les zones exposées et de hiérarchiser leur niveau de dangerosité :

- La **cartographie contextualisée** permet de replonger dans l'espace les informations simulées par le modèle, à l'exemple des températures intérieures et extérieures. Cette cartographie sert à contextualiser et mettre en valeur les données et l'information calculée de TEB. Cela donne à voir la richesse des sorties. Cette représentation est moins abstraite qu'une représentation à la maille puisqu'elle relie les prévisions à l'espace géographique illustrant le fait que cet espace n'est pas homogène⁵¹. Cette étape permet de différencier des quartiers et de mieux appréhender les déterminants et les conséquences du phénomène. Aux sorties SURFEX-TEB sont additionnées les données urbaines morphologiques 2D de l'IGN®. Cependant, même si le modèle SURFEX-TEB permet de calculer des températures dans les rues canyons, en fonction de la topographie et des conditions météorologiques environnantes, les températures fournies en sortie sont des moyennes valables dans une maille et peu différenciées. Ainsi, une deuxième représentation est nécessaire pour améliorer les connaissances sur les températures en période caniculaire.

Les objectifs sont donc de revisiter le modèle SURFEX-TEB, en se concentrant sur les phénomènes de canicule et en exploitant mieux les sorties du modèle (pas totalement exploitées actuellement) afin d'étudier la répartition des températures à l'intérieur des mailles et améliorer la granularité spatiale en se concentrant sur des zones d'intérêts.

- La **cartographie différenciée** se base sur des mesures réalisées dans des bâtiments non climatisés au centre de Paris (Pinson *et al.*, 2015) et des hypothèses sur les gradients de températures en période de canicule. Cette cartographie permet de compléter les estimations (notamment des températures intérieures) dans l'espace. Ces simulations sur Paris, sont réalisées à partir du modèle et des mesures terrains réelles. Elles prennent en compte les effets d'ICU, les écarts de températures entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment, en fonction de ses caractéristiques thermiques. Ce dernier point utilise les connaissances existantes sur la répartition de chaleur en plus des campagnes de mesures réalisées durant l'été 2015. Cette cartographie permet de localiser les hot-spots, à savoir les zones où niveau d'inconfort (ressenti) et de dangerosité est le plus élevé.

L'objectif de ces cartographies est l'identification des zones vulnérables en se basant sur les écarts de températures entre les bâtiments.

- La **cartographie du risque et de la canicule** fait référence à la notion de temporalité. En effet, cette cartographie temporelle représente l'évolution des températures en se basant sur l'intégration d'un indice de dangerosité. Pour cette cartographie, on s'appuiera sur les travaux de Yuan (1999) d'après Peuquet (1994). Yuan propose de séparer les trois aspects présents dans une

⁵¹ Lorsqu'on visualise des données sous forme de grille, on croit que l'espace est homogène

De la mesure à l'indice

base de données spatiaux-temporelles : le temps, l'espace et la thématique, de façon à s'intéresser aux changements de l'un, les autres étant fixes, ou aux changements de plusieurs d'entre eux simultanément.

L'objectif est donc d'analyser la durée des phénomènes caniculaires sur le ressenti la dangerosité des habitants, pour en déduire des zones de hot-spot à l'échelle du quartier. Cette analyse se base sur une succession d'états pour aller vers des durées pour bâtir des indicateurs de dangerosité basés sur la durée et l'intensité du phénomène.

Ces cartographies ont pour objectif de mieux donner à voir les canicules en zones urbaines denses, prendre en compte la durée pour passer à la notion de dangerosité, et représenter graphiquement cette information. Ainsi, la proposition des représentations graphiques permet de mieux expliquer le phénomène (sa variabilité, sa dangerosité). Il est important de montrer que les valeurs ne sont pas homogènes dans l'espace et diffèrent entre les configurations spatiales, thermiques et au cours du temps.

3. Méthodologie

3.1. Organisation de la partie B

Pour visualiser l'ensemble de notre démarche globale, la partie B se déroule en trois phases : la première est centrée sur l'approche de la simulation avec le modèle SURFEX-TEB (chapitre 3), tandis que la seconde décrit les mesures réalisées sur les bâtiments et fusionne les données mesurées à celles simulées par le modèle (chapitre 4). La troisième permet de faire le lien entre les premières parties, se destinant à valoriser l'information sur le risque caniculaire (chapitre 5). Ainsi, trois chapitres sont proposés dans cette partie (Fig.2.4).

Le premier chapitre concerne les données simulées par le modèle SURFEX-TEB. Il vérifie l'hypothèse selon laquelle il existe des différences de températures dans une même région, même ville et même quartier. Celles-ci sont présentes et dues à plusieurs facteurs, notamment celui de l'effet de l'îlot de chaleur urbain (pour la plus petite échelle) et des configurations spatiales (pour la plus grande échelle). De plus, ces températures varient au cours du temps. L'analyse des températures parisiennes, pendant le mois de juillet 2015, montre que celles-ci produisent des informations sur les événements caniculaires dont la connaissance permet de mieux aménager, appréhender le risque caniculaire et augmenter la perception du risque à l'échelle du quartier. Cependant, cette étude présente deux limites : elle propose et représente plusieurs types de configuration⁵² et les données sont simulées.

Le deuxième chapitre propose une analyse des mesures réalisées sur Paris et une méthode de fusion de données qui permettent la création de cartographies de températures (durant la canicule 2015) en fonction des types d'appartements. En effet, les mesures faites confirment l'impact du type d'appartement sur les températures intérieures. Cinq types de bâtiments sont définis et un sixième correspondant au modèle SURFEX-TEB. Une méthode de fusion de données est proposée pour

⁵² SURFEX-TEB simule un type de bâtiment par maille. Les températures se différencient en fonction du type de bâtiments (bureaux, industriel, résidentiel, etc). Le modèle ne permet pas un seul type de bâtiment. Les types de bâtiments présents dans Paris sont précisés dans le chapitre 3.

De la donnée brute à la dangerosité

calculer, visualiser les températures intérieures comme extérieures sur l'espace parisien et définir des zones de dangerosité. Une évaluation de l'estimation de la canicule est réalisée en se focalisant sur les cartes de températures par type d'appartement.

Enfin, le dernier chapitre de cette partie s'appuie sur la création d'un indice de dangerosité, afin d'estimer le risque encouru par la population durant une période de canicule. Des fonctionnalités d'outils de géovisualisation et une méthode cartographique permettent une visualisation du phénomène caniculaire et de ses spécificités. Cet indice permet également de différencier les représentations cartographiques aux besoins de la population à risque.

Ainsi, dans cette recherche nous proposons un indice de dangerosité décrivant les risques potentiels d'une canicule en fonction d'un type d'appartement et d'un profil type. L'originalité de cette recherche réside dans l'analyse conjointe des températures intérieures et extérieures, dans différentes configurations spatiales. L'approche prend en compte différents types de bâtiments, correspondant à une plus grande diversité de cas.

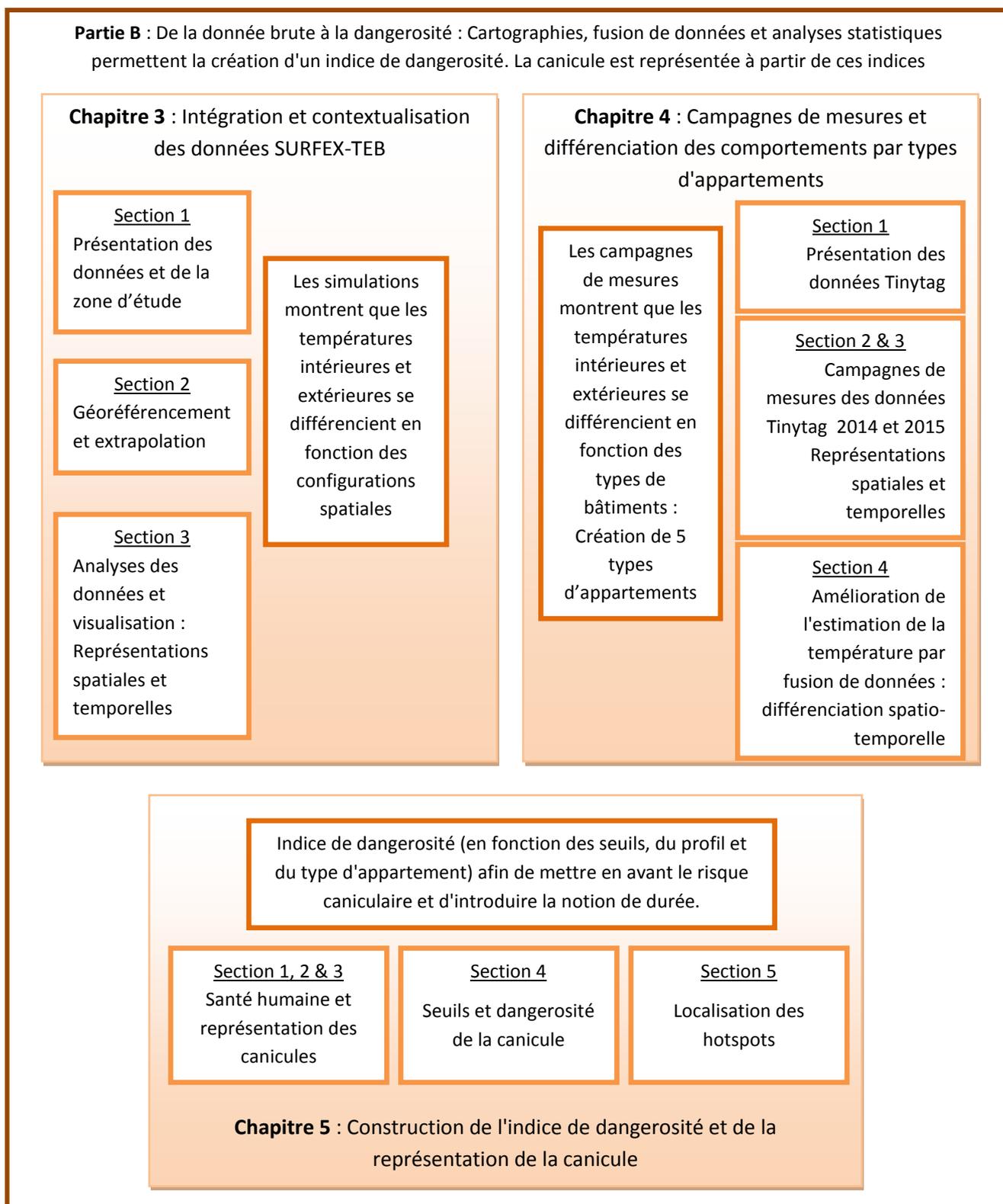


Figure 2.4 : Organisation de la partie B de la thèse – Analyse et représentation des épisodes caniculaires en zones urbaines denses

De la donnée brute à la dangerosité

Les simulations des canicules sont réalisées à partir du modèle SURFEX-TEB (chapitre 3). Des connaissances, issues de campagnes de mesures, vont venir approfondir les estimations de la canicule en fonction des types d'appartements créés (chapitre 4). Le chapitre 5 met en relation les deux données (issues des simulations et des campagnes de mesures) pour créer un indice de dangerosité et une meilleure représentation de la canicule.

Nous présentons la méthodologie, élaborée pour répondre à la problématique de la thèse, décomposée en différentes étapes, pour analyser et représenter le risque caniculaire en zones urbaines denses. Nous donnons ici, une vue d'ensemble de la méthodologie adoptée afin de répondre à nos questionnements, avant de les détailler dans les chapitres 3, 4 et 5.

Pour passer de la mesure brute à un indice de dangerosité, différentes étapes sont nécessaires allant de la structuration des données spatiales et temporelles jusqu'à la spatialisation du phénomène de canicule, en passant par des analyses spatiales et statistiques (Fig.2.5). Comme le souligne Madelin (2004), les méthodes statistiques rassemblent des outils primordiaux pour résumer un grand nombre de données à traiter et dégager l'information de la base de données. Afin de spatialiser les données ponctuelles des mesures de terrain, les données géographiques, topographiques et environnementales influençant la distribution spatiale des mesures observées, sont introduites dans les sorties SURFEX-TEB.

Pour la simulation météorologique, le projet utilise le modèle SURFEX-TEB. Pour les autres tâches, d'autres solutions et logiciels sont proposés.

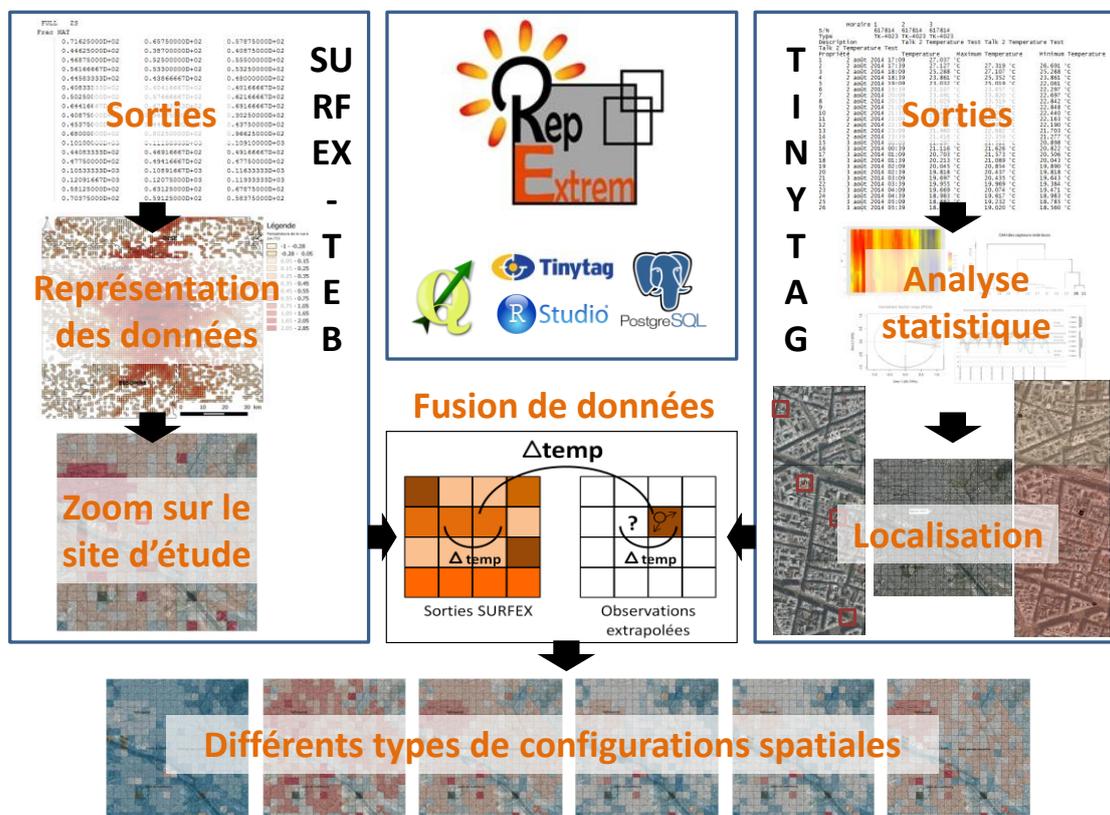


Figure 2.5 : Schéma représentant les différentes tâches et logiciels utilisés pour le projet RepExtrem

De la mesure à l'indice

L'utilisation de différents logiciels est nécessaire afin de lire, analyser mais aussi stocker l'information. Nous privilégions les ressources open source ou libres, accessibles en ligne avec des communautés actives d'utilisateurs. Ces outils peuvent être des systèmes de gestion de base de données spatiales (PostGis), des systèmes d'information géographique (SIG avec QGIS), des outils d'analyses statistiques (R) et des plates-formes dédiées à des traitements particuliers (GeoServer). Chaque outil a ses propres formats d'import et d'export.

Nous avons ainsi développé une méthodologie permettant de construire des cartes de dangerosité de la canicule, pendant son occurrence, pour différentes configurations urbaines denses. Afin de mieux visualiser et représenter la canicule, nous proposons des méthodes pour estimer la température intérieure et extérieure d'un bâtiment (pour différentes configurations spatiales et thermiques) et construire un indice de dangerosité. Cette visualisation du phénomène caniculaire passera par des représentations pertinentes du phénomène via un service web ad hoc, pour des actions de valorisations des résultats. Ainsi, pour l'estimation de la température nous utilisons le modèle SURFEX-TEB et un jeu de mesures de températures provenant de capteurs Tynitag. Par la suite, après l'analyse et l'étude de ces températures, nous avons conçu un indice de dangerosité, à l'échelle du quartier, intégrant la durée et l'intensité du phénomène ainsi que le temps de récupération et les effets des différents types d'appartements. Cette recherche pourra être communiquée par un service web pour l'exploration de la dangerosité de la canicule 2015 sur Paris. Les données sont proposées dans le cadre de ce travail de thèse. La finalisation du site web est réalisée par Ha Pham, doctorante à l'IFSTTAR et spécialisée en symbologie.

Des premières sorties du modèle, on différencie les températures dans les rues en fonction entre autres de l'altitude par une analyse post-traitement. Ensuite, l'intégration de la temporalité est fondamentale afin d'identifier les zones critiques. La relation entre les températures intérieures et extérieures est également analysée.

Le risque caniculaire est difficile à représenter puisqu'il varie dans le temps et dans l'espace. Qui plus est, la biométéorologie entre en compte dans notre étude, en dernière étape, lors de la conception d'un indice de dangerosité.

Ainsi, la problématique des îlots de chaleur urbains montre les apports de la géomatique : amélioration des informations statistiques simulées par TEB, analyse spatio-temporelle pour identifier les zones critiques avec une évaluation plus précise de l'intensité, de la durée et de la configuration spatiale, de la prise en compte du profil et une meilleure visualisation du phénomène.

3.2. Les différentes étapes de la méthodologie

Nous cherchons à organiser, améliorer et visualiser les connaissances sur la représentation du risque caniculaire sur la population parisienne. Pour cela, une méthodologie a été élaborée pour passer des sorties TEB à la représentation cartographique du phénomène de canicule et à sa dangerosité. Les principales étapes de l'approche sont énoncées ci-dessous :

1. Prise en compte des connaissances de la littérature sur le phénomène de la canicule et les indices de confort mis en place

De la donnée brute à la dangerosité

Cette littérature s'appuie sur des projets nationaux ou européens dans des sites d'études de types différents. Les études et recherches décrites (à l'instar du projet VURCA, EPICEA ou MAPUCE) ont souvent pour but de simuler les effets d'îlots de chaleur urbain durant une vague de chaleur et les conséquences encourues. Les mesures peuvent provenir d'observations directes ou de simulations. L'objectif de ces mesures est de montrer que les territoires denses, comme Paris, sont particulièrement sensibles aux événements extrêmes que sont les canicules.

2. Lecture des données et création d'une base de données

Les données, pour notre recherche, se focalisent sur les températures de Paris (intérieures comme extérieures), ainsi que l'humidité et les données sur l'indice UTCI. Nous cherchons à représenter la canicule avec ses températures. Ainsi, pour visualiser les sorties du modèle utilisé, il faut structurer, lire et stocker ces données dans un SGBD (Système Gestion Base de Données). Il est nécessaire de structurer les données afin de suivre en dynamique une canicule.

3. Améliorer et affiner les sorties du modèle SURFEX-TEB

Pour contextualiser les données simulées, on intègre un référentiel à grande échelle (RGE®) dont la donnée topographique issue de la BD TOPO® et la donnée orthographique issue de la BD ORTHO® de l'IGN. Ces données sont disponibles en format numérique sur l'ensemble du territoire français. Elles permettent une lecture plus aisée du territoire que l'on étudie. Cette implémentation permet de mieux localiser le phénomène et de construire des cartes distinctes mais complémentaires pour améliorer la représentation des épisodes. Elles permettent aussi de mettre en valeur les sorties en contextualisant les données, afin de croiser les températures avec les objets morphologiques décrivant l'espace. Ceci est particulièrement important pour différencier, au moins visuellement, les températures des rues et des bâtiments, et mieux percevoir la vulnérabilité du territoire. Cette projection permet d'interpréter les données et de mieux représenter la richesse des sorties de ce modèle.

4. Représenter des états pour passer à la notion de durée

Les températures sont structurées et stockées sous forme de base de données. Les données géographiques et de températures sont numériques, et lisibles par des SIG et des bibliothèques informatiques de traitements d'analyses. Ces données sont représentées, toutes les heures, sous forme d'une grille, afin de passer d'états à des durées et suivre les températures au cours du temps à l'échelle de la maille. L'analyse heure par heure du champ (nuit et jour dans notre étude) permet d'identifier la chronologie du réchauffement et du refroidissement de l'air. En effet, les périodes diurnes et nocturnes apparaissent comme des échelles utiles à la définition et la gestion des risques. Les résultats sont ensuite interprétés et analysés en s'appuyant sur les connaissances du terrain et celles des experts du modèle SURFEX-TEB

5. Amélioration de l'estimation des canicules à l'intérieur, à l'extérieur et fusion des données de températures

Pour avoir une meilleure estimation et prévention des températures, et pouvoir différencier les configurations, nous avons réalisé deux campagnes de mesures durant les étés 2014 et 2015. Nous avons placé des capteurs de températures à l'intérieur et à l'extérieur de bâtiments, au cœur de Paris, puis nous avons analysées les données de température. La campagne 2015, plus chaude, sera

davantage traitée. 21 capteurs ont été placés dans 5 appartements du centre urbain de Paris. De ces campagnes, nous regardons les relations entre la température extérieure et intérieure d'une période chaude et dans le contexte d'appartements non climatisés. A partir d'analyses bibliographiques et statistiques, cinq types d'appartements, adaptés au centre de Paris, sont créés en fonction de leurs comportements thermiques. Le 6^{ème} type est celui utilisé par le modèle SURFEX-TEB. Ainsi, qualifier et quantifier les variations de températures permet de montrer une différenciation dans les comportements thermiques en fonction du type d'appartement.

Nous cherchons à obtenir la couverture totale de Paris selon le quadrillage de SURFEX-TEB pour les différents types d'appartements. L'objectif est d'intégrer par fusion de données les températures mesurées, de jour et de nuit et de les recalculer dans un contexte spatial spécifique, donné par le modèle SURFEX qui différencie localement les températures (intérieures comme extérieures). Pour intégrer ces températures ponctuelles des campagnes de mesures à partir du modèle SURFEX-TEB, il est nécessaire de réaliser une fusion de données.

6. Introduire un indice de dangerosité

La prise en compte du temps est cruciale dans l'étude du phénomène caniculaire puisque la canicule devient préjudiciable à partir d'une certaine durée. Ainsi, l'indice que nous souhaitons construire se fait en fonction de la durée du phénomène, du seuil (nuit et jour des températures) et du profil type (puisque le danger est fonction de la personne, à savoir son état de santé, son âge, etc.). Dans la mesure où il s'agit d'un suivi, les indices sont calculés et mis à jour régulièrement. L'indice de dangerosité proposé permet d'évaluer le niveau de risque, pour les habitants dans différents types d'appartements et de configurations, dans un centre urbain lors d'épisodes de canicule. Seul le risque sanitaire (santé humaine) est pris en compte par cet indice. Il permet de donner les premières pistes de réflexion sur la dangerosité de la canicule. Nous utilisons le terme de *dangerosité* pour souligner le fait que nous cherchons à identifier le moment à partir duquel certaines personnes peuvent être en danger. Il s'agit donc d'une dangerosité potentielle.

7. Proposition d'un schéma de données pour représenter la durée et la dangerosité.

Le modèle de données sert de cadre à la définition de la dangerosité de la canicule et à sa représentation. Ce modèle structure la méthodologie globale de notre recherche. Il intègre les deux types de données météorologiques, c'est-à-dire simulées et mesurées. Il est décrit par objets et par classes avec leur agrégat (spatiaux et temporels) correspondant. Ce schéma de données mis en place pour la formalisation et l'organisation des concepts et des relations entre eux, est détaillé lors des différents chapitres. Il intègre les types d'appartements, les seuils de l'indice de dangerosité et les types d'espaces. Celui-ci sera présenté dans la partie suivante.

Nous voyons dans l'approche globale que plusieurs étapes sont nécessaires pour représenter spatialement et temporellement le phénomène de la canicule. Elles peuvent être représentées sous forme de schéma de données mettant en avant les relations entre les étapes. Ce schéma permet, ainsi de décrire notre structure de base de données, en définissant l'ensemble des types de données de notre base. De ce fait, l'objectif de ce schéma est de structurer les données de façon efficace, afin de pouvoir suivre en dynamique une canicule à l'aide de prévisions et de mesures. La dangerosité étant fonction de l'intensité et de la durée, il faut pouvoir passer d'états à des durées et suivre les températures au cours du temps, à l'échelle de la maille, pour voir si on rentre dans une situation de

De la donnée brute à la dangerosité

possible canicule et quelle est sa dangerosité et sa couverture spatiale. Ce modèle conceptuel (Fig.2.6) présente les informations que nous calculons pour assurer le suivi du risque caniculaire.

Le modèle présenté ici inclut les données simulées du modèle TEB et les données issues des mesures de campagne. De ces dernières nous avons créé 6 types d'appartements caractérisés par plusieurs paramètres : exposition, étage, ensoleillement, etc. Ainsi, chaque type de bâtiments est décrit par ses attributs. La description plus détaillée de ces appartements sera donnée au chapitre 4. Chaque appartement est caractérisé par ses températures (intérieures et extérieures). Dans ce schéma, trois grilles permettent de décrire l'espace géographique et météorologique. La première grille, de l'appellation *maille* ou *maille morphologique*, définit un espace géographique comportant des mailles de 250*250m comprenant des informations sur les caractéristiques de cet espace (le pourcentage de végétation, de bâtiment, de route, etc.) Cette maille constituée de données topographiques peut être représentée avec des géométries en 2D ou 3D. La *maille météo* est la deuxième grille et comporte en plus, les données de températures (intérieures et extérieures) ainsi que les autres paramètres que l'on souhaite étudier (UTCI, humidité, etc.). Les paramètres sont donc représentés à une date t , ce qui renvoie aux snapshots⁵³ (Armstrong., 1988). La troisième grille fait référence à la première agrégation de valeurs pour les périodes de nuit et de jour. C'est l'objet *maille-météo-durée* décrivant la température (moyenne, maximale et minimale) dans une maille, pendant 8 heures d'affilées de nuit et de jour, en évitant les heures intermédiaires moins significatives.

⁵³ Le modèle snapshot se base sur une succession d'états. A chaque temps correspond une couche, c'est-à-dire un état indépendant. Cf chapitre 5

De la mesure à l'indice

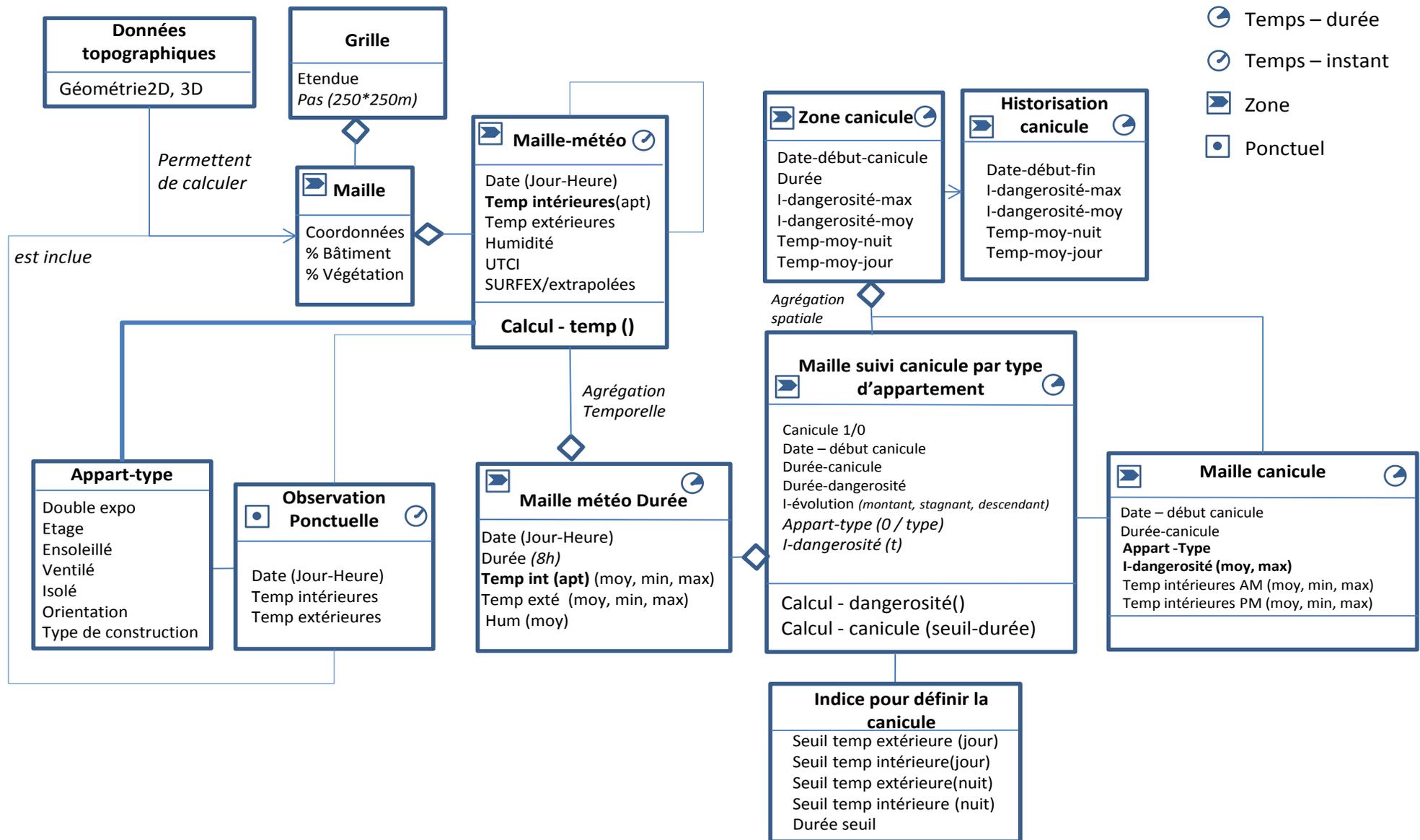


Figure 2.6 : Schéma de données de la thèse amenant à la représentation de la durée et du suivi du risque caniculaire

A partir de ces différentes grilles, l'objet *maille-suivi-canicule-par-type-d'appartement* est constitué. Cet objet contrôle l'état de chaque maille à partir du moment où un objet *maille-météo-durée* répond aux spécifications d'une possible canicule, où les températures sont supérieures aux seuils. L'objet *maille-suivi-canicule* s'enrichit toutes les 12h en intégrant les données fournies par la *maille-météo-durée* correspondante au pas de temps suivant. En plus de cela, cet objet portera des indices de dangerosité issus de l'objet *indice-pour-définir-la canicule*. La *maille-météo-durée* porte donc une date et un début de canicule ainsi que sa durée (en plus des températures et des indices). Si en revanche la *maille-météo-durée* n'est pas, ou plus au-dessus des seuils de canicule, l'objet *maille-suivi-canicule-par-type-d'appartement* est réinitialisé. A noter que compte tenu de l'inertie thermique, certains appartements peuvent être encore en risque caniculaire même si la température extérieure est descendue sous les seuils. Ainsi, cette *maille-suivi-canicule-par-type-d'appartement* est au cœur de notre analyse. C'est grâce à l'objet *indice-pour-définir-la canicule* que l'on constate que la notion de durée et de seuils de températures sont primordiaux dans la prise en compte du risque caniculaire. Ainsi, dans cet objet, la durée de l'événement et son intensité, mais aussi l'accumulation et la récupération d'une personne, sont implicitement intégrés dans le calcul de l'indice. Plusieurs indices sont créés en se basant sur les indices IBM, sur les températures jour/nuit et intérieures/extérieures. La *maille canicule* permet, grâce à l'indice de dangerosité, de savoir si on est en présence d'une canicule ou non. Cette maille se base uniquement sur la référence des trois jours et nuits consécutifs de températures supérieures aux seuils. La canicule a une date de début et de fin et, est donnée par type d'appartement. La *maille canicule* sauvegarde la succession d'épisodes caniculaires pour chaque maille.

Une seconde agrégation, mais cette fois-ci spatiale, permet de définir la *zone-canicule*. Cette dernière correspond à des objets de la classe *maille-suivi-canicule* connexes. Il s'agit d'une agrégation spatiale.

Enfin *l'historisation-canicule* a pour but de stocker les objets et informations pertinentes pour décrire les zones de canicules. Savoir si le phénomène a un caractère exceptionnel ou non, au vue des seuils de températures mais surtout de sa durée (rédhibitoire pour la santé des personnes fragilisées) est un des buts de cet archivage de données. L'historisation permet d'avoir une vision dynamique du phénomène et de son évolution.

Le schéma de donnée décrit et représente notre méthodologie à travers un ensemble de classes d'entités. Cette modélisation, est une étape fondamentale puisqu'elle détermine le contenu de notre base de données et définit la nature des relations entre les classes.

Synthèse du chapitre 2

Dans le contexte du réchauffement climatique et de la densification de la population urbaine, cette thèse propose d'analyser, de suivre et représenter la canicule et sa dangerosité pour mieux appréhender ce phénomène.

Pour conclure, ce chapitre met en avant la pluridisciplinarité de cette recherche tout en présentant la mise en œuvre de notre méthodologie et les différentes étapes de sa construction. Il s'agit de représenter spatialement et temporellement les températures à l'aide de données de simulations et de campagnes de mesures. Les données provenant des capteurs étant ponctuelles, elles nécessitent d'utiliser une méthode de fusion de données et de combinaison avec les données SURFEX-TEB. A partir du modèle SURFEX-TEB, nous proposons de mettre en valeur les résultats en les cartographiant sur l'espace géographique, puis nous proposons d'étudier les variations de températures dans des configurations spécifiques, pour mieux appréhender l'inconfort en période estivale afin de créer des indices de dangerosité en prenant en compte la durée et l'intensité. Une meilleure représentation de la canicule est réalisée.

Notre méthodologie s'appuie sur un schéma de données. Il représente de façon structurée les données qui sont utilisées pour représenter la durée, la dangerosité et les hotspots de canicule. La relation entre chaque classe est notifiée. Les premières classes (données topographiques, grille et maille) permettent la création de la maille météo. Pour cela, la zone d'étude est définie par des données géographiques et météorologiques issues du modèle SURFEX-TEB. Le chapitre 3 présente et visualise ces données.

Chapitre 3

Intégration et contextualisation des données SURFEX-TEB

Les objectifs de ce chapitre sont :

- Définir et caractériser la zone d'étude
- Comprendre l'interface et les sorties de SURFEX-TEB
- Identifier et résoudre le géoréférencement dans SURFEX-TEB
- Représenter par états les canicules 2010 et 2015
- Déterminer les différenciations spatiales et temporelles des canicules

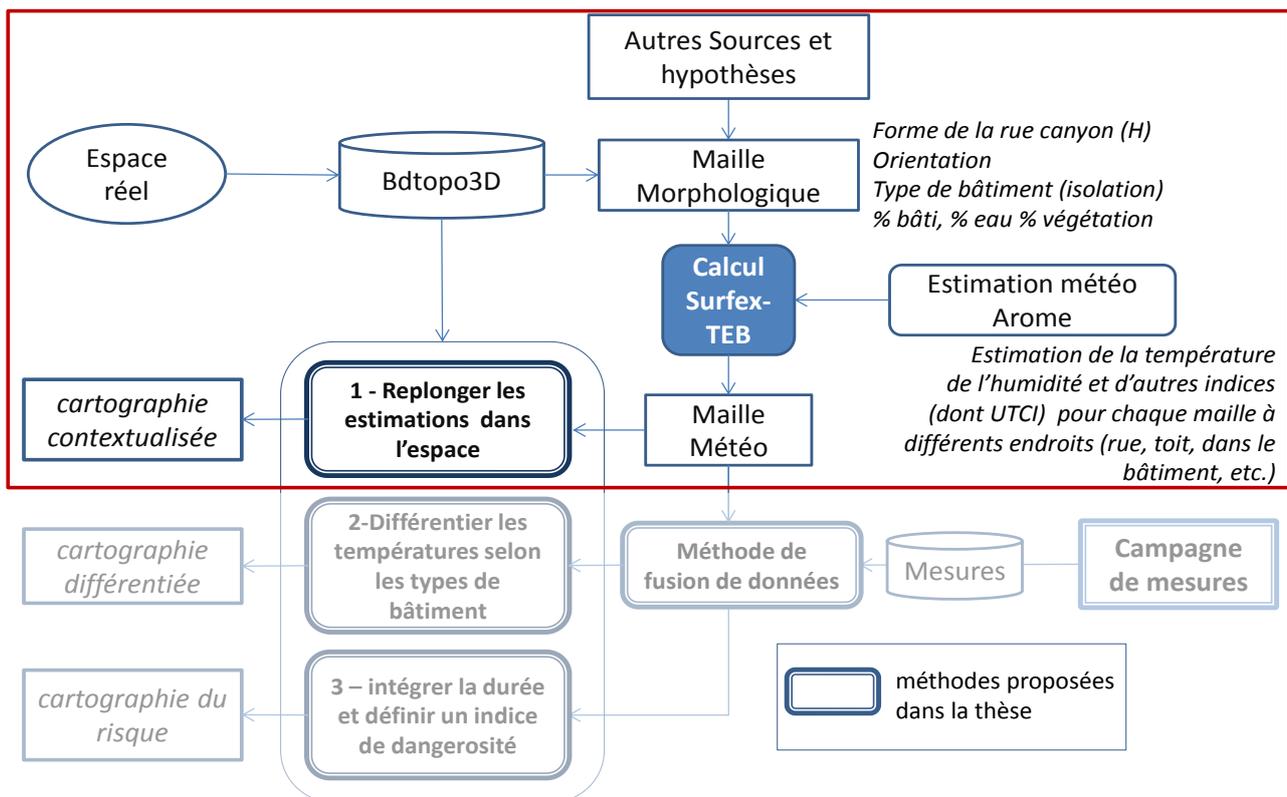
TABLE DES MATIERES

INTEGRATION ET CONTEXTUALISATION DES DONNEES SURFEX-TEB	131
1. <i>Présentation de données pour les simulations SURFEX-TEB</i>	134
1.1. Zone d'étude	134
1.1.1. Paris, la capitale : quelques chiffres	134
1.1.2. La Seine et les canaux	134
1.1.3. Les rues, boulevards et constructions	135
1.1.4. Le bâti et les quartiers	136
1.1.5. La végétation	136
1.1.6. La climatologie	138
1.2. Description des données géographiques	140
1.3. Complémentarité entre modèles climatiques	141
1.3.1. Modèle AROME	142
1.3.2. Interpolation des données AROME	144
1.4. Présentation des données SURFEX-TEB	147
1.4.1. Différentes étapes d'une simulation SURFEX	147
1.4.2. Paramètres TEB	148
1.4.3. Modèle SURFEX-TEB	151
1.4.4. Traitements préalables et stockage des données sous SGBD	154
2. <i>Traitement des données</i>	155
2.1. Du Lambert 2 étendu au Lambert 93	155
2.1.1. Ellipsoïde : du Lambert 2 étendu au Lambert 93	156
2.1.2. Concordance entre les valeurs et les données topographiques	158
2.2. Contextualisation des données	160
2.2.1. Projections des données dans l'espace géographique	160
2.2.2. Visualisation des données en 3D	163
3. <i>Représentation et visualisation des données</i>	165
3.1. Simulation de janvier 2004	165
3.2. Simulation de la canicule 2010	168
3.2.1. Visualisation de la canicule de 2010	168
3.2.2. De la donnée météo à une base de données d'états	169
3.3. Simulation de la canicule 2015	172
3.3.1. Différenciation temporelle	172
3.3.2. Différenciation spatiale et différenciations des températures jours/nuits	175

Mais Paris est un véritable océan. Jetez-y la sonde, vous n'en connaîtrez jamais la profondeur

Honoré de Balzac

Nous avons vu, au travers du premier chapitre, qu'il existe une multitude de modèles pouvant simuler le climat urbain. SURFEX couplé avec le modèle TEB est celui que nous avons choisi pour notre recherche. Si on reprend la figure 2.3 présentée au chapitre 2, le chapitre 3 présente la cartographie contextualisée des sorties du modèle SURFEX-TEB.



Plusieurs étapes sont nécessaires : la première étape est l'intégration des données d'AROME au modèle SURFEX-TEB, la seconde est le géoréférencement des données et la dernière est l'analyse, la représentation, la visualisation et la contextualisation des données pour les simulations réalisées sur trois périodes :

- Janvier 2004 : cette simulation permet de comprendre les paramètres et les sorties du modèle et de définir notre zone d'étude,
- Août 2010 : cette simulation permet d'étudier la canicule de 2010, de tester notre méthodologie et de confirmer notre choix de zone d'étude,
- Juillet 2015 : cette simulation permet d'étudier la canicule 2015 et développer notre méthodologie. Elle correspond à la même période que nos mesures de campagnes. Elle est la base de notre analyse spatiale et temporelle de la canicule 2015, sur Paris.

Cette première cartographie permet la mise en valeur des données calculées par SURFEX-TEB. La question est de savoir comment exploiter l'ensemble des données recueillies par le modèle choisi et comment faire le lien entre l'ensemble de ces données. Toutes les données accumulées par le modèle ont un rôle et une place particulière qu'on leur attribue en fonction de notre schéma de données. Toutes n'ont pas la même importance et certaines données ne seront pas utilisées. Nous avons hiérarchisé les données selon leur importance explicative. Les données choisies ne vont pas faire l'objet d'une analyse individuelle mais d'une mise en relation entre les différentes temporalités et paramètres. La mise en relation entre plusieurs types de données permet de construire une cartographie de la canicule.

Dans notre cas, les sorties du modèle correspondent aux canicules 2010 et 2015 sur un espace urbain dense : le centre de Paris.

1. Présentation de données pour les simulations SURFEX-TEB

1.1. Zone d'étude

L'objectif de cette thèse, est d'analyser les phénomènes caniculaires dans un espace dense. Au niveau de l'espace géographique expérimental utilisé, la zone d'étude est Paris. Cette zone est choisie pour son tissu urbain dense et sa forte densité.

1.1.1. Paris, la capitale : quelques chiffres

Paris est constitué par son histoire millénaire. Elle se situe au 22^{ème} rang mondial en termes de population. Le périmètre du territoire administratif de Paris est de 54,745km (comprenant les bois de Boulogne et de Vincennes). Les points les plus élevés (au niveau du sol naturel) sont situés à l'intérieur du cimetière de Montmartre à 130,53 m. Quant à sa population, la capitale est passée de 7 000 habitants, aux I^{er} et III^{ème} siècles, à environ de 2 230 000 habitants en 2013 (dernière étude réalisée par l'INSEE) après un pic à 2 800 000 habitants en 1936 (nombre d'habitants intra-muros). La densité moyenne de la population (nombre d'habitants au km²) en 2013 est de 21 153,9 contre 118 habitants par km² pour le territoire français⁵⁴. Les arrondissements ayant les plus fortes densités sont les 10^{ème}, 11^{ème} et 20^{ème} avec plus de 32 000 habitants au km². Au contraire, les 1^{er}, 8^{ème}, 12^{ème} et 16^{ème} sont les arrondissement ayant les moins fortes densité avec moins 13 000 habitants au km².

1.1.2. La Seine et les canaux

Le bassin amont de la Seine a une superficie de 43 800km². Il comporte 1 427km de voies navigables. Ce bassin bénéficie d'un climat européen tempéré marqué par des précipitations annuelles légèrement supérieures à 600mm sur Paris. La Seine est la deuxième voie navigable européenne après le Rhin. La Seine, composante principale de Paris, a connu une forte évolution en termes de rapport vis-à-vis de la population. Les berges et les quais se sont transformés d'espaces économiques et d'échanges à des lieux de promenades et de déplacements automobiles. Ce fleuve a été fortement aménagé pour lutter contre les crues et satisfaire les besoins de la navigation. Au fil des années est apparue l'édification des murs de quai pour remplacer les grèves naturelles⁵⁵.

⁵⁴ Sources : Insee, RP2008 et RP2013 exploitations principales

⁵⁵ Une grève est une formation rocheuse de galets, de gravier, de sable pour aménager une voie

La Seine joue un rôle particulier dans le climat urbain. Elle a un rôle de régulateur thermique. Durant les périodes les plus fraîches, elle est plus chaude que l'air extérieur et pendant les périodes estivales, elle est plus fraîche que l'air. D'après le projet EPICEA (section 1.3.5), on remarque que la zone de fraîcheur induite par la Seine est très localisée. Sa distance d'impact est faible de quelques mètres à quelques dizaines de mètres de part et d'autre de son lit.

Paris est aussi connu par ses canaux. Le réseau est constitué des canaux Saint-Martin, Saint-Denis, de l'Ourcq et d'une partie de la rivière de l'Ourcq canalisée (Fig.3.1). L'intégralité de ces canaux est alimentée par la rivière de l'Ourcq et de deux stations de pompages (Trilbardou et Villers les Rigault). Ces canaux représentent une longueur de 130km dont 7,6km dans Paris. Ils traversent 43 communes. Ce réseau de canaux, axe structurant urbain, a pour objectif d'alimenter en eau la ville de Paris, et de permettre le transport de fret.

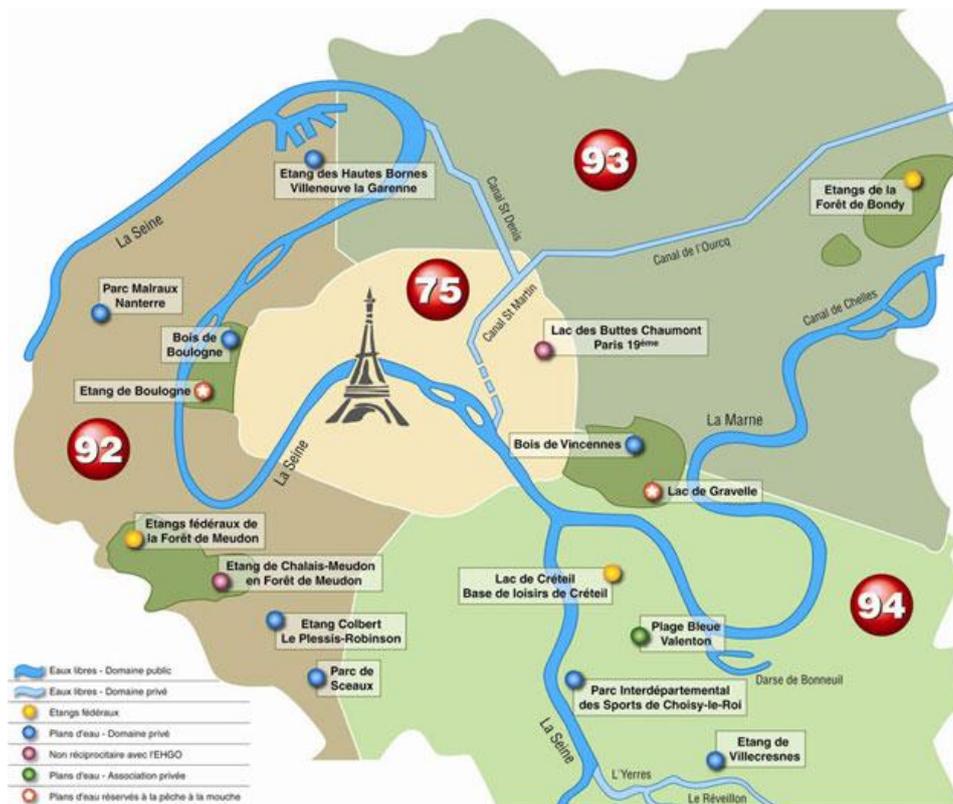


Figure 3.1 : Carte du réseau hydrographique de Paris (source : cartograf.fr)

1.1.3. Les rues, boulevards et constructions

Les rues parisiennes occupent plus de 25% de la superficie de la ville, avec une longueur de 1 245km. Paris a été construit, modelé et structuré par les places royales du XVII^{ème} siècle, les grandes percées haussmanniennes et les grands tracés du XVIII^{ème} siècle. La construction des édifices et des bâtiments a été réalisée le long du réseau viarie. Les commerces et toutes autres activités se localisent généralement en rez-de-chaussée. La largeur des trottoirs est proportionnelle à la largeur de la rue. Ces éléments constituent les règles de composition de l'espace public parisien (Service de l'urbanisme de la ville de Paris).

L'identité de l'espace public et ses règles ne permet pas de caractériser à elle seule les rues parisiennes. La forme des bâtiments est aussi un élément à prendre en compte. Plusieurs règles d'urbanisme au XVIII^{ème} siècle ont été élaborées afin de proportionner la hauteur maximale des façades et la forme du couronnement des immeubles à la largeur des rues. Les 11 premiers arrondissements ainsi que les 16^{ème}, 17^{ème} et 18^{ème} arrondissements sont largement issus de l'application de cette règle d'urbanisme.

1.1.4. Le bâti et les quartiers

La densité bâtie est de l'ordre de 3,6 à Paris. Cette densité est calculée à partir de la somme des surfaces de plancher à la somme des surfaces de terrains. Cette somme exclut toutes les superficies du réseau routier et des espaces hydrauliques, des espaces verts et des équipements publics. De ce rapport, les densités les plus élevées s'observent dans les 2^{ème}, 8^{ème}, et 9^{ème} arrondissements, le nord du 16^{ème} et le sud du 1^{er}. Ainsi, les îlots les plus denses se situent autour de l'opéra et des grands magasins.

Les densités les plus faibles se localisent dans le 13^{ème} et le 19^{ème} arrondissement. Le 20^{ème} comporte le plus grand nombre d'îlots de faible densité.

Le PLU (Plan Local d'Urbanisme) souligne que la densité chiffrée n'est pas toujours représentative de la perception qu'ont les habitants de leur environnement immédiat. En effet, généralement, l'impression de densité est liée à plusieurs facteurs :

- la hauteur et la continuité des façades (en relation avec la largeur des rues)
- la présence plus ou moins importante des espaces publics : places, squares
- la présence plus ou moins importante de la végétation
- les flux émanant de la circulation automobile (avec la présence visuelle et sonore saturant l'espace)
- la présence plus ou moins importante des commerces ou grands équipements publics (rendant plus admissible une forte densité bâtie)

Paris est connu par ses différents quartiers. On peut distinguer :

- les quartiers historiques bien connus des touristes (quartier latin par exemple)
- les quartiers à dominantes économiques et commerciales (quartier de l'Opéra, le long de la Seine, par exemple)

Paris s'est construit au fil des siècles donnant à chaque quartier des caractéristiques bien distinctes les unes des autres. Au niveau de la morphologie et de la géométrie de Paris, des rues et quartiers de la cité médiévale se côtoient avec des bâtiments haussmanniens, de l'habitat social de l'entre-deux guerres ou encore des grands ensembles. Les grandes avenues avec leurs magasins sont également typiques de Paris, surtout dans le 8^{ème} arrondissement.

Les quartiers de Paris se distinguent par leurs densités, leurs morphologies et leurs usages (commercial touristique, etc.).

1.1.5. La végétation

Paris, ville minérale, est inégalement aérée par la végétation : grands parcs et bois, squares et jardins privés. Au XX^{ème} siècle, plusieurs parcs voient le jour et de nombreux squares apparaissent afin de

verdir davantage la capitale. Malgré cette augmentation sensible du nombre d'espaces verts (plus de 150 hectares ces 20 dernières années), une répartition inégale et l'existence de secteurs « carencés » sont toujours présents. Si l'on compte les bois de Boulogne et Vincennes, les espaces verts représentent 29,30% de Paris. Sans eux, ils sont réduits à 14,40% (d'après les données de l'Atelier Parisien d'urbanisme (2004), Fig. 3.2)⁵⁶. En comparaison, en 2013 à Berlin, 40% de la superficie de la ville sont occupés par les espaces verts et les voies navigables (180km de linéaire). La ville recense plus de 6 400 hectares de par ces jardins, soit 26m² par habitant.

Tous ces espaces verts n'ont pas la même qualité environnementale. Cette différence est due à la typologie (jardinnet, square, etc.) aux essences mais aussi aux conditions plus ou moins naturelles de leur aménagement, de leur gestion, de leur taille ou des liens qu'ils entretiennent avec les espaces voisins.

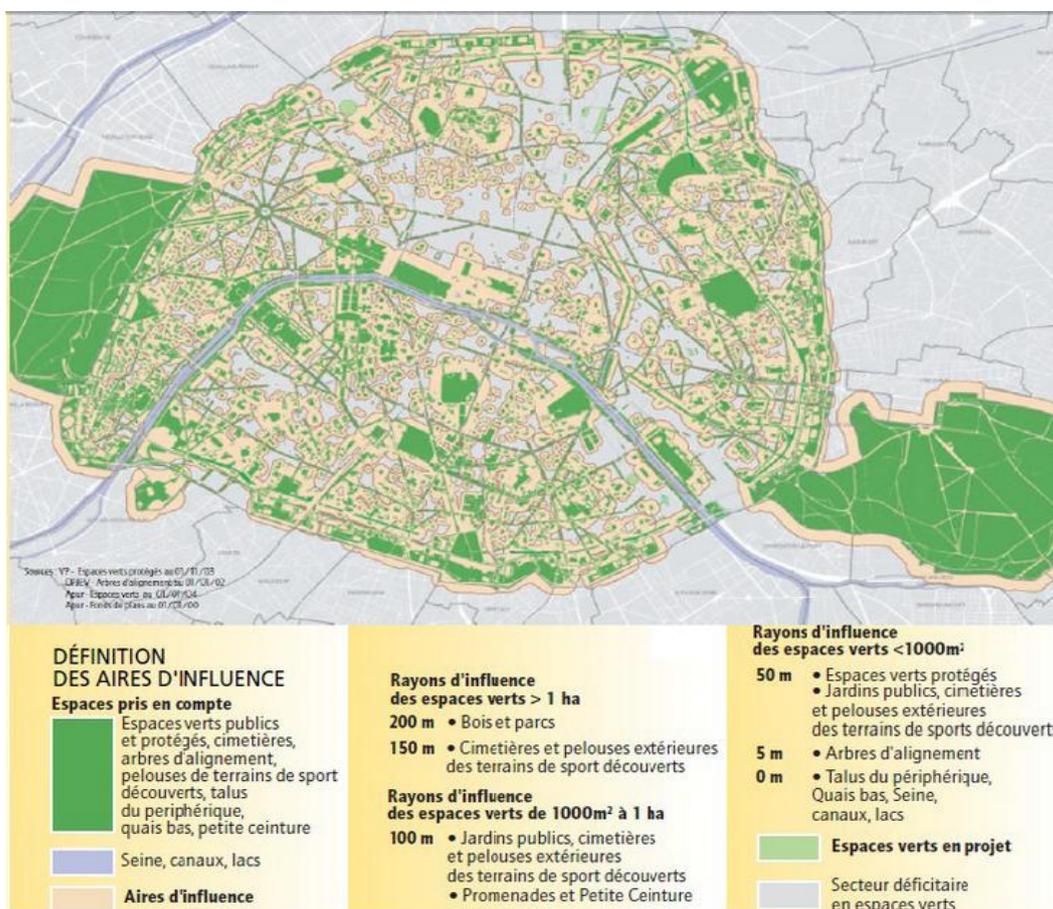


Figure 3.2 : Répartition des espaces verts et des aires d'influence dans Paris (Source : atelier parisien d'urbanisme : <http://www.apur.org>)

⁵⁶ Dans ces espaces verts sont comptabilisés :

- les espaces verts supérieurs à une superficie de 500hectares
- les bois : de Boulogne et de Vincennes
- les cimetières
- les espaces plantés (équipements publics : terrains de sports, établissements, scolaires, etc. et, de la petite Ceinture)

1.1.6. La climatologie

La France, dû à sa jonction entre plusieurs influences climatiques, connaît un climat de type tempéré (selon la terminologie officielle des services météorologiques internationaux). Un climat montagnard est noté dans les Alpes, le Massif central et les Pyrénéens. Au sud, un climat méditerranéen est présent. Une influence continentale est marquée par des arrivées de masse d'air du Nord et de l'Est (principalement froides). Le climat océanique est défini par des masses d'air plus douces, se localisant sur toute la partie Ouest de la France.

Paris, de par sa position, est influencé davantage par un climat océanique altéré. C'est une zone de transition entre le climat océanique, les climats de montagnes et le climat semi-continental. Ce climat, représentation synthétique des conditions météorologiques, est défini par les valeurs moyennes (sur 30 ans) et la dispersion autour de la moyenne des grandeurs météorologiques (températures, pluviométrie, vent, ensoleillement, etc.) ainsi que des phénomènes particuliers à l'exemple des orages, du brouillard. La figure 3.3 montre les normales de température sur la période 1981-2010.

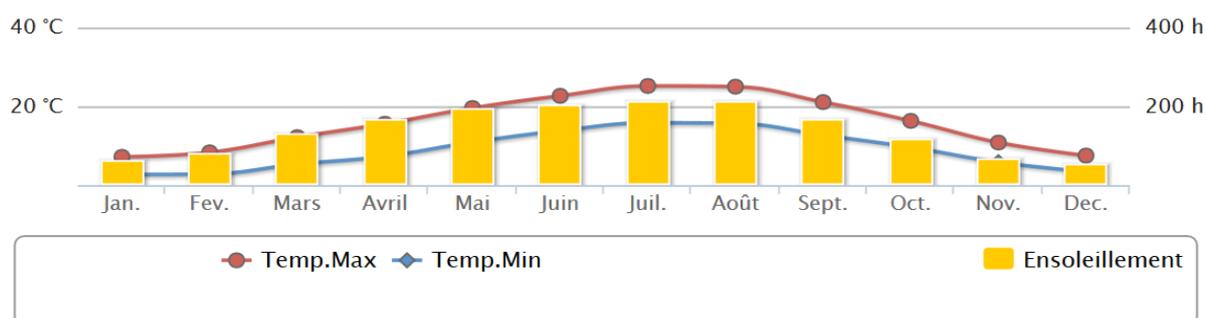


Figure 3.3 : Normales de températures à Paris-Montsouris sur la période 1981-2010 (source : Météo-France⁵⁷)

Du fait de sa localisation, Paris est décrit par des conditions météorologiques globalement tempérées, mais avec des conditions extrêmes occasionnelles, relativement rares, à l'exemple des canicules, des sécheresses ou des fortes précipitations.

Depuis quelques années, les relevés météorologiques et les différents rapports du GIEC semblent montrer que Paris (comme bien d'autres grandes villes) subit le réchauffement planétaire en termes de moyennes annuelles des températures et des précipitations.

- Les températures

Les normales de températures (1981-2010) permettent de décrire si une année est « *exceptionnelle* ». Pour l'année 2015 (année de référence pour notre étude de recherche) plusieurs observations sont à noter (Tab. 3.1) :

⁵⁷ Site internet : <http://www.meteofrance.com/climat/france/paris/75114001/normales>

Mois	Temp Min (1981 - 2010)	Temp Max (1981 - 2010)	Temp Min (2015)	Temp Max (2015)
Janvier	2.7°C	7.2°C	2.9°C	7.8°C
Février	2.8°C	8.3°C	2.3°C	7.6°C
Mars	5.3°C	12.2°C	5.4°C	12.9°C
Avril	7.3°C	15.6°C	8.5°C	18.3°C
Mai	10.9°C	19.6°C	10.7°C	19.6°C
Juin	13.8°C	22.7°C	14.1°C	25.2°C
Juillet	15.8°C	25.2°C	17.1°C	27.4°C
Août	15.7°C	25°C	16.6°C	26.9°C
Septembre	12.7°C	21.1°C	11.7°C	19.6°C
Octobre	9.6°C	16.3°C	9.1°C	15.5°C
Novembre	5.8°C	10.8°C	9°C	14°C
Décembre	3.4°C	7.5°C	7.7°C	12.3°C

Tableau 3.1 : Observations des normales de températures (colonnes de gauche) en comparaison aux températures moyennes mensuelles sous abri, pour l'année 2015 (colonne de droite) à Paris-Montsouris

- Les températures moyennes mensuelles de 2015 varient entre 2,9°C en février, mois le plus froid et plus de 26°C pour les mois de juillet et août, mois les plus chauds. En comparaison aux normales de températures maximales, le mois de juillet 2015 est plus chaud de 2,2°C, ainsi que le mois d'août 2015 avec 1,9°C de plus que la normale de température d'août. La plupart des températures mensuelles pour l'année 2015 sont supérieures aux normales de températures. C'est une année exceptionnellement chaude surtout pour la période estivale.
- Concernant les moyennes annuelles de 2015, on constate que les températures minimales et maximales sont supérieures par rapport aux normales des températures moyennes annuelles de la normale (Tab.3.2)⁵⁸. La température moyenne 2015 est supérieure aux normales. Les valeurs les plus élevées (donc les plus extrêmes pour l'année 2015) sont enregistrées le 1^{er} et le 4 juillet (pour la température minimale et maximale). On remarque, d'après les tableaux 3.1 et 3.2 que le mois de juillet est le plus chaud. On recense des périodes de vague de chaleur. La journée du 1^{er} juillet enregistre un record de température maximale de 39,7°C. La journée du 4 juillet, recense la température minimale la plus élevée de l'année de 23,7°C. Entre le 1^{er} et le 4 juillet les températures, au cœur de Paris, sont élevées et supérieures à la normale des températures.

		Température minimale	Température maximale
2015	Moyenne annuelle	9.6°C	17.3°C
	Valeur la plus basse	-1.4°C 6 janv 2015	1.8°C 6 janv 2015
	Valeur la plus élevée	23.7°C 4 juillet 2015	39.7°C 1 juillet 2015
Normales 1981-2010	Moyenne annuelle	8.9°C	16°C

Tableau 3.2 : Comparaison des normales de température sur la période 1981-2010 avec l'année 2015 en France (année de référence pour notre étude)

⁵⁸ Les chiffres présentés sont estimés à partir des bulletins climatiques de Météo-France, portant sur plus d'une centaine de stations météo réparties dans toute la France métropolitaine

De ces caractéristiques et observations, notre étude se focalise sur le mois de juillet 2015. C'est durant cette période que les températures sont les plus élevées. On enregistre une canicule.

- Le vent

Le vent représente un des facteurs prépondérant en matière de pollution de l'air. Si on se base sur les observations de la station Montsouris de Météo-France, la région parisienne est soumise à des vents dominants de secteur sud-ouest. Ces derniers sont associés à des régimes maritimes et sont assez puissants. Des vents de secteur nord-est sont également présents mais à plus faible intensité. Ils sont associés à des régimes continentaux. Concernant les vents des secteurs sud-est et nord-ouest, leurs présences sont quasi inexistantes.

Paris est une ville densément peuplée, construite par son histoire. Elle est définie par ses caractéristiques architecturales, urbanistiques et climatiques. Au niveau des observations de températures, l'année 2015 a généralement des températures supérieures aux normales. Le mois de juillet est le plus chaud.

1.2. Description des données géographiques

La donnée est un élément fondamental pour la compréhension d'un phénomène. Cette donnée peut être localisée ou non. Si elle l'est, on parle alors de données géographiques. Cette dernière permet, pour notre étude, de caractériser la ville de Paris. L'espace peut être modélisé par une base de données géographiques décrivant tous les objets ou phénomènes présents sur le territoire. Une base de données correspond donc à un ensemble de couches superposables.

L'une des principales caractéristiques de ces données est d'être géoréférencée. Cela repose sur des théories de géodésie, de topographie et de photogrammétrie.

Une autre caractéristique de ces données géographiques est leurs supports cartographiques. En effet, pour les données vectorielles, il s'agit d'objets représentant des entités du monde réel à l'exemple de la route, des bâtiments, de la végétation, etc. Elle permet de décrire l'information topographique avec tous les éléments constituant l'espace. Chaque objet est caractérisé par ses coordonnées (sa géométrie) et ses attributs. Pour la base de données de référence, nous avons utilisé la BD TOPO® de l'IGN.

Pour les données raster, comme celles issues de prises de vues aériennes, par caméra numérique, elles ont pour support des mailles régulières (comprises entre 20 et 50cm) portant sur les coordonnées géographiques et sur les mesures radiométriques. Ces mailles sont aussi appelées pixels : la BD ORTHO®. C'est une image orthorectifiée en Lambert 93. Pour notre recherche nous utilisons la BD ORTHO® de l'IGN avec une résolution de 50cm.

Une même information localisée à une position géographique peut être traduite dans les deux modes (Fig.3.4). Cette superposition nous permet de choisir la représentation nous convenant le mieux. L'utilisation de ces données apporte une multitude d'avantages, notamment sur le fait que les informations sont stockées de façon claire. Elles sont localisées dans l'espace (et peuvent l'être dans le temps). Elles permettent de comprendre et de prévoir certains risques.

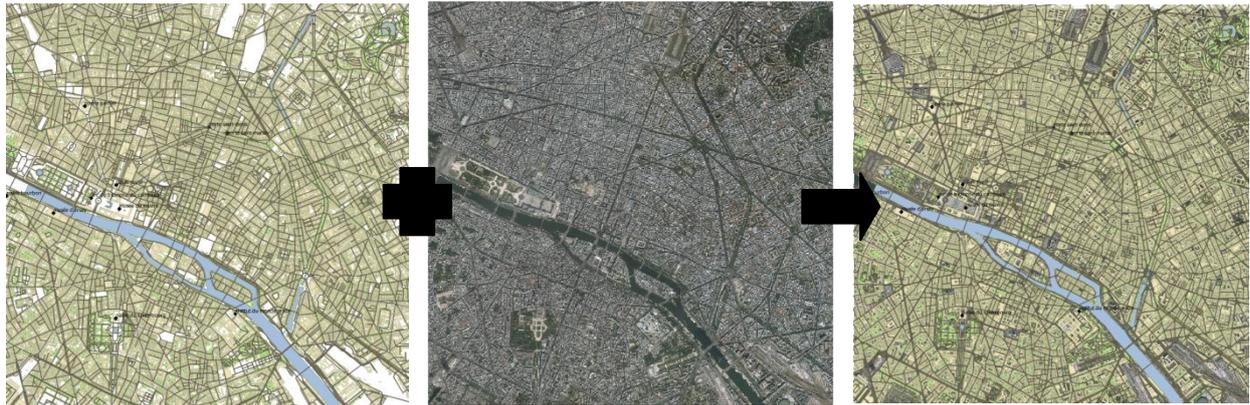


Figure 3.4 : Superposition des deux supports (vecteur, à gauche et raster, au centre) sur la zone d'étude (650000/6865000 – 655000/6560000 ; 5*5km)

Les données topographiques et morphologiques sont utilisées pour localiser et représenter les données météorologiques issues de modèles climatiques.

1.3. Complémentarité entre modèles climatiques

L'estimation des températures urbaines à grandes échelles est délicate puisqu'elle nécessite de prendre en compte les conditions atmosphériques au-dessus de la ville, calculées avec certains modèles (AROME, par exemple) et les échanges thermiques entre les différentes surfaces calculées avec les modèles de surface (SURFEX). On retrouve donc un effet cascade.

La construction du modèle SURFEX-TEB repose sur la complémentarité entre plusieurs modèles. Ici, elle se fait à trois niveaux de modélisation : AROME, SURFEX et TEB. AROME est un modèle de prévision météorologique, couplé avec le modèle SURFEX, pour décrire les conditions atmosphériques. Les données de surfaces (occupation du sol, morphologie du bâti, etc.) utilisées pour le modèle SURFEX proviennent du projet MUSCADE. Le modèle TEB peut être utilisé seul ou couplé avec le modèle SURFEX. TEB, utilisé seul ne peut pas être représenté sur un espace géographique. Ces sorties sont sous forme de graphique (vision 1D). La paramétrisation du modèle TEB peut se faire avec des données terrains. Il est associé à un atlas des différents types de surfaces (ECOCLIMAP, (Faroux *et al.*, 2013)) permettant une meilleure modélisation des sols et des phénomènes de basses couches (Partie A). SURFEX apporte l'élément géographique. Pour notre recherche nous avons couplé les modèle SURFEX et TEB : SURFEX-TEB afin de contextualiser l'information décrite par TEB, tout en intégrant les estimations des couches hautes d'AROME (Fig.3.5).

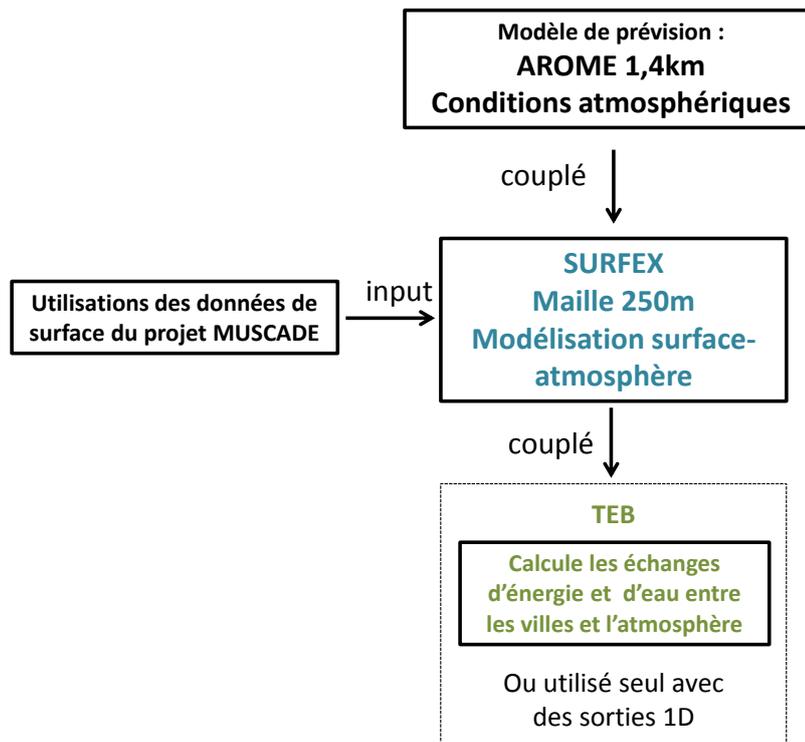


Figure 3.5 : Principaux systèmes de prévision numérique et de simulation utilisés dans notre recherche sur l'analyse et la représentation des épisodes caniculaires

L'addition de ces systèmes numériques permet la simulation de l'effet de l'îlot de chaleur urbain et de la canicule (ainsi que d'autres phénomènes météorologiques significatifs) à fines échelles.

Le modèle SURFEX nécessite l'utilisation du modèle AROME afin d'avoir une estimation des couches hautes. Pour l'implémentation du modèle SURFEX, les données de surfaces proviennent du projet MUSCADE⁵⁹. Le modèle TEB nécessite l'utilisation du modèle SURFEX pour contextualiser ses données. Pour notre étude, SURFEX-TEB est utilisé avec l'intégration des données estimées du modèle AROME.

1.3.1. Modèle AROME⁶⁰

AROME (Application de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Echelle) est un modèle régional opérationnel, à maille très fine. Il est alimenté par un modèle de plus petite échelle. Ainsi AROME est couplé avec le modèle à échelle globale ARPEGE (de résolution horizontale 10km) afin de fournir les conditions atmosphériques. Ce modèle permet de fournir des prévisions détaillées, au-dessus de la France, pour des échéances de 3 à 36 heures. C'est par ce modèle que les météorologues peuvent mieux prévoir certains phénomènes météorologiques ou événements climatiques à petite échelle, tels que les canicules, les forts orages, etc.

AROME connaît de fortes évolutions depuis avril 2015. Sa résolution horizontale a presque doublé passant de 2,5 à 1,3km avec un découpage vertical de l'atmosphère utilisant 90 couches au lieu de

⁵⁹ Modélisation Urbaine et Stratégies d'adaptation au Changement Climatique pour Anticiper la Demande et la production Énergétique. Ce projet ANR terminé en 2013 a eu pour objectif d'étudier les interactions entre la configuration urbaine et son expansion, la consommation d'énergie dans les villes et le changement climatique

⁶⁰ Source : <http://www.meteofrance.fr> (le modèle à maille fine AROME)

De la donnée brute à la dangerosité

60, (Fig. 3.6 et 3.7) et sa grille horizontale passe de 750*750 à 1536*1440 points (source Météo-France, 2015 (Fig. 3.6 et 3.8)). Son pas de temps diminue passant de 60 à 50s.

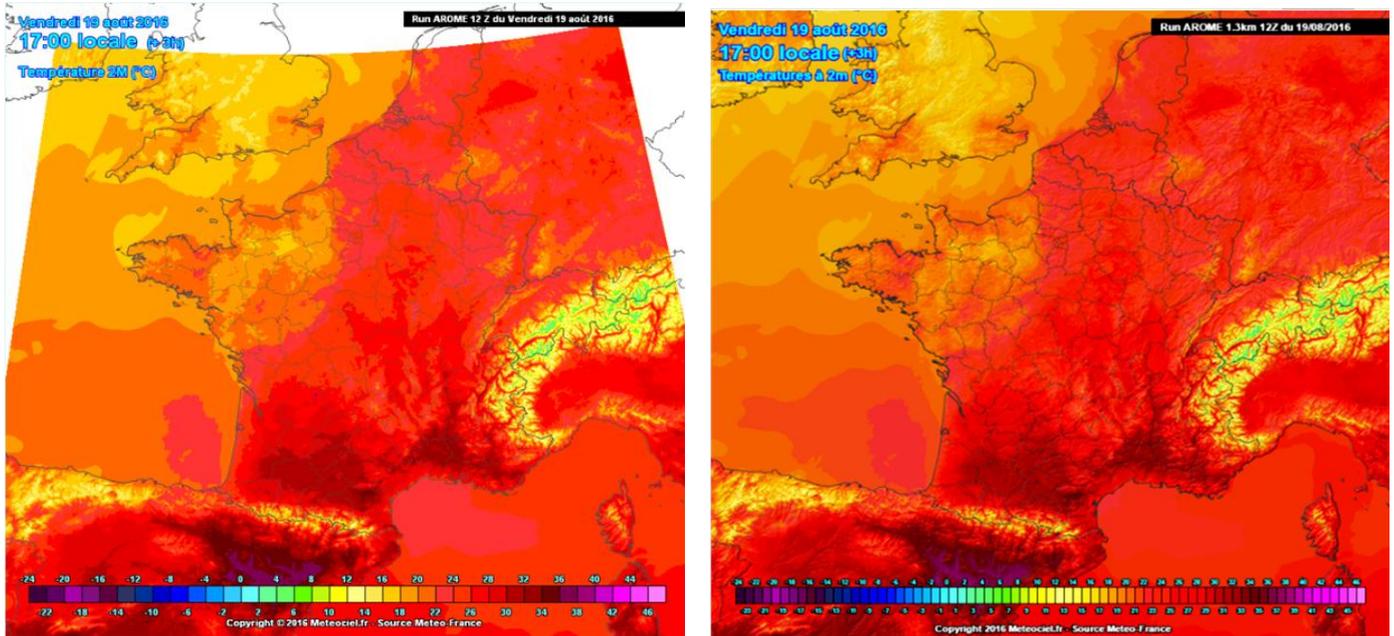


Figure 3.6 : Comparaison de la température à 2m du sol du modèle AROME à 2,5km (à gauche) et AROME HD 1,3km (à droite) sur la France le 19 août 2016 à 17h

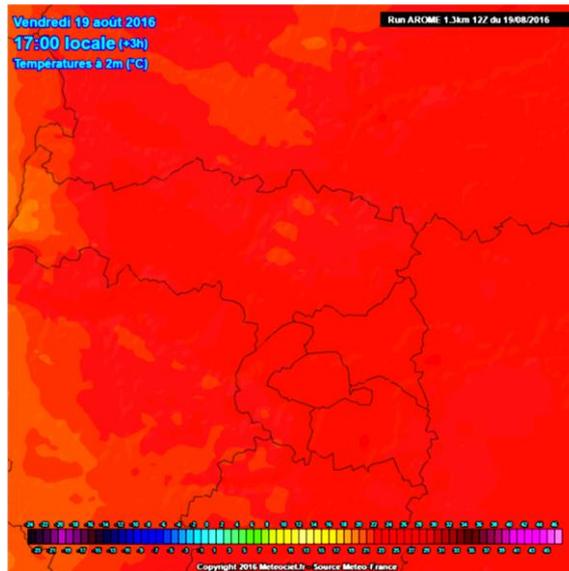


Figure 3.7 : Zoom de la figure 3.6 des températures à 2m du sol du modèle AROME (résolution 1,3km) sur l'Ile-de-France le 19 août 2016 à 17h

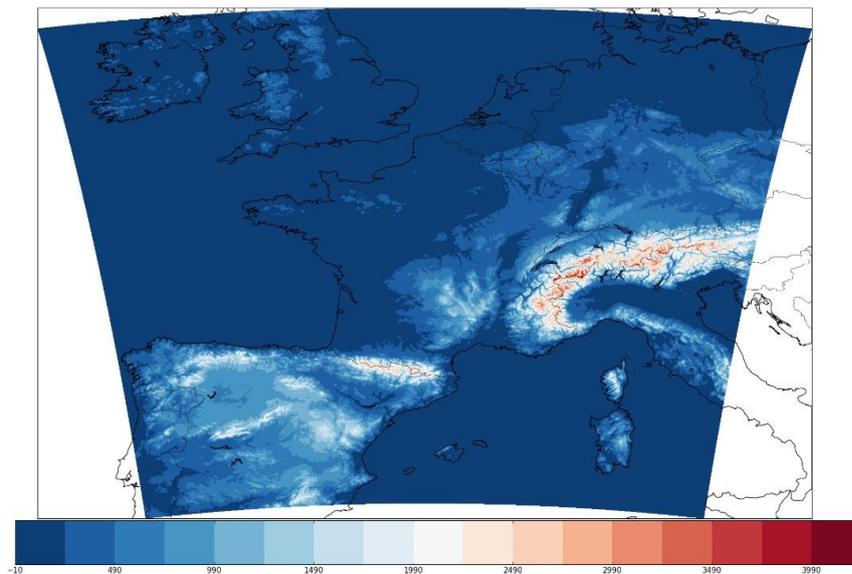


Figure 3.8 : Domaine de calcul d'AROME-France 1.3km (source Météo-France, 2015) représentant le relief (en m)

Ces différentes évolutions et particulièrement la résolution verticale permettent de simplifier l'interface entre le modèle de surface SURFEX et l'atmosphère.

AROME dispose de son propre système d'assimilation d'observations à haute densité. Les prévisions du modèle AROME sont continuellement réajustées par comparaison aux observations in situ ou satellitaires. Ces observations sont classées en deux types : conventionnelles et satellitaires.

Les observations conventionnelles assimilées sur le domaine AROME sont :

- les mesures en surface issues de stations d'observations terrestres (pression, vent horizontal/ température et humidité)
- les mesures provenant de radiosondages pour extraire les profils verticaux de température, d'humidité et des vents horizontaux
- les mesures provenant par ballons PILOT (profils verticaux de vent)
- les mesures sur avion permettant de connaître les vents horizontaux et les températures en altitude

Ces observations conventionnelles sont complétées par des observations satellitaires. Elles sont issues des radars profileurs, d'imageurs satellitaires, etc. Ce modèle dispose donc d'un état initial amélioré à chaque cycle de nouvelle prévision.

Le modèle AROME est capable de simuler les processus conduisant à la formation des îlots de chaleur urbains sur le territoire français, à l'échelle de l'Ile-de-France. Il parvient à simuler des champs de chaleur très réalistes, avec des gradients prononcés.

1.3.2. Interpolation des données AROME

Tous les modèles atmosphériques ont des limites telles que la résolution spatiale ou temporelle. Il faut donc interpoler les données sur des modèles numériques à échelle régionale afin de simuler des événements locaux, évoluant dans l'espace.

De la donnée brute à la dangerosité

Le modèle AROME est représenté par un maillage tridimensionnel. Chaque maille représente une longueur de 1,3km. Pour chaque volume on attribue des valeurs initiales (pression, températures, vent, etc.) observées à un instant T. Ces volumes considérés comme des points (horizontaux et verticaux) constituent la grille du modèle. La distance séparant deux points est appelée la résolution. A chaque point sont appliquées des équations thermodynamiques. Elles permettent de calculer les paramètres atmosphériques. Les résultats globalisés peuvent être présentés sous forme de graphique ou de grille.

Pour notre étude, nous décidons d'avoir un forçage plus précis, pour une meilleure visualisation de l'îlot de chaleur urbain et par conséquent des températures sur Paris. Une extraction des forçages atmosphériques (à 17,5m au-dessus des toits des bâtiments) du modèle de prévision météorologique AROME, à une résolution de 1,4km est réalisée. Les points sont définis par leurs latitudes et longitudes. Une interpolation spatiale des données est réalisée afin d'obtenir une résolution à 250m. L'interpolation est réalisée sur tous les paramètres de sortie AROME : la température, l'humidité, la pression, la force du vent, le rayonnement solaire, le rayonnement infrarouge et la nébulosité (basse, haute et moyenne), les précipitations (pluie et neige) (Fig. 3.9). Cette manipulation se fait sous R. On passe de 4 240 observations à plus de 130 000 observations. Tous les points du modèle sont compris entre 48° et 49°N et 2° et 3°E (pour couvrir toute la zone de Paris et ses alentours).

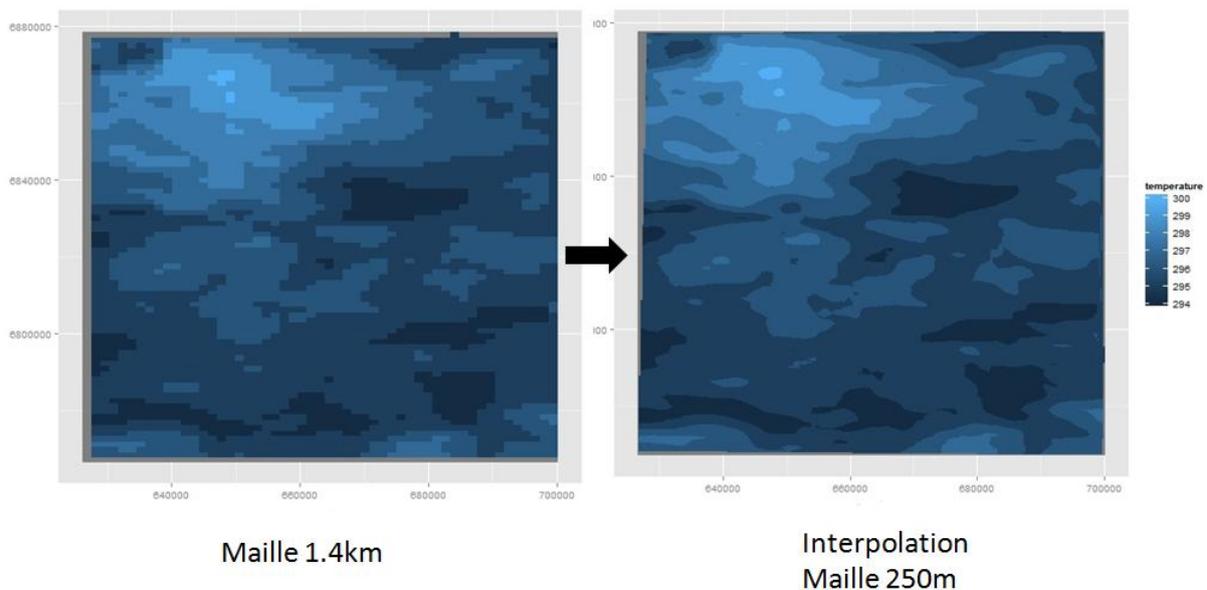


Figure 3.9 : Représentation de la température (en Kelvin) des sorties AROME à 1,4km (à gauche) et 250m (à droite, après interpolation) entre 48° et 49°N et 2 et 3°E

Pour cette interpolation, on transforme le jeu de données en objet géographique. Une grille de 250m est construite sur l'étendue des coordonnées X et Y. L'étendue X et Y étant trop large pour notre zone d'étude, la grille est réduite à 441 observations, soit une grille de 21*21 observations à un pas de 250m (Fig.3.10). La grille s'étend entre 650 000 et 655 000 m pour X, 6 860 000 et 6 865 000m pour Y (Lambert 2 étendu).

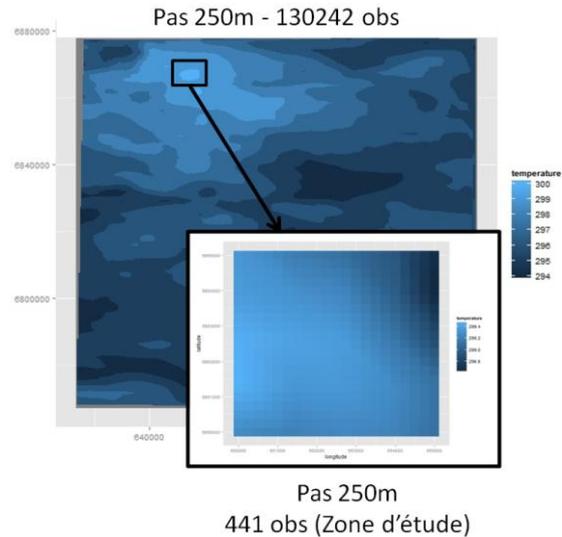


Figure 3.10 : Extraction de la zone d'étude issue de l'interpolation avec comme coordonnées : 650 000 et 655 000 km pour X, 6 860 000 et 6 865 000km pour Y (Lambert 2 étendu)

Nous réalisons une interpolation linéaire avec une méthode de l'inverse de la distance pondérée (IDW). Dans cette méthode déterministe, la valeur à estimer en un point de la zone d'étude est déterminée à l'aide de la moyenne pondérée des valeurs des points les plus proches du point considéré. La distance entre le point recherché et les points connus aux alentours est mesurée. Le calcul du point recherché se fait grâce à la moyenne des valeurs des points environnants. Pour résumer, plus le point à interpoler est proche d'un point dont on connaît la valeur, plus la valeur du point à interpoler sera proche de la valeur connue. La distance h , les points connus et le point recherché sont donnés par cette équation :

$$h_i(x, y) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (18)$$

Le résultat de l'interpolation prend en compte x , y et z ($i=1, \dots, n$). z_i désigne les valeurs prises par le point à interpoler et L le résultat de l'interpolation :

$$L(x, y) = \sum_{i=1}^N w_i(x, y) z_i \quad (19)$$

Où w représente les poids. Ils sont inversement proportionnels à une puissance afin que les données proches du point à étudier interviennent davantage dans la moyenne que les données éloignées.

Une fois les forçages atmosphériques réduits à un maillage de 250*250m, sur la zone souhaitée et avec les données de surface géoréférencées en Lambert2 étendu (système de référence utilisé par Météo-France, dans le modèle que nous avons utilisé), il est possible de faire tourner SUREFX couplé à TEB, à une grille de 250m. Cette opération prend quelques jours. Pour notre étude, les sorties SURFEX-TEB sont toutes les heures du mois de juillet, sur une zone de 11km² au centre urbain de Paris.

1.4. Présentation des données SURFEX-TEB

1.4.1. Différentes étapes d'une simulation SURFEX

SURFEX est conçu pour être couplé à des modèles atmosphériques et hydrologiques. Ces modèles indépendants permettent d'enrichir les sorties de SURFEX :

- ISBA, le modèle de surfaces continentales
- TEB pour les zones urbanisées
- Flake pour les lacs.

L'utilisation de SURFEX nécessite trois phases lors de son processus de simulation (Fig.3.11) :

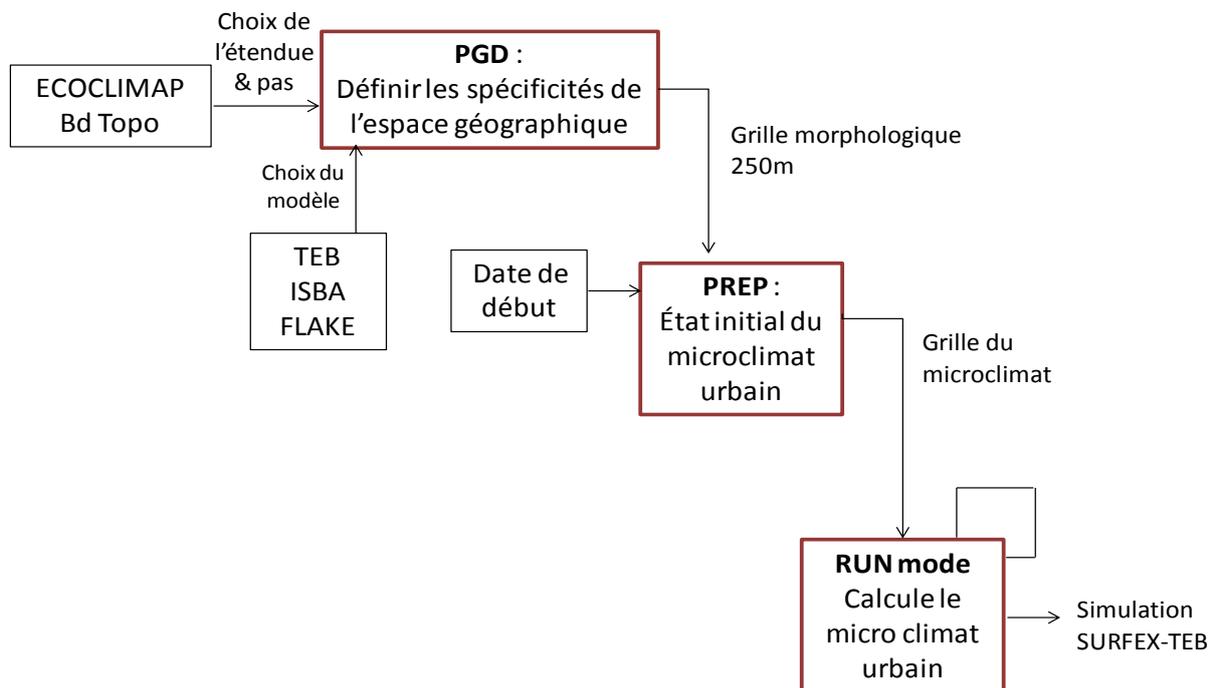


Figure 3.11 : Les différentes étapes et processus à paramétrer pour réaliser une simulation SURFEX

- La phase de PGD (PhysioGraphic Data) permet à l'utilisateur d'obtenir les spécificités de l'espace géographique. Ce fichier contient des informations sur l'orographie, les fractions de sable et d'argile, la couverture de la surface (avec le modèle ECOCLIMAP), etc. Ainsi, les schémas de surface sont choisis et sont implémentés avec leur nom, la température et le modèle choisi (ex : nature = ISBA). La création de la grille, en définissant les longitudes et latitudes se réalise durant cette phase de paramétrisation. Pour notre étude, nous avons choisi une grille s'étendant sur une maille de 250*250m. Pour résumer, cette étape permet de choisir les schémas de surfaces, de créer la grille d'étude et de définir la physiographie⁶¹.
- La phase de PREP (phase de préparation) permet de créer un fichier d'initialisation du microclimat urbain pour un instant t0. Ce fichier est utilisé pour la phase suivante. Lors de cette étape on spécifie la date et la fin de la simulation. Les forçages atmosphériques (issus des

⁶¹ Description géomorphologique des aspects naturels d'une région (relief, climat, etc.)

données du modèle opérationnel : AROME) sont interpolés sur la grille SURFEX. La namelist (liste des paramètres calculés par le modèle choisi) est définie durant cette phase. Elle est spécifique pour chaque schéma de surface. L'objectif de cette étape est d'initialiser les variables pronostiques.

- La phase Run mode (phase de prévision) correspond à l'intégration temporelle du modèle (comme évolution des températures initialisées dans le PREP, ainsi que la température de la rue à 2m, le flux de chaleur vers l'atmosphère, l'humidité à 2m, etc.). Elle calcule les paramètres de surfaces⁶² (principalement les températures des différentes parois-murs, toit et de la route). Ce calcul se base sur le fichier d'initialisation issu de la phase PREP ainsi que sur les différents fichiers de couplage. Le modèle AROME permet de donner les forçages atmosphériques sur une période définie.

1.4.2. Paramètres TEB

Pour rappel, TEB calcule les échanges d'énergie et d'eau entre les villes et l'atmosphère. TEB permet de décrire les échanges thermiques au sein d'une maille. Le modèle TEB peut être utilisé seul ou couplé avec le modèle SURFEX. Pour cette étude, nous utilisons les deux modes.

Pour le mode non couplé, le driver est téléchargeable directement sur le site. Il est utilisable par tous (à condition d'avoir quelques connaissances dans le langage FORTRAN). Des paramètres et des options de TEB, on constate qu'il est possible d'avoir des résultats pour tous types de configurations en fonction des variables (Tab.3.3). Dans le code, les types d'activités et les types de bâtiments sont normalisés. Pour chaque type de configuration, une classe de construction est donnée. Ces classes vont d'avant 1900 à la classe 2090-2100.

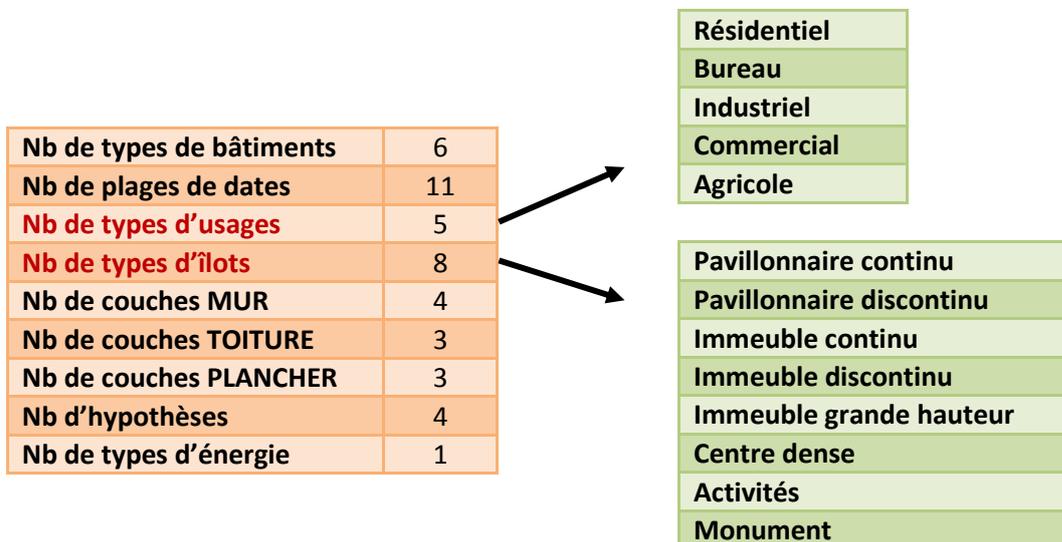


Tableau 3.3 : Nombres de variables présentes dans le modèle TEB (à gauche) et les spécificités de ces variables (à droite)

A chaque type de bâtiment et d'activité correspondent des paramètres thermiques spécifiques. Pour ces valeurs, on se base sur les données calculées et développées pour les projets MUSCADE et

⁶² Cf chapitre 1, partie 4.3.1. Les paramètres de surface sont calculés en fonction du forçage atmosphérique

ACCLIMAT (Annexe 3). Un matériau est défini pour un type de bâtiment, pour un élément (toiture, plancher, mur, enveloppe) pour une date. Une valeur est donnée pour sa conductivité, sa résistance thermique, sa chaleur spécifique, son émissivité et son albédo (pour l'élément de la toiture). Cette valeur est donnée pour chaque couche de l'élément (toit, mur et plancher). Pour donner les valeurs aux différentes variables, il faut connaître en principe les caractéristiques des bâtiments : nature des matériaux, isolation, sa fonction, etc. Dans notre cas, nous avons fait tourner le modèle avec les bâtiments de type haussmannien.

Pour notre étude, les données proviennent du projet MUSCADE. La figure 3.12 nous permet de visualiser les différents types d'îlots constituant notre zone d'étude.

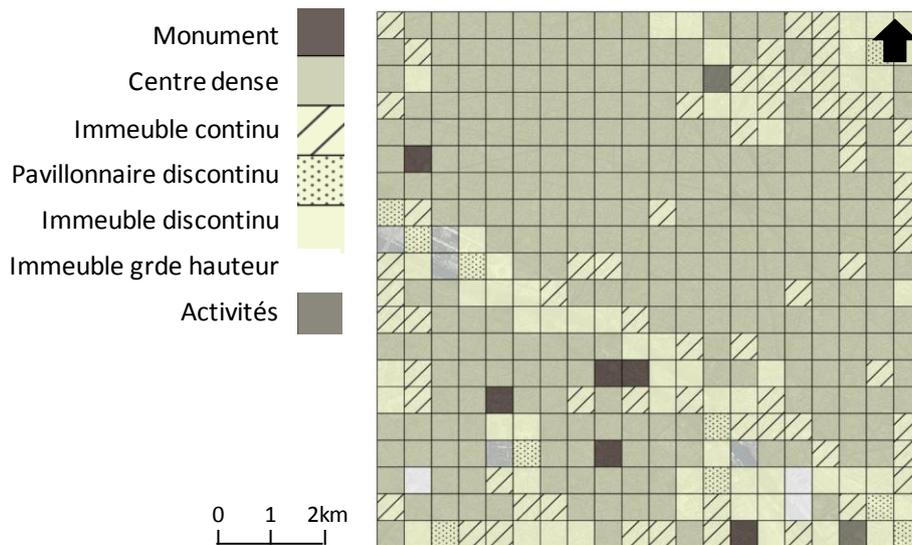


Figure 3.12 : Cartographie des différents types d'îlots sur notre zone d'étude provenant du projet MUSCADE

Le type *pavillon discontinu* correspond traditionnellement à un mode d'habitat rural. Ces dernières décennies, ces lotissements se sont développés pour le périurbain de Paris.

Le type *centre ancien* correspond aux centres villes historiques. Il est défini par un tissu urbain dense avec des immeubles de hauteurs moyennes et relativement homogènes. La présence de cours est caractéristique de ce type d'îlots.

Le type *immeuble discontinu* apparaît après la deuxième guerre mondiale. La hauteur de ces bâtiments est élevée mais ce tissu est globalement deux fois moins dense que le tissu du centre urbain.

Le type *immeuble à grande hauteur* désigne les tours de bureaux et les tours d'habitations. Même si très proche dans leur morphologie, leurs usages se distinguent par la variable type d'usage.

Le type *immeuble continu* correspond à un retour vers les formes urbaines traditionnelles opérées depuis le XXI^{ème} siècle. Il se caractérise par des espaces ouverts possédant une densité plus élevée que les immeubles à grande hauteur ou les immeubles discontinus.

Les *bâtiments d'activités* sont des bâtiments industriels, commerciaux et des locaux agricoles. Très peu se trouvent en ville. Ce type d'îlot est caractérisé par de grandes surfaces avec une volumétrie simple.

Le type *monument* correspond à un édifice touristique.

Pour une meilleure reconnaissance des types d'îlots, la figure 3.13 permet de les distinguer et les représenter visuellement. Le type monument n'est pas mentionné. Ces types d'îlots sont validés lors de la thèse de Marion Bonhomme (2013).

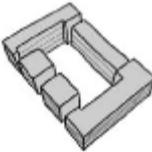
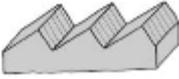
Type de quartier	Illustration
Pavillon discontinu	
Pavillon continu	
Immeuble discontinu	
Immeuble continu	
Immeuble de grande hauteur	
Centre ancien	
Bâtiment d'activités	

Figure 3.13 : Les sept quartiers des types d'îlots (source : Bonhomme M. 2013)

Les différents quartiers permettent de représenter la ville de Paris dans sa diversité typomorphologique.

Au-delà de la morphologie, les usages des différents bâtiments ont une influence primordiale sur l'énergétique du bâtiment mais aussi sur l'énergétique urbaine en général. Les apports internes sont très différents selon l'usage. Pour les bureaux, le taux d'occupation et les ressources énergétiques ont des comportements énergétiques différents que pour l'usage résidentiel. De plus, l'équipement en bureautique ainsi que la climatisation sont plus importants et génèrent des apports de chaleur non négligeable (Van Moeseke, 2002). Il est donc primordial de connaître leur localisation. La figure 3.14 présente la localisation des différents types d'usages sur notre zone d'étude.

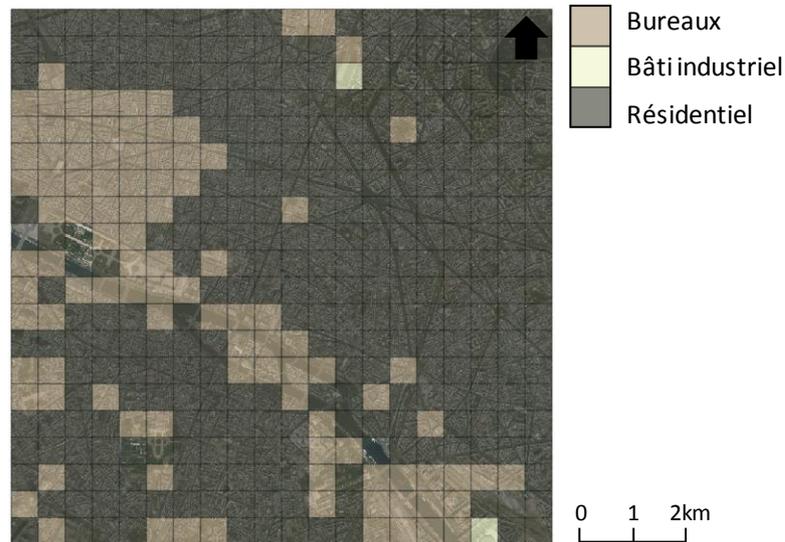


Figure 3.14 : Cartographie des différents types d'usages sur notre zone d'étude provenant du projet MUSCADE

La majorité des bureaux se localisent vers le quartier de l'Opéra et le long de la Seine. Très peu de bâtiments industriels sont présents. L'usage résidentiel est le plus représenté sur notre zone d'étude.

Pour notre étude, le modèle TEB est couplé avec le modèle BEM. Il permet une meilleure estimation des températures dans les bâtiments.

1.4.3. Modèle SURFEX-TEB

Afin de mieux comprendre les données du modèle, nous réalisons un modèle de données implicite (modèle conceptuel). Cette conception permet de mieux comprendre, organiser, structurer et résumer le modèle SURFEX-TEB (Fig.3.15). Ce modèle conceptuel a pour objectif de représenter les données, de façon structurée. Il permet également d'étudier les relations existantes entre ces données.

Comme on peut le constater, on retrouve des paramètres en entrée et en sortie. Les forçages atmosphériques (provenant du modèle AROME) sont des paramètres *input*. En entrée de SURFEX, pour chaque pas de temps du modèle et chaque maille, sont fournis la température, l'humidité spécifique de l'air et les composantes horizontales du vent à 17,5m au-dessus des bâtiments, la pression, la quantité totale de précipitation et les rayonnements incidents. SURFEX calcule alors les flux moyennés de chaleur sensible et latente, de quantité de mouvements qui vont fournir les conditions aux limites inférieures au modèle atmosphérique AROME. Concernant le modèle TEB, les

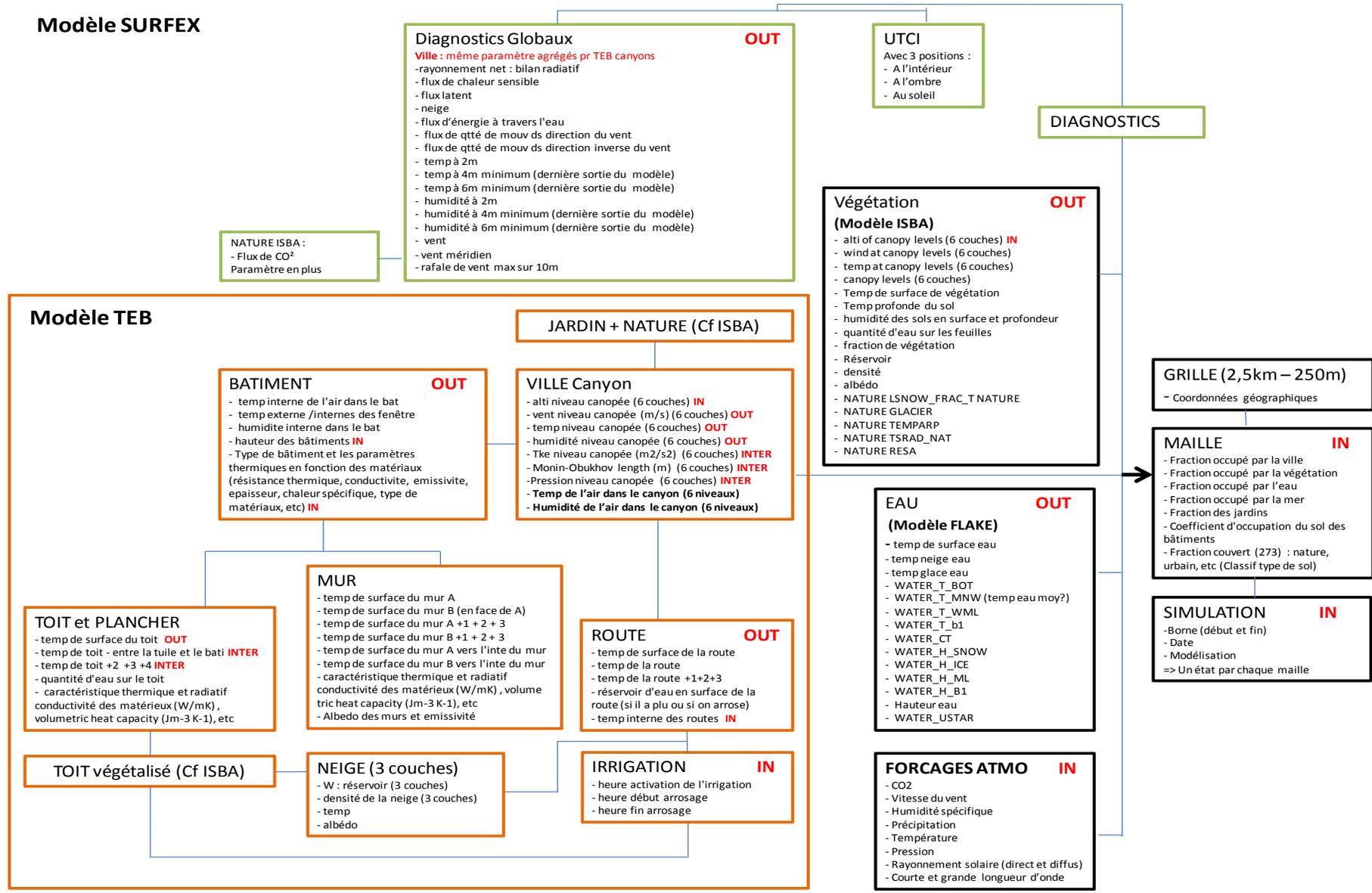
Intégration et contextualisation des données SURFEX-TEB

données d'entrée sont des données météorologiques (ou couplage avec un modèle météorologique, ici, AROME), la description des caractéristiques des formes urbaines, des bâtiments et de la végétation dans chaque maille du modèle (représentant un quartier ou autre, suivant la résolution spatiale utilisée). Les données en sortie sont représentées par le microclimat urbain dans chaque quartier, les flux de chaleur, d'eau et de CO₂ entre la ville et l'atmosphère, les indices de confort thermique et la consommation d'énergie, entre autre.

SURFEX est conçu pour être couplé à des modèles indépendants permettant d'enrichir ses sorties. Par exemple, le modèle ISBA permet d'inclure la végétation, TEB les zones urbanisées, etc.

Pour chaque simulation, la date, le pas de temps et l'étendue géographique sont précisés. Une sortie du modèle représente un état : une heure et une date précise.

De la donnée brute à la dangerosité



TKE : Turbulence kinetic energy - turbulence

Figure 3.15 : Schéma conceptuel du modèle SURFEX et du modèle TEB (encadré orange)

1.4.4. Traitements préalables et stockage des données sous SGBD

Pour représenter graphiquement les simulations extraites du modèle SURFEX-TEB, il est nécessaire de structurer l'information sortie et de l'analyser grâce à un logiciel statistique.

Les sorties du modèle SURFEX-TEB, pour notre étude, sont sous la forme d'un fichier ascii (format.txt.) Ces fichiers textes, peu structurés, sont délimités par des virgules mais ne peuvent pas être directement traités par le logiciel statistique. Il faut comprendre, identifier les paramètres et valeurs comprises dans ces fichiers.

Les valeurs de ces fichiers sont représentées sous forme de grille où à chaque maille correspond la valeur d'un paramètre. Dans notre cas expérimental chaque paramètre comporte 800 lignes pour un maillage d'une précision de 250m. Il existe plus de 50 paramètres de SURFEX. Les fichiers traités font plus de 40 000 lignes (800 lignes*50 paramètres) et plus de 200 000 valeurs pour un état. Parmi ces 200 000 valeurs, certaines sont des paramètres en entrée, d'autres des paramètres intermédiaires et certains paramètres en sortie. Les deux premiers blocs de paramètres sont les coordonnées X et Y (Lambert2 étendu) de la grille. A chaque nouvelle variable, la valeur est donnée pour la maille. Pour notre recherche, nous nous sommes seulement focalisés sur six paramètres :

- Température de la rue à 2m du sol
- Humidité de la rue à 2m du sol
- Température intérieure des bâtiments
- Les trois indices UTCI (ombre, soleil et intérieur)

Les paramètres, une fois classés et étudiés, sont structurés dans une base de données, PostGIS. Pour les visualiser sous un SIG, différents traitements préalables sont nécessaires. Le premier est d'organiser et structurer les valeurs pour simplifier la lecture sous Java. On enlève tous les caractères spéciaux, les doublons et les explications pour avoir une structure des données simples et répétitives. Les valeurs 0,10000000E+21 correspondent à des valeurs nulles sur la grille. Au final la structure se compose comme telle : 2 lignes de paramètres et 800 lignes de données (Fig.3.16).

```
FULL_XX
XX
0,57912500E+06  0,57937500E+06  0,57962500E+06  0,57987500E+06  0,58012500E+06  0,58037500E+06
0,58062500E+06  0,58087500E+06  0,58112500E+06  0,58137500E+06  0,58162500E+06  0,58187500E+06
0,58212500E+06  0,58237500E+06  0,58262500E+06  .....
FULL_XY
XY
0,24051250E+07  0,24051250E+07  0,24051250E+07  0,24051250E+07  0,24051250E+07  0,24051250E+07
0,24051250E+07  0,24051250E+07  0,24051250E+07  0,24051250E+07  0,24051250E+07  0,24051250E+07
0,24051250E+07  0,24051250E+07  0,24051250E+07  .....
TOWN_TROOF3
X_Y_TROOF3
0,10000000E+21  0,10000000E+21  0,10000000E+21  0,29085201E+03  0,29074865E+03  0,29091849E+03
0,29073945E+03  0,29080945E+03  0,29080605E+03  0,29062467E+03  0,29067056E+03  0,10000000E+21
0,10000000E+21  0,10000000E+21  0,10000000E+21  .....
TOWN_TWALLA4
X_Y_TWALLA4
0,10000000E+21  0,10000000E+21  0,10000000E+21  0,30154980E+03  0,29915467E+03  0,30181906E+03
0,30126540E+03  0,30180826E+03  0,30081722E+03  0,30047337E+03  0,29872982E+03  0,10000000E+21
0,10000000E+21  0,10000000E+21  0,10000000E+21  .....
```

Figure 3.16 : Exemple de la structuration des fichiers textes en sortie du modèle SURFEX-TEB

Cette partie présente avec plus de précision les modèles et paramètres utilisés pour réaliser les simulations des canicules. Les modèles sont couplés pour aboutir à une meilleure estimation de la température.

Nous voulons exploiter ces sorties pour étudier les variations spatiales et temporelles dans la zone de Paris, en particulier lors d'épisodes caniculaires. L'analyse de ces températures illustre le fait que la ville n'est pas un bloc homogène.

2. Traitement des données

2.1. Du Lambert 2 étendu au Lambert 93

Les données en sortie de SURFEX-TEB doivent être géoréférencées avec notre zone d'étude. Pour cela on réalise une transformation des coordonnées. Le Lambert 93 (EPSG 2154) est aujourd'hui le système de coordonnées de référence⁶³. La transformation permet de passer d'un système à un autre.

Après cette transformation des données incluses dans le programme du modèle SURFEX-TEB, on relève une erreur de géolocalisation des données. Cette erreur est visible après la transformation des coordonnées. Elle est due à un problème de géoréférencement que nous avons identifié visuellement (Fig.3.17). Cette opération permet de croiser autant d'informations que l'on souhaite sur une même zone d'étude (Balletti 2006).

⁶³ Le décret n°2000-1276 du 26 décembre 2000 rend obligatoire l'usage du système de référence RGF93 (modifié par le décret n°2006-272 du 3 mars 2006)

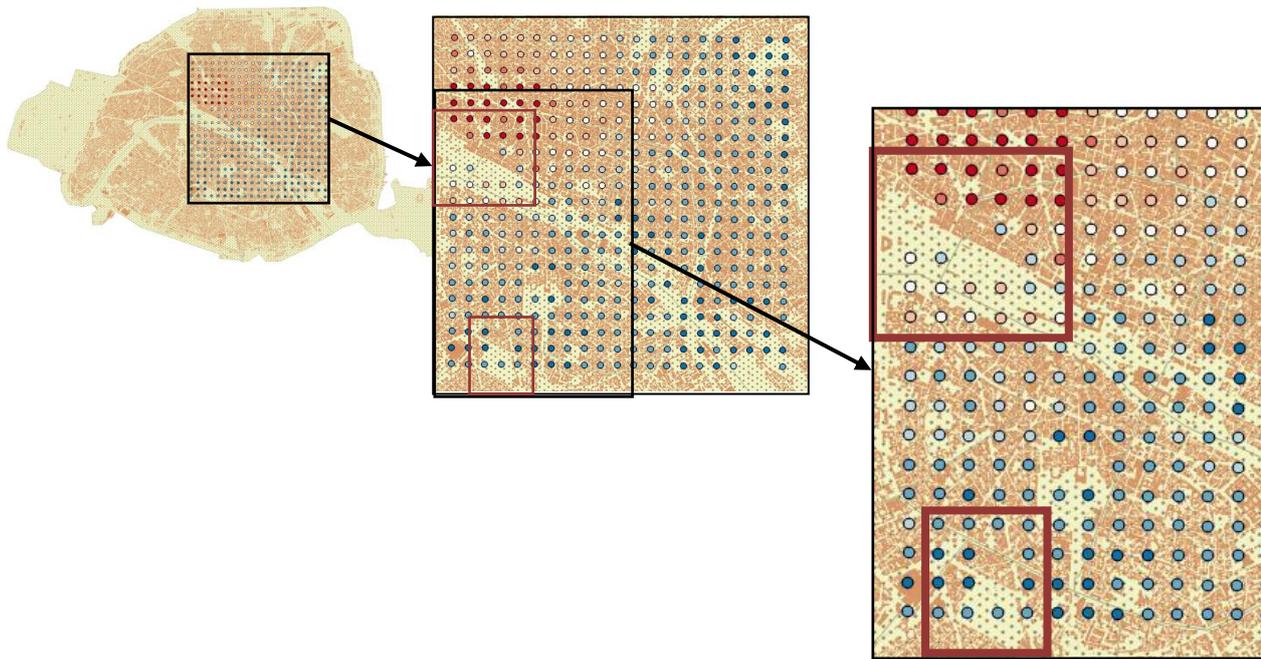


Figure 3.17 : Exemple de décalage entre les sorties SURFEX-TEB et les données issues de la BD TOPO® de l'IGN

2.1.1. Ellipsoïde : du Lambert 2 étendu au Lambert 93

Pour résoudre ce problème de géoréférencement, Météo-France vérifie (dans le modèle SURFEX) les transformations latitude/longitude du Lambert 2 étendu au Lambert 93.

Pour réaliser cette vérification, Météo-France utilise, un site web faisant directement les transformations : (<http://geofree.fr/gf/coordinateconv.asp#listSys>).

Si, sur quelques points, on compare les transformations entre coordonnées géographiques, la projection faite dans SURFEX-TEB et dans le site de référence, on peut constater des écarts importants : de 50m en X et 10m en Y environ en Lambert 2 étendu, et de quelques mètres en X et 350m en Y en Lambert 93 (Fig.3.18). Cette différence est bien trop importante surtout si l'on souhaite travailler à grande échelle ou à l'échelle du quartier.

Lambert 2 étendu	

XY vers latitude longitude	
<u>SURFEX</u> :	X= 598125.0000000000 Y= 2426125.0000000000 ==>
LON=	2.3117038874735543 LAT= 48.833561428113093
<u>site web</u> :	X= 598125.0000000000 Y= 2426125.0000000000 ==>
LON =	2,3109978 LAT= 48,8334951
Latitude longitude vers X et Y	
<u>SURFEX</u> :	LON= 2.0230765300000000 LAT= 48.898750300000003 ==>
X=	576952.47306819807 Y= 2433424.1054831240
<u>site web</u> :	LON= 2.0230765300000000 LAT= 48.898750300000003 ==>
X=	577005,36 Y= 2433431,40

Figure 3.18 : Ecarts constatés entre les différentes coordonnées issues du modèle SURFEX-TEB et des données topographiques de l'IGN

Passer par des sites ou logiciels n'est pas recommandé. Il est connu que de très nombreux logiciels de transformations arrondissent les données. Pour cela l'IGN a rendu disponible le logiciel Circé. Ce logiciel est utilisé pour vérifier les coordonnées. On constate que les points de localisations (les coordonnées de la station Météo-France de Montsouris) sont mal géoréférencés.

Cette erreur provient de la paramétrisation de l'ellipsoïde, dans le code SURFEX, mal prise en compte dans les calculs. En Lambert 2 ou 2 étendu l'ellipsoïde de base est le Clark 1880 et en Lambert 93 c'est l'ellipsoïde international WGS. Si l'ellipsoïde et son algorithme sont justes, un décalage visuel n'est pas possible lorsque l'on met les données SURFEX en Lambert 93 et qu'on les superpose aux données de la BDTopo® Lambert 93. Les différents ellipsoïdes ne sont pas centrés de la même façon, on peut facilement avoir des décalages de quelques mètres à quelques kilomètres ou plus.

Le modèle SURFEX utilise un algorithme de calcul avec les coordonnées NTF⁶⁴ puisqu'il utilise le Lambert 2. Ce calcul est pris sur la documentation pour la transformation des coordonnées géodésiques de l'IGN :

(<http://geodesie.ign.fr/contenu/fichiers/documentation/pedagogiques/TransformationsCoordonneesGeodesiques.pdf>).

Le géoréférencement du RGF93 repose sur un autre ellipsoïde, pris pour intégrer des données satellitaires (GPS) sachant qu'il faut un ellipsoïde mondial/ Le Lambert 93 est utilisé avec WGS84

⁶⁴ Pour rappel, NTF est le système géodésique français ancien basé sur un ellipsoïde coïncidant bien avec la France Métropolitaine (Clark 1880)

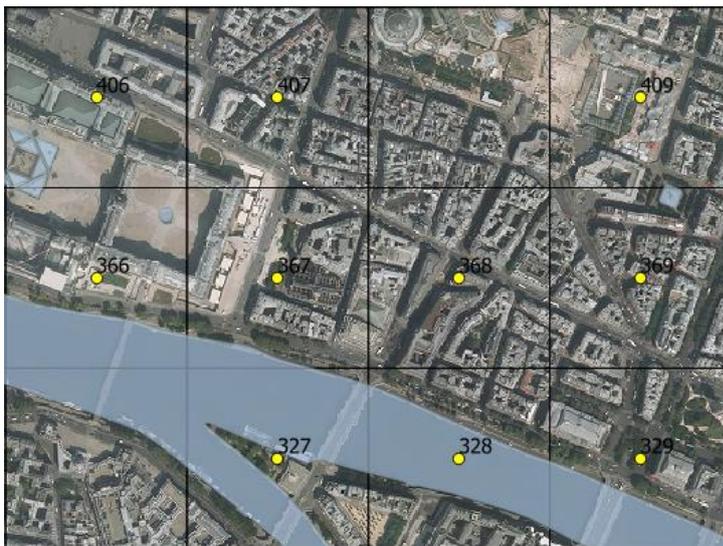
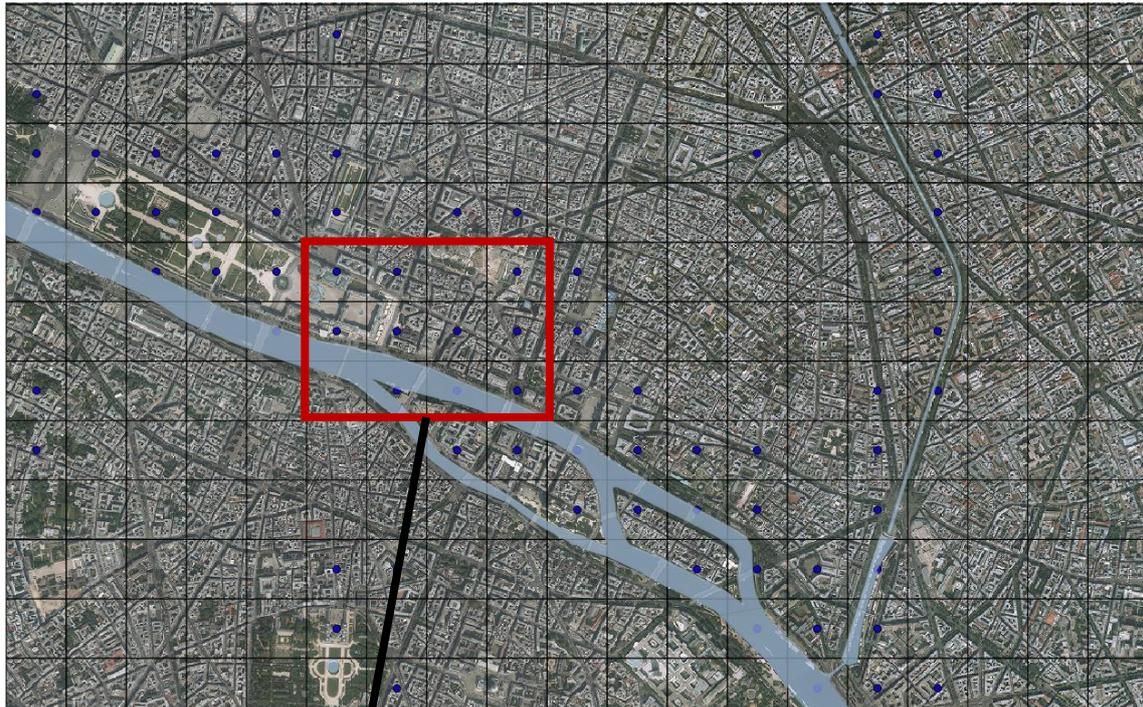
L'ellipsoïde, en météorologie, n'est pas utilisé ni considéré. Les modèles météorologiques sur le globe font des calculs sur une sphère et les modèles météorologiques régionaux ont une projection Lambert (quelconque, n'importe où sur le globe, rien à voir avec les projections utilisées en géographie), stéréographique polaire ou Mercator (quelconque), mais à partir de la sphère. Cette projection reste satisfaisante pour leurs modèles.

Lorsque Météo-France souhaite travailler au niveau de la surface (sous l'atmosphère), ici, le centre de recherche souhaite seulement avoir les bonnes correspondances entre l'occupation du sol et la latitude/longitude. Quand les chercheurs de Météo-France travaillent à partir de données de surface en Lambert 93, ou quand ils veulent avoir une grille en Lambert 93, il est suffisant pour eux d'avoir une bonne correspondance lat/lon vers X, Y et vice-versa. Les chercheurs de centre météorologique ont codé des formules de conversion lat/lon vers X, Y, à partir des formules données dans la documentation de l'IGN (cité ci-dessus).

Après un test réalisé avec un nouvel ellipsoïde, nous démontrons que l'erreur provient bien de l'excentricité. Cette erreur est survenue suite à une ambiguïté dans la documentation de l'IGN. En effet, en page 9, section 3.1 (définissant les paramètres des projections utilisés dans les calculs), on a des valeurs de paramètres pour les différents Lambert, mais une seule valeur de l'excentricité, en bas du tableau. En page 11, en revanche, on a 2 valeurs d'excentricité différentes pour les Lambert I,II,III,IV et pour le Lambert 93. Les formules ont été codées dans SURFEX à partir des valeurs présentées dans la section 3.1, donc avec une valeur d'excentricité fautive pour le Lambert 93. Avec la valeur correcte, le géoréférencement est très satisfaisant.

2.1.2. Concordance entre les valeurs et les données topographiques

Une fois le géoréférencement résolu, un autre problème est survenu. On constate une erreur dans la valeur de la donnée. On prend l'exemple de la fraction eau, lorsque le point se localise sur la Seine, la fraction eau est faible voire quasi nulle et inversement, lorsqu'une valeur « eau » se retrouve dans un espace totalement urbanisé, sa valeur qui doit être nulle est élevée. Sur la figure 3.19, on remarque que pour la maille 368, sa fraction d'eau correspond à 0,40. Cette maille située dans un espace non humide devrait avoir une valeur nulle. La maille 328, se situant en partie sur la Seine, a une valeur hydraulique faible de 0,17.



Id	Valeur
327	0.10811533
328	0.17944
329	0.12790047
366	0.27192384
367	0.63463396
368	0.40802914
369	0.26242575
406	0.305888
407	0.07281565
409	0.00977821

Figure 3.19 : Exemple d'erreur dans la valeur hydrologique, dans différentes mailles issues des sorties SURFEX-TEB

On présume que cette imprécision vient de la précision des données de départ, déjà dégradées à une maille de 250m. Cette hypothèse se confirme par les données calculées des PGD (PhysioGraphic Data).

Les données calculées des PGD ne font pas de calculs d'intersections d'aires comme dans un SIG par exemple. Pour chaque maille du fichier d'entrée (représentée par un point, le point central de la maille), on regarde dans quelle maille de SURFEX se trouve le point. On associe alors sa valeur à cette maille de SURFEX. Il peut donc y avoir jusqu'à $DX/2$ d'imprécision. DX correspond à la taille de la

maille du fichier d'entrée (ici 250m). Si plusieurs points rentrent dans la même maille de SURFEX, on moyenne leurs valeurs.

Le principe est assez précis lorsque les données du fichier d'entrée sont à une maille bien plus fine que la grille SURFEX. PGD est construit à la base en partant de cette hypothèse. Mais ici, les deux grilles ont la même résolution. Le décalage vient donc de ce calcul.

Pour confirmer ce décalage, nous regardons les données en longitude/latitude sans aucune transformation en Lambert 93. Lorsque l'on affiche ces données en WGS84 (4326 EPSG), on remarque une meilleure corrélation entre la fraction eau et son environnement. Par cet exemple, on peut donc confirmer que l'erreur vient directement du modèle SURFEX (Fig. 3.20).

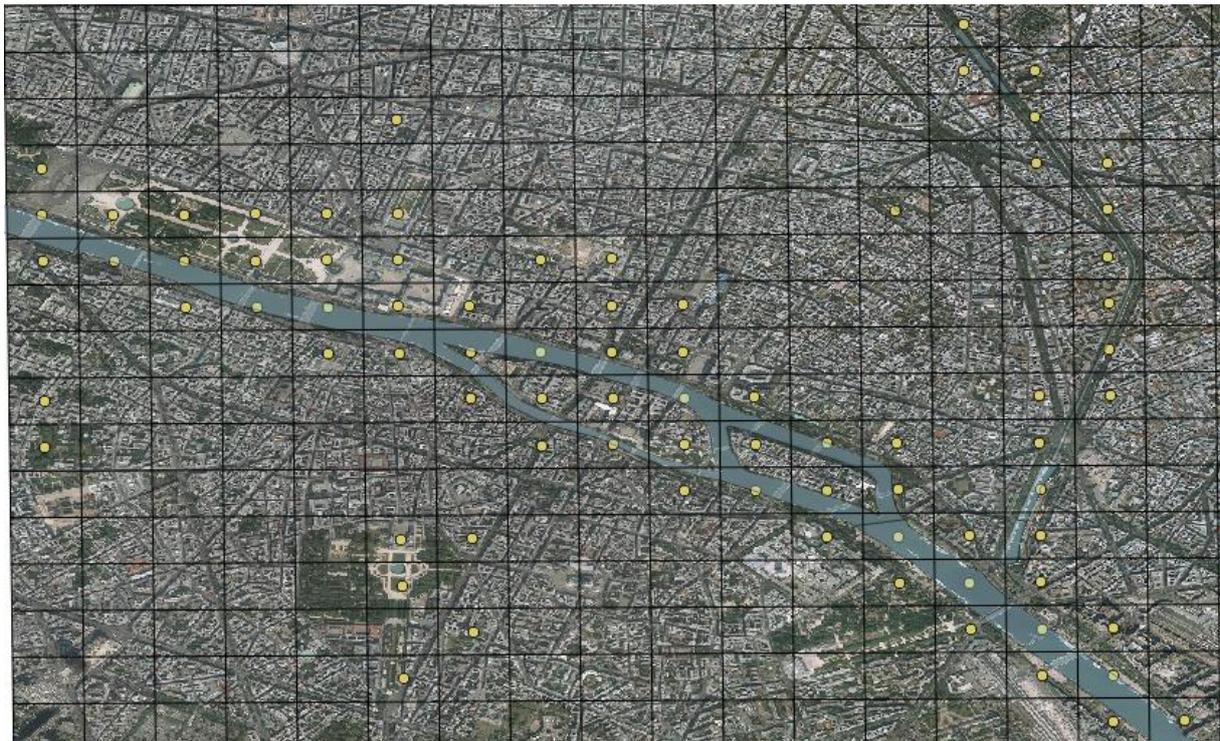


Figure 3.20 : Capture d'écran des sorties SURFEX-TEB en WGS84

2.2. Contextualisation des données

L'objectif de la représentation et de la visualisation est d'exploiter les caractéristiques du système visuel humain pour faciliter la manipulation et l'interprétation des données informatiques. Une des difficultés de la visualisation est de produire des représentations visuelles, donc concrètes, à partir d'éléments abstraits qui n'ont ni forme, ni couleur, ni dimension, ni position.

2.2.1. Projections des données dans l'espace géographique

Le géoréférencement réalisé, il est possible de visualiser les données ponctuelles de SURFEX-TEB sur la BD TOPO®. La figure 3.21 permet de montrer les champs de températures dans Paris.

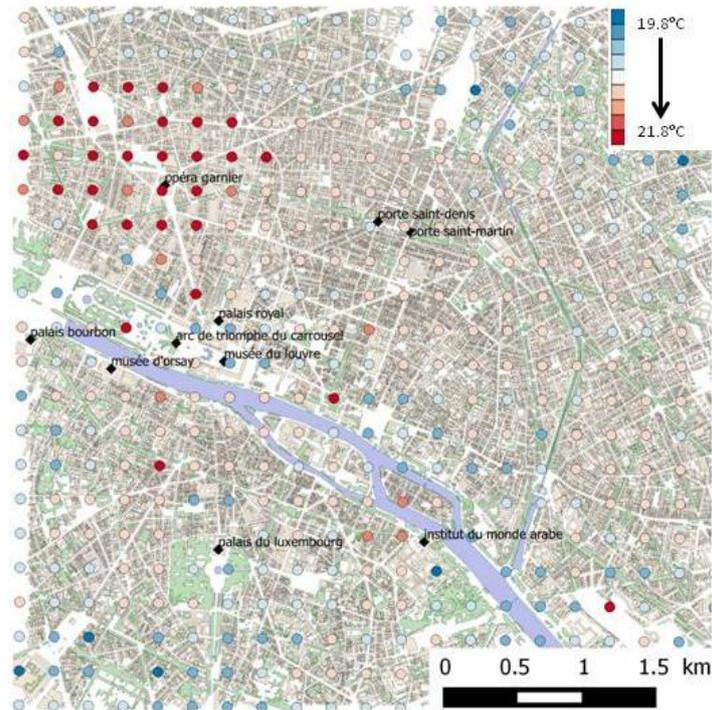


Figure 3.21 : Exemple des valeurs de températures issues de SURFEX-TEB dans Paris (250m)

Plusieurs étapes sont nécessaires pour la visualisation et la contextualisation de l'information. Après avoir structuré les données sous un SGBD-Géo il faut les extrapoler. Cette manipulation permet « d'étendre » la valeur ponctuelle à la maille de 250*250m.

Pour replonger et visualiser les données, on part des données ponctuelles SURFEX-TEB, restructurées autour de la maille. Une fois la visualisation des données sous forme de points, on crée une grille de 250*250m sur la zone. Elle permet d'extrapoler les valeurs pour mieux voir la donnée. On structure donc les données autour de la maille pour affecter à chaque maille la valeur de la donnée.

La création d'une grille géoréférencée permet d'affecter à chaque maille de la grille, la valeur de la donnée ponctuelle issue de TEB (Fig.3.22).

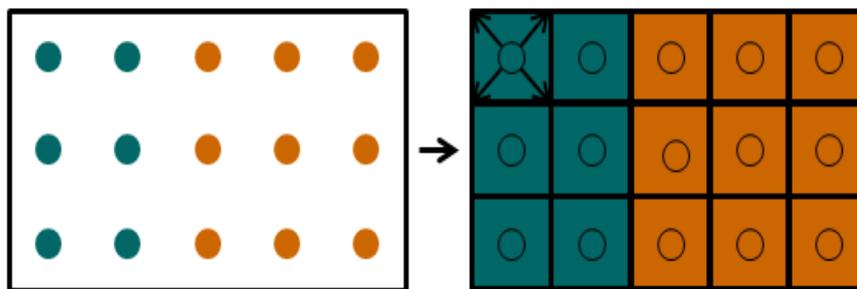


Figure 3.22 : Schéma représentant l'extrapolation des données

Ainsi, chaque maille est décrite par un ensemble de descripteurs météo dont certains représentent la température dans la rue à 2m du sol, la température dans les bâtiments et sur les toits à chaque pas de temps.

Intégration et contextualisation des données SURFEX-TEB

Pour une meilleure visualisation et pour représenter plusieurs paramètres à la fois, on affecte aux objets géographiques les valeurs de ces mailles. On rappelle que chaque maille météo est décrite par un ensemble de paramètres météorologiques (issus de SURFEX-TEB) dont certains représentent la température dans la rue à 2m du sol, la température dans les bâtiments, sur les toits, etc. Pour cet exemple, seules les températures intérieures (dans les bâtiments) et les températures de la rue à 2m du sol sont présentées (Fig.3.23).

Le traitement des données SURFEX-TEB via un SIG permet d'établir une cartographie des températures et d'intégrer ces informations à la BD Topographique de l'IGN. Cette intégration permet de contextualiser les données en sortie pour croiser les températures avec les objets décrivant l'espace. Pour contextualiser, on plaque les données de la grille aux différents objets constituant la « ville ». Si un objet (un bâtiment) se localise à l'intersection de deux mailles, alors on lui affecte la moyenne pondérée par la surface de la valeur des deux mailles. Une visualisation en 3D via le plugin *qgis2threejs* est possible. La figure 3.23 permet de mettre en valeur les sorties TEB via une représentation cartographique par élément (ici les bâtiments et la route) en 2D ou 3D. Cette manipulation permet aussi de superposer plusieurs informations sur une même couche. Ce type de représentation permet de mettre en valeur l'information calculée par TEB.

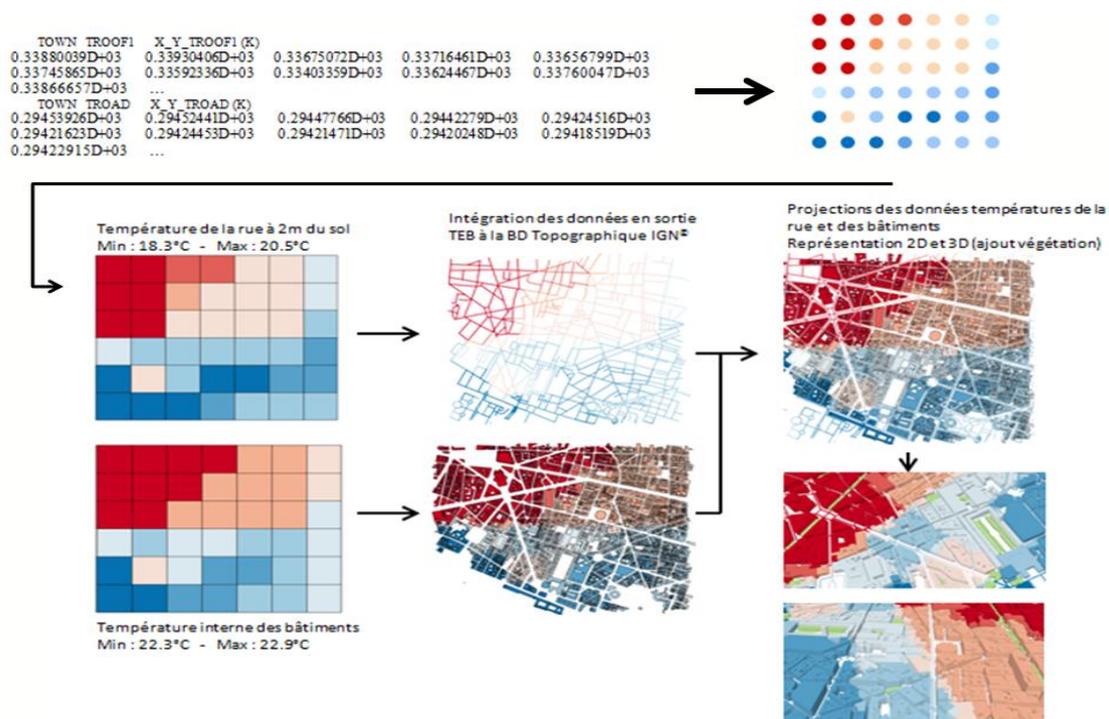


Figure 3.23 : Etapes nécessaires à la contextualisation et à la projection des données TEB dans l'espace en 2D et 3D (données 250m²). Représentation des températures intérieures des bâtiments et de la rue à 2m

La figure 3.24 illustre la mise en valeur des données TEB en les replongeant dans l'espace en 2D ou 3D. L'intégration des valeurs à la BD TOPO® permet la contextualisation de la température dans la rue et à l'intérieur des bâtiments. Le processus développé permet la conception d'un ensemble de cartes. Il faut signaler qu'aujourd'hui la plupart des représentations sont en 2D.

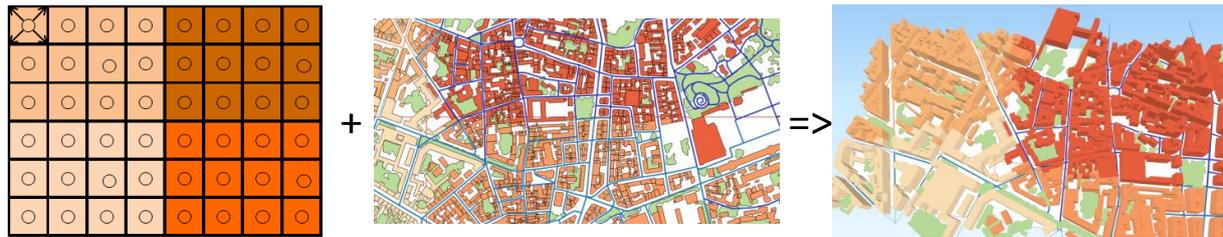


Figure 3.24 : Projeter les données TEB dans l'espace en 2D et 3D (données 250m²) avec la couche végétation

La mise en valeur des données doit être vue comme une représentation pour la communication et non comme un viewer (destiné à l'expert). Il est essentiel de plonger les données dans un espace géographique que la personne (ou celui qui prendra la décision) connaisse. Les représentations cartographiques doivent aider à se repérer et à comprendre les caractéristiques du phénomène représenté. Les travaux de Kunz (2011) sont particulièrement recommandés puisqu'ils proposent une diversité de représentations 2D et 3D pour les risques d'avalanches.

2.2.2. Visualisation des données en 3D

La visualisation 3D est devenu indispensable à presque toutes les campagnes de communication pour les risques urbains. Le rendu 3D permet de mieux se rendre compte de la volumétrie des bâtiments, de la végétation et de « projeter » l'observateur du rendu dans la scène. D'ailleurs en matière de communication, la perspective 3D (dite cavalière) est souvent recommandée puisqu'elle se rapproche de notre perception de l'espace. Ainsi, la représentation en 3D de phénomènes environnementaux est de plus en plus convoitée. La donnée 3D permet de mieux appréhender certains phénomènes physiques liés à la morphologie urbaine, à l'exemple de l'effet d'îlot de chaleur urbain corrélé avec l'ouverture du ciel⁶⁵.

Les sorties 3D (Fig.3.25 ; 3.26 et 3.27) illustrent la possibilité de représenter conjointement de nombreuses informations. Une cartographie de la température des rues et à l'intérieur des bâtiments durant la canicule de juillet 2010 est possible (ici est représentée la moyenne des températures de la nuit du 7 juillet 2010). Pour différencier les températures des bâtiments entre elles, l'échelle des températures évoluent de 22,3°C à 22,9°C. Les températures des rues évoluent de 18,3°C à 20,5°C. Ainsi, selon ce que l'on souhaite montrer, on constate que l'importance donnée aux valeurs, peut fortement varier. Il est donc important de savoir ce que l'on souhaite valoriser et mettre en avant.

Pour la visualisation de la cartographie en 3D nous utilisons l'extension *Qgis2threejs* de QGIS. Cette extension affiche la 3D dans une interface de programmation WebGL via la création d'un fichier HTML. *Qgis2threejs* permet d'afficher autant de couches que l'on souhaite. Ces sorties 3D permettent la visualisation des températures de la rue et des températures intérieures de bâtiments avec leur hauteur. La couche végétation (en vert clair) est affichée. L'orthophotographie est utilisée comme socle.

⁶⁵ Pourcentage de ciel visible depuis un lieu, ou bien de l'impact de la forme de la ville sur l'ensoleillement (Mantavon, 2010)

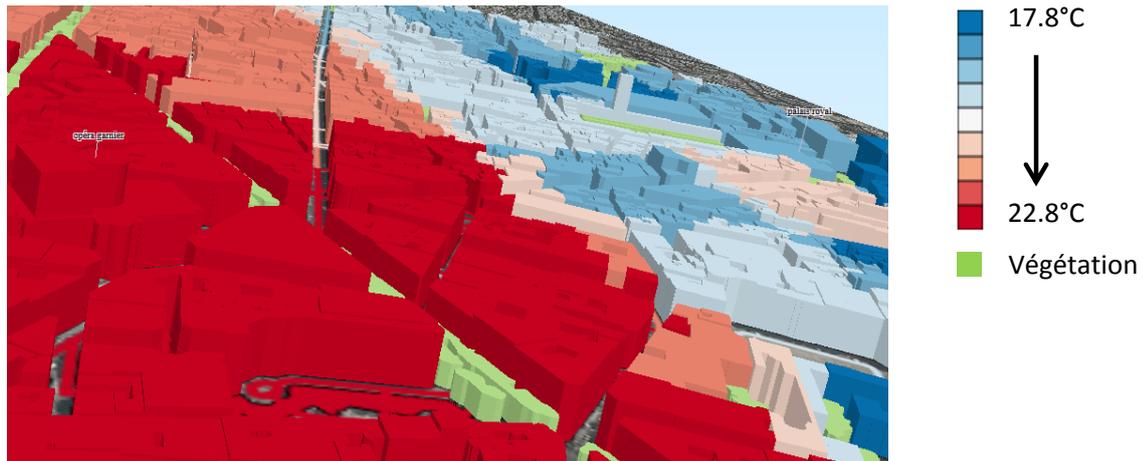


Figure 3.25 : Représentation des températures extérieures de la scène en 3D dans la nuit du 7 juillet 2010

Pour se repérer plus facilement dans l'espace, il est possible d'ajouter de la nomenclature (Fig.3.26). Cette extension permet de se balader sur tout le canevas en zoomant et dé-zoomant la scène. Il est important de souligner que cet outil reste de la simple visualisation sans exportation du résultat possible pour une autre utilisation .

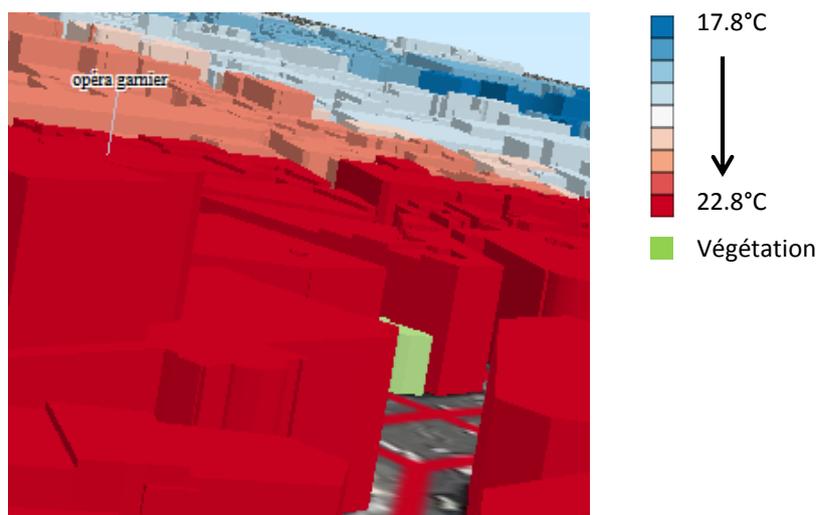


Figure 3.26 : Zoom de la figure 3.25 sur le quartier de l'Opéra avec le même code couleur



Figure 3.27 : Vue d'ensemble du canevas avec le quartier de l'Opéra et du Palais Royal

La contextualisation des températures permet la mise en valeur des zones les plus chaudes. Elle cible les zones de dangerosité et permet une meilleure communication.

Toutes les données et sorties du modèle SURFEX-TEB sont réduites, traduites, transformées et condensées pour permettre une visualisation graphique mieux adaptée à la représentation de l'information souhaitée. Cette représentation et cette visualisation, en plus de communiquer efficacement, permettent d'explorer et d'analyser différents points de vue et de niveaux de détails, de comparer les données et de les coupler avec d'autres. Une base de données est développée pour réaliser une visualisation 2D et 3D.

3. Représentation et visualisation des données

3.1. Simulation de janvier 2004

Le modèle TEB permet d'estimer un ensemble de températures (mais aussi d'autres paramètres) moyennées dans chaque maille à différentes altitudes. Les sorties de ce modèle avec des mailles de 1000*1000m² permettent d'avoir une première représentation de la variation moyenne de la température entre la ville et sa périphérie, dans la région Ile-de-France.

Cette cartographie (Fig.3.28), représente la température moyenne de la rue à 2m, le 1^{er} janvier 2004, à minuit (simulation réalisée en période non caniculaire). Elle permet de mettre en avant le phénomène d'îlot de chaleur urbain.

Nous avons commencé notre projet avec des données simulées en janvier 2004, puisque c'était les premières sorties du modèle disponible. Ces données ont permis d'avancer sur le raisonnement de notre méthodologie, sur les structures à mettre en place et mieux comprendre les paramètres et les sorties du modèle SURFEX-TEB. Sur la cartographie, nous avons représenté la température moyenne de la rue à 2m du sol, le 1^{er} janvier 2004, à minuit (simulation réalisée en période froide).

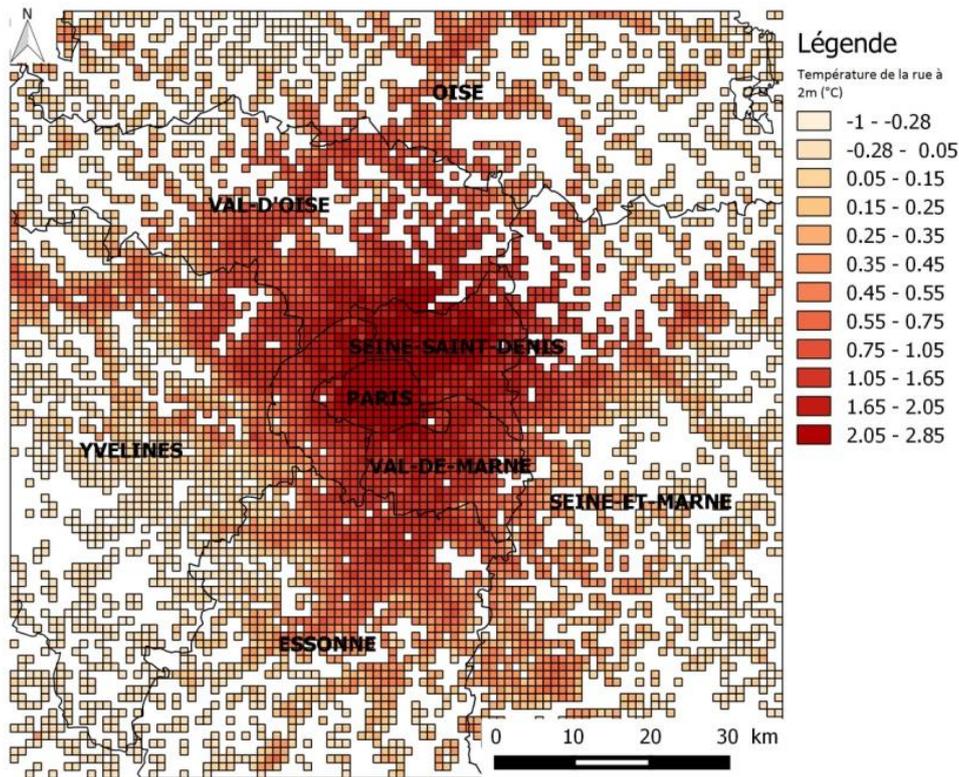


Figure 3.28 : Représentation de la simulation SURFEX-TEB pour la température de la rue à 2m du sol, au 1^{er} janvier 2004 en IDF (maille de 1km²)

Une faible différence de température entre le centre urbain, sa couronne et sa campagne périphérique est visible. Cette différence s'élève de 4°C entre le centre urbain dense de Paris et sa périphérie éloignée, environ 30km. Néanmoins, il est possible de distinguer visuellement trois classes de température, en fonction de l'éloignement par rapport au centre :

- Les surfaces les plus chaudes (2,05°C à 2,85°C) comprennent le centre-ville de Paris densément bâti et tout son département ainsi que la partie nord-ouest du département Seine-Saint-Denis et le nord du Val-de-Marne. Du fait de la forte inertie thermique, de la configuration spatiale et de la forte densité de bâti, ces surfaces stockent la chaleur le jour et demeurent relativement plus chaudes la nuit, en raison du manque d'eau à évaporer et du piégeage du rayonnement infrarouge d'un immeuble à l'autre dans le centre.
- Les surfaces les plus froides (-1°C à 0,45°C) correspondent à la périphérie lointaine de Paris (plus de 30km) où l'occupation du sol est dominée par la végétation et une faible densité de bâti. Ce constat est visible par la faible densité de mailles représentant la température de la rue et les mailles « sans valeur » (espace blanc). Plus on s'éloigne du centre-ville plus l'importance de la végétation est présente. L'effet de la végétation est perceptible. Les températures des surfaces végétalisées sont également plus basses que celles des surfaces densément bâties du centre-ville puisque la quantité d'énergie préalablement accumulée est moindre.

De la donnée brute à la dangerosité

- Entre les deux zones décrites ci-dessus, se trouvent des surfaces intermédiaires quant à leur comportement thermique. C'est à partir de cette couronne périphérique qu'on commence à observer les variations de températures, entre les zones urbaines et les zones rurales, de plus de 2°C.

De ce premier constat, on peut définir le phénomène d'îlot de chaleur urbain. Une différence de température entre le centre et sa périphérie est présente. Ce phénomène est constaté, également, pendant une période hivernale.

Cette cartographie ne traduit pas toutes les variations engendrées par le milieu urbain. Une des particularités du climat urbain est que les variations spatiales sont très importantes. La température fluctue d'une région à une autre, d'un département à un autre, d'une ville à une autre mais aussi d'un quartier à un autre en fonction notamment de la configuration spatiale, et encore mieux d'une rue à l'autre. Sur cette représentation, cette différence n'est pas assez marquée surtout si on s'intéresse plus particulièrement aux différences de températures entre les quartiers.

De cette cartographie, on peut noter que le modèle SURFEX-TEB permet de calculer des températures à 2m dans les rues en fonction de la topographie et des conditions météorologiques environnantes (issues des forçages atmosphériques du modèle AROME). Les températures fournies en sortie sont des moyennes valables dans une maille et peu différenciées. Les mailles de la grille définie (1000*1000m) sont d'une trop grande superficie pour s'intéresser à des phénomènes plus locaux. La taille de la maille est donc essentielle à la granularité des résultats. Plus la maille est grande (1km²), plus l'espace analysé peut être grand ou le calcul rapide. Inversement, plus une maille est fine (100*100m), plus la prévision est spatialement précise mais longue à calculer (Fig.3.29). Il convient ainsi de définir le niveau de détails le plus pertinent (LoD) pour visualiser au mieux les représentations moyennes dans chaque maille. La finesse des données en entrées vont aussi, influencer sur le niveau de détails. La différenciation des bâtis en entrée doit être faite par le calcul.



Figure 3.29 : Différence entre une maille de 1km² (à gauche) et d'une maille de 100*100m (à droite) (extrait Orthophotographies RGE®IGN)

Les représentations sont généralement peu précises et lissent la réalité : on ne voit pas les écarts locaux en planimétrie.

3.2. Simulation de la canicule 2010

Nous décidons de localiser notre étude sur la ville de Paris et non sur tout le territoire de l'Île-de-France. Nous souhaitons réduire la superficie de la maille de la grille afin d'avoir une meilleure précision des températures à l'intérieur des quartiers. De plus, comme notre problématique se base sur les canicules, nous choisissons de faire une nouvelle sortie sur la canicule de juillet 2010, avec une grille dont les mailles ont une résolution de 250*250m².

3.2.1. Visualisation de la canicule de 2010

Les nouvelles sorties du modèle SURFEX-TEB avec des mailles de 250*250m² permettent de se focaliser sur l'observation des températures à l'échelle du quartier de Paris. Cette nouvelle base de données donne les températures de la rue à 2m (mais aussi les températures intérieures et l'humidité) au pas de temps horaire du 5 et du 9 juillet 2010 sur le centre de Paris. Période durant laquelle la France connaît un phénomène de canicule. Ces données permettent d'établir une cartographie des températures de la rue canyon à 2m du sol, au centre de Paris (Fig.3.30) via un SIG.

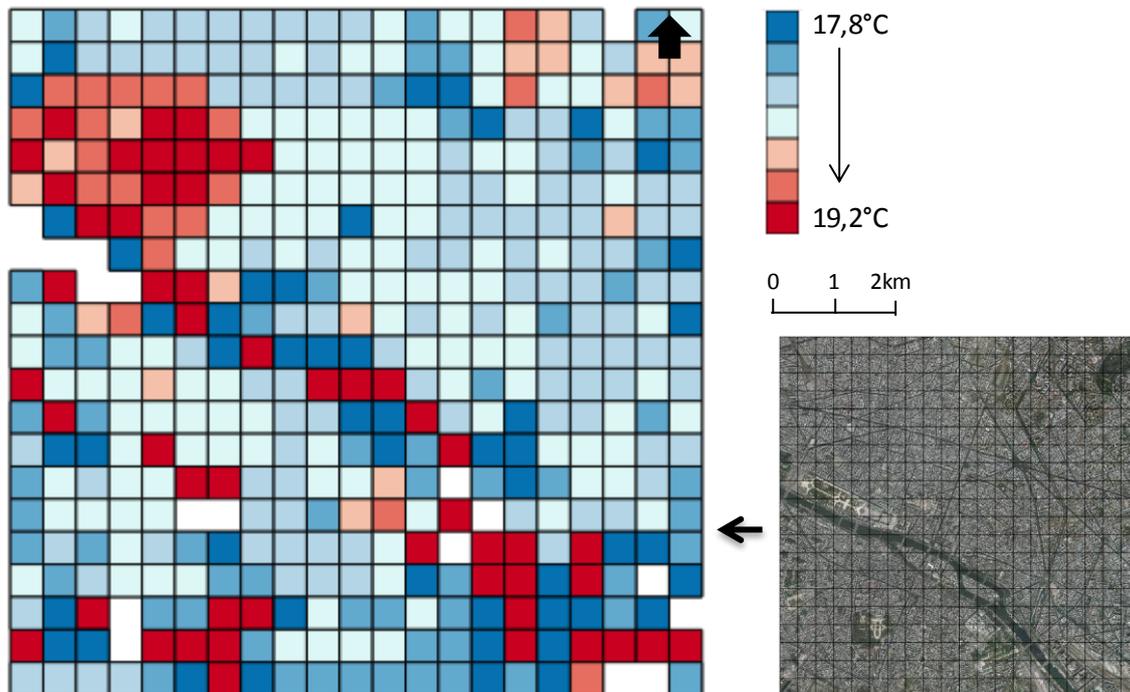


Figure 3.30 : Représentation de la simulation SURFEX-TEB pour la température à 2m, le 5 juillet 2010 à 3h, sur Paris (maille 250*250m²)

La visualisation de la différence de température qui existe au sein d'un même quartier est notable. Cette différence de température est d'environ 1,5°C en fonction des quartiers. Avec seulement une observation et sans analyse, on peut noter que la température varie spatialement.

De cette deuxième cartographie, plus détaillée (que celle de la simulation de janvier 2004), plusieurs constats sont visibles :

- On retrouve une différence de température entre quartiers. Elle s'élève à environ 1,5°C entre les quartiers d'Opéra et l'est parisien, soit 4km d'éloignement. On constate qu'entre les

mailles limitrophes, une différence de 1,5°C peut être présente. Le long de la Seine, on remarque plusieurs mailles limitrophes avec une différence des températures de 1,4°C. On peut noter qu'à un pas de 250m, il est possible de visualiser de fortes différences de température.

- Au nord-ouest de la carte vers le Palais Garnier, on retrouve une zone de forte chaleur. Elle est probablement due notamment à la forte urbanisation, à la faible présence et à l'éloignement d'espaces végétalisés et hydrauliques. Cette forte concentration de chaleur sur Opéra, est due à la configuration spatiale. Elle est influencée par le nombre de bureaux implantés dans cette zone. La climatisation utilisée pour ces bureaux augmente les températures extérieures sur cette zone.

Cette simulation permet d'avoir une meilleure estimation de la température à 2m et de montrer la répartition spatiale de la température. L'analyse heure par heure permet d'identifier la chronologie du réchauffement et du refroidissement de l'air. Cette analyse heure par heure est possible si on étudie la température sur une ou deux nuits. Pour notre recherche, on s'intéresse à une plage horaire plus longue. Un cumul des différents états est réalisé. Il est ce que l'on va appeler l'agrégation temporelle. Ce traitement permet d'intégrer la temporalité pour identifier les zones critiques correspondant à des portions d'espace où la température est particulièrement élevée pendant un certain temps. Cette agrégation nous permettra par la suite d'assurer un suivi du risque caniculaire et pouvoir calculer l'indice de dangerosité sur une zone.

3.2.2. De la donnée météo à une base de données d'états

Comme nous l'avons rappelé précédemment la canicule est, comme tous les phénomènes météorologiques, variable dans l'espace et dans le temps. Les représentations graphiques des phénomènes de canicule se focalisent sur les prévisions des températures alors que la dangerosité devrait intégrer à minima la durée du phénomène. Le modèle SURFEX-TEB fournit des descripteurs météo pour chacune des mailles, pour chaque pas de temps de la simulation. Ces données sont fournies en entrée du modèle SURFEX-TEB calculant les flux thermiques entre la surface et les couches hautes de l'atmosphère, pour un temps donné t_1 .

Pour réaliser des expérimentations sur le suivi de la canicule et développer notre méthodologie, les sorties SURFEX-TEB (période du 5 au 11 juillet 2010) ont permis d'établir une base de données des températures. Cette dernière est constituée d'une valeur, d'un paramètre (température intérieure, extérieure, humidité) pour chaque heure, et chaque maille de la grille. L'analyse heure par heure du champ permet d'identifier la chronologie du réchauffement et du refroidissement de l'air. De jour, l'urbanisation conduit principalement à une réduction de l'évaporation au profit de l'accumulation de chaleur dans les matériaux urbains. De nuit, l'énergie accumulée dans la canopée urbaine⁶⁶ est restituée vers l'atmosphère et maintient un chauffage convectif limitant le refroidissement nocturne.

Pour mieux analyser et percevoir le risque, on se base sur des temps spécifiques moyennés. Les critères de canicule étant différents la nuit et le jour, on propose de calculer les moyennes de températures le jour et la nuit en évitant les heures intermédiaires, moins significatives. Après avoir

⁶⁶ Par analogie aux forêts, le terme canopée urbaine désigne la couche entre le sol et le sommet des bâtiments

réalisé notre première expérimentation (2014) sur Paris, nous décidons de représenter les périodes de chaleur sur une plage horaire de 7h (entre minuit et 7h et entre 15h et 21h).

L'agrégation temporelle permet de faire la relation entre la *maille météo* et la *maille météo durée*. Une fois que les données sont stockées dans un SGBD (PostGIS) elles sont lues dans un SIG (QGIS) pour établir une cartographie des températures de la rue canyon, dans Paris, pour une maille de 250m et une durée de 7h (Fig.3.31). L'objectif de ces premières cartes est de montrer la répartition spatiale du phénomène au cours du temps et d'identifier les zones à risque, et les hotspots, le cas échéant.

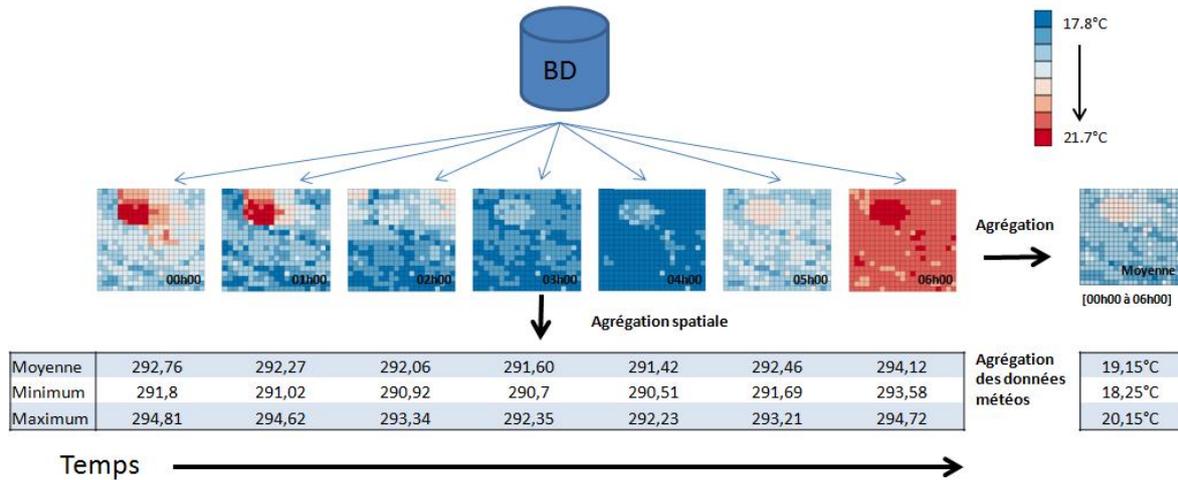


Figure 3.31 : Schéma représentant l'agrégation temporelle pour une durée de 7h sur les températures à 2m, le 5 juillet 2010

Sur la figure 3.31, on remarque que l'agrégation temporelle a permis de moyenniser les sorties sur une plage de 7h. Après avoir fait la moyenne des valeurs, la température moyenne pour la matinée du 5 juillet 2010 est de 19,6°C avec une moyenne maximum de 20°C et un minimum de 18,5°C. Grâce aux sorties du modèle SURFEX-TEB de la canicule de juillet 2010, on peut construire notre méthodologie, notre réflexion et notre démarche.

Une fois l'agrégation réalisée, l'étape suivante est de cartographier seulement les données environnementales et météorologiques. Ces cartes de référence permettent de nous interroger sur la notion du temps, de la canicule, de sa représentation et sur les différences de températures qui existent entre le jour et la nuit, l'intérieur et l'extérieur, entre les quartiers, sur des périodes moyennées.

Sur la figure 3.32, on constate des zones plus ou moins chaudes et la forte différence entre les températures de jour et de nuit. De nuit, les températures varient de 17,8°C à 21,7°C soit une différence de 3,9°C. De jour, les températures s'échelonnent entre 21,4°C et 26,2°C soit 4,8°C de différence. L'amplitude thermique est plus importante de jour que de nuit.

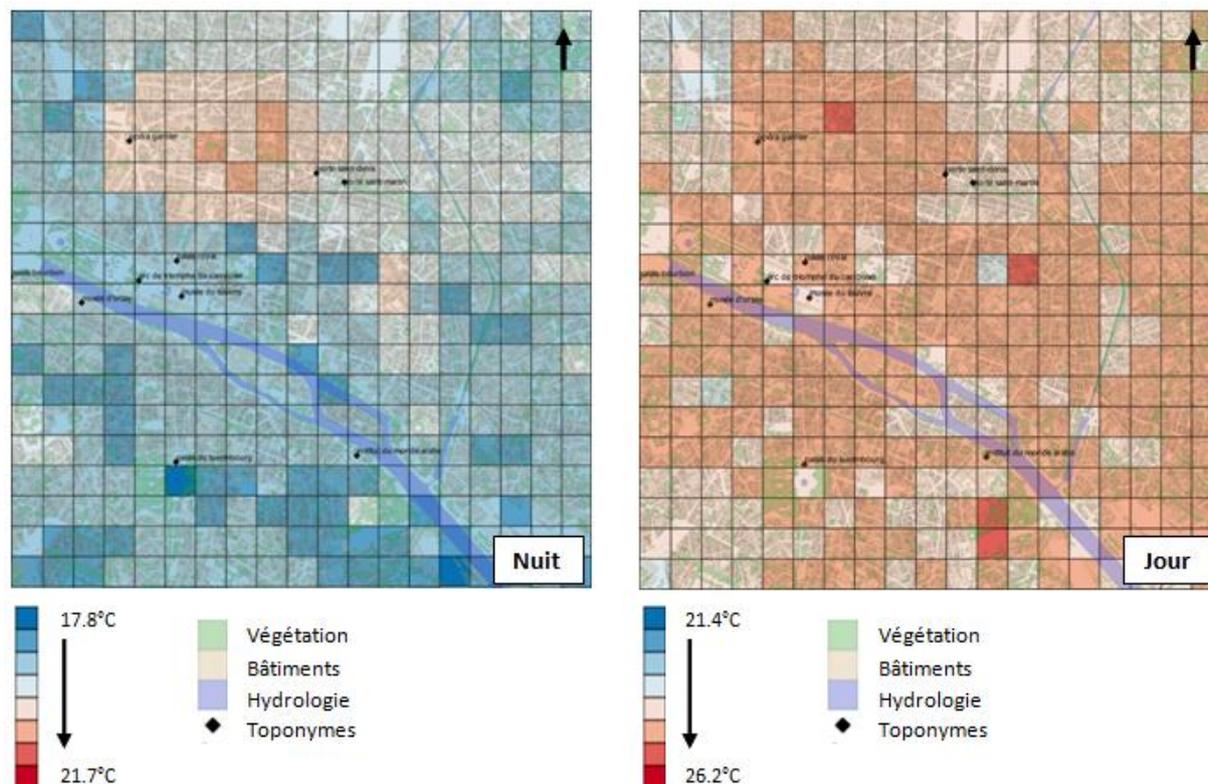


Figure 3.32 : Cartographie des données environnementales et météorologiques (températures de nuit (gauche) et de jour (droite), à 2m, le 5 juillet 2010, simulées par SURFEX-TEB) sur une période de 7 heures sur la zone de Paris (maille 250x250m)

L'objet canicule n'est pas explicitement représenté : nous voyons des températures élevées mais le système ne permet pas de définir que les températures élevées appartiennent au phénomène de la canicule. La notion de durée, déterminante dans la définition de la canicule, n'est pas représentée de façon explicite. Effectivement, le nombre de jours consécutifs d'exposition à la chaleur accroît l'épuisement et donc le risque de mortalité. Ainsi, la conception de nouvelles représentations nécessite le développement de structures de données ad hoc.

Suite à nos expérimentations (campagnes de mesure 2015) nous nous rendons compte que ces plages horaires ne reflètent pas exactement les épisodes de fortes chaleurs. Pour nos nouvelles sorties du modèle, on se focalise sur des temps spécifiques représentant le mieux le phénomène de canicule, soit 15h-22h pour la journée et 03h-10h pour la nuit (soit 13h-20h et 1h-8h en heure solaire). Ces périodes significatives du jour et de la nuit correspondent aux heures les plus chaudes et les plus fraîches pendant un épisode de canicule. C'est à partir de cette plage horaire qu'on agrège toutes les données horaires en données cumulées de 8h sur les données de la canicule 2015. Ainsi, on crée autant d'états différents qu'il existe de données avec comme paramètres l'humidité et la température à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments.

Les sorties de SURFEX-TEB sont moyennées sur 8h. Les plages horaires 15-22h et 03-10h sont définies pour la période diurne et la période nocturne. Cette agrégation temporelle est réalisée afin de représenter au mieux le phénomène caniculaire.

3.3. Simulation de la canicule 2015

Les nouvelles sorties sur le mois de juillet 2015 permettent de savoir si la canicule est ressentie avec la même intensité sur toute la ville de Paris et quels sont les moments où des différences apparaissent entre les quartiers. Cette simulation est la base de notre analyse spatio-temporelle.

3.3.1. Différenciation temporelle

Pour l'analyse temporelle, les mailles les plus extrêmes sont utilisées afin de comparer la différence thermique entre deux quartiers d'une même ville. On entend par mailles extrêmes, la maille où la moyenne des températures est la plus élevée et la plus faible, sur toute la période d'étude. Elle est définie par l'équation suivante :

$$\text{Ext max} = (\text{moy nuit/jour} (\text{Texte/inte/maille})) \quad (20)$$

Les mailles où le pic de température est le plus important ou le plus faible ne veut pas dire que ce sont les mailles les plus extrêmes. La maille la plus fraîche se situe au nord-est de la zone, à côté du Parc de la Villette et du canal de l'Ourcq. La maille la plus chaude se situe à l'est de la zone, au sud de la Seine (Fig. 3.33).

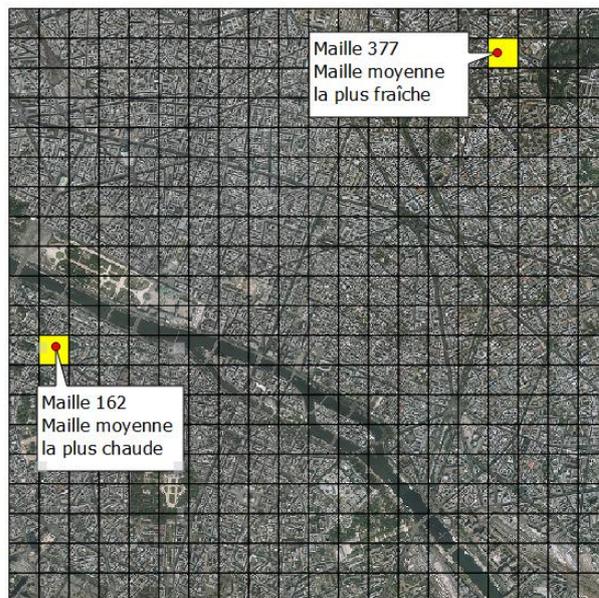


Figure 3.33 : Localisation des mailles les plus extrêmes sur toute la période d'étude

Les moyennes, minimales et maximales des mailles sont calculées (Tab.3.4) :

	Moyenne	Minimum	Maximum
Exte Min	295,00	287,80	308,43
Exte Max	296,82	289,18	308,55
Inte Min	298,65	293,17	303,43
Inte Max	301,96	297,45	306,29

Tableau 3.4 : Températures (en Kelvin) intérieures et extérieures (moyennes, minimales et maximales) des mailles les plus chaudes et fraîches (maille moyennée sur toute la période d'étude) pour juillet 2015

Temporellement, si on regarde le graphique 3.34, on constate une forte différence entre les températures intérieures et extérieures et sur leurs amplitudes thermiques.

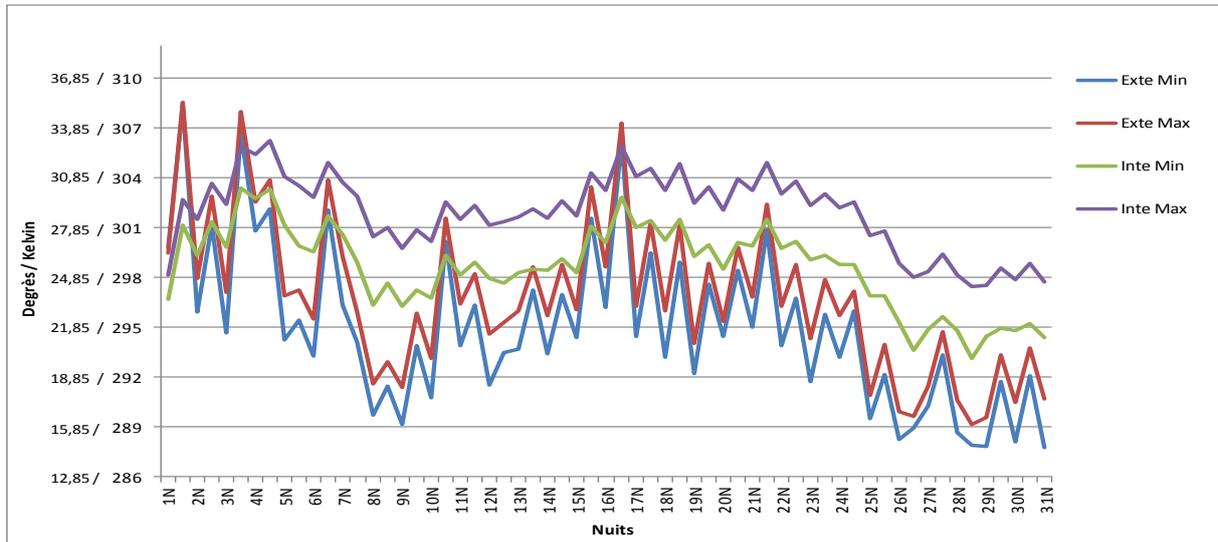


Figure 3.34 : Graphique représentant les températures intérieures et extérieures (minimales et maximales) de jour et de nuit des sorties SURFEX-TEB (sur les mailles 162 et 377) sur la période du 1^{er} au 31 juillet 2015

Le graphique permet d'identifier la canicule 2015 et la vague de chaleur ressenties mi-juillet. Plusieurs périodes sont visibles :

- Du 1^{er} au 5 juillet : période de canicule où les températures extérieures maximales moyennes (sur la zone) vont atteindre de jour, plus de 34,85°C et de nuit vont descendre jusqu'à 21,85°C contre 26,85°C pour les températures intérieures. Cette période est définie par des températures élevées (de nuit comme de jour) et avec des pics de températures.
- Du 6 au 14 juillet : cette période marque un court rafraîchissement où les températures extérieures ont un minimum de 25,85°C. Les températures intérieures moyennes diminuent mais dans une moindre mesure que les températures extérieures avec un minimum de 20,15°C. Pendant cette période, un écart de plus de 5°C est visible entre les températures intérieures et extérieures. Cette période est caractérisée par des températures plus faibles avec des amplitudes thermiques importantes.
- Du 15 au 17 juillet : une vague de chaleur est visible puisque les températures extérieures moyennes tout comme les températures intérieures vont croître de plusieurs kelvins. Cette nouvelle période de chaleur est plus courte mais tout aussi intense que la première.
- Du 18 au 24 juillet : les températures intérieures moyennes stagnent ou baissent très faiblement tandis que les températures extérieures moyennes se différencient peu et enregistrent des amplitudes thermiques de plus de 4°C entre le jour et la nuit. Les températures extérieures moyennes maximales enregistrent des températures de jour équivalentes aux températures moyennes intérieures de jour.

- Du 25 juillet jusqu'à la fin de notre période d'étude, les températures diminuent de jour en jour jusqu'à arriver à un seuil inférieur à 15,85°C, pour les températures extérieures moyennes et de 20°C pour les températures intérieures moyennes. Cette période est décrite par de faibles températures (surtout extérieures) mais avec des amplitudes plus faibles.

Ce graphique permet de mettre en évidence que les températures intérieures sont généralement plus élevées que les températures extérieures. Cette différence est due notamment à l'accumulation de chaleur à l'intérieur des appartements. Les températures intérieures maximales sont toujours quasi supérieures à 28°C (exceptée pour la deuxième période de rafraîchissement). Lors de la dernière période de rafraîchissement, on remarque que la température intérieure maximale est plus élevée en moyenne de 5°C que la température extérieure maximale. Il existe une différence moyenne de 2,8°C entre les températures intérieures minimales et maximales contrairement aux températures extérieures où cette différence est bien plus faible, généralement inférieure à 1°C.

La corrélation entre les températures intérieures et extérieures est tout aussi perceptible. On remarque que lorsque les températures extérieures diminuent les températures intérieures vont faire de même, mais avec un décalage temporel. La nuit du 7 juillet, les températures extérieures diminuent de plusieurs degrés (12°C). Cette baisse a une répercussion de 30 min à 1h avant que les températures intérieures diminuent. Le bâtiment accumule de la chaleur. Le déphasage, défini comme le décalage dans le temps entre le pic de température extérieure et le pic de température à l'intérieur du bâtiment est visible. Ce déphasage est fonction de l'inertie thermique.

Au niveau de l'amplitude journalière des températures intérieures, on constate un faible rafraîchissement entre la nuit et le jour contrairement aux températures extérieures. Ces dernières montrent de fortes amplitudes, pouvant aller jusqu'à 12°C pour la 8^{ème} nuit. La faible amplitude thermique à l'intérieur vient des caractéristiques de l'appartement simulé par le modèle SURFEX-TEB et de son inertie thermique, à savoir le stockage de chaleur dû à l'isolation. Ainsi, il apparaît que les températures intérieures ont plus d'impact pour la santé humaine que les températures extérieures. Le corps ne peut pas se refroidir durant la nuit. Ce refroidissement est essentiel pour la santé humaine. Dans les pays chauds, en Espagne par exemple, de nombreuses terrasses sont aménagées pour que les habitants puissent y dormir pendant les nuits les plus chaudes.

Plusieurs enjeux sont notables. Pour assurer un confort d'été, il faut limiter l'ensoleillement d'un bâtiment, rechercher l'ombre et favoriser la ventilation naturelle par des ouvertures. En hiver, au contraire, on cherchera des apports solaires, la protection des vents dominants et la limitation des déperditions. Les obstacles naturels, l'orientation des façades, l'ombrage, le rafraîchissement par les effets de masques ; la brise ou les vents dominants jouent un rôle dans les températures intérieures. D'après l'étude réalisée par EMPA⁶⁷, l'optimisation du confort d'été doit être prévue dès la conception de l'immeuble en prenant en compte l'orientation des surfaces vitrées (influence de 1 à 3,5°C), la ventilation nocturne pour évacuer la chaleur (influence de 1°C à 4,5°C) et la bonne inertie du bâtiment (avec une influence de 1°C à 2,5°C), ainsi que la performance thermique des parois influençant de 1°C à 3,4°C la température intérieure. Il est important de prendre en compte la configuration spatiale des bâtiments.

⁶⁷ EMPA (Materials Science and Technology) Institut de recherche et de services interdisciplinaires se consacrant à la science des matériaux et au développement technologique

Le mois de juillet 2015 est caractérisé, d'après nos simulations, par une canicule allant du 1^{er} au 5 juillet et par une vague de chaleur du 15 au 17 juillet. Entre ces dates, un léger rafraîchissement est noté. Les températures intérieures se distinguent des températures extérieures par leurs plus faibles amplitudes et leurs températures plus élevées. Des facteurs thermiques, topographiques (hydrologie, végétation, etc.), etc. expliquent cette distinction.

3.3.2. Différenciation spatiale et différenciations des températures jours/nuits

Spatialement, sur la figure 3.35, représentant les températures intérieures et extérieures (moyennées sur la plage horaire 15-22h) des sorties SURFEX-TEB, entre le 1^{er} et le 7 juillet, on constate que les températures intérieures fluctuent davantage (spatialement mais aussi au niveau de l'amplitude thermique) que les températures extérieures. Cette fluctuation est due notamment à l'effet d'inertie thermique. Si on regarde les températures extérieures, on constate que pour décrire une journée, une à deux plages de températures suffisent pour décrire l'ambiance thermique extérieure contrairement aux températures intérieures où celles-ci fluctuent davantage spatialement. Le 4 juillet par exemple, a des températures extérieures se situant entre deux classes (26,85-29,35°C et 29,35-31,85°C) et pour les températures intérieures, les classes de températures vont de 26,85°C à 41,85°C.

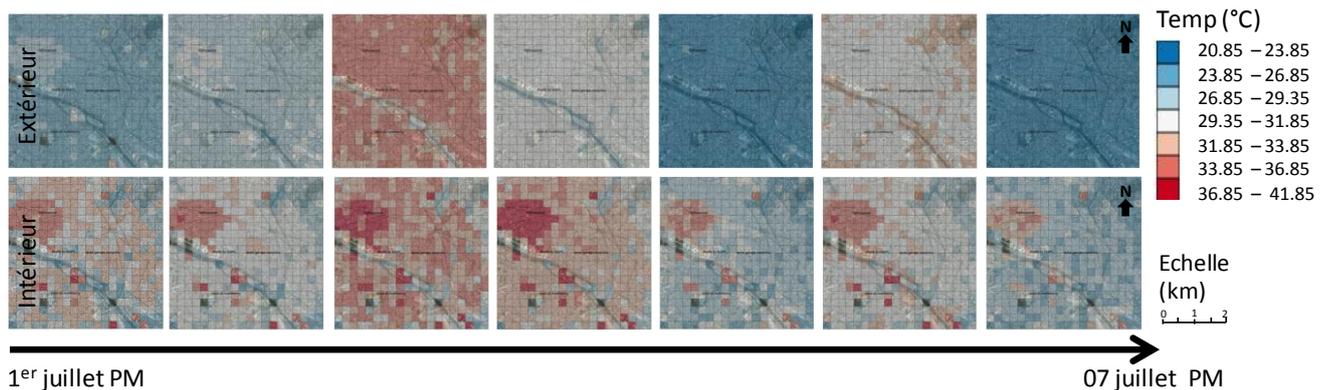


Figure 3.35 : Représentation des sorties du modèle SURFEX-TEB sur les températures intérieures et extérieures de jour (moyennées 15-22h) du 1^{er} au 7 juillet 2015

On retrouve deux comportements distincts entre les températures intérieures et extérieures dus à l'inertie thermique. Lorsque les températures extérieures baissent la nuit, cela ne signifie pas que les températures intérieures vont systématiquement et instantanément baisser et suivre la même tendance. En effet, en raison de l'inertie thermique et des caractéristiques des bâtiments (matériaux, ventilation), les températures intérieures diminuent très faiblement voire restent stables ; les bâtiments accumulent de la chaleur. Ce phénomène est encore plus visible après une journée de forte chaleur. Par exemple le 3 juillet, vu comme une journée de forte chaleur, en certains endroits, la température extérieure dépasse les 33°C. Les températures intérieures sont par conséquent élevées. Cependant, avec l'effet de l'inertie thermique, même si le 4 juillet la température extérieure diminue de plusieurs degrés, la température intérieure, elle, reste élevée voire localement sera plus chaude que les jours précédents. L'effet est tout aussi marquant de nuit (Fig.3.36). Par ces exemples, on constate l'importance d'étudier les températures intérieures et leurs fluctuations au cours du temps.

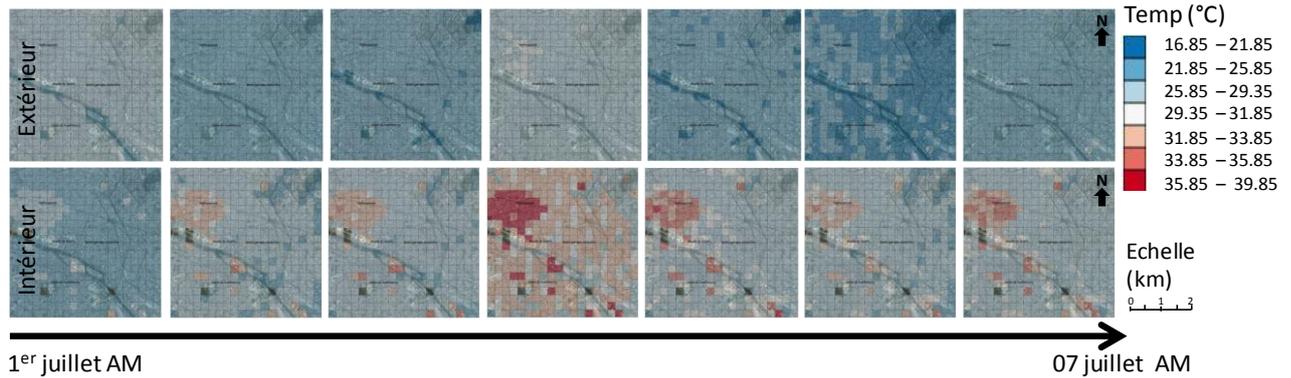


Figure 3.36 : Représentation des sorties du modèle SURFEX-TEB sur les températures intérieures et extérieures de nuit (moyennées 03-10h) du 1^{er} au 7 juillet 2015

L'ICU a une variabilité journalière récurrente : son intensité est en général plus forte la nuit que le jour. Sur cette figure, nous pouvons faire le même constat mais à échelle plus fine. En effet, en comparaison avec les températures de jour, les températures de nuit diminuent avec une plus faible intensité. L'influence urbaine est plus marquée la nuit et il existe une forte variation et différence de températures entre la zone urbaine dense et la zone environnante (zone rurale). Ce phénomène est accentué par la géométrie encaissée des rues, limitant le refroidissement des parois (routes et murs), par les pertes radiatives nettes (réduction du facteur vu du ciel constituant un puissant puits radiatif). Cette différence de températures, plus importante de nuit que de jour a des conséquences sanitaires sur la population, du fait notamment de l'augmentation du stress thermique que le corps doit affronter.

Pour synthétiser, l'inertie thermique joue un rôle primordial. Elle stocke les apports excédentaires durant la journée et les restitue plus tard, lorsqu'il fait plus frais la nuit. Durant les périodes estivales, les températures extérieures nocturnes sont généralement inférieures aux températures à l'intérieur du bâtiment. Il est possible d'appliquer une ventilation naturelle puisque l'air ventilé favorise, par la convection, la dissipation de la chaleur stockée dans les parois en l'évacuant vers l'extérieur. Cela permet de réduire les pics de chaleur dans le bâtiment. Cependant, la plupart du temps, l'efficacité des échanges est pénalisée par les finitions intérieures telles que l'isolation avec les plaques de plâtre, faux plafond, etc. Avant l'apparition des matériaux isolants, la construction traditionnelle avait privilégié deux types de systèmes constructifs : la construction massive en pierres ou en briques (à forte inertie) et la construction légère (à faible inertie). Avec l'apparition des isolants, l'ambiance intérieure est davantage influencée par les conditions climatiques extérieures.

En plus de l'isolation, plusieurs autres facteurs jouant sur la différence de température peuvent être cités : l'orientation et l'exposition des façades, les formes urbaines et architecturales, la ventilation naturelle et les appartements traversants.

L'humidité, joue aussi un rôle important sur l'impression de chaleur. Même si peu évoquée et pris en compte dans les indices, tels que l'IBM, l'humidité renforce la chaleur ressentie. Comme énoncé dans la partie A, l'homme pour refroidir son corps transpire ; ce mécanisme est perturbé lorsque le taux d'humidité dans l'air devient trop élevé. L'air déjà saturé par la vapeur d'eau, empêche la sueur de s'évaporer et reste collée à la peau. Toute évaporation devient impossible lorsque l'humidité relative atteint les 98%.

Contrairement à l'indice Humidex (indice pertinent pour des vagues de chaleur humide), l'IBM ne prend pas en compte l'humidité puisqu'en France nous connaissons plutôt des vagues de chaleur sèches (extrait de l'InVS).

Ainsi, on ne peut pas aborder de manière identique le confort à l'intérieur et à l'extérieur d'un bâtiment. Cette différenciation est due à la forte disparité des températures entre elles et aux différents facteurs intervenants.

Une meilleure exploitation des sorties du modèle, en se concentrant sur les phénomènes de canicule, permet de caractériser l'apport des variables pour définir les canicules. Cette amélioration passe par une analyse post-traitement des sorties du modèle SURFEX-TEB pour différencier les températures dans la rue et intégrer la temporalité. Cette différenciation permet d'identifier des zones critiques, correspondant à des portions d'espaces où la température est particulièrement élevée pendant un certain temps. L'analyse de la durée des phénomènes pour en déduire les zones de dangerosité (hotspot) à l'échelle du quartier permet la conception d'un premier schéma de données et de méthodes associées (Fig.3.37) Il est décrit par objet et par classe avec son agrégat temporel.

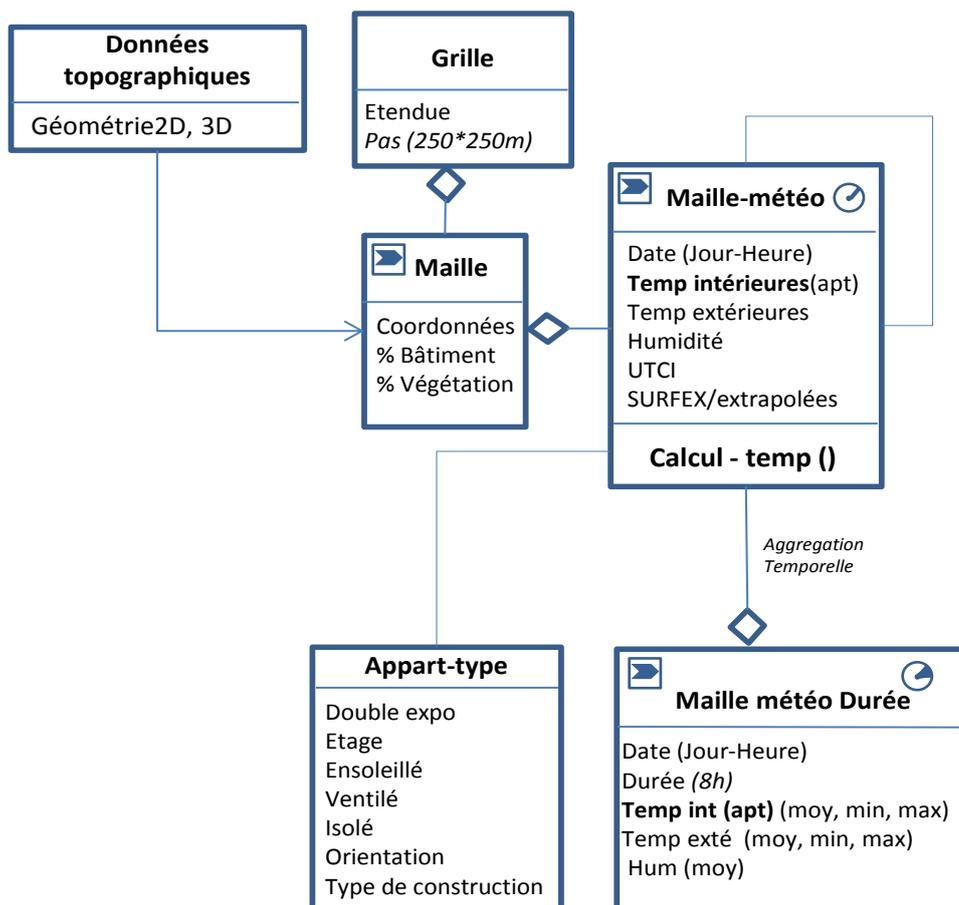


Figure 3.37 : Proposition du schéma de données représentant la durée pour les données issues du modèle SURFEX-TEB

Le schéma de données permet de résumer et structurer l'information. Les données topographiques, avec une grille d'un pas de 250*250m, permettent la création d'une maille comprenant les coordonnées et les pourcentages des différents éléments composants le paysage. De cette maille, une *maille météo* est créée. Elle contient des informations sur la température

intérieure, extérieure, l'humidité, etc. Cette maille se base sur un appartement type pour avoir les températures intérieures. Cet appartement type, tiré du modèle TEB est caractérisé par son exposition, son isolation, son type de construction, etc. Par agrégation temporelle, la *maille météo* permet de construire la *maille météo durée*. Elle comporte les informations des paramètres sur une durée de 8h. Les températures intérieures et extérieures sont étudiées contrairement à l'humidité. Nous avons choisi de focaliser notre attention sur les températures et non sur l'humidité pour représenter la canicule. D'après l'InVS l'humidité n'est pas le facteur le plus prédictible de la mortalité en cas de canicule en France puisque nous connaissons des vagues de chaleur sèches.

Synthèse du chapitre 3

Pour conclure ce chapitre, différentes périodes de canicule sont simulées sur Paris avec le modèle SURFEX, le schéma de ville TEB et le modèle AROME. La collaboration avec Météo-France permet de réaliser ces simulations à une résolution de 250m. Améliorer et affiner les sorties du modèle en ajoutant à celles-ci une maille morphologique de la BD topographique de l'IGN permet d'avoir une première visualisation de la canicule et de son intensité spatio-temporelle. Les résultats sont très satisfaisants (mais à évaluer par comparaison avec des observations) : le modèle permet de simuler les températures intérieures et extérieures avec les cycles diurnes et nocturnes. Les analyses temporelles montrent la variabilité quotidienne des températures. Elles permettent de mieux localiser le phénomène et de construire des cartes distinctes mais complémentaires pour améliorer la représentation des épisodes de canicule. Cette intégration permet également de mettre en valeur les sorties, en contextualisant les données (toutes les heures), sous forme d'une grille afin de passer d'états à des durées et suivre les températures au cours du temps, à l'échelle de la maille.

L'objet de cette recherche est de mieux évaluer, représenter et communiquer sur les risques caniculaires en zones urbaines denses. Les différentes simulations permettent de considérer l'hétérogénéité des températures intérieures et l'influence des températures extérieures sur celles intérieures. Pour améliorer ces simulations, des données météorologiques locales issues de campagnes de mesures sont réalisées au centre de Paris. Ces mesures, pendant la canicule 2015 sur Paris, dans le cadre de cette recherche, mettent en évidence les phénomènes d'accumulation et l'impact des configurations des appartements sur les températures intérieures et extérieures.

Les cartes de vigilance météorologique sur les risques caniculaires sont basées sur la prévision de dépassement de seuils à l'extérieur des habitations. L'analyse sur le passé des données de stations météorologiques placées, majoritairement à l'extérieur des centres urbains, à l'exemple de la station Montsouris (à Paris) détermine ces seuils. A une autre échelle, Montsouris est à l'intérieur de la zone urbaine de l'Ile-de-France. Les mesures réalisées à partir des stations météorologiques ne prennent donc pas intégralement l'effet du microclimat urbain et ainsi l'effet de l'ICU. De plus, on sait que l'on passe plus de 80% de notre temps dans des lieux clos. On peut donc se poser la question des véritables seuils de canicule à appliquer en termes de dangerosité et de l'influence des températures extérieures sur celles intérieures. Pour estimer les échanges thermiques entre surface, SURFEX-TEB estime les températures à l'intérieur des bâtiments ; c'est l'occasion d'explorer la relation entre les températures intérieures et extérieures à l'intérieur d'un tissu urbain dense. Une comparaison entre les températures intérieures et extérieures, tant spatialement que temporellement, est primordiale.

Chapitre 4

Campagnes de mesures et différenciation des comportements par type d'appartements

Les objectifs de ce chapitre sont de :

- Présenter les campagnes de mesures et les capteurs utilisés
- Identifier des règles de températures entre appartements en répondant aux hypothèses posées
- Identifier les différences entre les températures intérieures et extérieures
- Représenter spatialement et temporellement (par état) les températures pour la canicule 2015
- Proposer une méthode pour la prise en compte des données de modèles et des données issues des campagnes de mesures

TABLE DES MATIERES

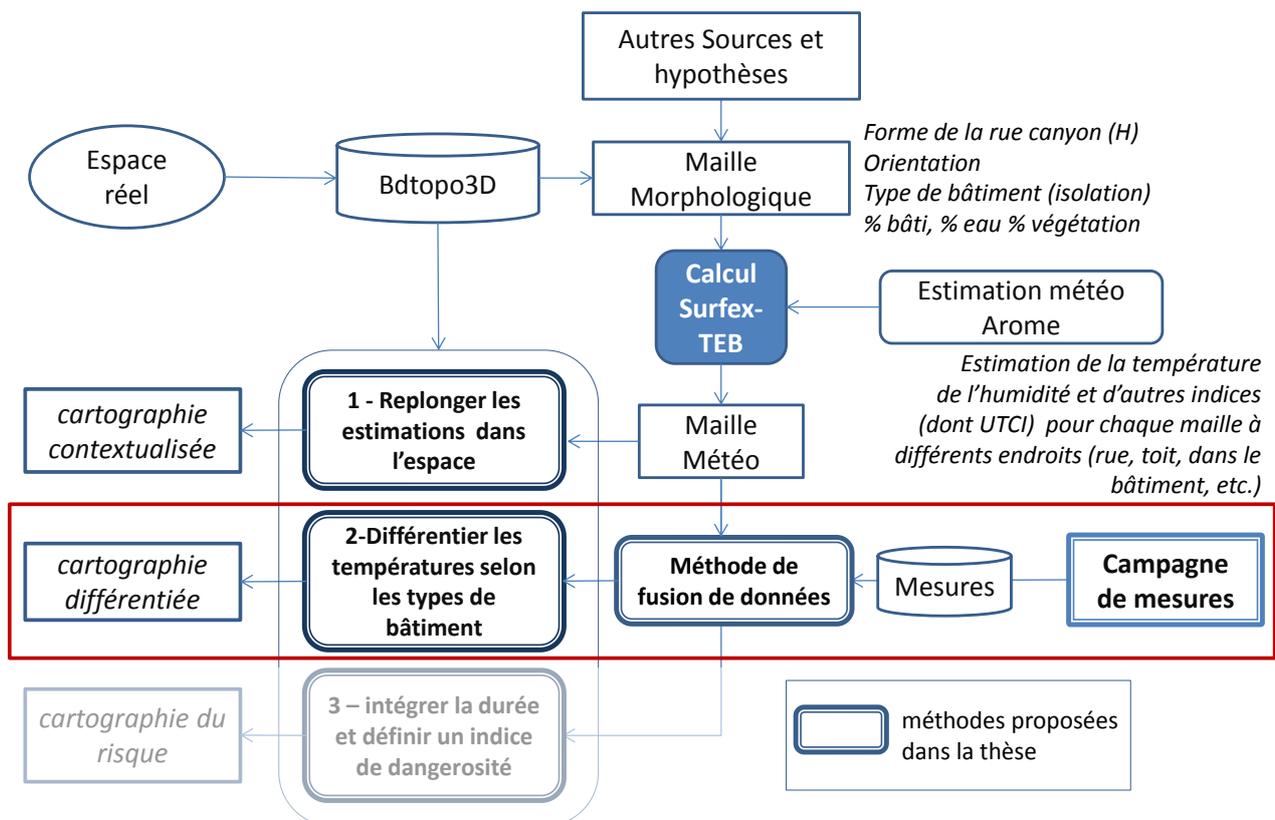
CAMPAGNES DE MESURES ET DIFFERENTIATION DES COMPORTEMENTS PAR TYPE D'APPARTEMENTS	181
1. <i>Les capteurs de températures</i>	184
1.1. Présentation des capteurs Tinytag	184
1.2. Installation et localisation des capteurs	185
1.2.1. Localisation et caractéristiques des capteurs 2014	186
1.2.2. Localisation et caractéristiques des capteurs 2015	189
1.2.3. Hypothèses	192
2. <i>Campagne 2014 : analyse intra-immeuble</i>	193
2.1. Températures extérieures	193
2.2. Températures intérieures	199
2.3. Influence des températures extérieures sur celles intérieures	206
2.3.1. Orientation	207
2.3.2. Par appartement	210
2.3.3. Synthèse	212
3. <i>Campagne 2015 : analyse entre appartements</i>	213
3.1. Températures intérieures	214
3.1.1. Appartement A	225
3.1.2. Appartement B	227
3.1.3. Appartement C	229
3.1.4. Appartement D	230
3.1.5. Appartement E	232
3.2. Températures extérieures	234
3.2.1. Contextualisation des appartements	234
3.2.2. Analyses	237
3.3. Températures et appartements	248
3.3.1. Appartement A	249
3.3.2. Appartement B	259
3.3.3. Appartement C	262
3.3.4. Appartement D	266
3.4. Les types d'appartements	270
3.4.1. Création des types d'appartements	271
3.4.2. Schéma de données	271
4. <i>Amélioration de l'estimation des températures</i>	273
4.1. Méthodologie	273
4.1.1. Localisation et géoréférencement des types d'appartements	273
4.1.2. Fusion de données	274
4.2. Visualisation des températures intérieures	275
4.2.1. Différenciation spatiale par type d'appartements	275
4.2.2. Différenciation temporelle par type d'appartements	276
4.2.3. Indice UTCI par type d'appartements	281
4.3. Visualisation des températures extérieures	281
4.4. Différenciation spatiale intérieure/extérieure par type d'appartements	282

Les faits sont têtus. Il est plus facile de s'arranger avec les statistiques

Mark Twain

Nous passons aujourd'hui plus de 80% de notre temps au sein de notre habitat ou dans des lieux clos. Le renouvellement de l'air est indispensable pour conserver le confort et l'hygiène de nos habitations. Une mauvaise qualité de l'air et donc une mauvaise aération peut entraîner certains dommages comme maux de tête, fatigue, etc. Ventiler permet d'apporter un air neuf et d'évacuer les odeurs et les polluants qui s'y accumulent. Renouveler l'air n'est pas le seul objectif de la ventilation. Elle peut être utilisée dans des régions plus arides ou lors de périodes caniculaires pour modifier la température intérieure afin de créer une sensation de fraîcheur dans les bâtiments. Ainsi, cette ventilation naturelle joue aussi un rôle sur la température à l'intérieur des logements mais a des impacts différents en fonction de l'orientation, de l'exposition et des propriétés thermiques du bâtiment.

L'un des objectifs de la thèse est d'étudier les effets de la canicule sur la population en intégrant la notion du temps mais aussi d'étudier la variabilité spatiale à échelle fine dans les quartiers de Paris. La méthodologie mise en place dans cette recherche est une méthode basée sur l'utilisation du modèle SURFEX-TEB et d'un jeu de données de températures provenant de capteurs Tynitag. L'objectif de cette partie est de réaliser une cartographie différenciée.



Si on reprend la figure 2.3 présentée au chapitre 2, il s'agit, dans ce chapitre, de savoir en quoi et à quel point la température en un point dépend des configurations spatiales locales et surtout des caractéristiques des appartements. Pour obtenir des données climatiques plus fines, un réseau

capteur est mis en place à l'intérieur et à l'extérieur d'appartements. Nous cherchons l'influence de la morphologie urbaine sur le champ des températures. Cette cartographie différenciée permet de compléter les estimations provenant du modèle.

La mesure des températures est l'une des plus complexes en météorologie puisqu'on observe de fortes variations spatiales selon la topographie, l'éloignement à une ville, la présence de végétation, les obstacles géographiques locaux, etc. L'enregistrement des températures se fait au moyen de divers appareils. Le plus classique est la station météorologique (ensembles de capteurs) incluant un thermomètre pour des mesures globales. Il existe des méthodes pour des approches plus ponctuelles fondées sur des capteurs.

Dans cette partie, nous souhaitons confirmer et surtout mieux estimer l'existence d'une différence de température entre appartements et quartiers d'une même ville pour mieux connaître les risques lors de canicule dans les appartements.

1. Les capteurs de températures

Le choix des appareils de mesures et leur installation sont très importants pour montrer la forte variabilité spatio-temporelle du climat sur des petits espaces. Il faut limiter les incertitudes concernant l'étalonnage, la résolution, etc. Il est noté que les plus fiables ne sont pas forcément les appareils les plus onéreux (Quénol. 2011). Nous utilisons les capteurs Tinytag ayant une résolution de 0,3°C et étalonnés en laboratoire.

1.1. Présentation des capteurs Tinytag

Le capteur de températures est devenu un instrument de mesure indispensable si l'on souhaite faire des mesures ponctuelles. L'avantage essentiel du capteur, par rapport à une station, réside dans sa facilité d'utilisation. Il existe une multitude de capteurs de températures tant par leur technique que par leurs formes. Plusieurs secteurs peuvent utiliser cette méthode à l'exemple de l'automobile (moteur, par exemple) et l'industrie (dans les appareils électroménagers). De nombreuses sources d'erreurs affectent toutefois la qualité des estimations de températures du capteur. Malgré l'incertitude des résultats, le capteur permet la mesure en temps réel sur un espace ciblé. Il permet une bonne représentation des phénomènes.

Pour nos différents tests de mesures, nous avons choisi de les réaliser avec des capteurs de type Tynitag Talk 2. Ce capteur est une sonde de température avec un enregistreur de la marque Gemini®. Les caractéristiques du capteur sont présentées dans la figure 4.1. Il est abrité dans une boîte de pellicule de 35mm. Nous avons choisi ce capteur par sa facilité d'emploi, par sa précision (0,05°C ou meilleur), par sa petite taille et par son coût modéré (permettant de multiplier les points de mesures). Ces enregistreurs permettent de surveiller les températures comprises entre -40°C à plus 125°C, dans des endroits variés. Le capteur Tinytag est principalement destiné à un usage en intérieur mais son boîtier est résistant aux éclaboussures et à couvert d'un abri, il peut être placé à l'extérieur. Il a été largement utilisé pour l'observation aux échelles fines des parcelles viticoles (Qauénol 2012, Bonnefoy 2013)

Data logger Type: TK-4023	
Capacité totale de mesures	16 000 mesures
Type de mémoire	Non Volatile
Démarrage différé	jusqu'à 45 jours
Options d'arrêt	Quand plein/Après n lectures/ Jamais (écriture par dessus les anciennes données))
Types de mesure	Actuel/Min/Max
Intervalle d'enregistrement	1 seconde à 10 jours
Alarmes	Deux alarmes programmables
Amplitude d'enregistrement	-40°C à 125°C
Type de capteur	10K NTC Thermistor (sonde externe)
Résolution de la mesure	≤ 0.05°C
Stabilité de la température	±0.01°C/°C à partir de 25°C
Précision de la mesure	0.4°C (0°C<T<70°C) et 0.4°C à 0.8°C (-20°C<T<0°C)



Figure 4.1 : Caractéristiques des capteurs Tinytag Talk 2 utilisés (source : Gemini ®)

Ce capteur s'utilise avec le programme Tinytag Explorer. Les données du capteur sont connectées, par ordinateur via un câble. A partir de ce programme, on choisit la description de notre exécution d'enregistrement. Le programme Tinytag permet d'établir l'intervalle et la durée de l'enregistrement et les données que l'on souhaite mesurer. Nous l'avons programmé pour enregistrer la température (en °C) minimale, maximale et moyenne toutes les 30 minutes. L'avantage d'enregistrer les valeurs minimales et maximales sur une période donnée est que la durée d'enregistrement de l'unité peut être augmentée puisqu'il y a moins de lectures stockées. Lorsque le capteur est paramétré pour enregistrer les valeurs minimales et maximales, il vérifie la valeur de son entrée une fois toutes les minutes. A la fin de chaque intervalle (ici, 30min), la valeur minimale et maximale est stockée. La moyenne des valeurs se fait après. Pour extraire les données, une connexion du capteur à l'ordinateur est obligatoire. La visualisation des données se fait par graphiques et tableaux de valeurs.

Nous avons choisi des capteurs « uniques », c'est-à-dire que les séries de températures sont obtenues à partir des mêmes capteurs et non pas en combinant plusieurs.

L'avantage des mesures simultanées est de pouvoir obtenir des données de terrain sans décalage temporel.

1.2. Installation et localisation des capteurs

Il est essentiel de bien choisir ces postes de mesures. En effet, l'objectif est d'analyser les écarts de températures à l'intérieur des quartiers engendrés par des effets locaux. Les capteurs doivent être placés là où l'influence des variables climatiques est élevée : rue canyon, centre urbain, etc. La répartition sur l'ensemble de la zone d'étude est privilégiée pour ne pas avoir des secteurs sans prise de mesures. Pour l'interprétation, cela peut poser des interrogations. Dans un contexte de milieu urbain, il est toutefois difficile de disposer des capteurs de manière optimale pour les raisons suivantes :

Campagnes de mesures et différenciation des comportements par type d'appartements

- Les capteurs ne sont pas placés à la même hauteur,
- Certains secteurs n'ont pas pu être exploités,
- L'influence des appareils électroménagers (pour les capteurs intérieurs) et de la ventilation,
- La proximité des murs (pour les capteurs extérieurs) et de la végétation.

Les capteurs Tinytag ont été placés à l'intérieur et à l'extérieur de bâtiments. Pour l'extérieur, nous avons réalisé des abris météo pour éviter le rayonnement solaire direct sur le capteur. Ce type de capteur présente l'avantage d'avoir une sonde thermistance déportée permettant de l'installer dans un abri antiradiation. Pour l'intérieur les capteurs sont directement posés au lieu voulu (Fig.4.2).

Les capteurs placés à l'intérieur sont directement impactés par l'habitant et l'usage qu'il fait de son appartement. Pendant nos campagnes de mesures certains appartements n'ont pas été habités. Les fenêtres non ouvertes durant les absences créent une plus forte accumulation de chaleur à l'intérieur du logement. Pour les appartements occupés, les fenêtres sont ouvertes pour créer une ventilation naturelle et des ventilateurs fonctionnent sur quelques heures. Aucun climatiseur n'a été utilisé lors de nos campagnes de mesures. Les modes de vie, les habitudes, les absences des habitants influencent les températures intérieures. Nous avons placés les capteurs seulement après acceptation de chaque habitant des appartements mesurés. Leur donner des contraintes, pour avoir les mêmes modes de vie dans tous les appartements, n'est pas envisageable.

Deux campagnes de mesures ont été nécessaires pour structurer la méthodologie et pour répondre à nos attentes. Les tests ont été réalisés en août 2014 et juillet 2015.

1.2.1. Localisation et caractéristiques des capteurs 2014

Afin de détailler plus précisément les variations locales, nous avons réalisé un premier test sur une zone dense dans Paris. Pour la campagne de mesure d'août 2014, un seul bâtiment est testé. Ce bâtiment, situé au cœur de Paris, dans le 2^{er} arrondissement, a permis de comparer les températures entre étages. Cette comparaison permet de visualiser au mieux la variabilité spatiale altitudinale des températures et pouvoir identifier des règles à cette variabilité. L'étude des écarts de températures entre l'intérieur et l'extérieur mais aussi sur les faces Nord et Sud sur les différents étages était le premier questionnement.

Les figures 4.3, 4.4 et 4.5 et le tableau 4.1 présentent la répartition spatiale des 14 capteurs (dont certains extérieurs placés dans des abris naturellement ventilés) sur un bâtiment non climatisé, au centre de Paris, se situant dans une rue canyon. Ces capteurs ont été placés faces Nord et Sud, à l'intérieur et à l'extérieur de l'immeuble sur 4 étages différents (du 3^{ème} au 6^{ème} étage). Chaque appartement est équipé d'un ou plusieurs capteurs (face Nord et Sud, intérieur et extérieur) au bon vouloir des résidents. Les températures font partie des grandeurs variant de façon très perceptibles selon les rythmes diurnes/nocturnes et selon le positionnement du capteur. Cette campagne permet de confirmer ou infirmer ce constat.

De la donnée brute à la dangerosité



Figure 4.2 : Capteurs pour la campagne de mesures sur Paris juillet 2014

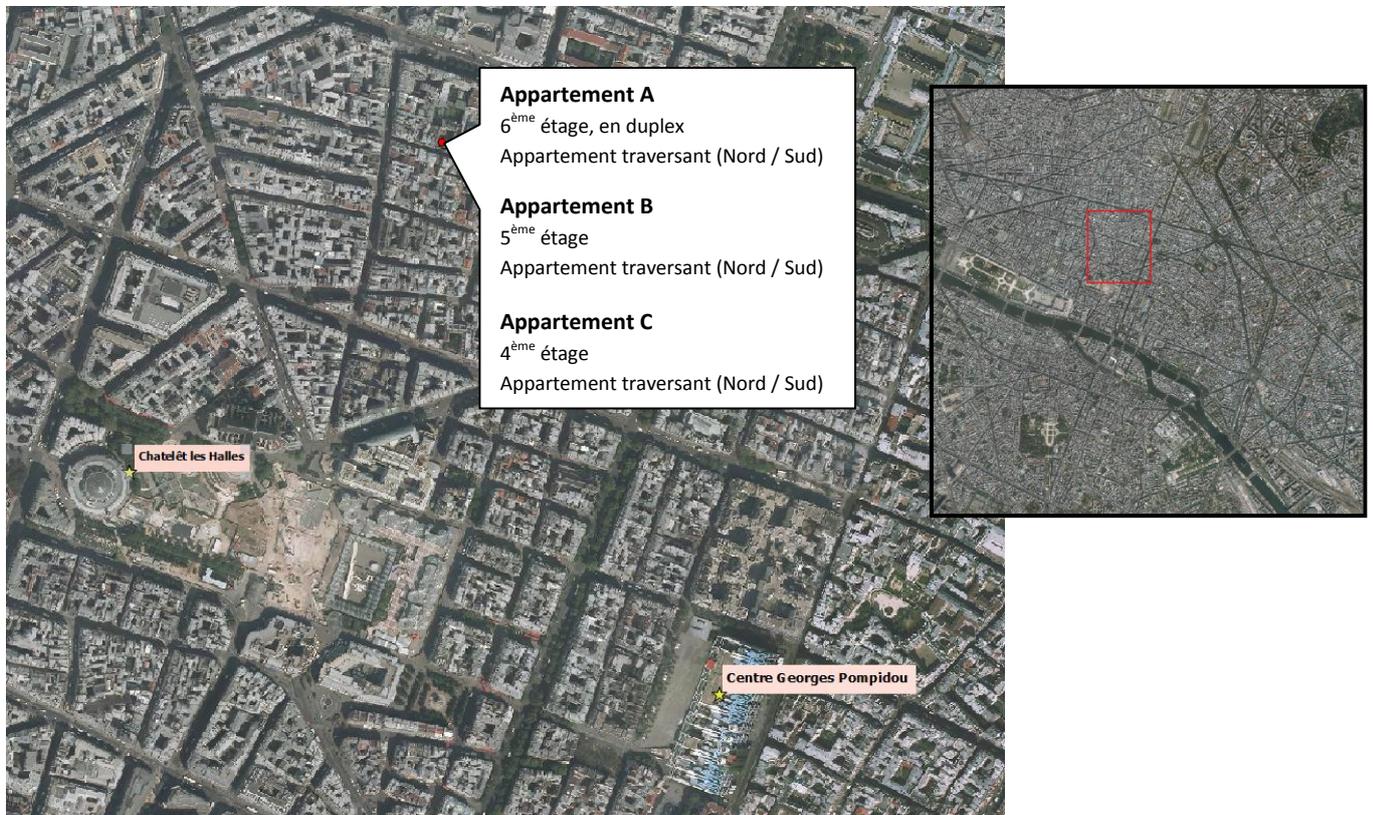


Figure 4.3 : Localisation de l'immeuble mesuré pour la campagne 2014



Figure 4.4 : Photographies des appartements de la campagne 2014

Appartements	Etages	Nbre de capteurs	N° capteur Extérieur	N° capteur Intérieur
A (duplex)	6	5	9 (Sud) – 3 (Nord)	7 ; 22 (Sud) – 27 (Nord)
B	5	4	16 (Sud) – 13 (Nord)	15 (Sud) – 12 (Nord)
C	4	4	2 (Sud) – 11 (Nord)	8 (Sud) – 24 (Nord)
D	3	1	17 (Nord)	X

Tableau 4.1 : Localisation des capteurs intérieurs et extérieurs campagne 2014

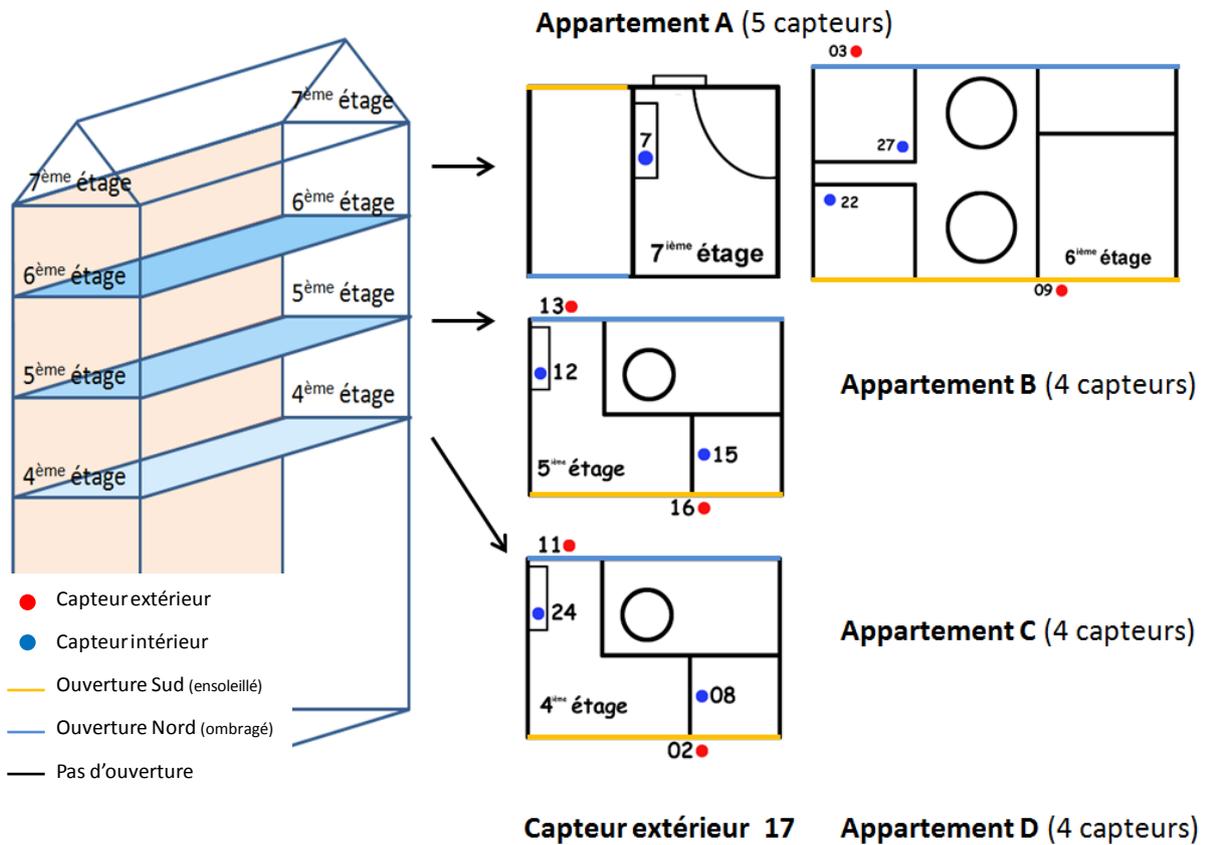


Figure 4.5 : schéma de la localisation des capteurs

La température de l'air (moyenne, minimale et maximale) est enregistrée toutes les 30min entre le 3 et le 14 août (période non caniculaire). Dans le but d'explorer, expliquer et améliorer ces données, nous avons réalisé des graphiques en fonction de l'emplacement de chaque capteur. Des techniques statistiques permettent de mettre en avant ces résultats. Des calculs de base sont effectués (en plus des graphiques) sur les données de façon à qualifier et quantifier les variations de températures et mieux les représenter.

Bien que le test n'ait pas été réalisé en période de canicule, il nous permet d'avoir les premières informations.

1.2.2. Localisation et caractéristiques des capteurs 2015

Pour cette campagne, nous avons placé 22 capteurs, localisés dans le centre urbain de Paris (Fig. 4.6, 4.7 et Tab 4.2). On s'intéresse aux températures moyennes, minimales et maximales durant la période du 29 juin 2015 12h, au 1^{er} août 2015 minuit.

L'analyse de l'évolution de la température en période estivale entre le 29 juin et le 1^{er} août 2015 a été réalisée en utilisant les séries de températures correspondant aux 21 capteurs retenus. Nous avons examiné l'évolution des températures aux échelles journalières, toutes les 30 minutes. Ces résultats ont permis notamment d'écrire les règles nécessaires à la compréhension des mécanismes météorologiques et thermiques présents dans notre cartographie des risques.

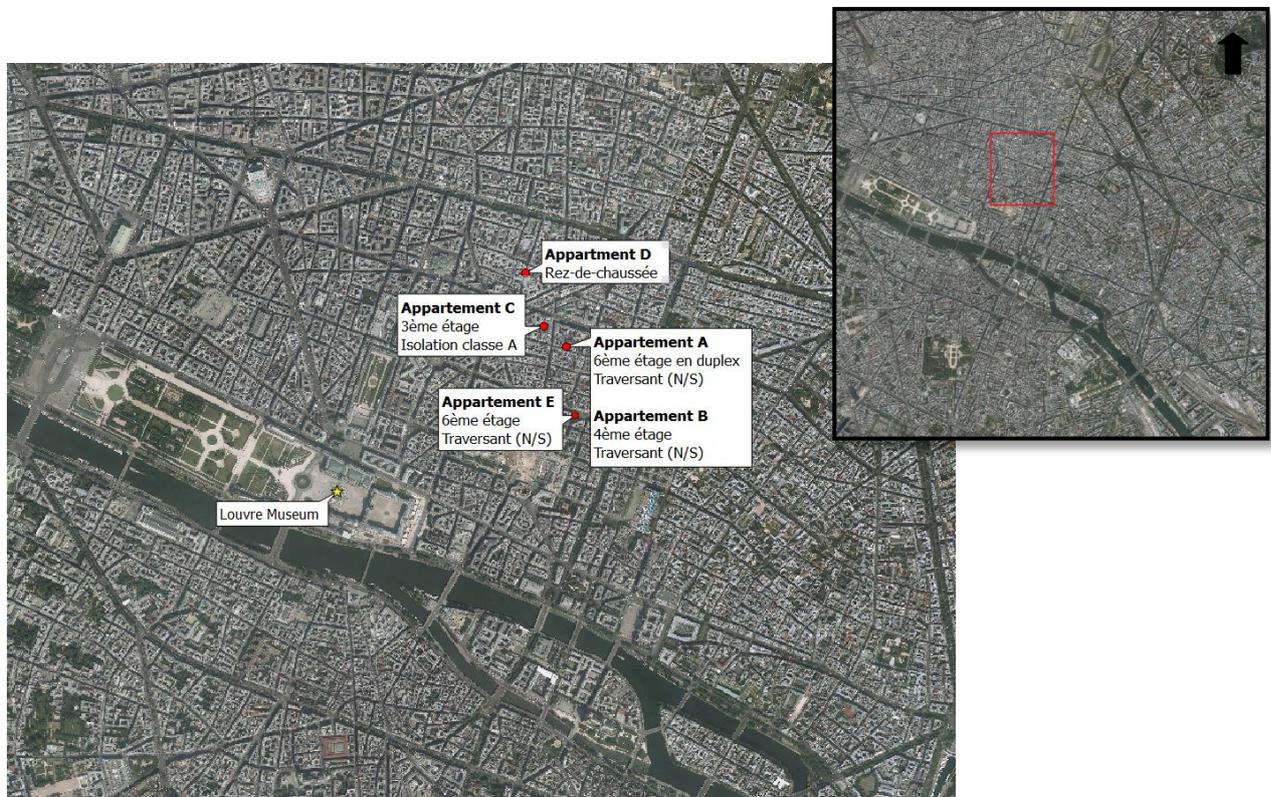


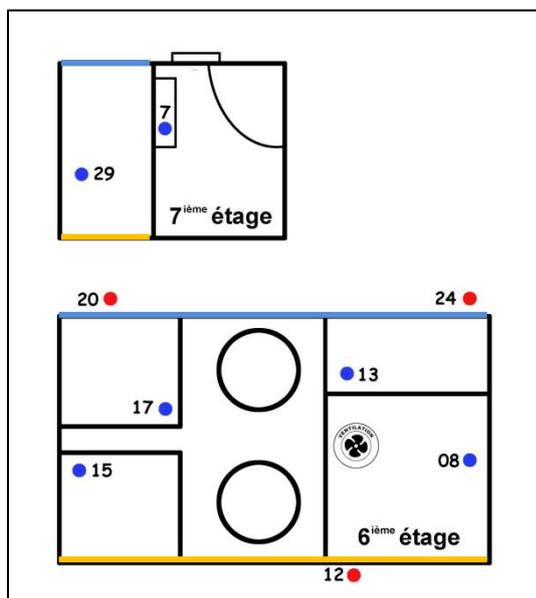
Figure 4.6 : Localisation des appartements mesurés pour la campagne 2015

Campagnes de mesures et différenciation des comportements par type d'appartements

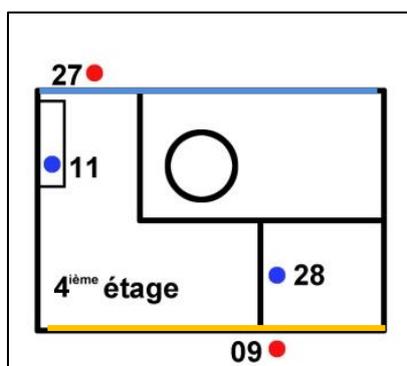
Appart	Année de construction	Coordonnées géographiques	Nbr de capteurs	Etages	N° capteur Extérieur	N° capteur Intérieur
A (duplex)	< 1850	652172 6863111.3	9	6	12 (Sud) – 20 ; 24 (Nord)	29 ; 7 ; 15 ; 8 (Sud) – 17 ; 13 (Nord)
B	< 1850	652172 6863111.3	4	3	9 (Sud) – 27 (Nord)	28 (Sud) – 11 (Nord)
C	< 1850	652086.4 6863196.7	3	3	30 (Nord)	18 (Sud) - 2 (Nord)
D	Haussman	652202.8 6862844.3	3	6	3 (Sud) – 4 (Nord)	14 (Nord)
E	< 1850	652012.5 6863397	1	RDC	X	22 (Nord)

Tableau 4.2 : Localisation des capteurs intérieurs et extérieurs campagne 2015

Appartement A (9 capteurs)



Appartement B (4 capteurs)



Rue canyon



Face Sud

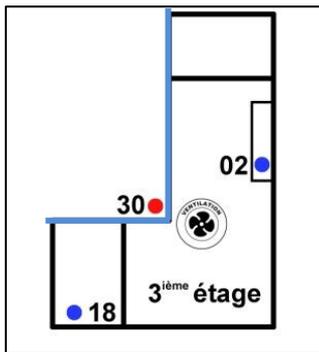


Face Nord



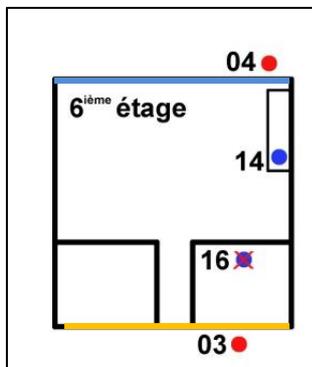
De la donnée brute à la dangerosité

Appartement C (3 capteurs)

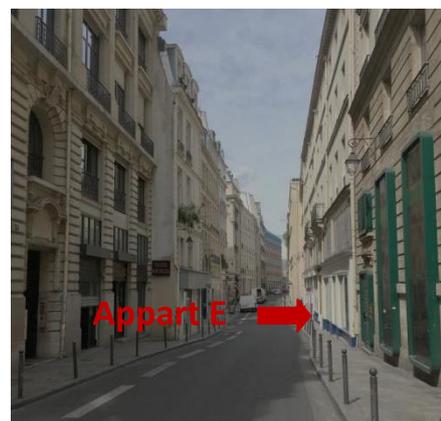
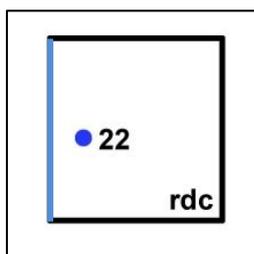


Appartement D (3 capteurs)

Le capteur 16, suite à une défaillance, ne sera pas utilisé



Appartement E (1 capteur)



- Capteur extérieur
- Capteur intérieur
- ⊗ Défaut capteur
- Ouverture Sud (ensoleillé)
- Ouverture Nord (ombragé)
- Pas d'ouverture

Figure 4.7 : Localisation des capteurs et présentation des lieux

1.2.3. Hypothèses

L'étude des paramètres météorologiques et thermiques permet de mieux cerner la façon dont les températures intérieures diffèrent de celles extérieures, en période de canicule. Des hypothèses nous permettent d'avancer et mieux comprendre l'importance de caractériser un appartement en fonction de ses caractéristiques, pour comprendre sa dangerosité. L'objectif de cette partie est de montrer que la variabilité des températures extérieures ou intérieures est fonction de l'emplacement géographique, de l'altitude, de l'orientation et de l'isolation. En prenant l'exemple des deux campagnes de mesures, des constats sont faits sur les différences thermiques entre appartements d'un même quartier. Plusieurs hypothèses sont posées :

- Les températures extérieures :
 - influencent les températures intérieures
 - influencent davantage les capteurs placés en double exposition qu'au dernier étage (mezzanine)
- Les températures intérieures :
 - sont relativement plus chaudes la nuit due à l'inertie thermique de l'appartement
 - sont plus élevées que les températures extérieures dues à l'accumulation de chaleur, durant les périodes fraîches
 - côté Sud sont plus chaudes que celles côté Nord
 - Les capteurs au dernier étage enregistrent des valeurs toujours supérieures aux autres
- Les températures extérieures et intérieures :
 - l'orientation influence (plus chaud côté Sud que Nord)
 - Une différence de température plus importante de nuit que de jour
 - Un déphasage est plus marqué en période caniculaire
 - une hiérarchisation des mesures des capteurs est-elle possible ?
- Avec une forte isolation :
 - la chaleur s'accumule dans le logement et le rafraîchissement nocturne est faible
 - le pic des températures intérieures apparaît quelques jours après le pic de températures extérieures
 - les températures intérieures nocturnes sont toujours plus chaudes que les températures extérieures nocturnes
 - les températures intérieures sont anormalement élevées
 - une faible amplitude de température entre le jour et la nuit est présente. La sensation de fraîcheur est inexistante

Cette partie n'a pas pour vocation de donner une définition et une température par appartement, elle permet de mettre en avant les différences de températures existantes entre ces logements. Apporter une analyse fondée sur la différenciation entre les températures intérieures et extérieures dans un bâtiment, lors de période caniculaire permet une représentation plus précise du phénomène caniculaire et de mieux estimer la dangerosité associée. Après avoir répondu aux hypothèses et classifié les appartements en fonction de leur ressemblance thermique et de leurs caractéristiques, des types d'appartements sont créés.

Cependant, comme le fait remarquer Foissard (2015), on peut toujours se poser la question portant sur l'incertitude liée à la mesure (le capteur est-il représentatif que quartier ou de la rue) et sur les possibles influences microlocales au moment de la mesure.

Dans cette partie, l'installation de deux campagnes de mesures est présentée. Une campagne de mesure en août 2014 et une autre en juillet 2015. Pour la campagne de 2015, cinq appartements, au cœur de Paris, sont équipés de capteurs Tinytag et 4 appartements pour celle de 2014. Les capteurs sont placés à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments, face Nord et Sud. Des hypothèses sont énoncées.

2. Campagne 2014 : analyse intra-immeuble

La forme du bâtiment, l'orientation, la taille, la localisation des fenêtres, la ventilation sont autant de paramètres influençant directement ou indirectement le confort thermique à l'intérieur. Pour analyser et mieux comprendre l'importance de ces facteurs, une première campagne de mesures a permis d'acquérir des connaissances et d'apporter des réponses à nos hypothèses de départ.

Afin de mieux exploiter les données, nous avons effectué des statistiques générales basiques pour décrire les premières tendances de nos mesures tout en comparant les températures intérieures - extérieures et les températures faces Nord-Sud sur les 8 jours. On note que ce test est uniquement valable pour les périodes estivales et pour des appartements non climatisés.

2.1. Températures extérieures

Le mois d'août 2014 est caractérisé par des températures maximales inférieures aux normales de 2 à 4°C. Les précipitations ont été abondantes (avec un cumul de 107mm) et l'ensoleillement a été inférieur à la normale. Ce mois d'août est le plus pluvieux de l'année 2014. L'été 2014 n'est pas défini comme un été caniculaire mais plusieurs constats peuvent être faits⁶⁸.

Pour l'analyse des températures extérieures, les capteurs 3, 13, 11 et 17 ont été placés dans une cour intérieure, au Nord. Ces capteurs peuvent être moins ventilés que les capteurs placés dans une rue canyon.

L'analyse jour par jour des températures extérieures montre une grande homogénéité (Fig.4.8). Les températures extérieures ont été recueillies sur la même période que les températures intérieures, soit le 3 août et le 12 août. Ce graphique représente les températures extérieures à différents étages. Le troisième étage a été testé seulement pour les températures extérieures, sur cour, côté Nord. L'homogénéité entre capteur des températures est flagrante, elles suivent toutes la même tendance. L'amplitude thermique est forte avec une différence de température entre le jour et la nuit pouvant atteindre plus de 10°C. Les températures varient de 31°C à 15°C en seulement 10 jours. L'étendue des températures est plus importante à l'extérieur qu'à l'intérieur. Cette différence de température est primordiale à prendre en compte pour le bien-être de l'habitant. Elle permet de rafraîchir les températures intérieures.

⁶⁸ Source : <http://www.meteofrance.fr> (bilan climatique de l'été 2014)

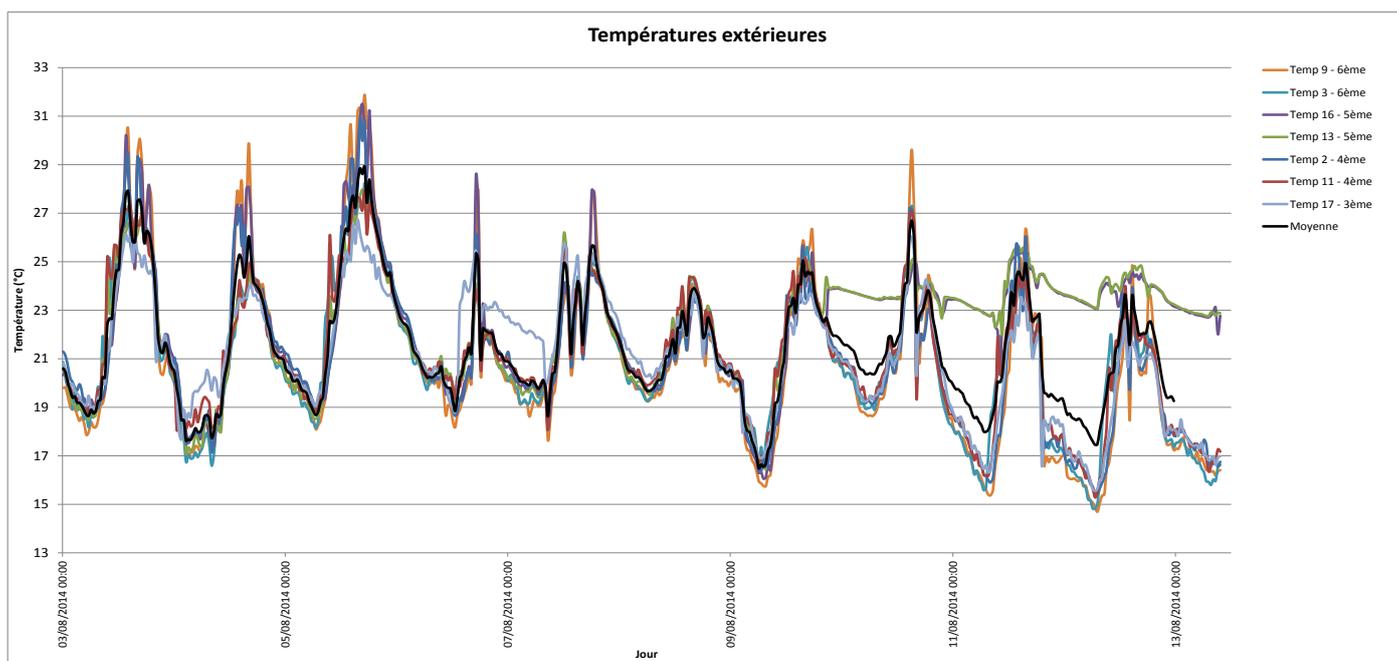


Figure 4.8 : Graphique des températures extérieures pour les appartements A, B et C pour la campagne de mesure 2014

A partir du 9 août et jusqu'à la fin de la période, on retrouve une irrégularité dans sur les capteurs 13 et 16. Ces capteurs enregistrent des valeurs élevées (de jour comme de nuit) se situant entre 23°C et 25°C contrairement aux autres capteurs. Ces classes de températures correspondent aux températures intérieures. L'habitant, contre notre volonté, a retiré les capteurs extérieurs.

On retrouve trois périodes distinctes :

- La première période débute le 3 août et se termine le 5 août. Cette phase est caractérisée par trois jours de fortes chaleurs. Les températures peuvent atteindre plus de 31°C de jour. Les amplitudes thermiques sont importantes avec plus de 10°C de différence entre la nuit et le jour, sur certains capteurs. Les températures diurnes ne descendent quasi jamais en dessous de 25°C. Les capteurs 9, 16 et 2 enregistrent les valeurs les plus élevées. Ils sont hiérarchisés en fonction de leur étage. Le capteur 9 enregistre des températures plus chaudes que le capteur 16 qui lui-même à des températures plus chaudes que le capteur 2. Ces capteurs situés au Sud perçoivent plus de rayonnement. Le capteur 17, situé côté cour (Nord) au troisième étage correspond aux températures les plus fraîches.
- La deuxième période, du 6 au 9 août, se définit par une baisse des températures et des amplitudes thermiques plus faibles. Le 6 et 7 août Paris connaît d'importantes précipitations (29,1mm le 7 août). Les températures ne vont jamais dépasser les 27°C, à l'exception du capteur 16. Les amplitudes thermiques vont être comprises entre 4°C et 6°C. Une forte chute des températures est perçue dans la nuit du 9 août. Les températures baissent de plus de 7°C en seulement sept heures. Lors de la journée du 7 août, on remarque une irrégularité dans le comportement de la température. Les températures perdent en une heure environ 3°C. Trois amplitudes thermiques vont ainsi se suivre. Cette irrégularité peut être due à des averses rapides et spontanées ou à d'autres facteurs extérieurs. Cette particularité est présente sur tous les capteurs (côté Nord comme Sud). Lors des périodes nocturnes, le capteur 9

enregistre les plus faibles températures. Dû à son élévation, les mouvements d'air sont présents et rafraîchissent plus rapidement l'air. Les capteurs localisés aux étages inférieurs recevant moins de courants, l'air se refroidit moins vite.

- La dernière phase, comprise entre le 10 août et jusqu'à la fin de l'expérimentation, se caractérise par une baisse constante des températures. Cette baisse est plus importante de nuit que de jour. Des rafales de vent de 77km/h ont été enregistrées pour la journée du 10 août. De fortes amplitudes thermiques entre la nuit et le jour, d'environ 7°C (sans prendre en compte le capteur 13) sont présentes. Une hiérarchisation des capteurs est possible. Lors du pic de températures du 10 août, les capteurs 9, puis 2 et 11, se succèdent dans la hausse des températures. En période nocturne, le capteur 9 est toujours le plus frais, suivi des capteurs 3, 2, 11 et 17.

Une hiérarchisation des températures entre étages est possible en distinguant les périodes diurnes et nocturnes. Ces périodes impactent cette hiérarchisation. En effet, de jour, le 6^{ème} étage de l'appartement A enregistre les valeurs les plus élevées. De nuit, c'est l'inverse qui se produit. Ses températures sont les plus fraîches. On retrouve la plus forte variation de températures. Une différence de température entre la rue canyon et la cour, moins exposée au soleil, entraîne une ventilation naturelle des logements la nuit et donc un rafraîchissement.

De la moyenne des températures (Tab.4.3), on constate que le capteur 16 placé au Sud de l'appartement B, avec 21,85°C a la moyenne la plus importante (en supprimant les températures irrégulières). Les moyennes les plus fraîches sont celles de l'appartement A avec 20,8°C et 20,9°C. La différence de température entre les différentes expositions (Nord-Sud) est quasi inexistante voire nulle. Il y a entre 0,1 et 0,2°C de différences entre les façades Nord et Sud. L'exposition, pour les températures extérieures, est un facteur faible dans la distribution des comportements de la température. L'altitude est le facteur influençant et distribuant les températures. Son impact même limité permet de faire une stratification verticale de la température. L'appartement D a une température nord plus fraîche que les appartements C, B et A. L'appartement A a une température plus fraîche que le C dû à la présence de mouvements d'air rafraîchissant.

	A 6 ^{ème} (dernier étage)		B 5 ^{ème}		C 4 ^{ème}		D 3 ^{ème}
Capteurs	Temp 9 s	Temp 3 N	Temp 16 s	Temp 13 N	Temp 2 s	Temp 11 N	Temp 17 N
Temp moy (°C)	20,81	20,92	21,85	21,66	20,99	21,14	21,07
Temp moy max	21,37	21,51	22,45	22,18	21,50	21,63	21,48
Temp moy min	20,29	20,42	21,66	21,42	20,51	20,67	20,69
Ecart min-max	1,08	1,09	0,8	0,76	1	0,96	0.80

Tableau 4.3 : Comparaison des températures extérieures moyennes, minimales et maximales entre le 3 et 14 août 2014

De ces premières informations, on peut écrire plusieurs constats, même en période non caniculaire :

- Les températures extérieures sont homogènes avec des fortes amplitudes thermiques,
- Une différence de températures, même minime, est visible en fonction de l'orientation (Nord/Sud) et de l'étage

- Une stratification verticale des températures extérieures est donnée
- Le brassage de l'air reste faible puisque les rues canyons participent à la mauvaise circulation de l'air et donc au rafraîchissement.

Pour mieux visualiser les pics de chaleur et de fraîcheur, une chronique horaire des températures extérieures a été réalisée (Fig.4.9.).

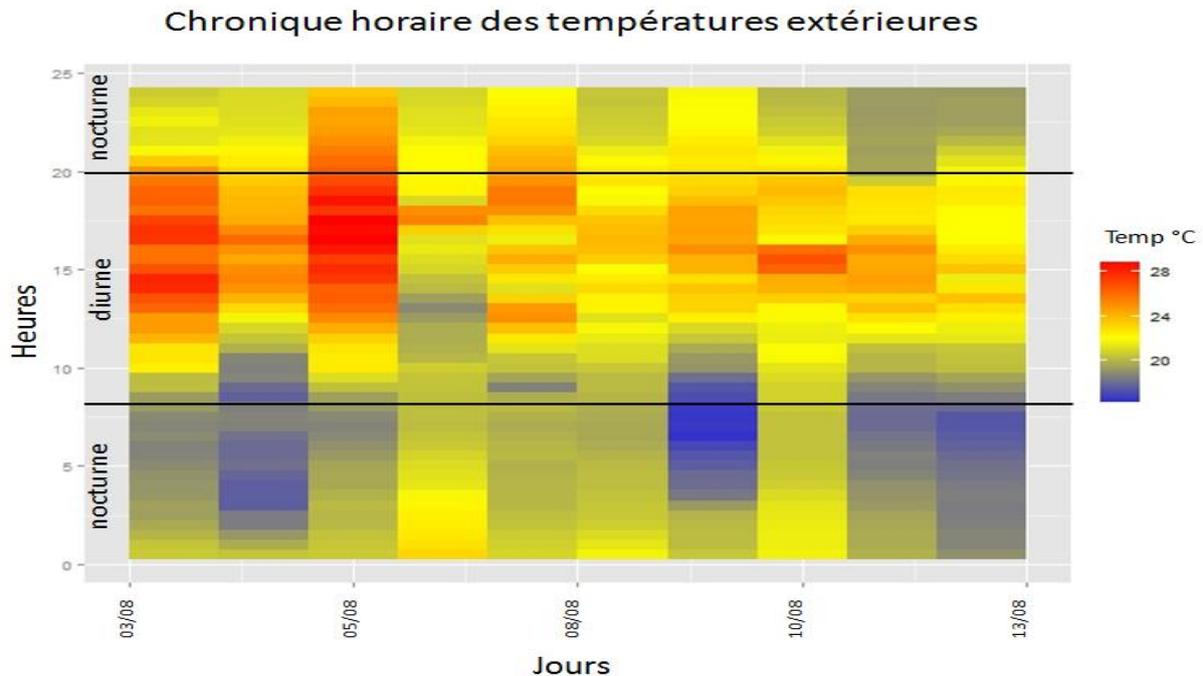


Figure 4.9 : Chronique horaire de la moyenne des températures extérieures

Cette chronique confirme nos constats et complète notre étude. On constate que lors de la première période, comprise entre le 3 août et le 5 août, les heures les plus chaudes sont comprises entre 13h et 20h. Les pics de chaleur sont aux alentours de 16-17h. Les températures atteignent les 30°C. Elles se rafraîchissent à partir de 20h avec un pic de fraîcheur à 3h. Ce pic est plus visible dans la nuit du 4 août. La température va descendre en dessous des 18°C. Sur les autres périodes, on remarque que le pic de fraîcheur se localise vers 7h.

La seconde période est caractérisée par des variations de températures dans la journée. Les températures grimpent et baissent en fonction des heures de la journée. Les températures vont varier entre 20 et 26°C. Les périodes diurnes sont relativement fraîches pour la saison estivale. Les 6 et 7 août, on constate que le pic de fraîcheur est enregistré entre minuit et 8h. La nuit du 9 août est une des plus fraîches. Entre 3h et 10h, les températures ne vont jamais atteindre les 20°C.

Sur la dernière période, on constate une nouvelle baisse des températures. Cette baisse est principalement nocturne. En journée, les températures fluctuent mais sans jamais dépasser les 27°C.

Pour l'ensemble des périodes, les fortes chaleurs se localisent entre 13h et 20h. Entre 3h et 10h apparaissent les heures les plus fraîches. La température de l'air varie avec l'alternance du jour et de la nuit mais aussi, dans la journée avec l'ensoleillement. Il est important d'indiquer que la température maximale de la journée n'est pas atteinte à midi solaire mais plutôt vers 15h solaire

(soit 17h en France, l'été). Le minimum est atteint peu après le lever du soleil. Par temps couvert, le cycle est le même mais avec une amplitude moins forte.

Le graphique sur les écarts à la moyenne vient en complément aux autres figures (Fig.4.10). De par ce graphique, on constate que les capteurs 16 et 13 enregistrent des anomalies dans leurs températures, sur les trois derniers jours. On recense un écart à la moyenne de plus de 3°C le 10 août à plus de 5°C d'écart le dernier jour.

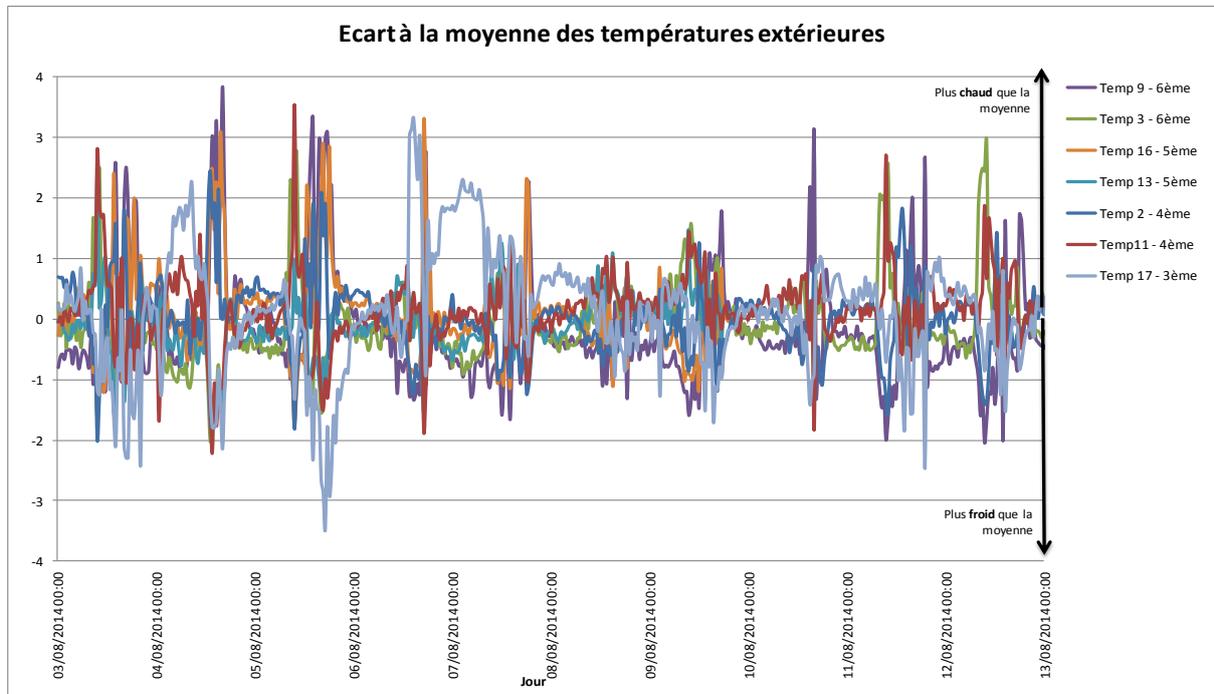


Figure 4.10 : Graphique des écarts à la moyenne des températures extérieures

On constate des cycles dans le comportement des températures. Ils sont décrits par les périodes nocturnes et diurnes. De nuit, les températures varient peu, contrairement en journée et les écarts à la moyenne sont faibles. Ils sont inférieurs à 1°C. De jour, les écarts sont plus importants avec en moyenne une différence de 2.2°C. Ainsi, de jour, les températures sont plus hétérogènes que de nuit. Elles varient moins en période nocturne.

Sur les trois premiers jours, lors des fortes chaleurs, on retrouve une opposition entre les capteurs Sud et les capteurs Nord. La journée du 5 août est un bon exemple. Les capteurs situés au Sud (2, 16, 9) de l'immeuble enregistrent des écarts à la moyenne positifs alors que les capteurs situés au nord (17, 11, 13 et 3) ont des écarts à la moyenne négatifs. A l'inverse, lors de la deuxième période, pour des températures inférieures à 26°C, les capteurs placés au Sud mémorisent des écarts à la moyenne négatifs et ceux au Nord ont des écarts positifs. C'est aussi pendant cette période que de faibles écarts à la moyenne sont enregistrés. Ils sont quasi toujours inférieurs à 1°C. Toutes les températures enregistrées, sur ces deux jours, sont très proches de la moyenne.

Le capteur 17 correspond à une tendance négative de la moyenne. A l'inverse du capteur 9, enregistre des écarts négatifs. Cela est visible sur la plupart de la période.

Pour rassembler les températures extérieures, nous avons eu recours à une CAH. Elle s'exprime sous la forme d'une matrice de distances⁶⁹. Pour notre CAH, nous utilisons la distance euclidienne². Elle s'exprime par l'équation suivante pour des vecteurs de dimensions n :

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (21)$$

La CAH rassemble les individus de manière itérative. Nous définissons le nombre de classes⁷⁰. Les températures les plus « ressemblantes » sont réunies dans une même classe homogène (Fig.4.11)

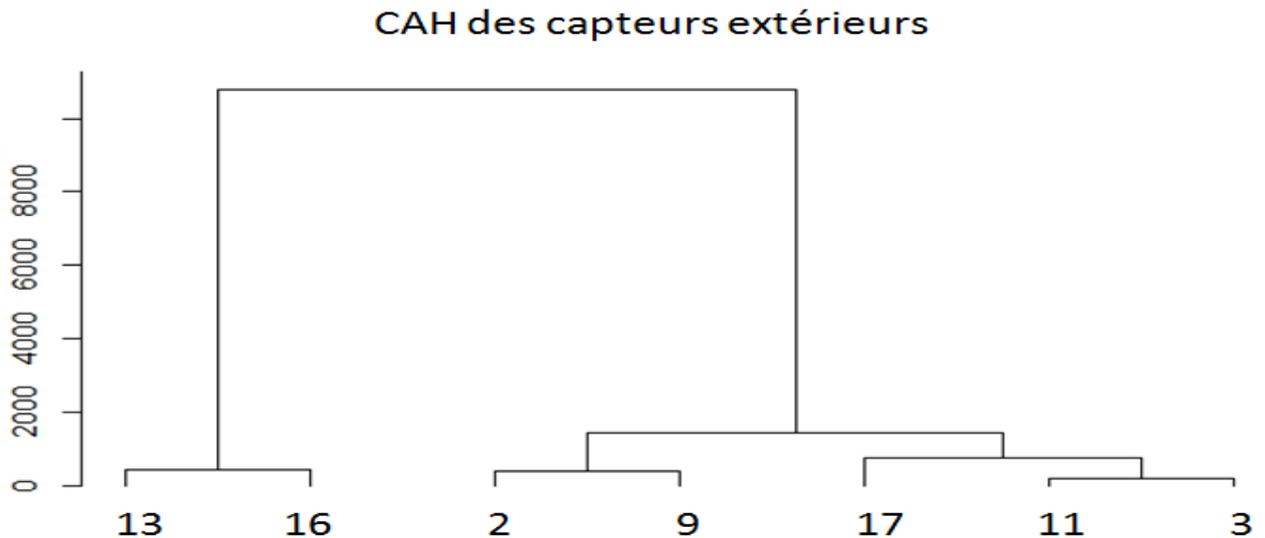


Figure 4.11 : Dendrogramme pour les températures extérieures

La classification ascendante hiérarchique permet de confirmer nos constats et de mettre en évidence les capteurs « atypiques » et les capteurs similaires. Cette classification contient deux partitions. La première regroupe les capteurs dits « atypiques » c'est-à-dire les capteurs 13 et 16, ils se trouvent sur la même partition dû à leur forte ressemblance et à leur distinction par rapport aux autres capteurs. Les capteurs 13 et 16 situés tous deux au 5^{ème} étage ont été impactés par un facteur extérieur autre que celui de l'exposition ou du gradient altitudinal. La deuxième, quant à elle, se divise en deux nouvelles partitions. La première partition englobe les capteurs positionnés sur la façade Sud, c'est à dire les capteurs 2 et 9. La deuxième, elle, correspond aux capteurs placés sur la façade opposée, Nord. Ce sont les capteurs 17,11 et 3.

Le capteur 17, de par ses quelques différences de températures notamment sur les journées du 6 et 7 août est isolé des capteurs positionnés au Nord.

Ainsi, on remarque que le facteur exposition joue un rôle dans la distribution des températures puisque les capteurs sont divisés, en deux partitions distinctes, en fonction de leur emplacement Nord ou Sud. Ce dendrogramme permet de mettre en évidence le facteur de l'orientation

⁶⁹ Elle exprime la distance existant entre chaque individu pris deux à deux. Plus les données sont dissemblables, plus la distance sera importante.

⁷⁰ Pour toutes les autres CAH réalisées, nous utilisons les mêmes caractéristiques : distance euclidienne et le nombre de classes est aléatoire en fonction des données.

contrairement aux autres graphiques où le facteur principal de distinction est la stratification verticale.

L'étude des températures intérieures devient importante puisque durant les nuits estivales, lorsque la température extérieure est généralement inférieure à la température à l'intérieur du bâtiment, il est possible d'appliquer une ventilation naturelle. L'air ventilé favorise par la convection la dissipation de la chaleur stockée dans les parois en l'évacuant par l'extérieur. Cette ventilation permet de réduire les pics de chaleur dans le logement.

2.2. Températures intérieures

L'analyse jour par jour des températures intérieures montre une grande variabilité spatiale (Fig.4.12). D'après le graphique, on remarque une différence de température entre les appartements du même immeuble.

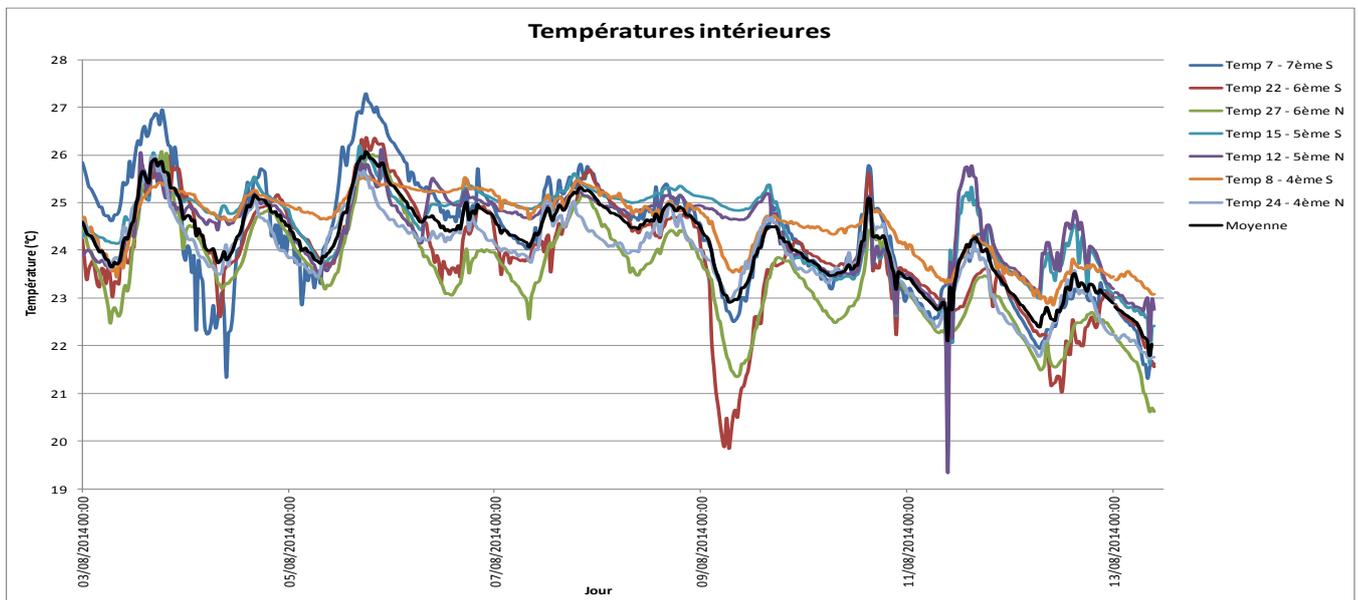


Figure 4.12 : Graphique des températures intérieures pour les appartements A, B et C d'un même immeuble pour la campagne de mesure 2014

Le graphique décrivant les températures intérieures dans les trois appartements nous permet de montrer qu'il existe des comportements de températures différents en fonction de l'exposition et de l'étage. On constate une grande hétérogénéité entre les températures même si celles-ci suivent les mêmes tendances. Dans un même appartement les températures varient de plusieurs degrés. L'appartement A, durant la nuit du 3 juillet, enregistre des températures de 24,7°C (capteur 7), 23°C (capteur 22) et de 22,5°C (capteur 27). En fonction de l'orientation et du duplex, la température varie, à la même heure de plus de 2°C. L'étage joue un rôle aussi dans la distribution verticale des températures. Pour la plupart des données, pendant les périodes nocturnes, les appartements les plus élevés enregistrent les amplitudes les plus fortes et les températures les plus basses. Les capteurs intérieurs de l'appartement B, 15 et 12, sont très similaires et varient peu entre eux. Les températures sont, pour la quasi-totalité de la période, supérieures à la moyenne. Le capteur 8 enregistre les plus faibles amplitudes thermiques entre le jour et la nuit. Ce capteur donne des températures toujours plus élevées que la moyenne des autres capteurs et varie peu. On suppose

que l'emplacement de ce capteur, au 3^{ème} étage bénéficie d'une ventilation naturelle plus faible que les capteurs placés aux derniers étages. Les capteurs 22 et 27 relèvent des températures faibles surtout durant la période nocturne. La nuit du 9 août est un bon exemple. Le capteur 22, situé dans une pièce au Nord ressent des températures plus fraîches et une meilleure ventilation de l'air. On retrouve une forte baisse des températures pour le capteur 12 avec une chute d'environ 3°C pour la nuit du 11 août. On suppose que cela résulte d'un facteur extérieur lié certainement à la personne occupant le logement.

De ce graphique, on constate trois périodes :

- La première période est définie par une grande variabilité des températures. De fortes amplitudes thermiques entre le jour et la nuit et entre étages sont visibles. Ces amplitudes vont de 2,3°C à plus de 6°C pour le capteur 7, situé au duplex de l'appartement A. Les températures diurnes sont supérieures à 24°C et les températures nocturnes inférieures à 24°C (à l'exception des capteurs 8, 12 et 15). Durant cette période les températures sont assez homogènes entre elles où les capteurs 8, 12 et 15, se distinguent des autres. Le capteur 7 enregistre les valeurs les plus élevées pouvant atteindre les 27°C de jour. On suppose que l'emplacement du capteur 7 et l'effet cheminée (la chaleur monte) s'additionnent pour caractériser les fortes températures enregistrées dans cette pièce. Les températures pendant cette phase sont les plus chaudes
- La seconde période, à partir du 7 août, est caractérisée par des températures variant peu avec un delta de 1,2°C et une faible amplitude thermique inférieure à 2°C. Une hiérarchisation entre étages est possible. Les capteurs 22 et 27 sont les plus frais, suivis des capteurs 12 et 15 puis du capteur 8. Le troisième étage est le plus chaud. Le capteur 8 reste très stable. Il enregistre les plus faibles amplitudes thermiques entre le jour et la nuit, avec moins 0,7°C de différence. Cette période, avec une température moyenne de 24,5°C, peut-être préoccupante pour la santé humaine. L'air ne se refroidissant pas durant les périodes nocturnes empêche le corps de récupérer et peut engendrer des coups de chaleur.
- La dernière période, commençant le 9 août pour se terminer le 14 août, indique une baisse constante des températures et une hétérogénéité des températures (à l'exception du capteur 8). La nuit du 9 août est la plus fraîche de la période. Le capteur 22 enregistre une température de 20°C contre 24,5°C, 24h plus tôt.

De par ce graphique, une hiérarchisation des températures entre étages est possible en distinguant les périodes diurnes et nocturnes. Ces périodes impactent cette hiérarchisation. En effet, de jour, le 6^{ème} étage enregistre les valeurs les plus élevées. De nuit, l'inverse se produit, ses températures sont les plus fraîches. De nuit, le 6^{ème} étage, par son orientation et sa hauteur a plus de mouvements d'air et une meilleure aération et ventilation est possible. De jour, le rayonnement solaire direct est plus important que sur les autres étages. Le quatrième étage est le contraire du 6^{ème} étage. Il enregistre ses températures les plus faibles durant les périodes diurnes et les plus élevées, en période nocturne. Au niveau des températures, le 5^{ème} étage se situe entre ces deux étages. La ventilation joue donc un rôle dans le rafraîchissement des appartements (Jentsch *et al.*, 2008). On peut considérer que si les appartements ont les mêmes ouvertures, les appartements les plus élevés sont plus aérés pendant la nuit en zone urbaine dense.

De la donnée brute à la dangerosité

Concernant les températures moyennes (jour/ nuit confondues) de chaque capteur (Tab.4.4), les pièces orientées Sud, enregistrent les températures les plus chaudes. Une différence de 0,6°C et 0,7°C est notée pour les appartements C et A. Pour l'appartement B, cette différence est plus faible avec moins de 1°C entre les pièces orientées Nord et Sud.

Le capteur 8, placé au Sud de l'appartement C, atypique durant cette période, enregistre la moyenne la plus élevée avec 24,59°C. Au contraire, c'est au dernier étage que la moyenne des températures est la plus faible avec 23,6°C. Toujours au 6^{ème} étage, on remarque une différence de 0,5°C à 0,8°C entre le capteur placé dans le duplex de l'appartement (7^{ème} étage) et les deux autres capteurs. La chaleur s'accumule donc sous les toits. Le capteur 27, situé au Nord, est très bien ventilé puisque durant les périodes nocturnes, la température baisse de plusieurs degrés et, est régulière sur toute la période. Au 5^{ème} étage, la moyenne des températures des deux capteurs est très similaire avec moins d'un dixième d'écart entre les deux.

Pour compléter la description des températures intérieures, un écart min-max de températures est calculé afin de mieux donner à voir la dispersion des valeurs (Tab. 4.4).

La différence entre les températures minimales et maximales diffère en fonction de l'appartement. Au 5^{ème} étage, cette différence est très faible avec moins de 0,3°C entre les températures minimales et maximales (pour les deux capteurs). La différence la plus élevée est au 6^{ème} étage avec 0,39°C pour le capteur 7. Ce capteur placé en duplex est soumis à de fortes variations de température. Le capteur 12 relève du plus grand écart min-max sur la période avec une différence de plus de 6°C survenue le 11 août.

Capteurs	A 6 ^{ème} (dernier étage)			B 5 ^{ème}		C 4 ^{ème}	
	Temp 7	Temp 22	Temp 27	Temp 12	Temp 15	Temp 8	Temp 24
Temp moy (°C)	24,37	23,91	23,61	24,48	24,56	24,59	23,96
Temp moy max	24,54	24,04	23,68	24,58	24,63	24,65	24,03
Temp moy min	24,15	23,76	23,53	24,36	24,47	24,52	23,90
Ecart min-max	0,39	0,28	0,15	0,21	0,17	0,12	0,13

Tableau 4.4 : Comparaison des températures intérieures moyennes, minimales et maximales entre le 3 et 14 août 2014

De ces données, on peut écrire plusieurs constats, même en période non caniculaire :

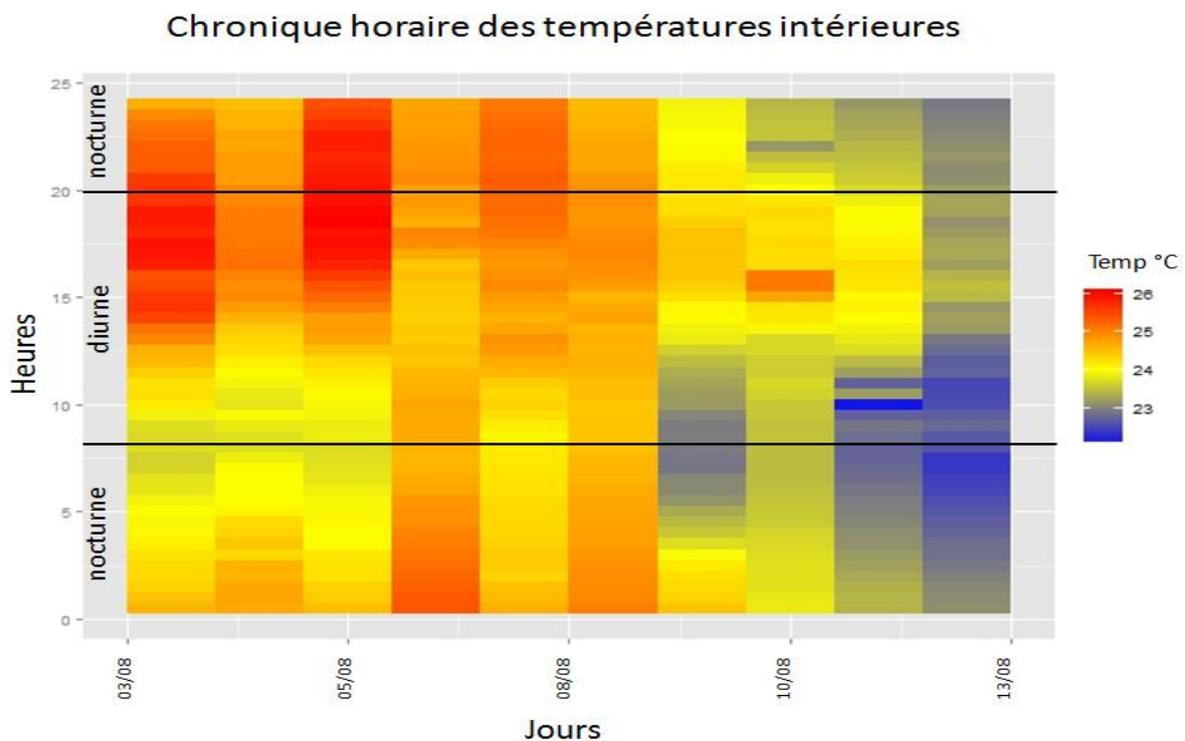
- les températures intérieures et par conséquent le confort de l'habitant est différencié en fonction de l'étage et de son orientation,
- la ventilation naturelle joue un rôle dans le comportement des températures. Le quatrième étage est le moins ventilé.

En période estivale, pour avoir un certain confort thermique, une des solutions est l'utilisation de climatiseurs. Ces appareils participent aux dépenses énergétiques et augmentent le phénomène d'ICU. D'autres alternatives plus respectueuses de l'environnement, moins coûteuses et naturelles existent pour rafraîchir l'intérieur. La ventilation par l'ouverture des fenêtres (création d'un courant d'air) permet de rafraîchir l'intérieur si l'air extérieur est plus frais. Cette ventilation est fonction de l'inertie du bâtiment et des protections solaires.

La chronique horaire (Fig.4.13) représente la moyenne des températures intérieures des capteurs du 3 au 13 août 2014. Elle permet de confirmer la présence des 3 périodes décrites précédemment et la baisse des températures à partir du 9 août. Sur les trois premiers jours, on note que les températures sont les plus chaudes de la période avec une faible baisse le deuxième jour. On remarque deux pics de températures : le 3 et 5 août entre 15h et 22h. Les heures les plus chaudes se localisent entre 14h et 22h avec un pic à 17h. Les températures les plus fraîches se localisent après 5h. Elles varient de 23,5°C à plus de 26°C. A partir du 7 août, les températures se stabilisent, avec de faibles amplitudes thermiques. Elles varient aux alentours des 24-25°C (jour comme nuit). Les températures les plus chaudes se concentrent aux alentours de minuit et une baisse est observée à partir du 9 août. Pendant cette phase, on constate que les températures les plus chaudes sont situées vers 15-16h et les températures les plus fraîches se localisent entre 3h et 10h avec un pic de fraîcheur à 7h. On retrouve donc une différence de comportement des températures en fonction des différentes phases décrites. Le point commun entre toutes ces périodes est l'intervalle entre les heures les plus chaudes et les plus fraîches :

- les heures les plus chaudes se localisent entre 15h et 22h soit 13h-20h (heure solaire)
- les heures les plus fraîches se localisent entre 03h et 10h soit 01h-8h (heure solaire)

La chronique nous permet de mieux visualiser les cycles diurnes et nocturnes sur la période et la distribution des températures à chaque heure. Les heures les plus chaudes et les plus fraîches sont facilement visibles. Ainsi, même dans une période de non canicule, il est possible de distinguer les heures les plus chaudes et les plus fraîches. Il est important de signaler aussi que les températures intérieures restent élevées pour la saison. Le danger n'est donc pas uniquement présent durant les



périodes de canicule.

Figure 4.13 : Chronique horaire de la moyenne des températures intérieures

L'analyse des écarts à la moyenne des températures intérieures, confirme l'hétérogénéité des températures et la particularité de certains capteurs. On constate que les capteurs 22 et 27 se situant au dernier étage ont des écarts négatifs à la moyenne sur la quasi-totalité de la période (Fig.4.14). Ces écarts peuvent atteindre les 3°C. Les capteurs 7 et 8 ont des écarts positifs. Ils se situent côté sud où la ventilation naturelle est faible. Le capteur 7, lui, enregistre le plus faible écart à la moyenne avec en moyenne 0.1°C de différence même si sur les premiers jours, on constate un écart de plus de 1°C par rapport à la moyenne. Le capteur 27 enregistre l'écart à la moyenne le plus élevé avec une différence moyenne de -0.6°C, conforté à une baisse significative des températures extérieures. Certains appartements et pièces ont tout de suite suivi cette baisse alors que d'autres ont été plus longs. La nuit du 9 août est spéciale puisqu'on retrouve une différence de plus de 5°C entre les capteurs. Les capteurs 15 et 12 ont une différence de 2°C et le capteur 22 d'environ 3°C. En fonction des appartements et de leurs caractéristiques les températures fluctuent énormément. Ainsi, même à l'intérieur d'un même immeuble, d'un même appartement, le comportement thermique des logements va jouer un rôle dans la répartition des températures.

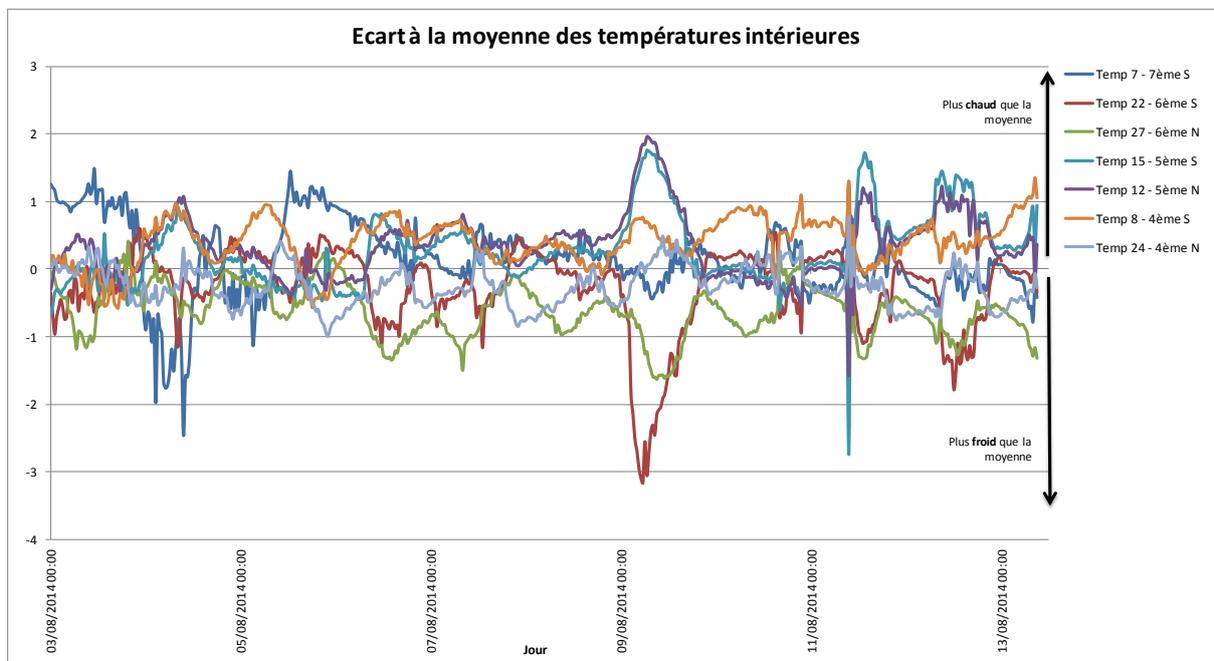


Figure 4.14 : Graphique des écarts à la moyenne des températures intérieures

Cependant, il est important de noter que les capteurs positionnés au Nord ne relèvent pas automatiquement d'un écart à la moyenne négatif et inversement. En effet, le capteur 12, positionné au 5^{ème} étage, au Nord, a des écarts à la moyenne positifs sur la quasi-totalité de la campagne. Le capteur 22, placé au Sud, enregistre des écarts à la moyenne négatifs, avec une différence moyenne de -0.3°C.

Enfin, les capteurs 12 et 15 sont très similaires par rapport à leur écart à la moyenne. L'écart est de 0.3°C. Ces capteurs se situent tous deux au étage, 5^{ème}. Sur ce pallier, l'exposition et l'agencement ne permettent pas de dissocier le côté Nord du côté Sud. La différence entre les deux est trop faible. On

peut suspecter une faible pratique d'ouverture et fermeture des fenêtres pour les habitants du 4^{ème} étage.

Les températures relevées montrent une variabilité récurrente journalière et une intensité plus forte la nuit que le jour. Cette campagne de mesure confirme la variabilité des températures. Les pratiques d'isolation et de matériaux de chaque pièce et la présence de phénomènes irréguliers comme l'ouverture des fenêtres faisant un appel d'air démontre les fluctuations des températures. De ces données, on a constaté que d'une pièce à l'autre, d'un logement à l'autre, la température gagne ou perd quelques degrés. Les profils de températures sont différents et mettent en évidence une différence significative.

Pour différencier les températures intérieures, nous avons fait une CAH (Classification Ascendante Hiérarchique) à partir des températures enregistrées. Cette classification permet de répartir les capteurs en fonction de leur similarité. Cette méthode aboutit à un emboîtement de partitions visualisables graphiquement par un dendrogramme (Fig.4.15).

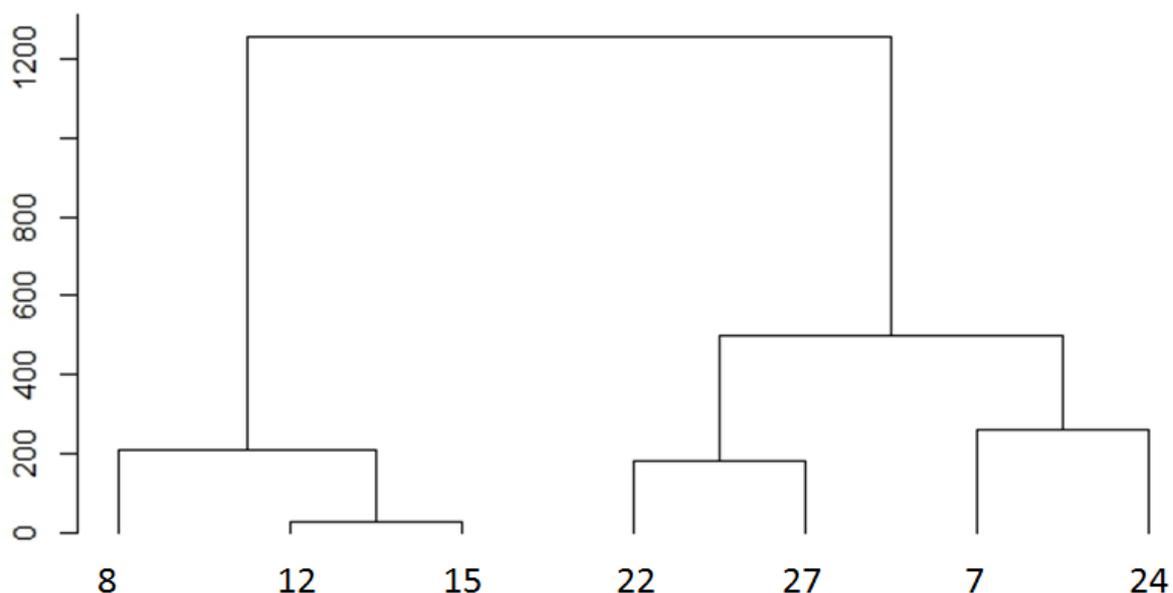


Figure 4.15 : Dendrogramme des températures intérieures

La classification ascendante hiérarchique confirme nos hypothèses et constats. Deux classes ont été nettement segmentées en fonction de leurs caractéristiques (valeurs des températures). Ces deux branches sont elles-mêmes divisées en deux autres classes :

- Dans la première branche, on retrouve des températures élevées et constantes sur toute la période avec les capteurs 8, 12 et 15. Leurs températures sont en moyenne supérieures à 24,5°C. Le capteur 8, enregistrant de fortes températures sur toute la période se trouve seul sur une classe dû à ses particularités. Tout comme pour les écarts à la moyenne, on constate que les capteurs 12 et 15 se regroupent sur la même branche dû à leurs fortes similitudes dans le comportement des températures.
- Sur la deuxième branche, on retrouve les capteurs 22, 27, 7 et 24. Ils sont définis par des températures plus fraîches et/ou atypiques. Les capteurs 7 et 24 sont sur la même branche. Malgré leur différence de température, la ressemblance entre le comportement de leurs

De la donnée brute à la dangerosité

températures fait qu'ils se regroupent. Ces deux capteurs sont peu ventilés dû à leur emplacement. Les capteurs 22 et 27 forment une autre classe.

L'orientation joue un rôle faible dans cette répartition. Le dendrogramme met en avant, aussi, la stratification verticale. Les capteurs 22, 27 et 7, se situant au dernier étage forment la même classe. Ce constat est le même pour les capteurs 12 et 15, se situant tous les deux au 5^{ème} étage. L'exception se fait pour les capteurs 24 et 8. Ils ont deux comportements bien distincts et cela se répercute dans la classification. Malgré leur faible ventilation naturelle, l'orientation joue un rôle plus important dans la répartition de ces deux capteurs.

2.3. Influence des températures extérieures sur celles intérieures

Pour mieux comprendre le comportement des températures intérieures et l'influence des températures extérieures sur celles intérieures, une analyse conjointe est réalisée. La détermination d'une corrélation reste hypothétique. Ce nouveau jeu de graphique va permettre de consolider et déterminer si une corrélation existe entre les deux températures. Si elle existe, il est nécessaire d'évaluer l'impact des températures extérieures sur les températures intérieures et inversement.

Le premier graphique met en relation les températures intérieures et extérieures par étage et selon l'orientation (Fig.4.16).

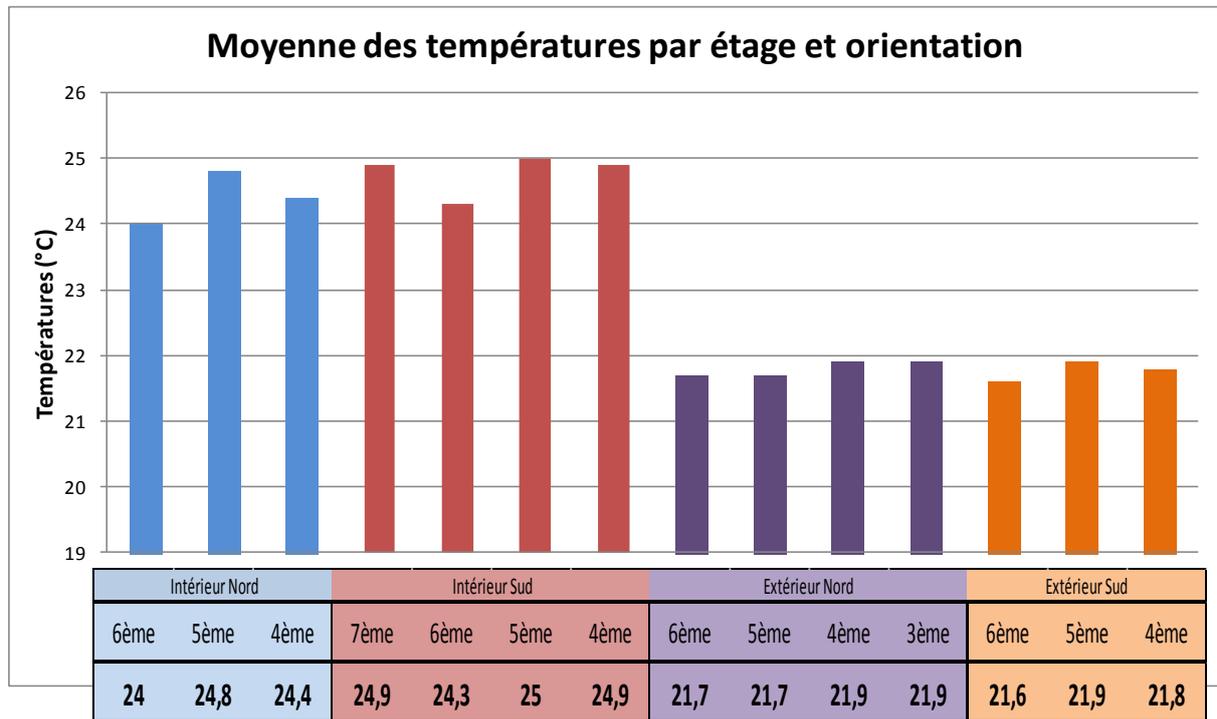


Figure 4.16 : Graphique de la moyenne des températures par étage et selon l'orientation pour la période du 3 au 14 août 2014

Ce premier résultat, permet de montrer la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. L'écart de température est de 2,8°C. Les températures intérieures moyennes ont une température moyenne de 24,6°C. La moyenne des températures extérieures est de 21,8°C. La différence de température entre l'intérieur et l'extérieur permet de déduire que la ventilation naturelle joue un rôle dans le rafraîchissement des températures intérieures. Cette déduction sera mise en avant dans les prochains graphiques.

Le facteur de l'altitude (la hauteur du bâtiment) est mis en avant dans ce graphique. Les températures intérieures moyennes Nord et Sud les plus fraîches sont celles du dernier étage (6^{ème}). Le même constat est visible pour les températures extérieures moyennes Nord et Sud. Le 5^{ème} étage est celui réunissant les températures les plus élevées à une exception près (extérieur Nord). Une stratification verticale est présente. Le 5^{ème} étage est le plus chaud, suivi du 4^{ème}, puis du 3^{ème} et enfin du 6^{ème}. Le 5^{ème} étage est plus chaud du fait que les fenêtres ont été moins ouvertes.

Concernant le facteur de l'orientation, les températures extérieures sud sont très largement plus chaudes que les températures extérieures nord de 0,4°C. Pour les températures intérieures cette différence est quasi nulle.

De ce premier graphique, on note que l'orientation et l'altitude ont des impacts différents, ou non selon qu'on soit à l'intérieur ou à l'extérieur de l'appartement. Ils sont étudiés plus en détails dans la partie suivante.

2.3.1. Orientation

Pour décrire plus précisément ces températures, une analyse descriptive vient en complément aux graphiques des températures (Tab.4.5 et 4.6).

Etage	Extérieur Sud			Intérieur Sud			
	6ème	5ème	4ème	Medz	6ème	5ème	4ème
Capteurs	9	16	4	7	22	15	8
Minimum	15,74	16,06	16,36	21,33	19,84	23,72	23,44
Maximum	31,88	31,5	30,9	27,28	26,45	26,76	25,56
Variance (n-1)	11,04	9,13	7,64	1,27	1,39	0,2	0,21
Ecart-type (n-1)	3,32	3,02	2,77	1,13	1,18	0,45	0,46

Tableau 4.5 : Description des températures sud

Etage	Extérieur Nord				Intérieur Nord		
	6ème	5ème	4ème	3ème	6ème	5ème	4ème
Capteurs	3	13	11	17	27	12	24
Minimum	16,38	16,46	16,73	16,91	21,34	23,47	22,96
Maximum	28,24	28,29	27,93	26,73	26,34	26,68	26,66
Variance (n-1)	6,8	6,45	5,93	4,32	0,93	0,26	0,35
Ecart-type (n-1)	2,61	2,54	2,44	2,08	0,97	0,51	0,6

Tableau 4.6 : Description des températures nord

Pour les températures extérieures sud, on constate que le 6^{ème} étage est celui variant le plus. On trouve une différence de 16,1°C entre son minimum et son maximum. Le 4^{ème} étage enregistre la température maximale la plus fraîche sur ces 8 jours avec 30,9°C. A l'inverse, le 6^{ème} étage rassemble les températures sud les plus basses pour l'intérieur. Une différence de 3,9°C et 3,6°C est notée avec le 5^{ème} et 4^{ème} étage. Il fait plus frais au dernier étage. Pour les températures maximales intérieures sud, les températures sont très proches entre elles. Une différence moyenne de 4°C est observée entre les températures extérieures et intérieures sud. D'une orientation à l'autre, le bâtiment se comporte thermiquement de la même manière puisque les températures intérieures nord, les plus fraîches sont au 6^{ème} étage et les plus chaudes au 5^{ème} étage. Pour l'extérieur nord, le 6^{ème} étage enregistre la température minimale la plus fraîche avec 16,4°C. Les températures les plus élevées sont notées pour le 3^{ème} étage avec 16,9°C. Cependant, ce même palier enregistre la plus basse température pour son maximum. La différence de température entre l'intérieur et l'extérieur, face nord, est moins élevée que la face sud. Cette différence est de moins de 3°C.

Concernant la variance, elle permet de caractériser la dispersion d'un échantillon. On constate qu'elle est élevée pour les données extérieures (c'est-à-dire des valeurs très écartées). Les capteurs avec une variance forte sont ceux du 6ème étage. Pour les capteurs intérieurs, on retrouve une variance proche de zéro (toutes les valeurs sont presque identiques). Cependant, on constate que les capteurs avec une variance plus forte que les autres sont ceux du 6ème étage. Le même constat se voit pour les écarts-types puisque ceux-ci représentent la racine carrée de la variance.

Un graphique représentant les températures intérieures et extérieures est réalisé afin de mettre en évidence ou non la corrélation et l'influence des températures extérieures sur celles intérieures (Fig.4.17).

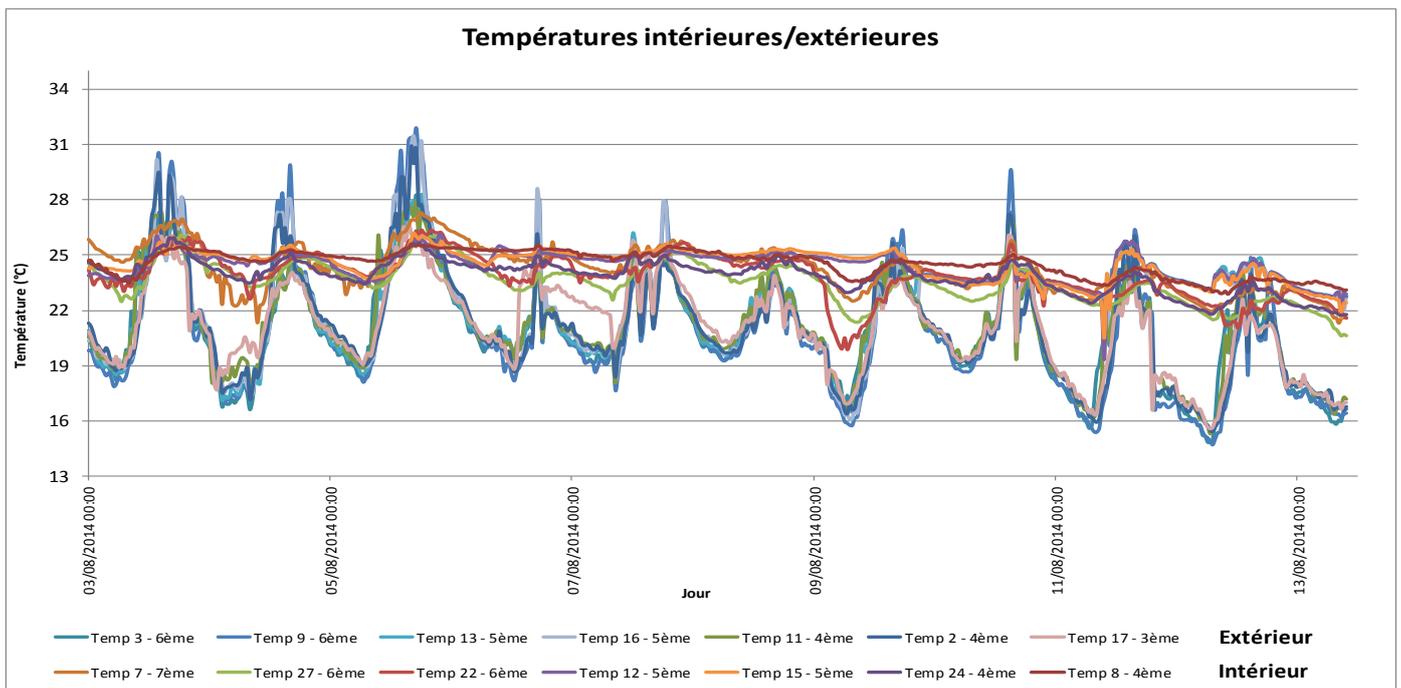


Figure 4.17 : Graphique représentant les températures intérieures et extérieures sur la période du 3 au 14 août 2014

Les températures intérieures suivent le même rythme et les mêmes cycles que les températures extérieures. Cela est d'autant plus visible lors des fortes chaleurs (ici, du 4 au 6 août). Lorsque la température extérieure commence à diminuer, à partir du 6 août, les températures intérieures de jour correspondent aux températures extérieures de jour. Il fait aussi chaud à l'intérieur du bâtiment qu'à l'extérieur. L'amplitude thermique est plus importante à l'extérieur qu'à l'intérieur du bâtiment. Lors des fortes chaleurs, les amplitudes extérieures dépassent les 10°C contrairement aux amplitudes des températures intérieures. Les températures intérieures sont plus stables et entraînent par conséquent un risque aggravant pour les habitants.

Sur la journée du 8 août, les températures intérieures sont plus élevées que les températures extérieures, de jour. Cela est dû à l'accumulation de chaleur des logements et à la forte inertie des matériaux. La chaleur est « capturée » par le logement et son isolation. Il faut plusieurs jours successifs de températures fraîches pour que l'habitation se rafraîchisse à son tour. On note que les températures nocturnes intérieures se rafraîchissent moins vite que les températures nocturnes extérieures. La différence de températures entre les deux est élevée alors que de jour, cette différence est plus faible, ne dépassant pas plus de 2°C (sauf par temps de fortes chaleurs) contre

De la donnée brute à la dangerosité

plus de 4°C de nuit. Ainsi, on peut dire que lorsque la température extérieure ne dépasse pas les 27°C, la différence avec les températures intérieures est faible. En période de forte chaleur, la différence de jour est plus importante mais reste inférieure à celle de nuit.

De ce graphique, on remarque que la différence de températures extérieures entre le Nord et le Sud est plus importante le jour que la nuit (de 1,5°C à 3,5°C le jour et de 0,4°C à 0,6°C la nuit) mais toutes deux sont corrélées entre elles.

Les températures extérieures baissent par phase durant la période nocturne. Ce déclin est lent et progressif tout comme les températures intérieures. A partir de 10h, les températures extérieures croissent très rapidement. Elles gagnent plusieurs degrés en quelques heures. Le 5 août, le capteur 9 passe de 21,4°C à 10h à 28,6°C à 13h soit plus de 7°C en seulement trois heures.

On remarque aussi, que les températures extérieures sont plus homogènes que les températures intérieures. Cela signifie que la température extérieure n'impacte pas de la même manière la température intérieure. Cet impact est différent en fonction de l'étage, de la pièce et/ou de l'exposition de celle-ci.

Les températures intérieures et extérieures sud les plus fraîches sont celles du 6^{ème} étage (moyenne totale jour/nuit) c'est-à-dire du dernier étage ce qui n'est pas le résultat auquel on s'attend à priori. Cela est probablement dû à une meilleure ventilation naturelle. Nous souhaitons vérifier ceci l'été 2015. Le 6^{ème} est celui qui a les plus grandes amplitudes thermiques entre le jour et la nuit (plus ou moins 10°C de différence pour les températures extérieures et entre 2 et 4°C pour les températures intérieures).

Les différences de températures extérieures entre les étages sont plus importantes la nuit que le jour. Le 6^{ème} étage est plus frais que le 5^{ème} qui est plus frais que le 4^{ème} (variation entre 0,4°C et 1°C).

Un déphasage⁷¹ est présent. Si on regarde la journée du 5 août, journée la plus chaude sur la période, on constate que le capteur 9, placé à l'extérieur, côté sud, a son maximum de température à 17h10 avec 31,9°C (Tab.4.7). Les capteurs placés à l'intérieur côté sud (7 et 22) ont leurs maximums de températures une heure plus tard, soit à 18h avec réciproquement 27,2°C et 26,4°C puis les températures diminuent au fil des heures. Ce déphasage, lié à l'inertie thermique des matériaux, peut durer de quelques minutes à quelques heures. Ce phénomène montre la capacité du logement à emmagasiner la chaleur de l'extérieur.

Heures	Temp 7 (Int S 6 ^{ème})	Temp 22 (Int S 6 ^{ème})	Temp9 (Ext S 6 ^{ème})
05/08/2014 16:40	26,71	25,72	30,82
05/08/2014 17:10	26,87	25,84	31,88
05/08/2014 17:40	27,12	25,90	30,51
05/08/2014 18:10	27,12	26,36	30,62
05/08/2014 18:40	27,13	26,23	29,73

Tableau 4.7 : Comparaison des températures entre capteurs

⁷¹ La différence de temps entre le moment où la température extérieure atteint son maximum et la température intérieure, aussi. C'est la capacité à différer les variations de températures.

2.3.2. Par appartement

Sur cette période non caniculaire, pour l'appartement A, on remarque que les températures intérieures atteignent très rarement le seuil des 26°C (Fig.4.18). Les températures intérieures sont comprises entre 27,2°C (pour le capteur 7) et jusqu'à 19,8°C (pour le capteur 22). Le capteur 7, placé en mezzanine enregistre toujours des valeurs supérieures aux autres capteurs, tout comme la campagne de 2015. L'orientation a un impact sur les températures extérieures puisque les températures sont plus chaudes au Sud qu'au Nord, même en période non caniculaire. La nuit, les températures extérieures se confondent.

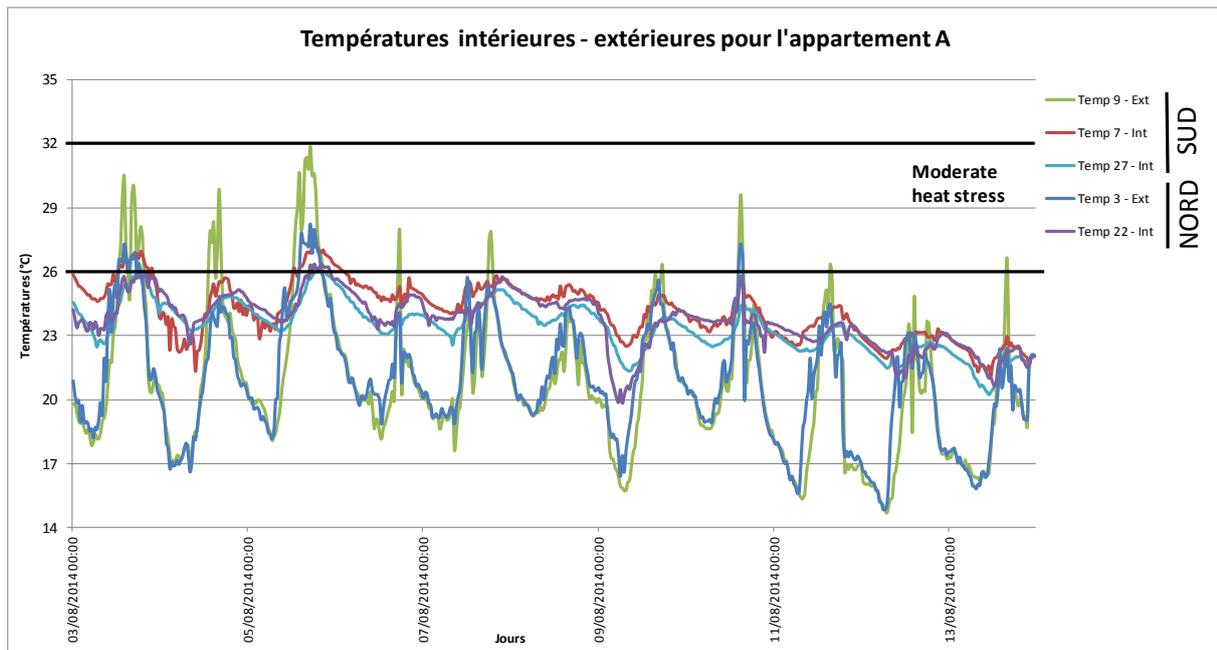


Figure 4.18 : Températures extérieures-intérieures pour l'appartement A, campagne 2014

De ces remarques, on peut dire que les températures extérieures influencent les températures intérieures puisque le comportement des températures intérieures est similaire aux comportements des températures extérieures mais avec des différences de températures.

Le phénomène de déphasage est également présent mais avec un temps plus large. Si on regarde les journées du 4 et du 5 juillet, les pics de températures extérieures s'enregistrent à 16h alors que pour les températures intérieures, les pics se localisent vers 17h30, soit plus de 1h30 de différence.

Pour l'appartement B, on remarque que les températures intérieures ont des valeurs très proches et stables sur toute la période (Fig.4.19). Une faible amplitude diurne/nocturne est constatée entre la nuit et le jour contrairement aux températures extérieures. Les températures extérieures impactent très faiblement les températures intérieures. A partir du 9 août, les données extérieures ne sont plus disponibles.

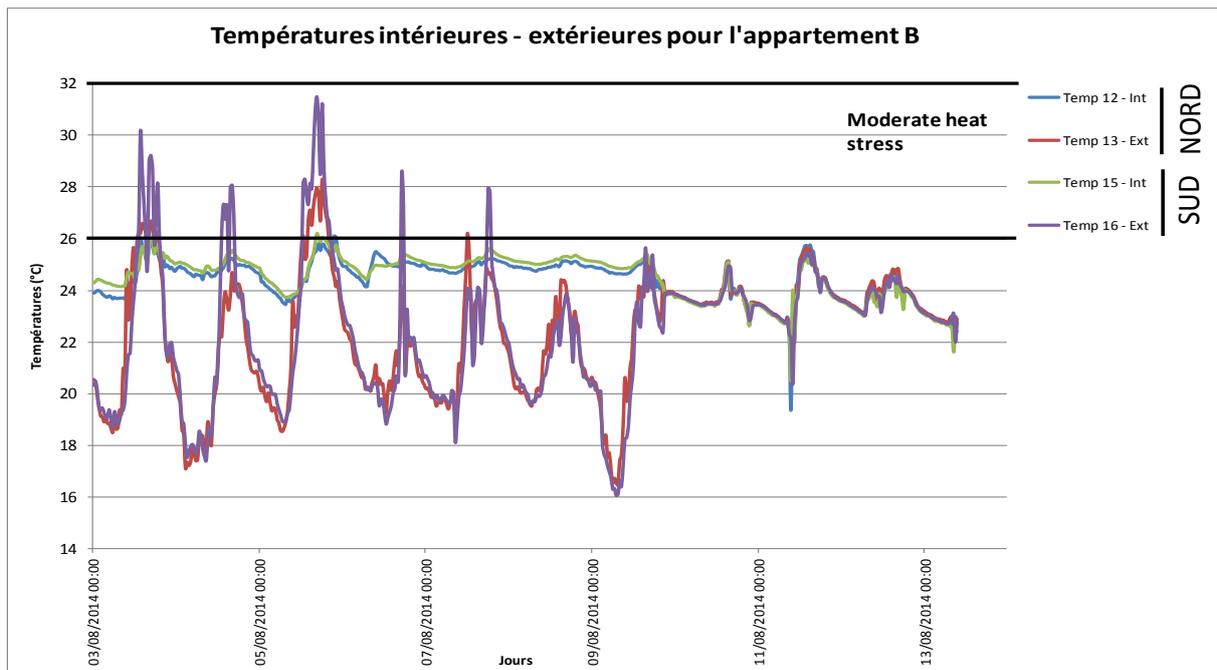


Figure 4.19 : Températures extérieures-intérieures pour l'appartement B, campagne 2014

Concernant l'appartement C, on constate que les amplitudes thermiques sont bien plus importantes pour les températures extérieures qu'intérieures (Fig.4.20). En extérieur, les températures recensent une amplitude moyenne de 5°C entre la nuit et le jour, contre seulement 1°C d'amplitude pour les températures intérieures.

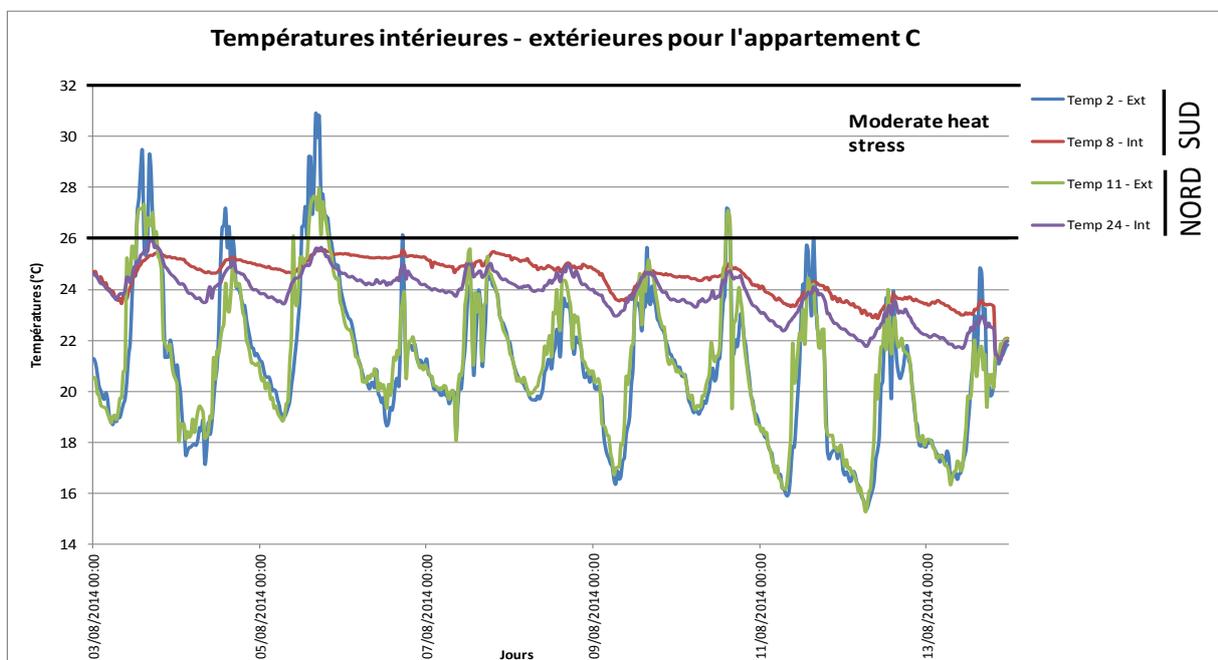


Figure 4.20 : Températures extérieures-intérieures pour l'appartement C, campagne 2014

Durant cette période de mesure, on remarque que les températures ne dépassent pas le seuil des 26°C. On ne rentre donc pas dans un stress de chaleur modéré. Les températures intérieures sont comprises entre 17,1°C (pour le capteur 8) et jusqu'à 25,9°C (pour le capteur 24). On constate que le

capteur 8 enregistre des valeurs toujours supérieures au capteur 24 avec une différence moyenne d'un peu plus de 1°C. L'orientation a un impact sur les températures intérieures puisque le capteur 8, se situe au Sud de l'appartement.

Au niveau des températures extérieures nous pouvons faire le même constat puisque les températures sont plus chaudes au Sud qu'au Nord (encore plus visible en journée), même en période non caniculaire. De nuit, les températures extérieures sud sont égales voire plus fraîches que les températures extérieures nord. De ces remarques, la corrélation entre les températures extérieures et les températures intérieures est plus importante et visible pour les capteurs placés au Nord. Le capteur 24 est plus influencé par les températures extérieures que le capteur 8, placé au Sud. On peut émettre l'hypothèse que la configuration spatiale joue un rôle dans la meilleure ventilation côté Nord.

Le phénomène de déphasage est également présent. Pour voir ce déphasage il est plus facile de se concentrer sur le capteur 24, plus influençable que le capteur 8. Le déphasage est compris entre 30min et 1h. Si l'on regarde la journée du 5 juillet, le pic de température extérieure pour le capteur 11 s'enregistre à 17h alors que pour les températures intérieures, le pic se localise vers 17h30, soit 30mn de différence.

Par ce constat, on remarque que selon l'altitude, le pic de chaleur n'arrive pas en même temps à l'extérieur. Dans l'appartement A, le pic extérieur est à 16h contre 17h pour l'appartement B, se situant 2 étages plus bas. L'effet de l'altitude va jouer aussi un rôle sur le temps.

2.3.3. Synthèse

Les premières analyses des mesures urbaines ont permis d'identifier des premières hypothèses qui nous guideront pour réaliser une deuxième série de mesures l'été 2015. On constate une variabilité des températures récurrentes journalières et une plus forte disparité des températures la nuit que le jour à la même heure. Les températures intérieures varient nettement moins que celles extérieures, même en période non caniculaire (une amplitude moyenne jour-nuit de 10°C environ pour les températures extérieures et de 4.1°C pour celles intérieures). Cette différence de variation est normale et, est due en partie, aux isolations propres à chaque bâtiment. En effet, sans isolation, la température à l'intérieur du bâtiment serait bien plus importante. Ces températures sont plus stables et plus élevées la nuit à l'intérieur qu'à l'extérieur et entraînent par conséquent un risque accru pour les habitants. Il est important de signaler que les conditions intérieures varient. Le dernier étage est celui qui a les plus grandes amplitudes thermiques. La température au 6^{ème} est plus basse qu'au 5^{ième} parce que, même sans avoir utilisé de ventilateur, l'endroit semble être mieux ventilé. Cela fera partie des points à vérifier lors de la prochaine campagne de mesures.

De plus, on constate une relation de concordance entre les températures intérieures et extérieures. Quand la température augmente brutalement à l'extérieur, cette augmentation est ressentie à l'intérieur du bâtiment et vice versa. La température intérieure varie en fonction de la température extérieure. La température de l'air varie avec l'alternance du jour et de la nuit et dans la journée, avec l'ensoleillement.

La différence de température entre la rue (orientée Sud) et la cour (au Nord), moins exposée au soleil, entraîne une ventilation naturelle des logements la nuit et donc un rafraîchissement plus notable.

De la donnée brute à la dangerosité

De plus, la ventilation naturelle et son fonctionnement sont corrélés aux conditions climatiques extérieures du bâtiment, à son orientation, à sa conception mais aussi par l'ouverture des fenêtres.

Des expérimentations plus complètes auront lieu l'été 2015 pour préciser ces phénomènes.

La première campagne de mesures montre une variabilité spatiale des températures. Les températures relevées montrent une variabilité récurrente journalière et une intensité plus forte la nuit que le jour. Les températures intérieures varient nettement moins que celles extérieures, même en période non caniculaire. Une différence de températures entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment est démontrée. La température extérieure varie plus que celle intérieure. Peu de différence thermique existe entre le côté Sud et le côté Nord à l'intérieur du bâtiment. Les amplitudes thermiques et les variations sont plus importantes côté Sud que côté Nord à l'extérieur du bâtiment. La température intérieures est dépendante des conditions extérieures puisqu'une variation de température extérieure l'impacte, de façon atténuée. La ventilation naturelle et son fonctionnement sont corrélés aux conditions climatiques extérieures du bâtiment, à son orientation, à sa conception mais aussi par l'ouverture des fenêtres. Son impact sur les températures intérieures reste à valider dans la campagne 2015.

3. Campagne 2015 : analyse entre appartements

Pour s'assurer de l'homogénéisation des capteurs et pour évaluer la précision de mesure de température, nous les avons étalonnés sur plus d'une journée les capteurs, dans le même local et programmés pour une enregistrement toutes les 30 minutes pour détecter ou non des anomalies. La figure 4.21 représente l'étalonnage des différents capteurs. On identifie un capteur « anormal ». Le capteur 16 enregistre des valeurs sur la journée à -42°C , cela signifie qu'il a été débranché. Ce capteur sera donc supprimé de l'étude pour ne pas biaiser les analyses.

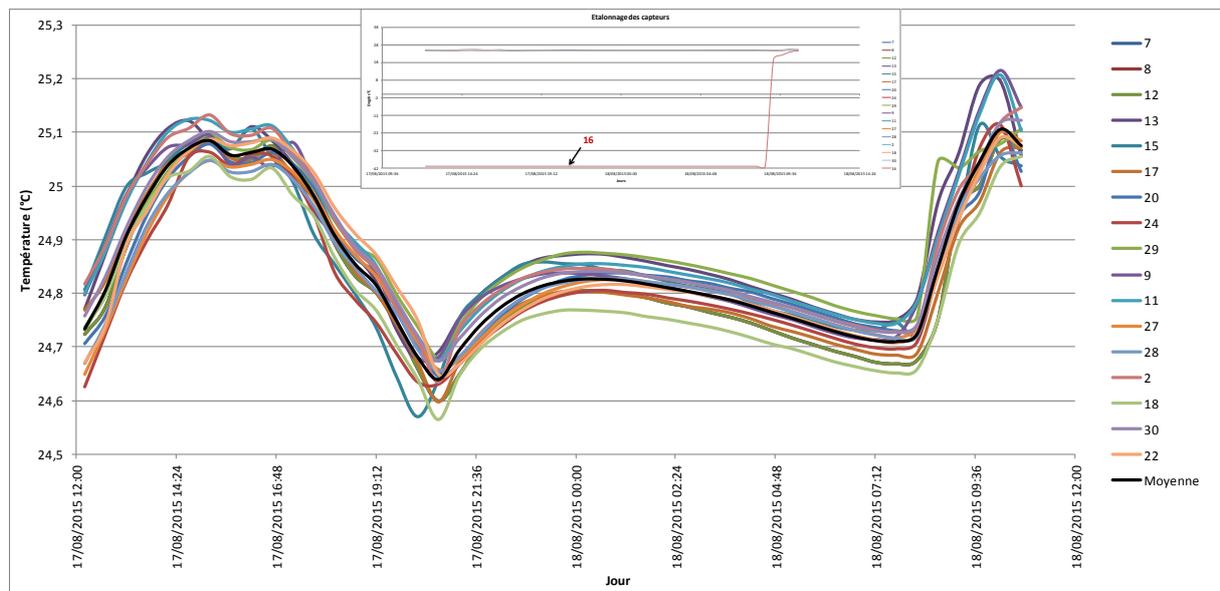


Figure 4.21 : Etalonnage des capteurs Tinytag

Concernant les autres capteurs, les écarts sont souvent inférieurs à $0,2^{\circ}\text{C}$. Une correction des valeurs est effectuée en se basant sur l'écart à la moyenne.

3.1. Températures intérieures

Dans cette partie nous présentons les résultats de l'analyse journalière et horaires des températures intérieures. Nous analysons également le comportement des températures des différents appartements lors de la période de canicule de juillet 2015. Les résultats présentés dans cette partie constituent une avancée importante pour valider ou infirmer nos hypothèses et compléter nos connaissances.

Pour rappeler le contexte, les appartements sont habités mais certaines pièces (dû aux fortes chaleurs) sont inoccupées. L'appartement A, les pièces en duplex (capteur 29 et 7) ne sont habités qu'après le 24 juillet. Les occupants ouvrent et ferment les fenêtres et ventilent leurs appartements comme ils le souhaitent. La climatisation est exclue. Ce sont les températures vécues.

Le mois de juillet 2015 est segmenté en plusieurs périodes afin de pouvoir visualiser différents phénomènes. Cette segmentation est réalisée par détection automatique sous R. Elle est expliquée en Annexe 4.

Le graphique montre les températures des différents capteurs placés à l'intérieur des bâtiments (faces Nord et Sud confondues) (Fig.4.22). On constate une grande hétérogénéité des températures. Trois capteurs se distinguent des autres. Les capteurs 2 et 18 (appartement C, face Nord) et le capteur 22, situé au RDC. Les capteurs 2 et 18 se caractérisent par des températures constamment élevées, toujours supérieures à la moyenne et par de faibles amplitudes thermiques entre le jour et la nuit, moins de 1°C en moyenne. Le capteur 22 enregistre de faibles températures et ses amplitudes thermiques sont négligeables.

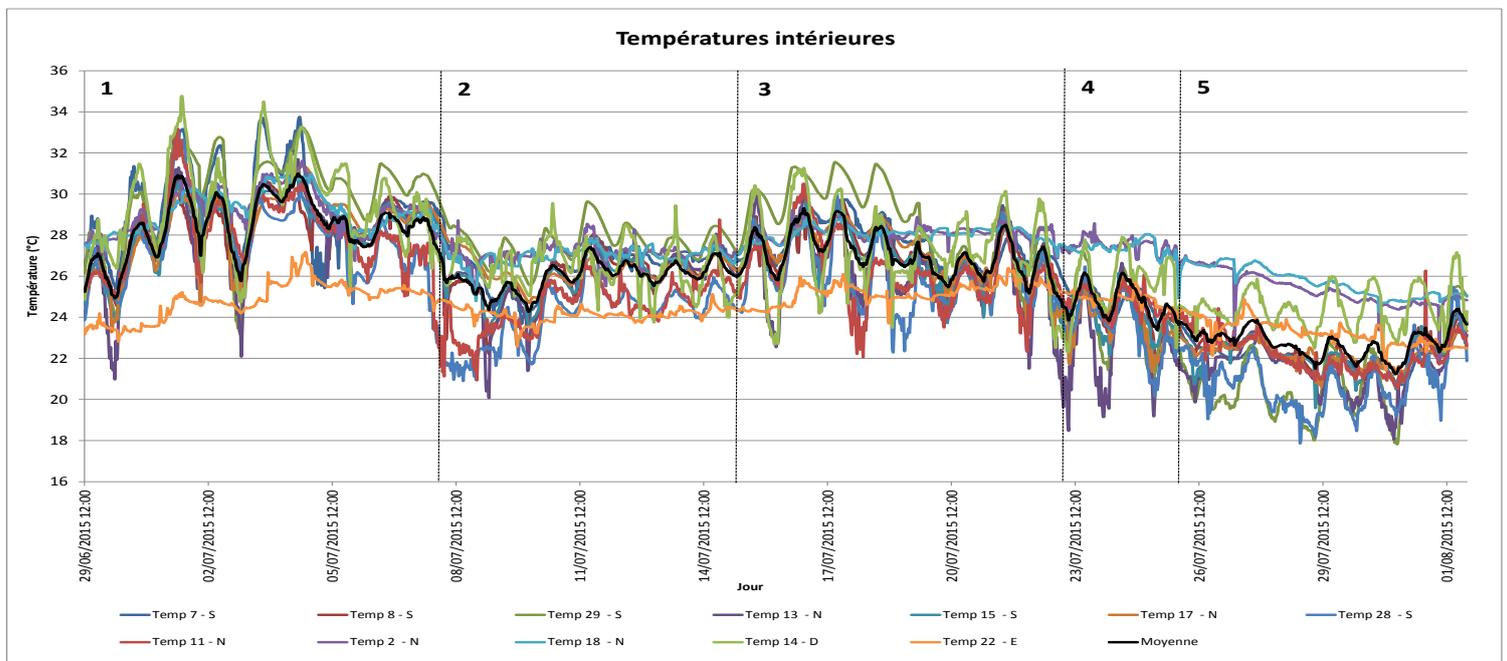
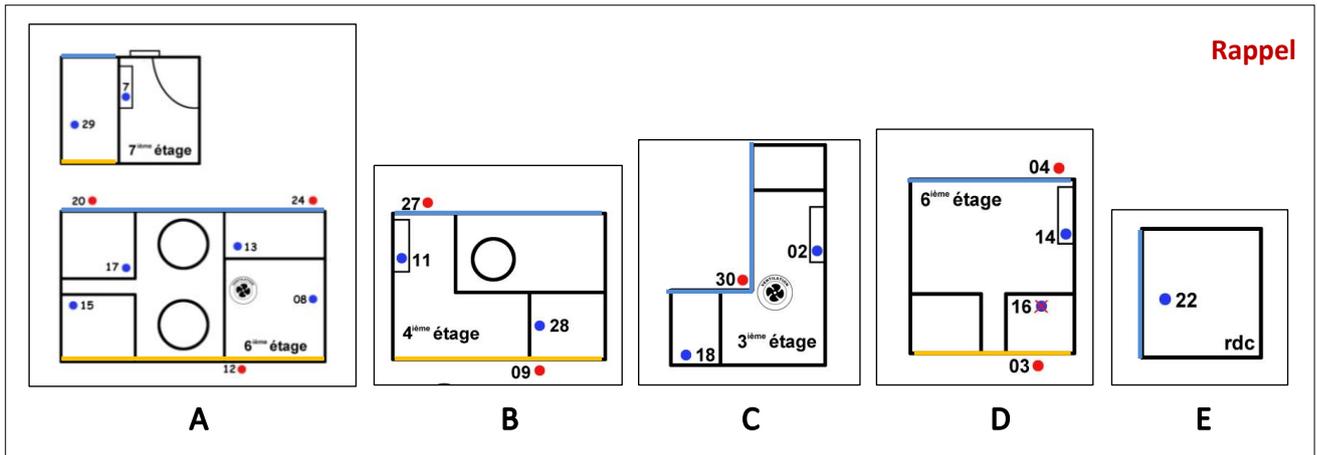


Figure 4.22 : Graphique des températures intérieures, juillet 2015



Le mois de juillet est divisé statistiquement, selon l'homogénéité en moyenne, en cinq périodes distinctes :

- La première correspond à une période de forte chaleur, voire caniculaire. Elle débute le 29 juin et se termine le 7 juillet. Elle est caractérisée par de fortes températures pouvant atteindre les 34°C et une grande amplitude thermique. Les capteurs 7, 14 et 29 ont les températures les plus élevées en opposition aux capteurs 11, 13 et 28.
- La deuxième, comprise entre le 8 juillet et le 14 juillet, relève des températures à faible amplitude thermique et comprises entre 24°C et 28°C en moyenne. On constate une baisse de la température d'environ 6°C par rapport à la première période.
- Pour la troisième période, à partir du 15 juillet, une nouvelle hausse des températures est présente. Elle est moins importante que la première période. Les températures atteignent les 30°C. Les amplitudes thermiques sont plus importantes. C'est une période de fortes chaleurs.
- La quatrième, du 20 au 23 juillet reflète une baisse modérée des températures. Les capteurs 2 et 18 (appartement C, face Nord) enregistrent les températures les plus élevées.
- La dernière période, du 24 juillet au 1^{er} août débute par une phase stagnante puis une baisse soudaine des températures. C'est la période la plus fraîche. L'amplitude thermique est importante et on constate une grande diversité de variations entre les différents capteurs. Ce qui est peu visible en période de fortes chaleurs. Les températures de jour sont comprises entre 22°C et 26,3°C. Les températures de nuit sont comprises entre 18°C et 25,7°C.

La chronique horaire de la température moyenne intérieure du 30 juin au 1 août permet de visualiser ces périodes (Fig.4.23). La chronique présente et décrit le cycle diurne et nocturne ainsi que les changements rapides ou graduels des conditions météorologiques. Cette chronique permet de voir la distribution de la température aux différentes heures de la journée.

On constate que les températures les plus chaudes se localisent en fin de journée avec un pic vers 20h lors de périodes caniculaires et de fortes chaleurs. Les heures les plus chaudes se localisent entre 15h et 22h. L'air se refroidit vers 5h environ. Les heures les plus fraîches se situent entre 3h et 10h. Durant cette plage horaire les températures vont perdre quelques degrés. En période caniculaire, les températures stagnent et n'évoluent presque pas entre la nuit et le jour. Les journées du 9, 12 ou 13 août illustrent la faible amplitude thermique.

Chronique horaire des températures intérieures

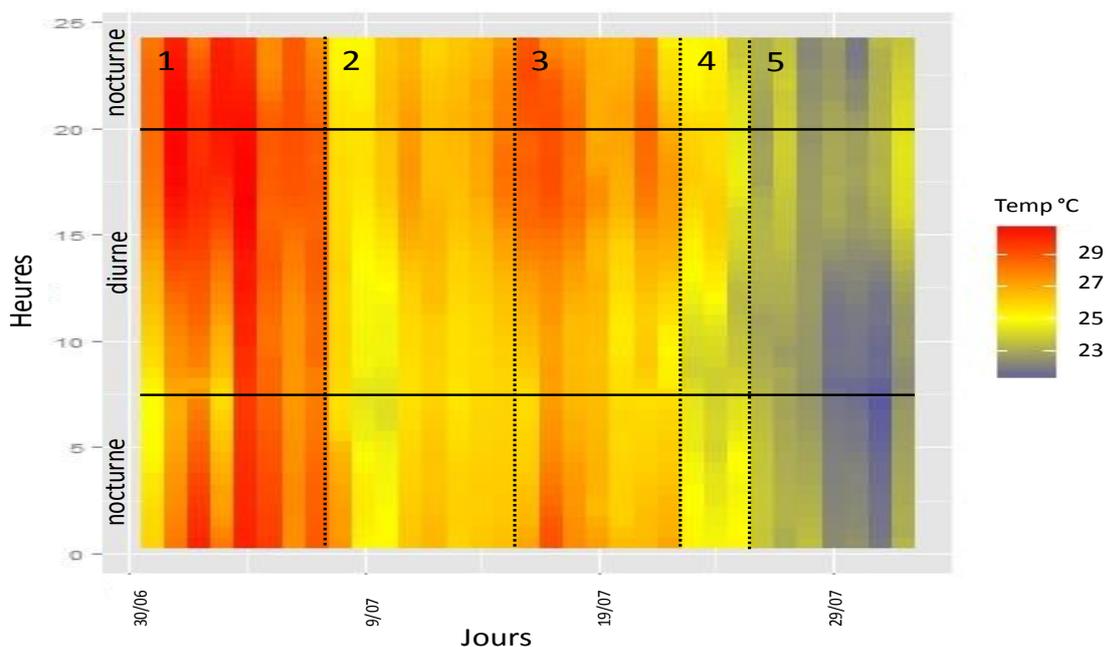


Figure 4.23 : Chronique horaire de la moyenne des températures intérieures, juillet 2015

Cinq périodes sont décrites : une canicule avec des températures élevées de 15h à 20h, un rafraîchissement, une période de fortes chaleurs et deux baisses successives amenant un rafraîchissement. Trois capteurs se distinguent des autres : 2, 18 et 22. Ils enregistrent des faibles variations thermiques et des températures élevées (capteurs 2 et 18). Les températures varient peu (faible amplitude) pendant la période de refroidissement.

Pour entrer plus précisément dans l'analyse des températures intérieures, nous avons différencié les capteurs placés côté Sud et côté Nord (Fig.4.24) pour savoir si une différence de températures existe des deux côtés.

NB : Le capteur 22 a été placé au centre de la pièce, dans un bâtiment face Est. Par ces faibles températures, nous l'avons additionné aux capteurs positionnés côté Nord.

- Au Nord, la température est comprise entre 34,3°C (pour la phase de canicule) et 18°C (pour la phase de refroidissement) et fluctue entre 34,3°C et 26°C, la nuit du 2 au 3 juillet entre les capteurs. Les températures entre elles sont très différentes.
- Au Sud, la température varie entre 33,9°C et 18°C (pour les mêmes phases). La nuit du 2 au 3 juillet les températures vont de 33,1°C à 29,3°C entre les capteurs.

Si on fait la moyenne globale côté Nord et Sud, on s'aperçoit que la différence de température est faible avec 0,3°C (Tab.4.8). Cette différence même faible permet de dissocier les deux orientations.

Une autre moyenne a été calculée en supprimant les moyennes de températures les plus extrêmes (capteurs 2, 14 et 18, pour le côté Nord). On remarque que la différence est bien plus élevée, avec 0,6°C d'écart de température entre les deux orientations.

De la donnée brute à la dangerosité

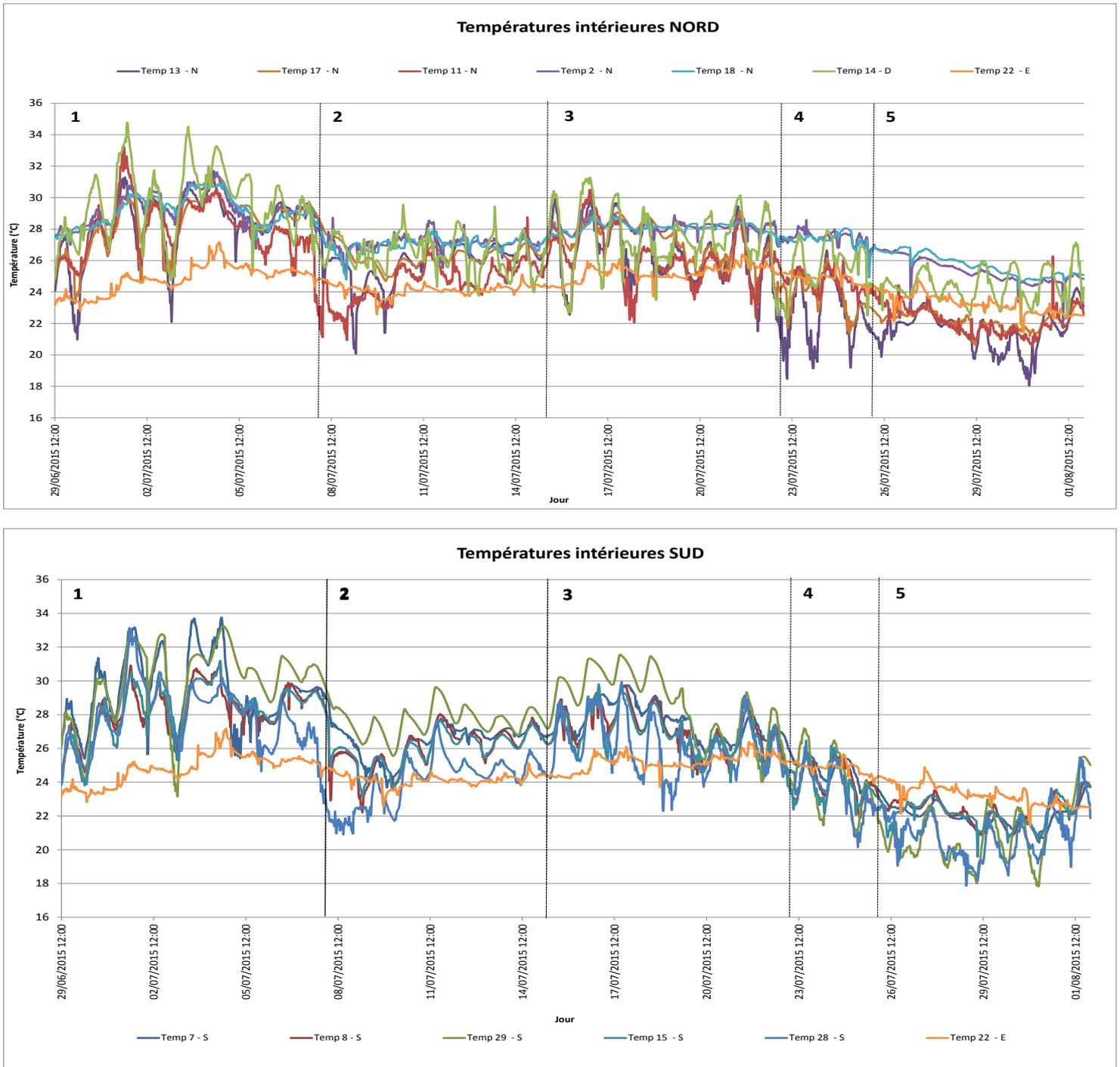


Figure 4.24 : Graphiques des températures intérieures côté Nord (haut) et côté Sud (bas), juillet 2015

Il fait donc plus chaud côté Sud que côté Nord dû principalement au rayonnement solaire direct. Un impact direct de la température extérieure sur la température intérieure est supposé. Cette hypothèse reste à vérifier pour la suite de notre étude.

	Côté Nord							Côté Sud				
Capteurs	13 (6 ^{ème})	17 (6 ^{ème})	11 (4 ^{ème})	22 (RDC)	14 (6 ^{ème})	18 (3 ^{ème})	2 (3 ^{ème})	8 (6 ^{ème})	15 (6 ^{ème})	29 (7 ^{ème})	7 (7 ^{ème})	28 (3 ^{ème})
Temp moy (°C)	25,9	26,15	25,5	24,41	27,63	27,53	27,68	25,95	26,05	27,37	26,47	24,64
Moy globale	26,40							26,10				
Moy globale ⁷²	25,49							26,10				

Tableau 4.8 : Températures moyennes côté nord et sud, juillet 2015

Les cinq phases commentées précédemment sont plus marquées côté sud que côté nord.

Les mesures enregistrées montrent que les températures sont plus hétérogènes côté nord que sud. L'amplitude thermique est légèrement plus élevée côté nord que sud : l'air intérieur se rafraîchit plus facilement au Nord. Une différence de 0,6°C entre le Nord et le Sud est notée (sans les capteurs atypiques : 14, 18 et 2). On constate des comportements de températures différents entre les logements.

Les écarts à la moyenne des températures intérieures nous confirment l'hétérogénéité des températures (Fig.4.25).

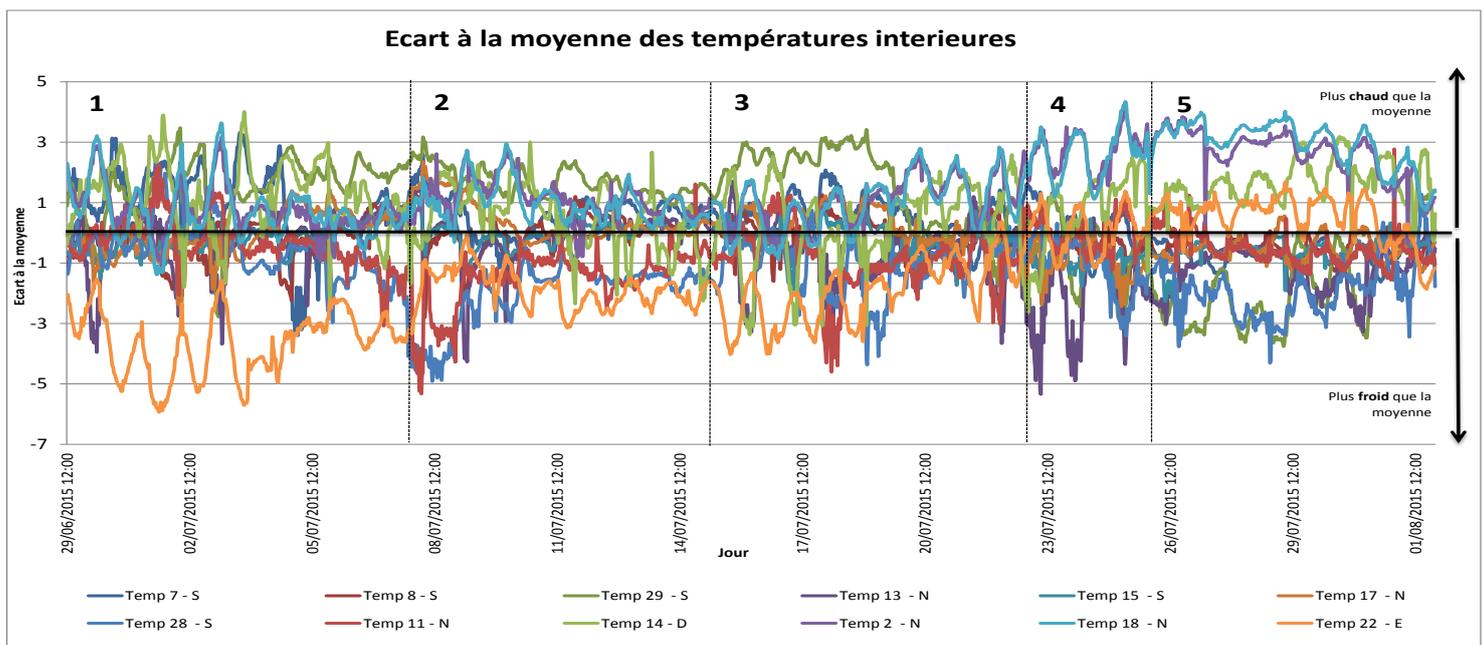
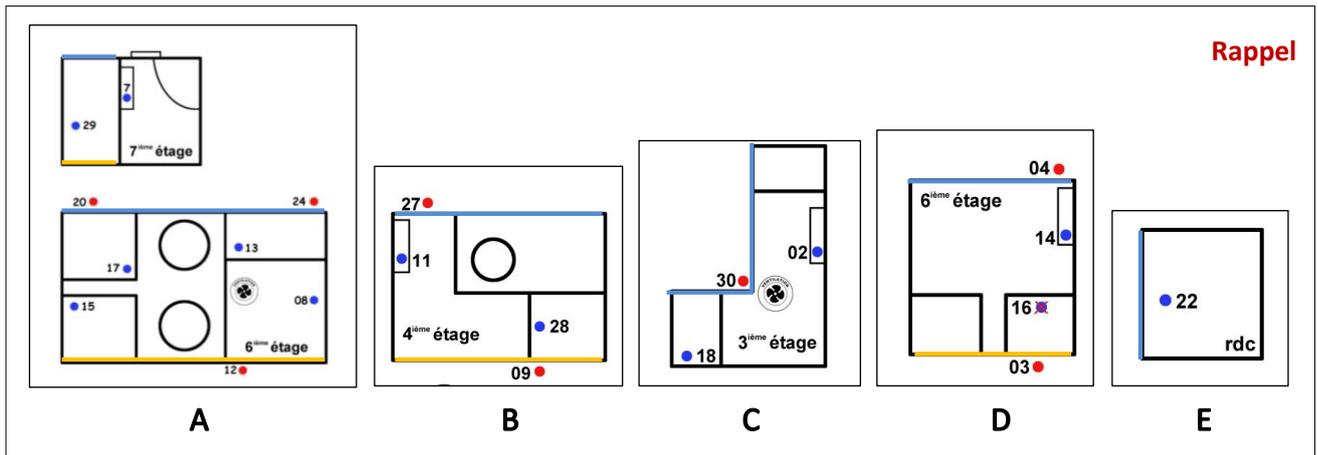


Figure 4.25 : Ecart à la moyenne des températures intérieures, juillet 2015

Le capteur 22 (appartement E, RDC) a un écart à la moyenne négatif sauf pendant la 4^{ème} période. Il a tendance à se réchauffer lorsque la température extérieure baisse. Pendant la période caniculaire, cet appartement a des températures toujours inférieures à la moyenne. Ce capteur enregistre le plus fort écart de températures avec une différence moyenne globale de -1,7°C.

⁷² Moyenne globale des capteurs intérieurs nord calculée en supprimant les valeurs des capteurs atypiques : 14, 18, 2



Le capteur 29 (appartement A, 7^{ème} étage) a un comportement opposé au capteur 22 (RDC). Il a un fort écart à la moyenne positif sur toute la période sauf pendant la phase de refroidissement où son écart est négatif. C'est pendant la vague de chaleur et de canicule qu'il enregistre les écarts les plus élevés, avec une différence de plus de 3°C par rapport à la moyenne. Ce capteur a un écart à la moyenne faible avec une différence moyenne globale de 0,7°C.

Les capteurs 2 et 18 (appartement C, 3^{ème} étage Nord) enregistrent les écarts positifs à la moyenne les plus importants avec 1,5°C. Leurs écarts sont très importants pendant la phase de rafraîchissement. Cet appartement se rafraîchit peu même en période de fraîcheur en raison de son inertie thermique. Ce sont des capteurs peu ventilés.

Le capteur 17 (appartement A, 6^{ème} étage Nord) enregistre l'écart à la moyenne le plus faible avec 0,07°C. Le capteur 13, se situant dans la pièce d'à côté et placé aussi au Nord, a des écarts à la moyenne négatifs et une différence moyenne de -0,7°C. Ainsi, la pièce du capteur 13, se rafraîchit plus rapidement que celle du capteur 17.

Les écarts à la moyenne, à chaque instant, nous permettent d'identifier les capteurs atypiques et affiner notre analyse sur l'orientation des pièces dans lesquelles sont les capteurs. Les écarts min-max (Annexe 5) définissent la dispersion des valeurs et confirment que chaque appartement et pièces ont des comportements thermiques différents en fonction de la ventilation, de la position géographique et de l'isolation.

Pour approfondir ces analyses, les températures intérieures de nuit et de jour sont analysées afin de voir comment se comporte les températures entre 03h et 10h et entre 15h et 22h. D'après nos analyses, ces horaires correspondent aux phases les plus chaudes et les plus fraîches lors d'une période de canicule.

- Températures intérieures de nuit

Les températures de nuit sont importantes à prendre en considération pour le bien-être des occupants des logements. C'est pendant les périodes nocturnes que le corps peut se refroidir de la chaleur accumulée durant la journée.

Sur le graphique, représentant les températures intérieures de nuit, on constate une grande hétérogénéité des températures (Fig.4.26). Les écarts entre les courbes des températures sont

importants allant de moins de 1°C à plus de 10°C et d'autant plus perceptibles durant la cinquième période. C'est pendant la période de canicule que les températures sont le plus homogènes entre elles, même si des écarts de 5°C sont présents avec le capteur 22 (appartement E, RDC).

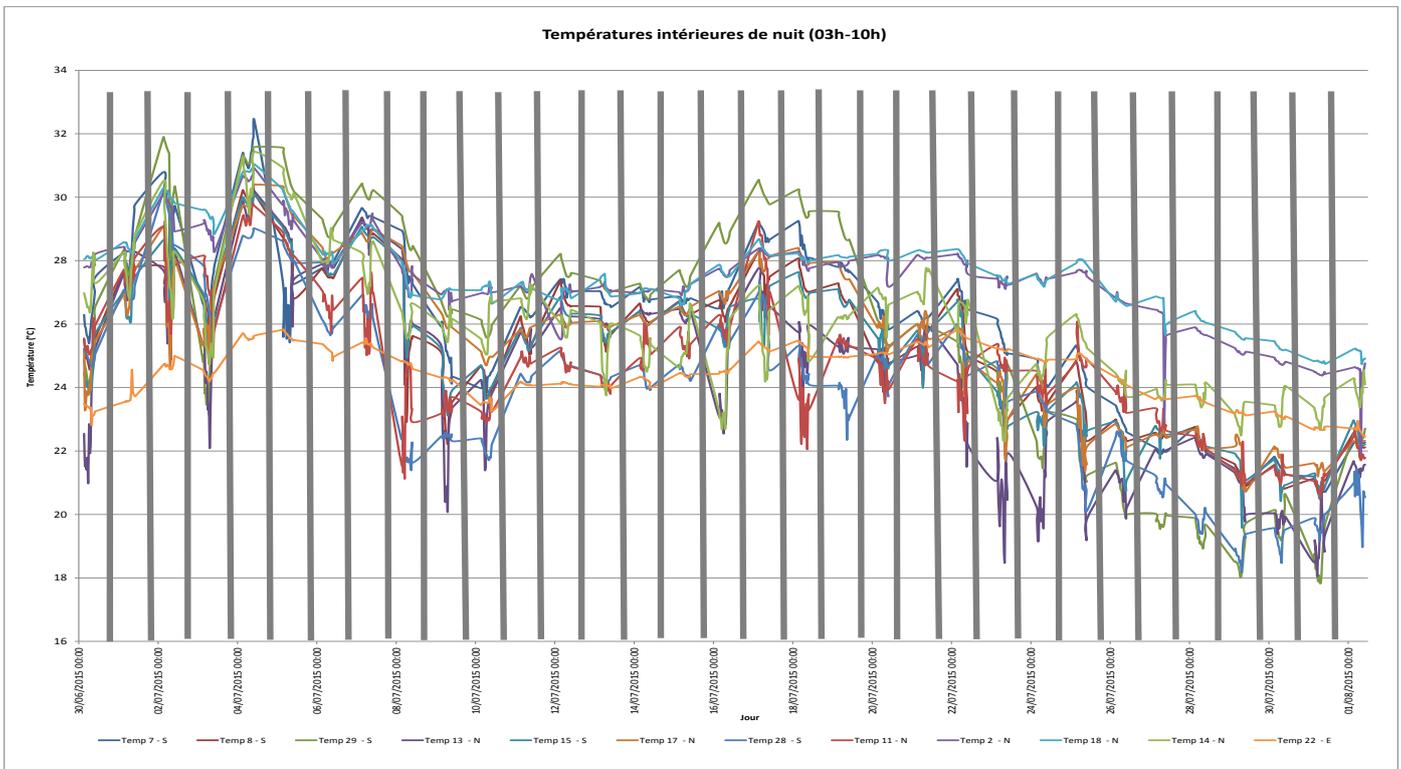


Figure 4.26 : Graphique des températures intérieures de nuit (03-10h), juillet 2015

Les courbes sont caractérisées, pour la plupart, par une chute des températures jusqu'à 6h puis une montée soudaine des températures. Pendant les périodes de rafraîchissement, ce constat est moins pertinent. Le capteur 29 (appartement A, 7^{ème} étage) enregistre certes des pics de chaleur, mais ce n'est pas celui enregistrant la plus forte température moyenne sur la période. C'est le capteur 18 (appartement C, 3^{ème} étage Nord) avec 27,6°C. Ce capteur a une température élevée et continue sur toute la période de test. Le capteur 22 enregistre la moyenne la plus faible, côté Nord, avec 24,4°C (Tab.4.9).

3,6°C séparent la température moyenne la plus chaude de la plus fraîche (capteur 24 et 18). Les capteurs 14, 18 et 2 sortent toujours de la normale puisqu'ils sont en moyenne 1°C supérieurs aux autres capteurs. Sur l'ensemble de la période, le capteur 28, (appartement B, 3^{ème} étage Sud) enregistre la moyenne la plus basse avec 24,6°C soit une différence moyenne de 1,4°C par rapport aux autres capteurs. Durant la période de refroidissement, ce capteur se rafraîchit plus rapidement.

Les températures moyennes intérieures sont toujours supérieures aux IBM de nuit (21°C). Les températures ont une moyenne globale de 24,7°C (côté Nord) et 25,2°C (côté Sud). On peut se poser la question de savoir quelle est l'impact de la température intérieure lorsque la température nocturne extérieure est de 21°C. On a vu que l'on passe plus de 80% de notre temps dans un espace clos. Il est donc judicieux de créer des indices de dangerosité pour les températures intérieures.

	Côté Nord							Côté Sud				
Capteurs	13 (6 ^{ème})	17 (6 ^{ème})	11 (4 ^{ème})	22 (RDC)	14 (6 ^{ème})	18 (3 ^{ème})	2 (3 ^{ème})	8 (6 ^{ème})	15 (6 ^{ème})	29 (7 ^{ème})	7 (7 ^{ème})	28 (3 ^{ème})
Temp moy (°C)	24,3	25,5	24,7	24,4	25,8	27,6	27,4	25,25	25,1	25,7	26	24
Moy globale	25,67							25,21				
Moy globale* ⁷³	24,73							25,21				

Tableau 4.9 : Moyenne des températures de nuit entre les capteurs côté Nord et Sud, juillet 2015

- Températures intérieures de jour

Les températures intérieures de jour, de 15h à 22h, ont une meilleure cohérence, à l'exception du capteur 22 (appartement E, RDC) (Fig.4.27). Il recense une différence de plus de 4°C avec les autres capteurs pendant la période de canicule. Ses températures augmentent en continu pour arriver à plus de 26°C le 4 juillet.

Les températures sont caractérisées, pour la plupart et pendant la période de canicule, par une augmentation brutale des températures jusqu'à 20h puis une baisse des températures. Pendant les périodes de rafraîchissement, l'augmentation des températures est moins soudaine. Les capteurs 2 et 18 (appartement C, Nord), voient leurs températures baisser mais restent très élevées pour la période, à plus de 26°C.

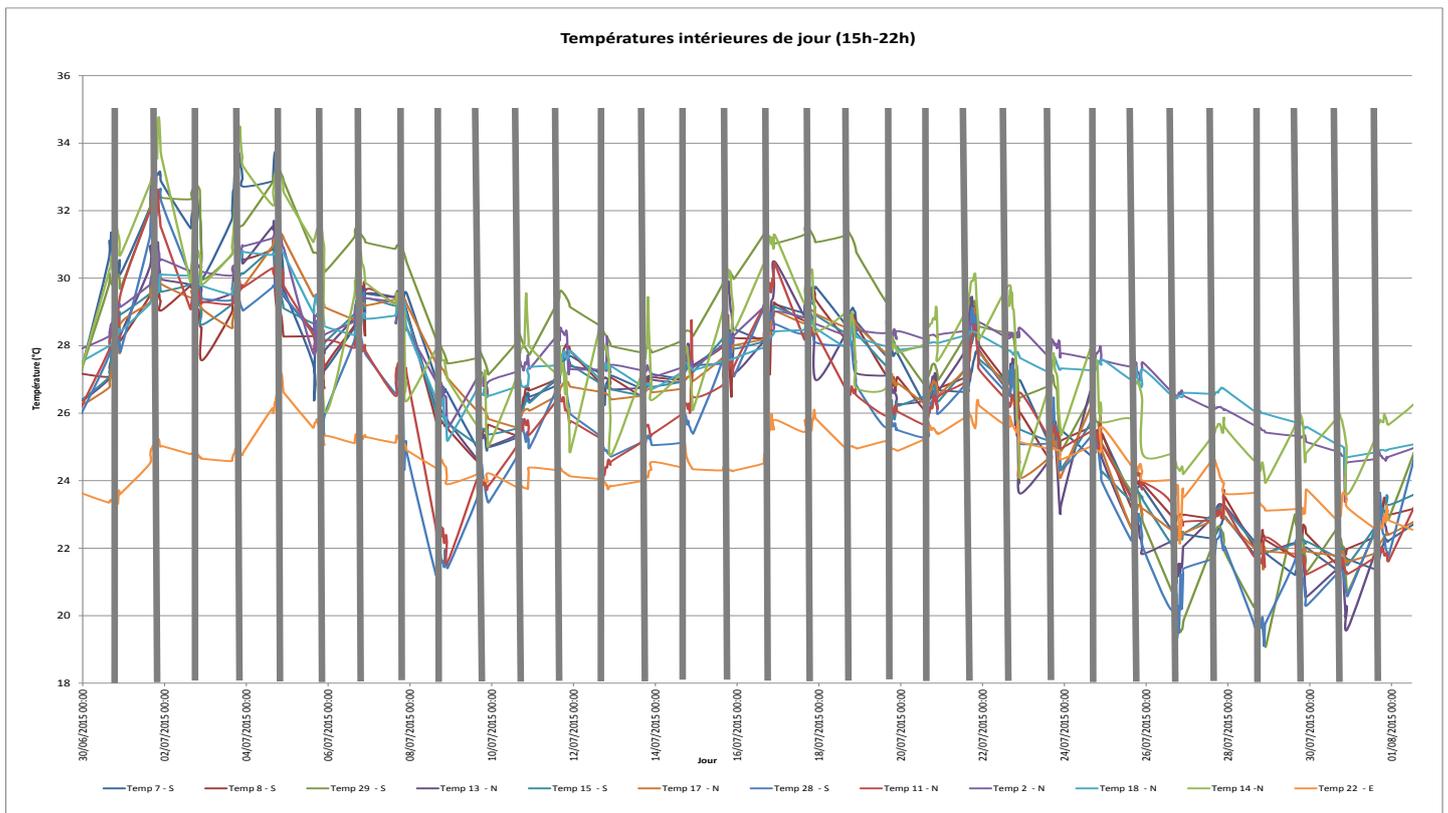


Figure 4.27 : Graphique des températures intérieures de jour (15-22h), juillet 2015

⁷³ Moyenne globale* est la moyenne des températures Nord sans prendre en compte les capteurs atypiques : 14, 18 et 2.

Campagnes de mesures et différenciation des comportements par type d'appartements

L'amplitude thermique maximale entre les différents capteurs est de 8°C pendant la phase de refroidissement. On constate une grande différence de température entre les capteurs 2, 14, 18 et 22 et les autres capteurs.

Tout comme les températures intérieures de nuit, les différentes périodes sont présentes et une différenciation Nord/Sud est visible :

- Côté Nord : les capteurs 14, 18 et 2 sortent toujours de la normale puisqu'ils sont en moyenne de 0,3°C à 3,2°C supérieurs aux autres capteurs (Tab.4.10). Le capteur 22 sort aussi de la normale par sa faible moyenne de 24,5°C. De nuit, comme de jour, le capteur 22 a une moyenne variant peu. Le capteur 14 (appartement D, Nord) enregistre la moyenne la plus élevée avec 28,2°C.
- Côté Sud : le capteur 29 (appartement A, 7^{ème} étage) enregistre les températures les plus chaudes et la moyenne des températures la plus élevée. Le capteur 28 (appartement B, Sud) a la moyenne des températures la plus faible avec 25,8°C contre 27,8°C pour le capteur 2 (appartement C, Nord). De jour comme de nuit, le capteur 28 est le plus frais sur la période.

	Côté Nord							Côté Sud				
Capteurs	13 (6 ^{ème})	17 (6 ^{ème})	11 (4 ^{ème})	22 (RDC)	14 (6 ^{ème})	18 (3 ^{ème})	2 (3 ^{ème})	8 (6 ^{ème})	15 (6 ^{ème})	29 (7 ^{ème})	7 (7 ^{ème})	28 (3 ^{ème})
Temp moy (°C)	26,5	26,5	26	24,5	28,2	27,6	27,8	26,6	26,5	27,8	27	25,8
Moy globale	26,73							26,74				
Moy globale*	25,875							26,74				

Tableau 4.10 : Moyenne des températures de jour entre les capteurs côté Nord et Sud, juillet 2015

- Période de canicule

Météo-France a placé 26 départements en vigilance orange à partir du mardi 30 juin, à 14h, en raison d'un « épisode caniculaire précoce et durable ». L'Ile-de-France fait partie de ces 26 départements. La vigilance rouge n'a pas été déclenchée. Il est donc intéressant d'étudier la canicule mesurée à l'intérieur des logements. On se focalise sur la période du 30 juin au 7 juillet 2015. Les températures intérieures ont été élevées pendant cette période (Tab.4.11).

La température moyenne la plus faible est de 27,62°C pendant la nuit durant cette période. Pendant 7 jours, il a fait en moyenne plus de 27,6°C dans les appartements de nuit comme de jour. La moyenne la plus élevée est le 4 juillet à 14h avec une moyenne de 30,7°C. A l'exception du capteur 22, tous les appartements ont une température intérieure supérieure à 30°C.

Le capteur 7 (appartement A, Sud) enregistre la plus forte température intérieure avec 32,9°C. La moyenne nocturne est plus importante que l'IBM d'Ile-de-France de 21°C. La canicule se calcule à l'extérieur mais les températures intérieures montrent sa dangerosité à l'intérieur d'un appartement. Un indice doit être développé pour prendre en compte cette dangerosité.

De la donnée brute à la dangerosité

	7 (7 ^{ème})	8 (6 ^{ème})	29 (7 ^{ème})	13 (6 ^{ème})	15 (6 ^{ème})	17 (6 ^{ème})	28 (3 ^{ème})	11 (4 ^{ème})	14 (6 ^{ème})	2 (3 ^{ème})	18 (3 ^{ème})	22 (RDC)	Moyenne
30/06/2015 14:12	29,76	26,68	29,26	26,60	26,70	26,40	26,98	27,66	29,61	28,23	27,98	23,30	27,43
01/07/2015 00:42	28,87	28,06	28,99	28,18	27,90	27,94	27,37	28,11	29,37	28,62	28,46	23,57	27,95
01/07/2015 14:12	31,63	29,04	31,41	30,18	29,08	28,83	30,21	30,92	32,81	29,62	29,15	24,31	29,77
02/07/2015 00:12	32,11	28,50	32,25	29,08	29,64	29,71	30,84	30,83	32,35	30,52	30,07	24,84	30,06
02/07/2015 14:12	31,30	29,37	31,94	29,45	29,44	29,17	29,44	28,89	30,61	30,08	29,96	24,81	29,54
03/07/2015 00:12	27,45	27,31	27,60	28,66	27,59	28,40	29,12	29,08	28,13	29,21	29,48	24,58	28,05
03/07/2015 14:12	29,86	28,30	30,06	28,79	28,67	28,19	28,69	28,87	30,17	29,61	29,38	24,54	28,76
04/07/2015 00:12	31,95	30,45	31,52	30,26	30,13	29,78	28,89	29,46	32,03	30,84	30,78	25,61	30,14
04/07/2015 14:12	32,90	30,76	32,53	31,29	30,72	30,74	29,59	30,21	31,19	31,09	30,71	26,46	30,68
05/07/2015 00:12	27,77	27,28	32,40	28,80	28,84	30,91	29,26	29,55	31,92	30,52	30,88	26,08	29,52
05/07/2015 14:12	28,08	28,22	30,78	28,45	28,61	29,48	28,43	28,09	31,18	28,83	29,06	25,57	28,73
06/07/2015 00:12	27,73	27,91	29,82	28,32	28,19	28,83	24,65	27,82	28,02	27,00	27,85	25,37	27,62
06/07/2015 14:12	28,33	28,20	30,76	28,47	28,55	28,60	27,36	27,77	28,88	28,56	28,27	24,94	28,22
07/07/2015 00:42	29,73	29,75	30,77	29,30	29,30	29,06	27,54	27,67	29,12	29,08	28,70	25,39	28,78
07/07/2015 14:12	29,41	29,14	30,85	29,36	29,09	29,31	27,11	27,30	29,97	29,31	28,85	25,15	28,74

Tableau 4.11 : Températures intérieures entre le 30 juin et le 7 juillet 2015

Le capteur 22 (appartement E, RDC), enregistre les plus faibles valeurs pendant cette période. L'emplacement de ce capteur est vu comme le facteur principal aux faibles températures. Ce capteur a 1°C jusqu'à 8,5°C de différence avec les autres capteurs. Il a en moyenne 4,5°C de moins que tous les autres capteurs. Durant cette période, la température maximale du capteur 22 est de 26,5°C pour la journée du 4 juillet à 14h.

Les capteurs 14 et 29 (appartement D, 6^{ème} étage ; appartement A, 7^{ème} étage) enregistrent les valeurs les plus extrêmes sur cette période. Chacun possède six températures maximales avec un maximum de 32,8°C et 32,4 pour les journées du 1^{er} et du 5 juillet. Attention, ce n'est pas le maximum des valeurs sur l'étude mais seulement pour ce tableau et les heures choisies.

Ce tableau permet de montrer, en période de canicule, la faible différence de température entre le jour et la nuit. La différence maximale est de 1,8°C et la minimale de 0,05°C. L'air se refroidit très peu, en phase nocturne, à l'intérieur des logements pendant la période caniculaire. Cette faible différence pose des questions de santé pour les occupants.

Pour compléter l'analyse, une CAH (Classification Ascendante Hiérarchique) est réalisée (Fig.2.28).

La CAH permet d'organiser les capteurs en les regroupant de façon hiérarchique. Cela passe par une agrégation des observations les plus semblables entre elles puis les observations ou groupes d'observations un peu moins semblables. Cette méthode permet de montrer non seulement les liaisons entre les classes mais la hauteur des branches nous indique leur niveau de proximité.

De ce graphique, on peut diviser les individus en 2 : capteurs « chauds » et capteurs « froids » :

- Les capteurs « chauds » se divisent eux même en deux sous classes. Le capteur 14 par ses fortes températures se retrouve avec les capteurs 18 et 2. Ces appartements peuvent être classés comme préoccupants pour la santé humaine

- Les capteurs « froids » se divisent en plusieurs branches. Les plus froids sont les 22, 28 et 11. Ces capteurs enregistrent des températures faibles pour la saison ou se refroidissent plus rapidement que les autres. Leurs moyennes de températures sont les plus faibles. Les capteurs 29 et 7 sont les plus chauds des froids. Ces appartements sont également préoccupants pour la santé humaine. Les autres capteurs par leur ressemblance se retrouvent dans les mêmes classes. Les capteurs 8 et 15 sont les plus similaires du fait de leur forte proximité.

Cette division nous permet de créer des classes pour créer des types d'appartements : appartements chauds, froids, bien ventilés, etc. Les capteurs 2 et 18, par exemple, peuvent former un type d'appartement : appartement chaud. Le capteur 22, à lui seul, peut former un autre type : appartement frais, RDC.

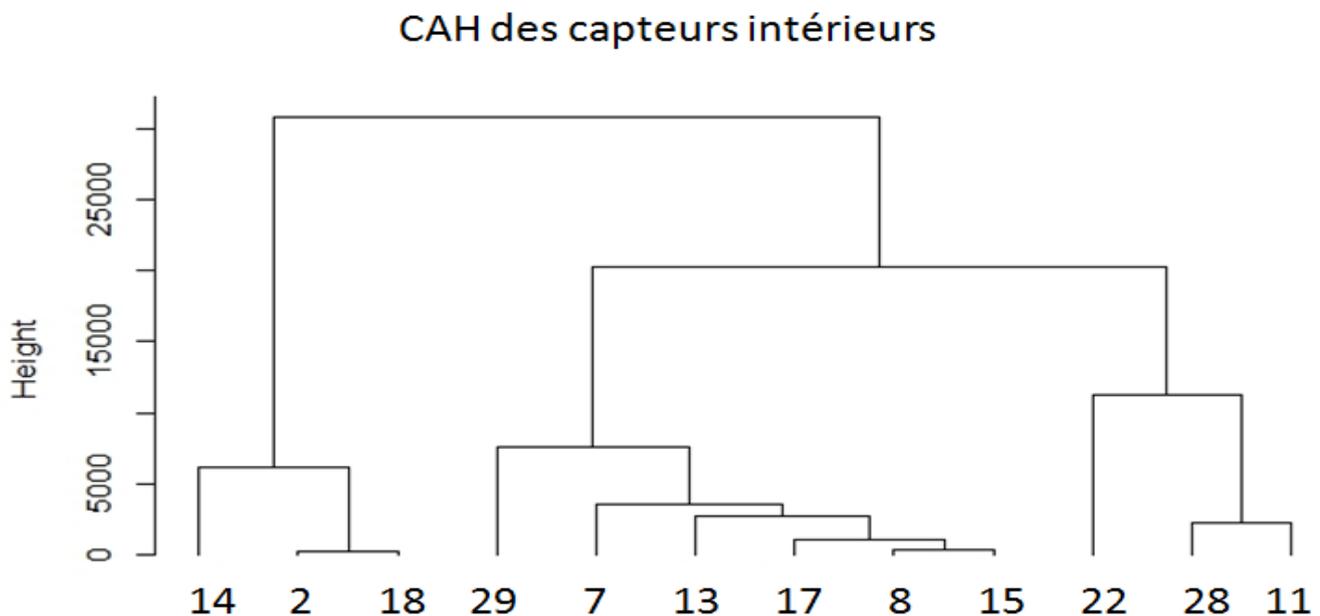


Figure 4.28 : CAH des capteurs intérieurs

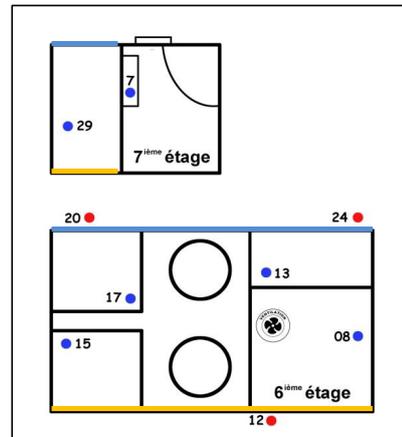
Cette analyse met en évidence des capteurs atypiques : 14, 2 et 18 et montre que les appartements réagissent différemment en raison de leurs configurations, de leurs localisations et leurs caractéristiques thermiques

Il paraît donc nécessaire de se concentrer sur chaque appartement, afin de mieux visualiser les écarts de températures et d'apporter ainsi des éléments de réponse sur les différents constats que nous venons d'effectuer. C'est l'objectif de la partie suivante.

3.1.1. Appartement A

Pour rappel

L'appartement A est un duplex au dernier étage (6^{ème}). Les capteurs 8 et 15 ont été placés dans les pièces exposées Sud donnant sur une rue canyon, les capteurs 13 et 17, dans les pièces exposées Nord donnant sur cour intérieure. Les deux derniers capteurs, 7 et 29, ont été placés à l'étage supérieur, au niveau de la mezzanine. La pièce du capteur 7 est ventilée par rapport à celle du capteur 29 puisqu'un brassage d'air est noté entre la pièce du 6^{ème} étage et celle du 7^{ème}. Le capteur 29, localisé dans une pièce est non ventilée.



Le graphique 4.29 représente les températures intérieures de l'appartement A et permet de montrer qu'à l'intérieur d'un même appartement les températures diffèrent d'une pièce à une autre, d'une exposition à une autre. Les températures varient entre 0,2°C et 4°C entre elles. Le capteur 29 tend à s'éloigner des autres par ses températures élevées.

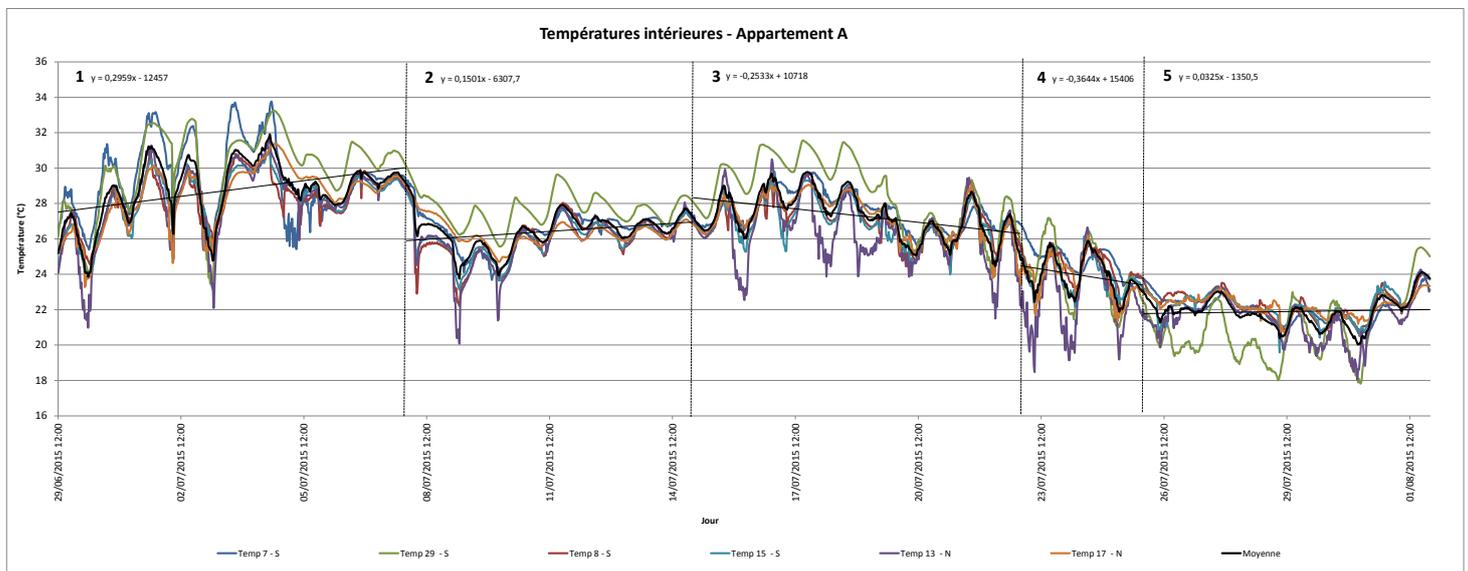


Figure 4.29 : Graphique des températures intérieures, appartement A

Il est possible de distinguer les cinq périodes :

- 1 : cette période est caractérisée par une augmentation continue des températures pouvant atteindre les 34°C. Une grande amplitude thermique entre la nuit et le jour est visible. Ces températures très élevées de jour comme de nuit sont nuisibles à la santé de l'occupant.

Campagnes de mesures et différenciation des comportements par type d'appartements

- 2 : cette phase est marquée par des températures nocturnes supérieures à 26°C. Cette stagnation des températures élevées impacte d'autant plus l'occupant que lors de période caniculaire. Le capteur 29 a 2°C environ de plus sur ses températures par rapport aux autres capteurs. La mezzanine, peu ventilée, accumule la chaleur.
- 3 : une légère augmentation des températures est présente puis une faible baisse. Les températures atteignent les 30°C et le capteur 29 dépasse les 29°C (de jour comme de nuit) entre le 15 et le 19 juillet.
- 4 : les températures, pendant, la quatrième période, stagnent avec une moyenne de température (jour/nuit) de 23,7°C. Le capteur 13 enregistre des nuits fraîches, inférieur à 20°C.
- 5 : à partir du 24 juillet, une forte chute des températures est visible. Elle sera continue sur 8 jours.

Les températures passent de plus de 32°C (pendant la période caniculaire) à moins de 22°C (pendant la période de fraîcheur). On constate que les deux capteurs placés au niveau de la mezzanine, enregistrent les températures moyennes les plus élevées avec 26,76°C et 26,42°C (Tab.4.12). L'étage et la ventilation jouent un rôle sur les températures.

L'étage supérieur a du mal à se refroidir durant les phases nocturnes. La ventilation naturelle ne suffit plus pour rafraîchir cette pièce de l'appartement. Un ventilateur est utilisé, sur quelques heures, en fin de journée. Cependant, malgré cette ventilation, les températures restent élevées avec une moyenne de 25°C pendant la nuit.

	Côté Nord		Côté Sud			
Capteurs	13	17	8	15	29	7
Temp moy (°C)	25,44	26,01	25,9	25,84	26,76	26,42
Moy total	25,72		26,23			
Nuit	25,13	26,07	26,01	25,87	26,48	26,44
Moy nuit	25,6		26,2			
Jour	25,9	26,15	26	26,05	27,4	26,5
Moy jour	26,03		26,49			

Tableau 4.12 : Températures moyennes intérieures, de jour et de nuit, appartement A

- Les capteurs côté Nord enregistrent les plus basses températures, de nuit comme de jour, avec une moyenne globale de 25,7°C.
- Les capteurs côté Sud ont une moyenne de 26,2°C. Une différence de 0,5°C entre les façades est notée. Cette différence de températures entre les pièces du logement est importante. Pendant la nuit, la différence moyenne est de 0,6°C mais peut atteindre 0,9°C (capteur 8 et 13) et 1,4°C si on prend le capteur placé au niveau de la mezzanine. Ce constat est encore plus visible durant la période caniculaire.

La différence entre le côté Sud et le côté Nord est accentuée durant les périodes nocturnes et lors des périodes caniculaires. La baisse de température entre la nuit et le jour est d'environ 2 à 3°C en période non caniculaire et environ 6°C en période caniculaire. Durant la journée, la différence est de 0,5°C contre 0,8°C de nuit. Côté Sud comme côté Nord les températures moyennes nocturnes sont

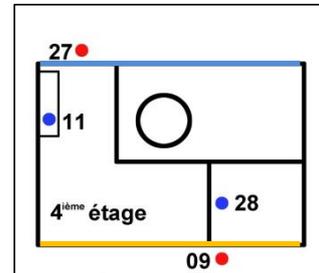
De la donnée brute à la dangerosité

proches aux températures diurnes. Le capteur 29 est celui où la différence est la plus marquée avec 0,9°C.

3.1.2. Appartement B

Pour rappel

L'appartement B est situé au 4^{ème} étage. Le capteur 11 est placé dans une pièce orientée Nord et donnant sur une cour intérieure et le capteur 28 dans une pièce orientée Sud donnant sur une rue canyon. Cet appartement se localise dans le même immeuble que l'appartement A



Le graphique 4.30 représente les températures intérieures de l'appartement B. Il est proche au précédent graphique de l'appartement A. La question du rôle de la stratification altitudinale dans les écarts de la température se pose.

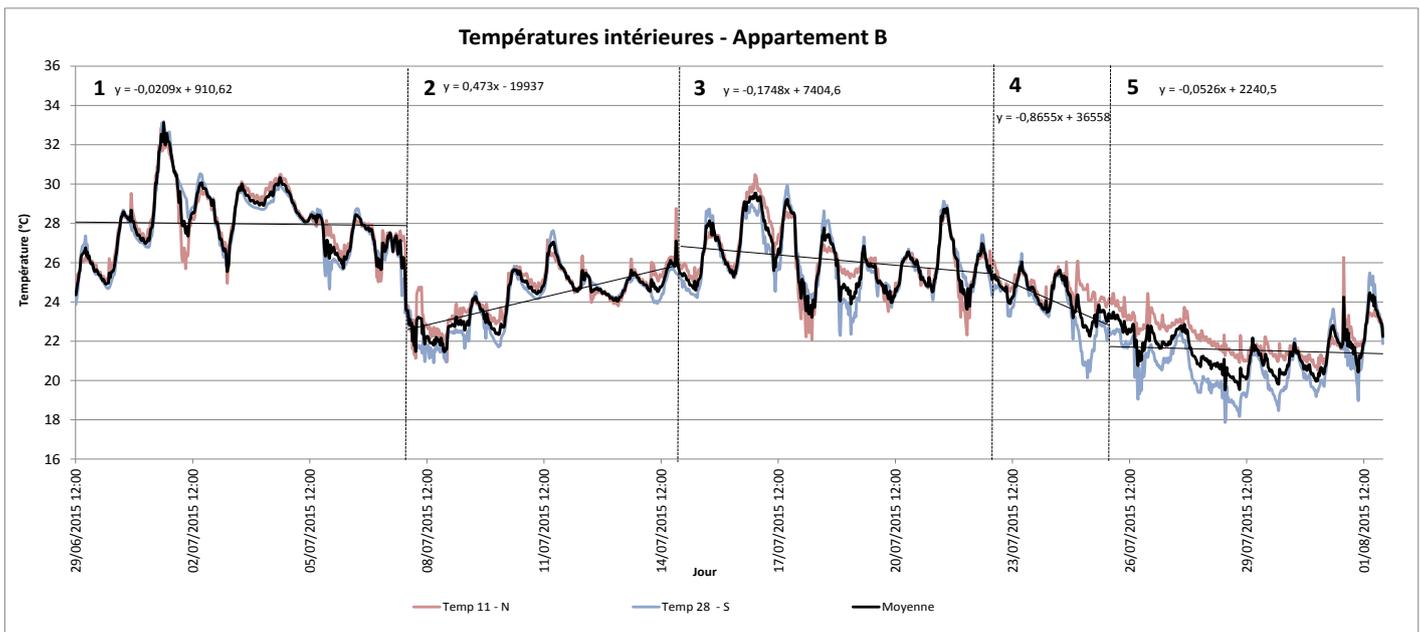


Figure 4.30 : Graphique des températures intérieures, appartement B

Les températures sont plus homogènes que l'appartement A. L'amplitude thermique est plus importante. Sur ce graphique, l'orientation ne joue pas forcément un rôle dans la distribution des températures. Quelques exceptions sont à noter telles que pour les 3, 15 et 17 juillet.

Les cinq périodes sont visibles :

- 1 : l'air se réchauffe avec un pic de température le 1^{er} juillet et avec une température à plus de 32°C.

Campagnes de mesures et différenciation des comportements par type d'appartements

- 2 : l'air chute de 27°C à 21°C en l'espace de 12h (le 7 juillet). La température restera fraîche pendant les 3 jours suivants
- 3 : entre le 15 juillet et le 18 juillet, les températures vont s'élever jusqu'à 30°C
- 4 : cette période est marquée par une forte baisse des températures
- 5 : une nouvelle baisse, des températures, plus faible et régulière est présente. Pendant cette diminution, le capteur positionné dans la pièce au Sud enregistre des températures plus fraîches que le capteur exposé côté Nord, sur plusieurs jours. On retrouve une inversion des valeurs selon l'orientation, ce qui est peu habituel. On peut poser l'hypothèse de l'effet cour. De plus, pendant toute la durée de cette inversion, le capteur 11 fluctue très légèrement (entre la nuit et le jour), contrairement au capteur 28. L'amplitude thermique est inférieure à 0,5°C pour le capteur 11. L'hypothèse de l'influence des températures extérieures est posée.

Au niveau de la différence de température entre la nuit et le jour, on constate que celle-ci est plus importante côté Sud que côté Nord. En effet, elle est seulement de 0,2°C (côté Nord) contre 1,4°C côté Sud (Tab.4.13). Cette différence de température reste très faible par rapport aux autres logements. Si on prend la moyenne totale sur toute la période, on constate que l'exposition des façades joue un rôle dans les températures, en journée. Une différence de 0,6°C est calculée de jour entre le côté Nord et Sud. De nuit, cette différence est inversée. L'air se rafraîchit davantage côté Sud. D'où la question de savoir si cette faible différence entre le Nord et le Sud est due à la localisation du logement, à savoir si le 4^{ème} étage est moins impacté par l'orientation que le 6^{ème} et le 7^{ème} étage ou que « l'effet cour » est plus fort au 4^{ème} étage. La cour, moins ventilée que la rue, stocke la chaleur et peut potentiellement créer une inversion thermique.

	Nord	Sud
Capteurs	11	28
Temp moy (°C)	25,35	24,79
Nuit	25,33	24,64
Jour	25,54	26,07

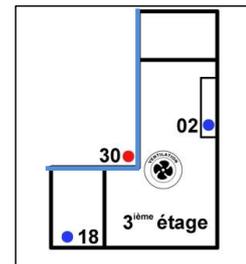
Tableau 4.13 : Températures moyennes intérieures, de jour et de nuit, de l'appartement B

De ces premiers constats, on peut dire que dans le même immeuble, les températures varient de la même manière, d'un jour à l'autre mais avec des écarts de températures entre capteurs et des amplitudes thermiques différentes. L'air se refroidit plus rapidement au dernier étage (dû principalement au brassage naturel de l'air) qu'au centre du bâtiment. En effet, les écarts min-max sont plus élevés au 6^{ème} étage avec un écart moyen de 0.41°C pour le capteur 28 contre seulement 0.22°C pour le capteur 15, placé au 4^{ème} étage. Cependant, malgré le brassage de l'air, la température intérieure reste plus élevée au 6^{ème} étage qu'au 4^{ème} étage et, est encore plus notable côté Sud que côté Nord. La température est certes plus élevée en journée au 6^{ème} étage mais baisse davantage la nuit qu'au centre du bâtiment situé dans une rue canyon.

3.1.3. Appartement C

Pour rappel

L'appartement C est très bien isolé, avec une performance énergétique élevée, de classe A. Un appartement très bien isolé signifie que l'inertie thermique est élevée. Cet appartement ne perçoit pas de lumière et les ouvertures donnent sur une cour intérieure.



Le graphique 4.31 représente les températures intérieures de l'appartement C. On constate que les courbes de températures sont différentes des appartements A et B. Cet appartement se distingue des deux autres par la similarité de ses températures intérieures. La moyenne des deux capteurs est la même avec 27,6°C. C'est la moyenne la plus élevée de tous les capteurs. L'écart de températures jour-nuit entre les deux capteurs est très faible, moins de 0,15°C de différence (Tab.4.14).

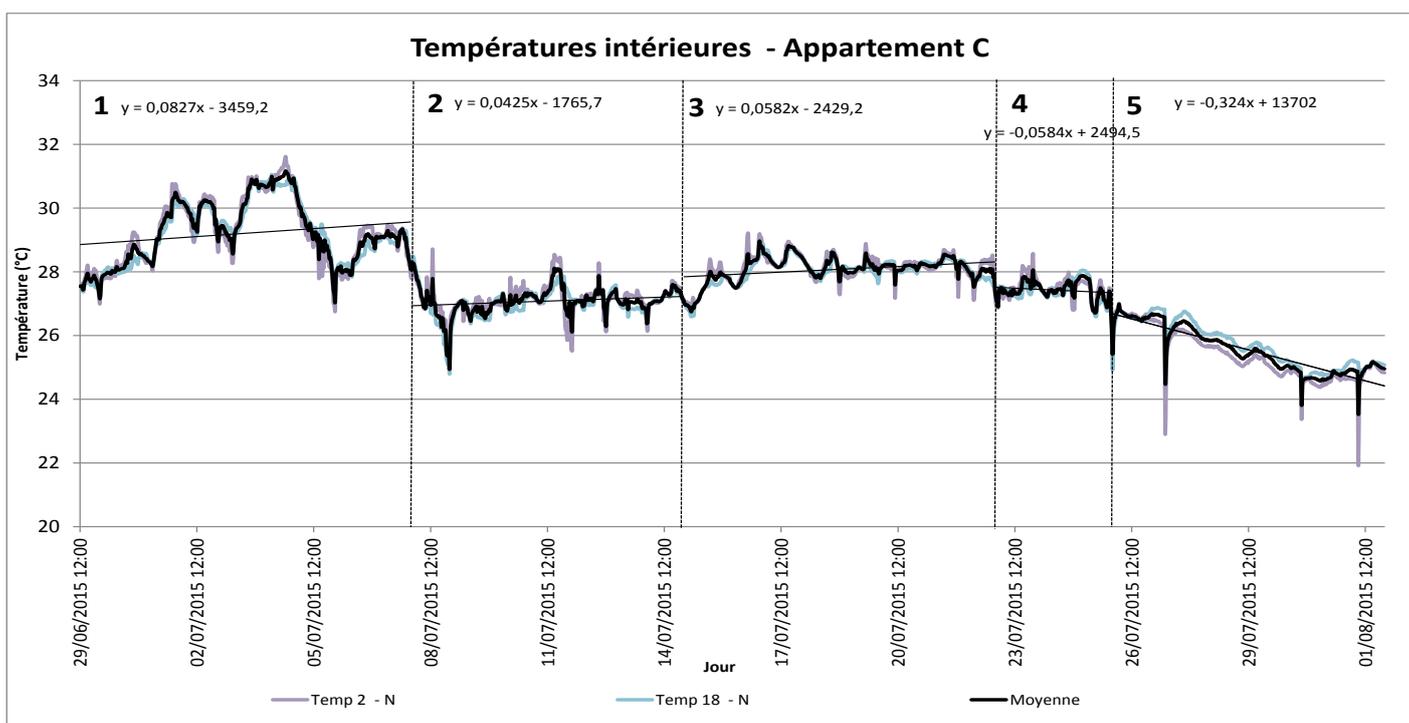


Figure 4.31 : Graphique des températures intérieures, appartement C

Il existe une faible variation entre la nuit et le jour. On peut supposer que les températures sont élevées et varient très faiblement entre la nuit et le jour du fait de la forte isolation de l'appartement. En effet, cette isolation a un effet néfaste sur la température ambiante du logement puisqu'elle emprisonne, accumule et stocke l'air chaud à l'intérieur. Cet appartement, au vue de ses températures très élevées, peut être caractérisé comme préoccupant voire dangereux pour la santé de ses occupants. Une température ambiante, de jour comme de nuit, supérieure à 27°C est difficilement supportable pour le corps.

Nord		
Capteurs	18	2
Temp moy (°C)	27,57	27,57
Nuit	27,53	27,64
Jour	27,68	27,53

Tableau 4.14 : Températures moyennes intérieures, de jour et de nuit, appartement C

Malgré cette faible variation, les quatre périodes se discernent :

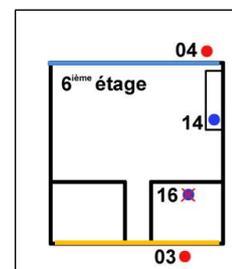
- 1 : cette période débute avec une température de 28°C. Avant cette date, le logement avait déjà stocké la chaleur des jours précédents. La température atteint plus de 31°C à l'intérieur de l'appartement, le 4 juillet. L'appartement reste à cette température sur plus de 24h.
- 2 : une chute des températures de plus de 3°C (chute conséquente pour cet appartement) est visible. Après cette chute brutale une deuxième s'ensuit. Les températures vont atteindre les 25°C ; cette chute est suivie d'une faible augmentation et stagnation des températures entre 27 et 28°C, entre le 9 et le 14 juillet.
- 3 : les températures augmentent légèrement pour passer à plus de 28°C.
- 4 : les températures sont légèrement plus fraîches que la période 3 mais restent élevées.
- 5 : les températures ne baissent pas avant le 25 juillet. A partir de cette date, les températures commencent à diminuer progressivement mais sans descendre sous les 24°C. Durant cette période, on constate 3 baisses brutales de températures sur le capteur 2. La température chute brutalement de plusieurs degrés. La plus importante est de 3°C (en seulement quelques heures). Ces chutes sont probablement dues à un facteur extérieur. C'est à partir du 25 juillet que les deux courbes commencent à se distinguer de quelques dizaines de degrés (de 0,2 à 0,5°C).

Dans cet appartement, on constate que l'exposition a un faible poids par rapport à l'isolation faite. L'isolation est, certes, très bénéfique en période hivernale pour le gain de chaleur apporté mais en période estivale elle devient néfaste ; l'isolation emprisonne l'air à l'intérieur et empêche la ventilation naturelle, même si cela dépend également des charges internes du logement (est-ce que l'on produit beaucoup de chaleur ?).

3.1.4. Appartement D

Pour rappel

L'appartement D est un bâtiment de type haussmannien, bien ventilé dû à sa localisation entre deux boulevards. Ce logement initialement équipé de deux capteurs n'est étudié avec qu'un seul, en raison d'une faiblesse du matériel. Le capteur 14 est placé dans une pièce exposée au Nord, donnant sur un boulevard.



De la donnée brute à la dangerosité

Le graphique 4.32 représente les températures intérieures au 6^{ème} étage. On constate que les températures fluctuent énormément. Sur l'ensemble du mois, les températures diurnes ne descendent pas en dessous de 25°C et celles nocturnes en dessous des 22°C.

Pendant la période de canicule, on remarque 2 pics de température. Les températures atteignent quasi les 35°C, mais une chute brutale de température la nuit réajuste la moyenne. L'amplitude thermique (entre le jour et la nuit) est importante et les températures sont élevées. Pendant cette période, on retrouve une différence de plus de 9°C entre le jour et la nuit sur la nuit du 4 juillet. L'amplitude diminue en période de refroidissement. Elle passe de 9°C à 3,2°C en moyenne. La température moyenne sur cette période est de 27°C. De jour, cette moyenne atteint les 27,6°C et de nuit les 26,4°C (Tab.4.15). Ce capteur fait donc parti des capteurs les plus chauds mais le comportement de la température n'est pas défini comme « extrême » puisqu'une différence importante entre la nuit et le jour existe.

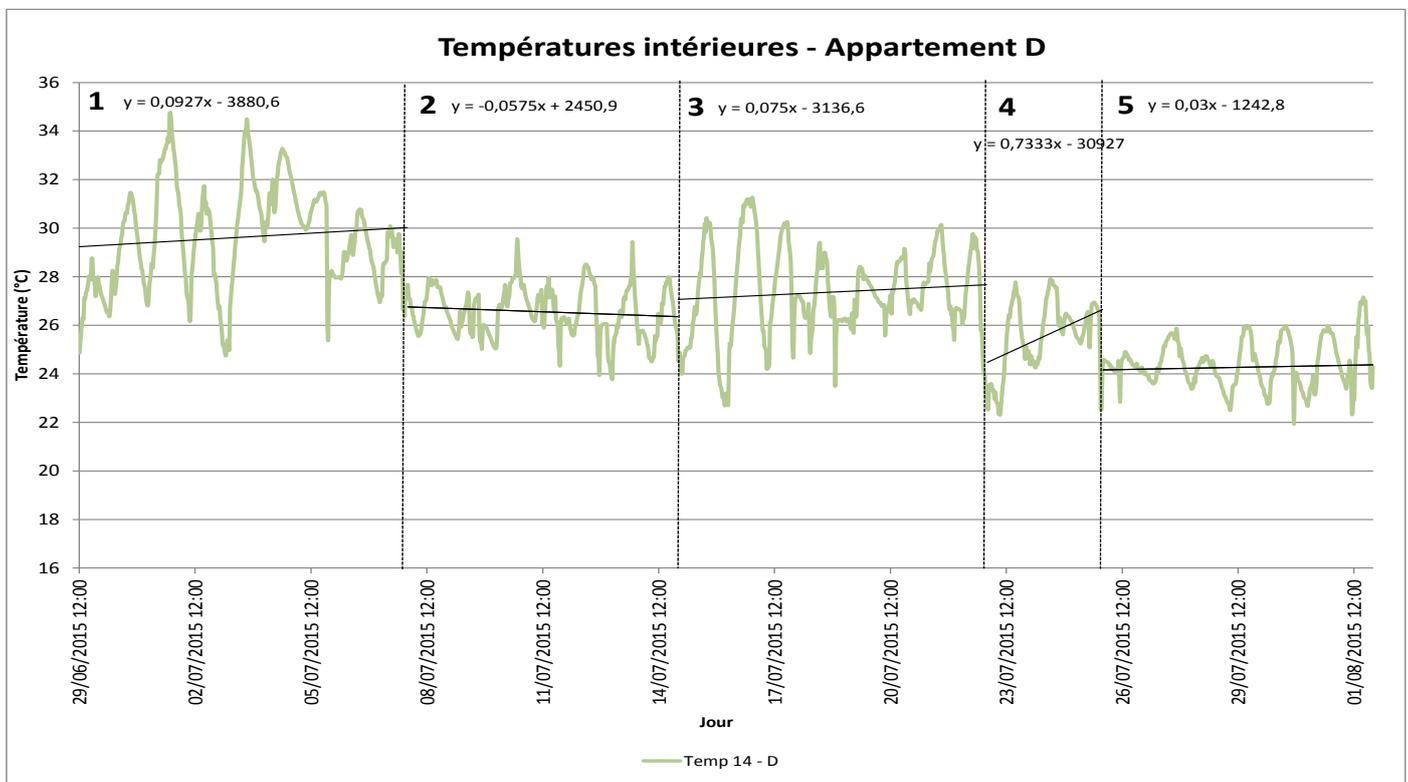


Figure 4.32 : Graphique des températures intérieures, appartement D

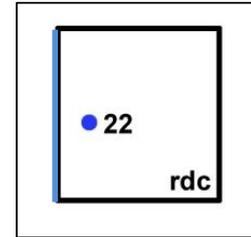
Côté Nord	
Capteurs	14
Temp moy (°C)	27
Nuit	26,43
Jour	27,63

Tableau 4.15 : Températures moyennes intérieures, de jour et de nuit, appartement D

3.1.5. Appartement E

Pour rappel :

L'appartement E est situé au rez-de-chaussée dans une rue canyon. Un seul capteur est étudié : 22. Cette pièce est au soleil quelques heures par jour.



Le graphique 4.33 représente les températures intérieures de l'appartement E. Cet appartement est défini par ces propriétés et caractéristiques : températures homogènes, peu de variations et une amplitude jour/nuit faible, avec au maximum de 2°C de différence. La moyenne des températures est faible avec 24,4°C (soit 3°C de différence avec le graphique précédent) (Tab.4.16). Sur ce graphique, les températures sont peu élevées par rapport aux températures des autres appartements. En effet, les températures dépassent les 27°C, seulement sur deux journées.

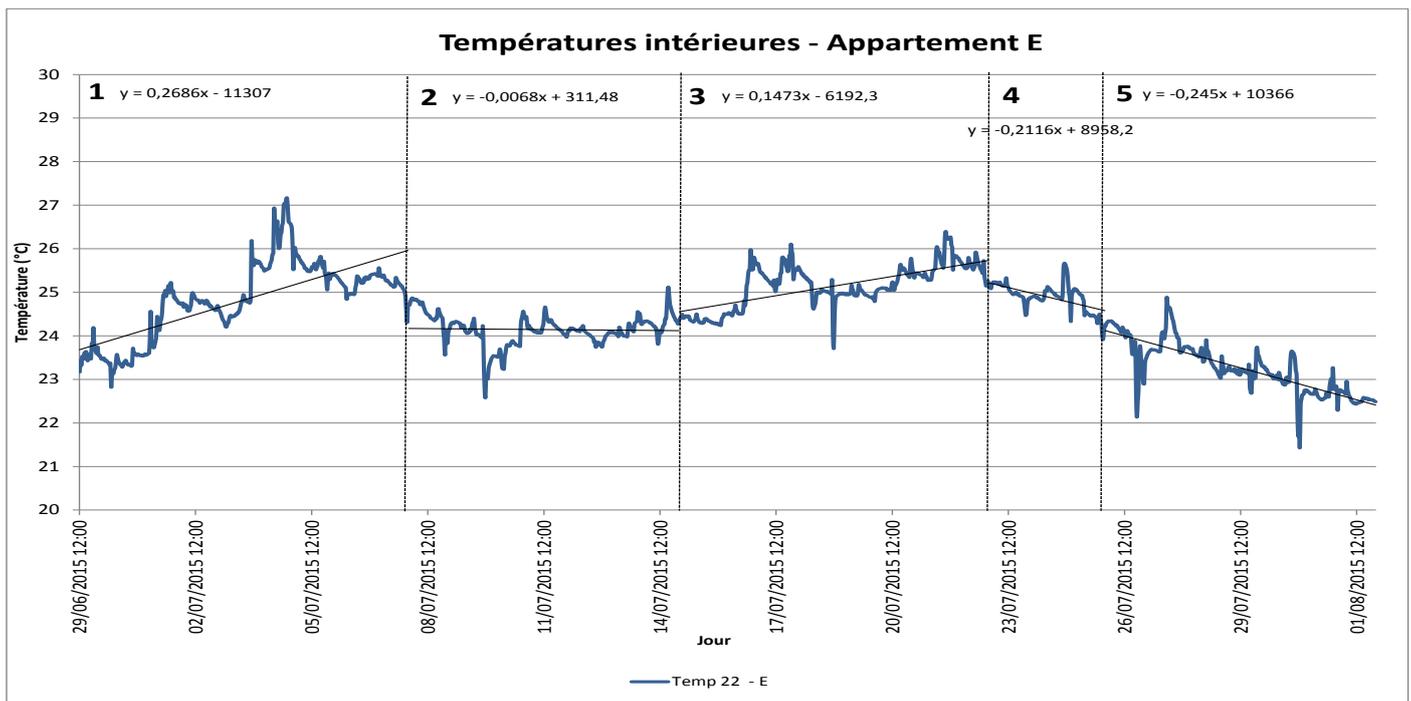


Figure 4.33 : Graphique des températures intérieures, appartement E

RDC Nord	
Capteurs	22
Temp moy (°C)	24,44
Nuit	24,45
Jour	24,41

Tableau 4.16 : Températures moyennes intérieures, de jour et de nuit, appartement E

De la donnée brute à la dangerosité

On constate que la période caniculaire est moins marquée puisque son intensité est moins importante par rapport aux autres mesures. Les valeurs les plus élevées se localisent aux alentours du 5 juillet, là où normalement les températures commencent à diminuer. On retrouve donc un décalage dans la date de la période caniculaire. En l'état, il est difficile de savoir si ce décalage vient de facteurs extérieurs ou propres à la localisation de l'appartement.

La différence moyenne de température entre la nuit et le jour est seulement de 0,04°C. L'appartement se refroidit très légèrement pendant la nuit. Cependant, les températures en journée restent assez faibles pour la période. Ce logement est le plus frais des logements testés.

On peut supposer que cette faible variabilité est due à la localisation de l'appartement. Le RDC permet de profiter de la fraîcheur des sous-sols pour conserver des températures fraîches tout au long de la période estivale.

Tout comme le graphique précédent, on constate, non trois mais deux baisses brutales survenant à la même date. Cependant, ces baisses sont moins importantes puisque la température baisse de 2°C. Il sera donc nécessaire de mettre en relation ces températures intérieures avec les températures extérieures afin de savoir si ces baisses brutales correspondent à une répercussion des températures extérieures sur les températures intérieures, ou si ces baisses relèvent d'un facteur propre au logement, ou à la localisation ou à un autre facteur.

Grâce à ces différentes analyses, nous pouvons dire qu'à l'intérieur de chaque appartement testé, les différentes périodes commentées sont présentes mais avec des intensités différentes.

Sur cette période d'étude, on retrouve de fortes disparités entre les appartements et les pièces. En effet, d'une courbe à l'autre, d'un logement à l'autre, à une même date, on peut trouver 10°C de différence. Ces différences et les forts écarts de températures nuit/jour constatés (surtout en période caniculaire et de refroidissement) d'un appartement à l'autre sont fonction notamment de l'altitude, de l'orientation, de l'isolation et du mode de ventilation. L'impact négatif de l'isolation est mis en avant par les mesures des capteurs 2 et 18 (appartement C, 3^{ème} étage, Nord).

La différence de l'exposition (Nord/Sud), les températures diurnes et nocturnes sont plus visibles si on se concentre seulement sur le logement en lui-même, que dans sa globalité. En effet, dans sa globalité, il existe une faible différence de température entre les capteurs côtés Nord et côté Sud (et cela pour les températures diurnes comme nocturnes), avec une différence moyenne de 0.3°C, alors que si l'on se focalise seulement sur les appartements, on peut constater une différence de plus de 1°C sur certains appartements. Il existe de plus, une plus forte hétérogénéité des températures côté Nord que côté Sud. Les pièces se réchauffent et se refroidissent dans un laps de temps plus court et avec une intensité plus élevée, d'où une plus forte dispersion (écart min-max) des valeurs au Nord.

De nuit, les températures ont des comportements différents en fonction du logement. De jour, l'exposition fait la différence entre les températures.

Ainsi, par ces différentes analyses, nous pouvons établir une liste des appartements « types » en fonction de leurs températures, leurs caractéristiques thermiques et leur configuration (Tab.4.17).

Le capteur 22 (appartement E, RDC), par sa forte différence autant thermique que spatiale, est pris comme un type de bâtiment, de même pour les capteurs 18, 2 (appartement C, 3^{ème} étage, Nord) et 14 (appartement D, 6^{ème} étage, Nord).

Les capteurs 29 et 7 (appartement A, 7^{ème} étage) par leurs fortes températures et similitudes dans leurs comportements et par leur typicité spatiale vont correspondre au quatrième type d'appartement. Les autres capteurs se rassemblent dans le même type d'appartement. Ainsi, la création de 5 types d'appartements est possible.

Type appartement	Capteurs
1	22
2	14
3	7 et 29
4	2 et 18
5	8, 11, 13, 15, 17 et 28

Tableau 4.17 : Création de type d'appartements en fonction des caractéristiques des capteurs pour la campagne de mesures 2015

Ces types d'appartements sont influencés par les températures extérieures. Il est intéressant de connaître la relation entre ces deux températures, à savoir si les températures intérieures sont impactées par les températures extérieures ?

3.2. Températures extérieures

Dans cette partie nous présentons les résultats de l'analyse journalière et horaires des températures extérieures. Nous analysons également le comportement des températures des différents appartements lors de la période caniculaire de juillet 2015. Les résultats présentés dans cette partie permettent de mieux comprendre les variations des températures intérieures en fonction des appartements. Nos hypothèses et connaissances sont validées et complétées.

3.2.1. Contextualisation des appartements

Pour une meilleure compréhension sur les comportements des températures, il est essentiel de poser le contexte. Sakhy (2016) fait le rapprochement entre la morphologie urbaine et les températures, c'est ce qu'elle appelle la morphométrie urbaine (la mesure de la morphologie urbaine). La hauteur des bâtiments, leurs volumétries au la distance entre les deux immeubles importante dans l'étude climatique. Les cartes sont réalisées via le site de Geoportail (www.geoportail.gouv.fr). Les cartes sont superposées avec la couche des parcelles cadastrales et les photos aériennes. Les mesures sont réalisées grâce aux outils du site.

- Appartement A et B

Les appartements A et B, se situant dans le même immeuble ont une cour intérieure d'une superficie de 149,6m² (Fig.4.34). Sa longueur est de 15,9m et 11,8m de largeur. Un renforcement est visible. Sa largeur est de 5,1m. Le capteur 20, situé au 6^{ème} étage, est placé dans ce renforcement. On peut supposer que cette partie, moins ventilée, aura des températures nocturnes plus chaudes que le capteur 24 (6^{ème} étage). Les capteurs 12 (6^{ème} étage) et 9 (4^{ème} étage), placés côté Sud, donnent sur une rue canyon.

De la donnée brute à la dangerosité

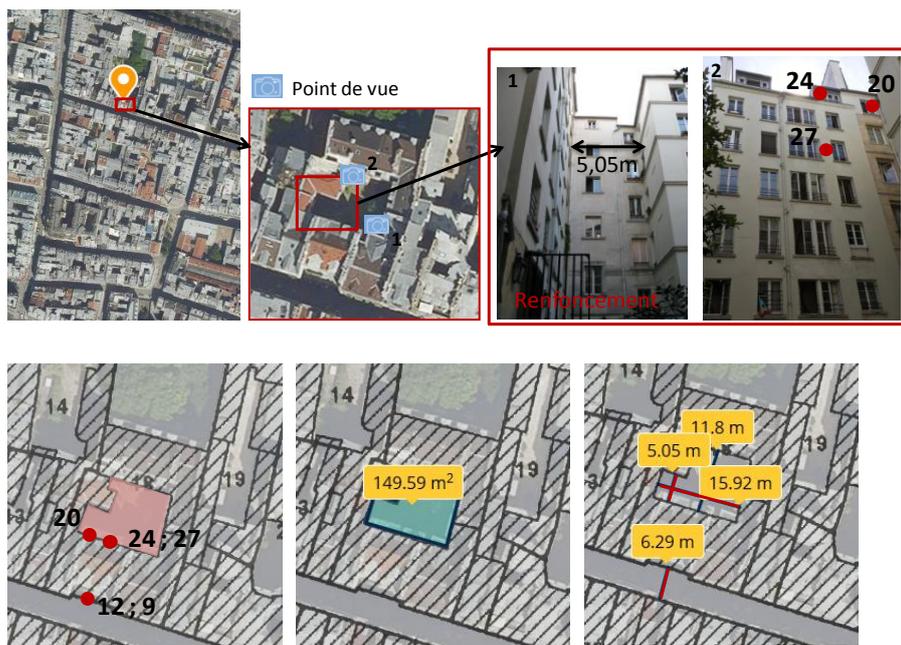


Figure 4.34 : Contexte des appartements A et B

- Appartement C

L'appartement C, se situe au 3^{ème} étage. Il donne sur une cour intérieure (Fig.4.35). Cette cour a une superficie bien plus petite que pour les appartements A et B. Sa superficie est de 84,8m² avec une largeur de 10m et longueur de 11,6m. Cette cour est moins ventilée que pour les appartements A et B en raison de sa faible superficie.

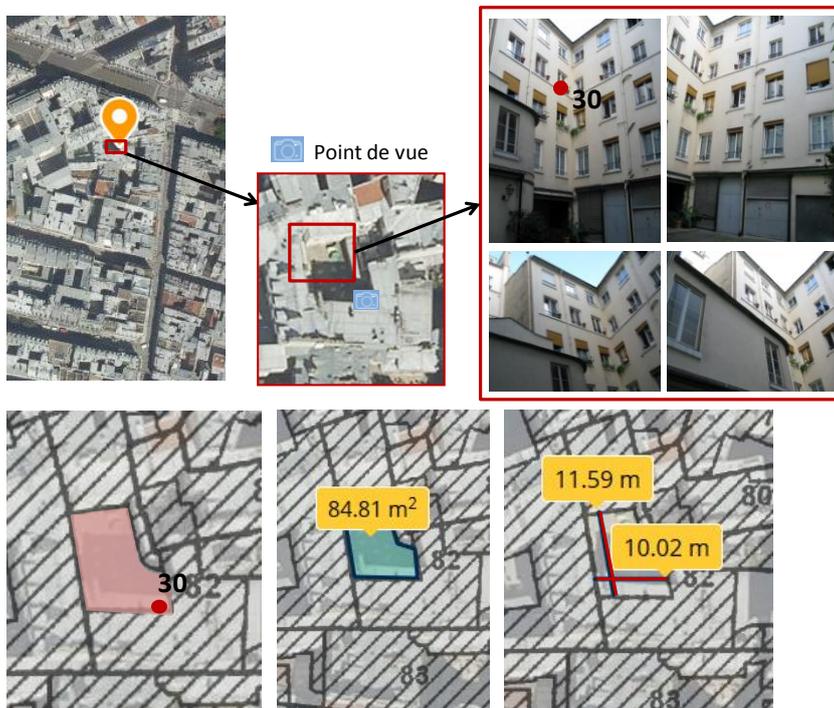


Figure 4.35 : Contexte de l'appartement C

- Appartement D

L'appartement D, se situant au 6^{ème} étage donne sur deux boulevards d'une largeur de 19,9m (Fig.4.36).

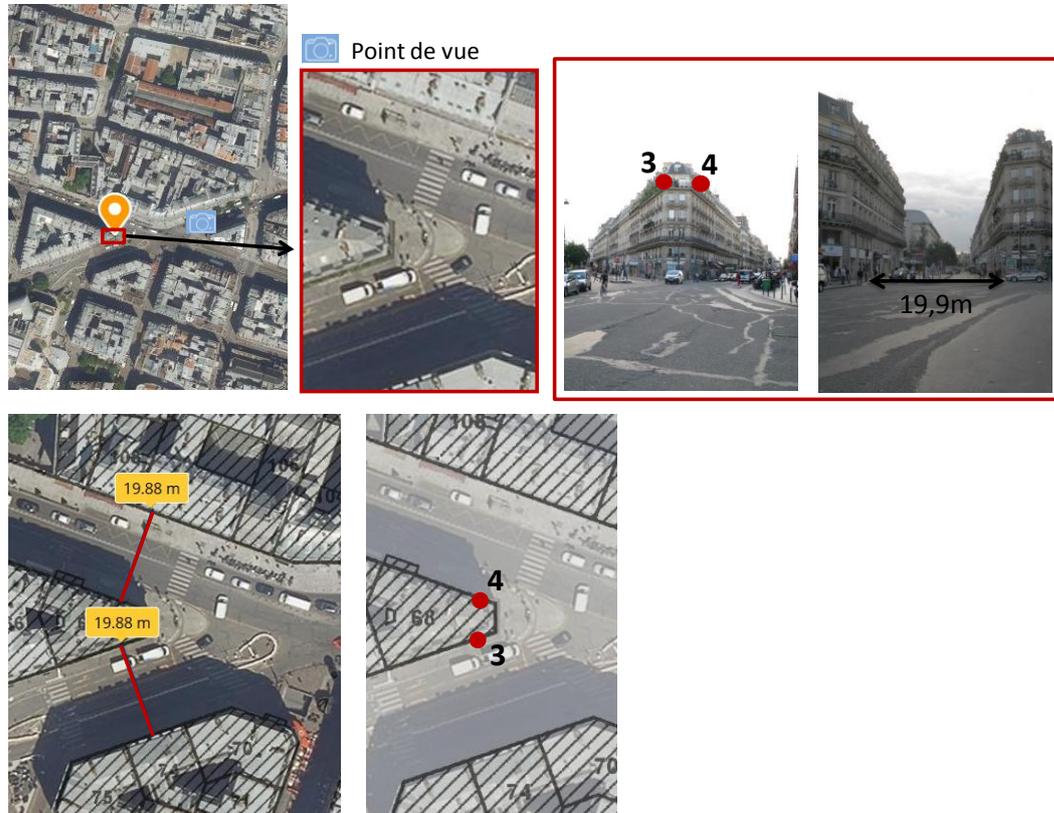


Figure 4.36 : Contexte de l'appartement D

De ces différentes configurations des hypothèses se posent :

- Est-ce qu'une différence de température est mesurée entre les cours intérieures ?
 - On peut supposer que par la superficie de la cour de l'appartement B, le brassage de l'air est faible voire inexistant et par conséquent, les températures extérieures seront élevées voir plus chaudes que celles des appartements A et B.
- Est-ce que dans une même cour et dans une même rue canyon, les températures sont différentes en fonction de l'altitude et des renforcements ?
 - On peut supposer que le capteur 12 aura des températures nocturnes plus chaudes que le capteur 9 en raison d'un meilleur brassage de l'air en altitude. On l'a constaté aussi lors de notre campagne de mesure 2014.
- Est-ce que les températures mesurées au niveau des grands boulevards sont les mêmes que dans les rues canyons ?
 - On peut supposer que les températures extérieures seront moins élevées que les températures de la rue canyon des appartements A et B en raison d'un meilleur brassage d'air.

- Est-ce que l'orientation a un poids plus fort que le contexte sur le comportement des températures ?

Remarque : Ces températures sont extérieures mais entourées d'immeubles. On pourra toujours se demander si elles ne subissent pas la nuit la chaleur des appartements.

3.2.2. Analyses

Le graphique 4.37 montre les températures des différents capteurs placés à l'extérieur des bâtiments. On constate une très forte homogénéisation des températures extérieures en opposition aux températures intérieures (pouvant atteindre les 10°C). Quelques différences de températures persistent à l'exemple du capteur 12 où les températures dépassent de plusieurs degrés celles des autres capteurs. Le capteur 12, dû à sa proximité avec la façade en zinc et à l'ensoleillement plus tardif, a ses températures élevées lors des périodes de canicules. Cependant, les températures suivent la même tendance.

On constate une hiérarchisation entre les capteurs. Le capteur 12, placé au dernier étage de l'immeuble A (6^{ème}) enregistre des températures toujours plus élevées que le capteur 9, placé au 4^{ème} étage du même immeuble. Le capteur 30 (exposé Nord) placé au 3^{ème} étage est plus frais que les capteurs 12 et 9 (exposés Sud). L'exposition et facteur altitudinal influencent sur les températures extérieures mais cela reste à nuancer. Il est difficile pour cette étude de hiérarchiser les températures en fonction de l'altitude puisque les capteurs ont été placés sur plusieurs immeubles de Paris. Certains immeubles se localisent dans une rue canyon et d'autres donnent sur des grands boulevards ou cours intérieures. La relation reste difficile à établir.

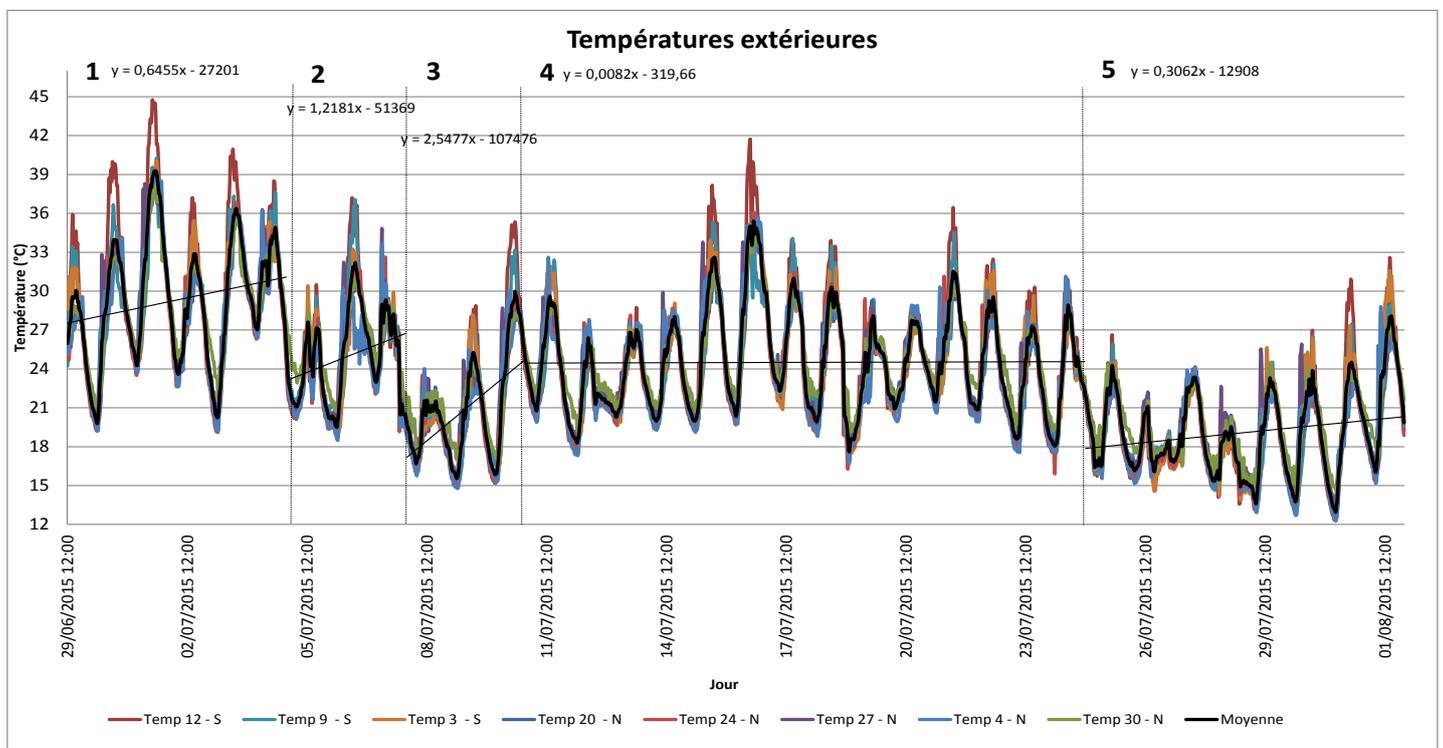
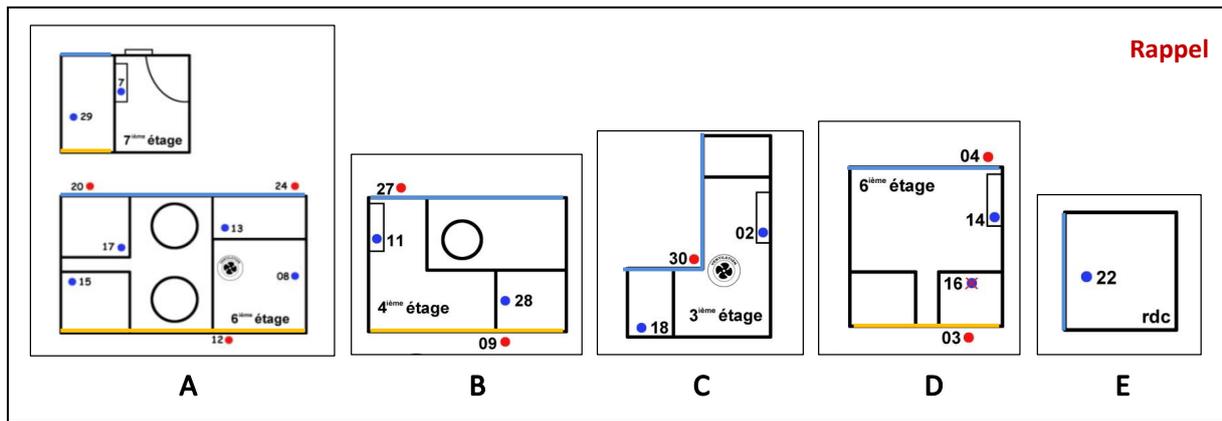


Figure 4.37 : Graphique des températures intérieures, juillet 2015



Ce graphique se compose de cinq périodes, segmenté par détection automatique sur la moyenne (Annexe 6).

- 1 : la première période débute le 29 juin pour se terminer le 4 juillet. Les températures extérieures diurnes dépassent les 31°C sur 5 jours consécutifs (tous les capteurs, de jour). Le capteur 12 enregistre les températures les plus élevées. Il dépasse 42°C le 1^{er} juillet. Les températures extérieures nocturnes dépassent le seuil des 21°C sur 2 jours consécutifs, le 29 juin et le 3 juillet, les températures sont sous les 21°C. Cette période est caractérisée comme caniculaire selon Météo-France.
- 2 : la seconde période est comprise entre le 5 et le 7 juillet. Une baisse des températures est visible avec la première période mais les températures restent élevées de jour. Les températures perdent plus de 12°C en une nuit. Les amplitudes thermiques diurnes/nocturnes sont moins importantes. La journée du 8 juillet est la plus fraîche avec une température diurne avoisinante les 22°C et une température nocturne inférieure à 17°C.
- 3 : la troisième période est comprise entre le 8 et le 10 juillet. Pendant cet intervalle les températures sont moins élevées. Les températures de nuit sont fraîches avec une moyenne de 15.2°C et les températures de jours dépassent légèrement les 24°C. Cette période est considérée comme fraîche pour la saison.
- 4 : la quatrième période est caractérisée par une hausse des températures. Durant cette période, on constate deux jours de fortes chaleurs où les températures sont supérieures à 33°C. La plupart des températures dépassent les seuils de 31°C (de jour) et de 21°C (de nuit), sur plusieurs jours, entre le 15 et le 19 juillet. L'amplitude thermique est moins importante lors de la période caniculaire. Les températures les plus hautes sont enregistrées par le capteur 12.
- 5 : la dernière période est une phase de refroidissement avec de faibles températures estivales. Elle est comprise entre le 20 juillet et le 1 août. A partir du 1^{er} août, les températures commencent à augmenter de nouveau pour atteindre les 22°C de jour. De nuit, les températures chutent jusqu'à 12°C, soit une différence d'un peu plus de 10°C entre la température diurne et nocturne.

La différence entre les températures diurnes et nocturnes est significative. Une grande amplitude thermique est constatée (moins visible pour les températures intérieures) durant toute la durée des mesures. La plus faible amplitude est d'environ 5°C.

Concernant l'exposition des capteurs :

- Côté Sud : les capteurs 12, 9 et 3 enregistrent les températures les plus élevées durant les périodes de canicules et de vague de chaleur. Sur l'ensemble de la période, le capteur 30 enregistre la plus forte moyenne.
- Côté Nord : les capteurs 20, 24 et 27 enregistrent les plus faibles températures sur ces périodes. L'exposition joue logiquement un rôle dans la distribution des températures.

La chronique horaire de la température moyenne extérieure du 30 juin au 1^{er} août permet de visualiser les périodes de refroidissement, de vague de chaleur et de canicule (Fig.3.38). Elle met en valeur le cycle diurne et nocturne des températures extérieures moyennes.

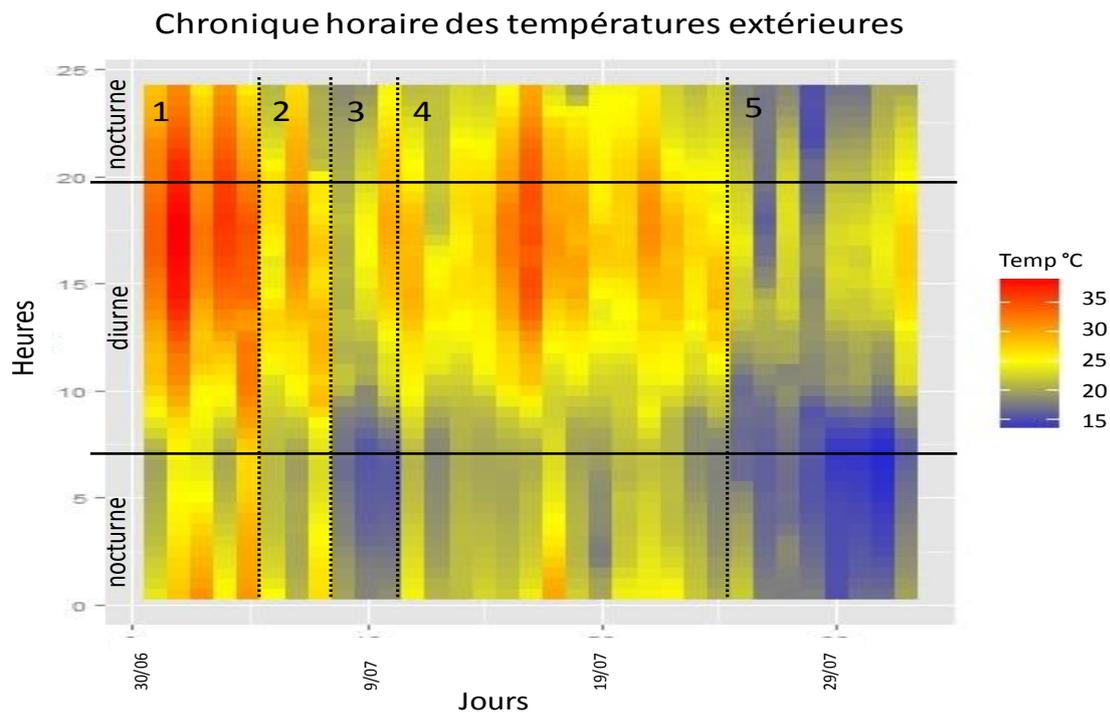


Figure 4.38 : Chronique horaire de la moyenne des températures extérieures, juillet 2015

Le contraste diurne/nocturne est mis en évidence sur cette chronique. Cette différence des températures est nettement plus remarquable en période caniculaire qu'en période de refroidissement. La période de canicule et des fortes chaleurs subies sur Paris entre le 30 juin et le 1^{er} août, sont visibles sur la chronique. La couleur rouge permet de distinguer ces événements. Durant la phase de canicule, on constate que les températures les plus élevées apparaissent vers 14h et sont continues jusqu'à minuit avec un pic de chaleur vers 19h. La canicule se ressent davantage la nuit puisque la différence de températures avec la journée est très faible. Les températures se refroidissent de quelques degrés mais restent très élevées.

Les heures les plus fraîches se localisent entre 2h et 9h quelle que soit la période. Les heures les plus chaudes, se localisent vers 14h et jusqu'à 20h. Vers 12h on enregistre les températures moyennes. C'est à partir de cette heure que les températures basculent de températures fraîches à élevées. Si on regarde seulement la plage de 12h-12h30, les températures moyennes se situent aux alentours de 25°C. Elles se rafraîchissent lors de la phase de refroidissement vers le 25 juillet.

Campagnes de mesures et différenciation des comportements par type d'appartements

Cette chronique permet de comprendre le phénomène de l'ICU non dans son échelle géographique mais dans son échelle temporelle. L'ICU est essentiellement nocturne et ne s'exprime nettement que certains jours. Lorsque les températures ont de faibles amplitudes thermiques, les plus élevées se situent en milieu de journée et l'air se refroidit dans la nuit. Cette caractéristique de l'ICU est visible sur la chronique. Spatialement, une comparaison avec la station Montsouris est nécessaire. Les relevés météorologiques disponibles proviennent principalement de stations de mesures situées en zones urbaines mais les conditions météorologiques sont différentes entre le centre urbain et sa proche périphérie.

La station météorologique de Météo-France à Montsouris est située à la périphérie de Paris dans le 14^{ème} arrondissement, placée au milieu du parc Montsouris, où les caractéristiques spécifiques des villes sont moins importantes (Fig.4.39). Les processus radiatifs, énergétiques, dynamiques et hydrologiques sont différents du milieu urbain.

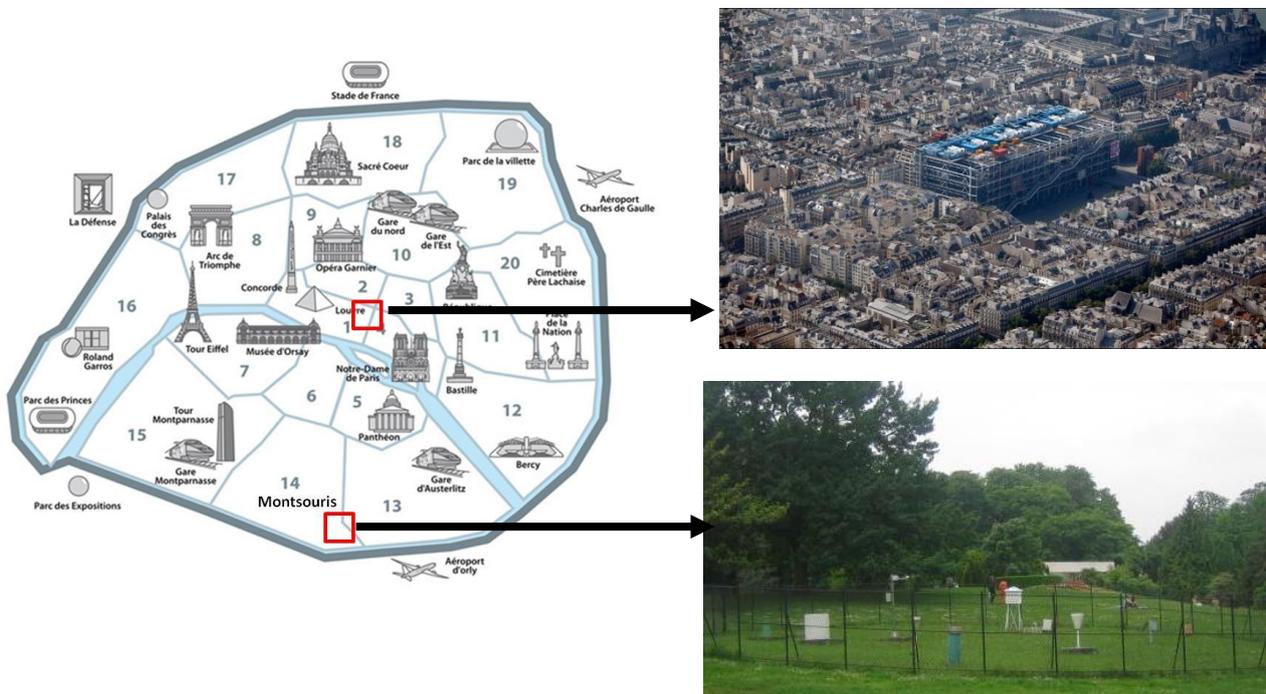


Figure 4.39 : Localisation de la station Paris Montsouris par rapport à notre site de mesure

Un graphique permet de comparer les données mesurées en milieu urbain avec celles de la station de Météo-France (Fig.4.40). Cette comparaison, même si discutable sur la précision des appareils de mesures et de leurs environnements respectifs et du protocole de mesure, permet de mettre en évidence plusieurs phénomènes.

On constate que les températures diurnes mesurées sont toujours plus élevées que les températures de Météo-France, avec une différence pouvant atteindre plus de 10°C. Les températures de la station se différencient davantage avec les capteurs placés côté Sud que ceux placés côté Nord. Cette forte différence de température diurne est très faible la nuit. De plus, certaines nuits, la station enregistre même des valeurs plus élevées que les capteurs à l'exemple des nuits du 30 juin, 9 et 10 juillet.

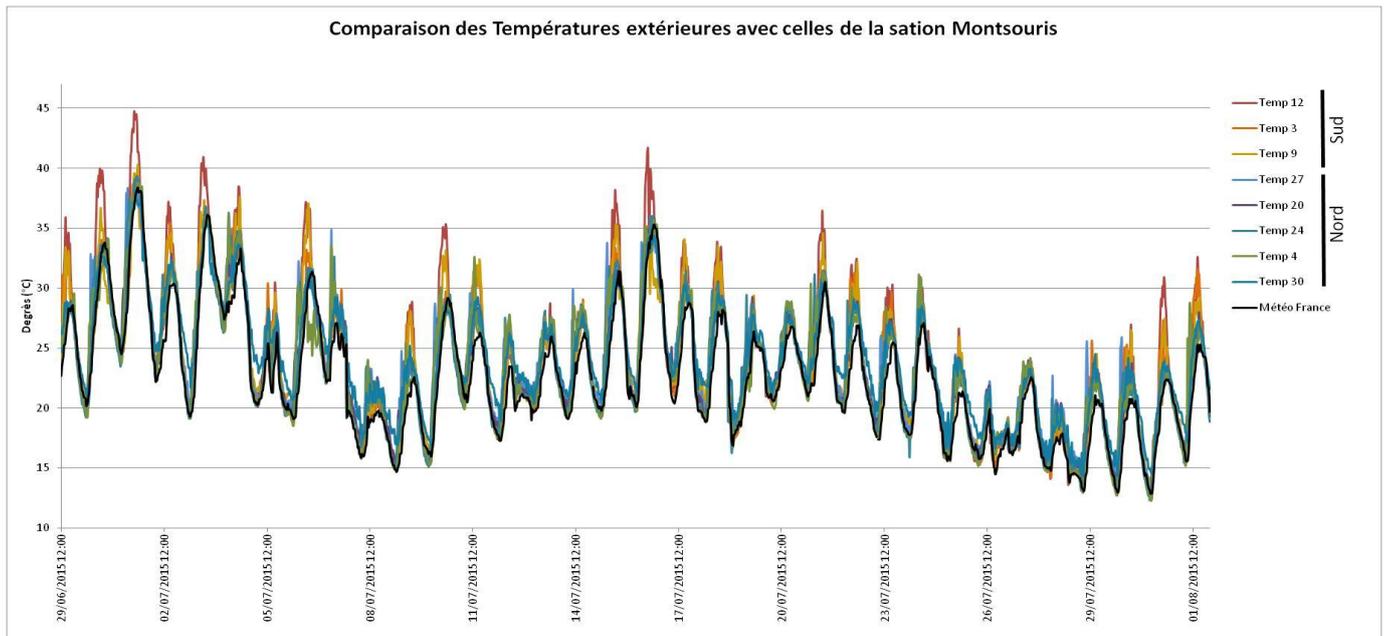


Figure 4.40 : Graphique des comparaisons des températures extérieures mesurées avec celles de la station Montsouris, juillet 2015.

Le phénomène d’îlot de chaleur urbain est constaté. Les valeurs des capteurs, plus élevées que la station, peuvent être perçues comme l’effet de la concentration de chaleur dans la ville et en particulier dans la rue canyon. La station Montsouris a des températures plus faibles, du fait de son emplacement (périphérie de la ville), que les capteurs localisés en milieu urbain. Le végétal est une véritable « pompe à fraîcheur ». Il puise l’eau du sol et la transpire quand il fait chaud. Cette évapotranspiration permet de rafraîchir l’air ambiant. De plus la photosynthèse capte et consomme une partie de l’énergie du soleil.

Les températures de la station sont inférieures aux températures mesurées au cœur du centre urbain. Le risque de gravité pour cette canicule est par conséquent sous-estimé. Cependant cela reste à nuancer en fonction de la précision du matériel et par conséquent de la mesure.

Pour résumer, on constate une faible différence de température entre les capteurs mais l’amplitude thermique entre la nuit et le jour est importante. Une hiérarchisation des capteurs en fonction de l’altitude est notée (12>9>30). Quatre périodes sont visualisées : canicule (températures élevées de 14h à minuit avec un pic à 19h), rafraîchissement, vague de chaleur et rafraîchissement. A midi, les températures moyennes sur toute la période, sont de 25°C environ. Le capteur 12 enregistre les températures les plus élevées. Les températures varient fortement. L’effet ICU est essentiellement nocturne et ne s’exprime que certains jours (situation anticyclonique). Les données issues de la station Montsouris sont plus faibles de jours mais s’équivalent de nuit avec les capteurs Tinytag.

Comme nous l’avons déjà observé, une différence de températures existe entre les côtés Nord et Sud. Pour une meilleure analyse de ce constat, nous avons différencié les deux orientations (Fig.4.41).

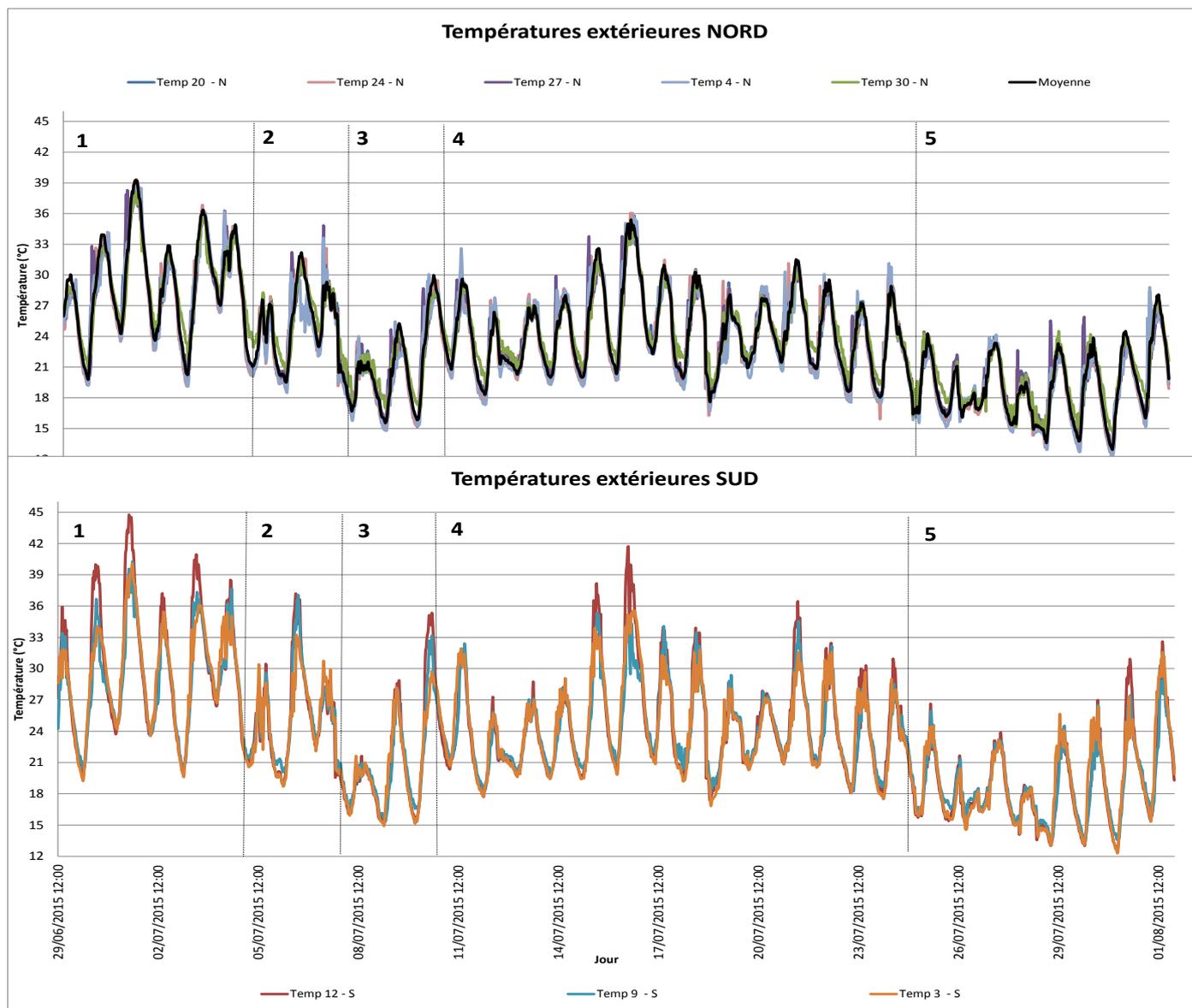


Figure 4.41 : Graphiques des températures extérieures côté Nord (haut) et côté Sud (bas), juillet 2015

Sur le graphique des températures extérieures on remarque une grande différence entre côté Nord et côté Sud : environ 5°C sur certains capteurs et sur certains jours. Cependant, si on fait la moyenne globale jour/nuit, on constate qu'elle est de 23,7°C pour chacune des températures (Nord et Sud), (Tab.4.18). Il y a très peu de variations de températures entre les deux orientations, tous capteurs confondus. Les températures moyennes diurnes et nocturnes sont peu différentes d'une orientation à l'autre. On constate une différence diurne de 0,5°C entre les côtés Nord et Sud. Pour les températures nocturnes, cette différence est de 0,1°C. De jour, les températures au Sud sont plus élevées en raison du rayonnement solaire direct.

Capteurs	Côté Nord					Côté Sud			Météo France® Mont-souris
	20 (6 ^{ème} cour)	24 (6 ^{ème} cour)	27 (3 ^{ème} cour)	4 (6 ^{ème} grd bld)	30 (3 ^{ème} cour)	3 (6 ^{ème} grd bld)	12 (6 ^{ème} rue canyon)	9 (3 ^{ème} rue canyon)	
Temp moy (°C)	23,63	23,59	23,81	23,51	24,12	23,64	23,84	23,64	
Moyenne total	23,7					23,7			22,75
Nuit	21,14	20,65	21,60	21,02	22,58	21,21	20,94	21,71	
Moyenne nuit	21,40					21,29			21.15
Jour	26,14	26,59	26,27	26,12	26,10	26,51	27,35	26,11	
Moyenne jour	26,24					26,66			24

Tableau 4.18 : Températures extérieures moyennes, de jour et de nuit

Concernant les amplitudes thermiques, elles sont plus importantes côté Sud que côté Nord, avec plus de 10°C de différence, côté Sud contre 7°C côté Nord. La période de canicule est nettement plus marquée côté Sud que côté Nord puisque l'exposition influence les températures extérieures due aux rayonnements directs reçus. Les rayonnements solaires sont beaucoup plus importants du côté Sud. Des températures extrêmes sont présentes sur 5 jours (pendant la période caniculaire) avec un maximum de 44,7°C (capteur 12).

- Côté Sud, au 6^{ème} étage (capteur 12), les températures sont toujours plus élevées que celles du 4^{ème} étage (capteur 9) du même immeuble. C'est encore plus visible de jour que de nuit, avec une différence comprise entre 5,2°C et 0,2°C. Comme le montre le tableau, de jour la température moyenne est de 27,4°C contre 26,1°C pour le 4^{ème} étage soit une différence moyenne de 1,2°C.
- Côté nord, ce constat est valable mais à plus faible intensité puisque les températures sont proches l'une de l'autre même à des étages différents. On retrouve 0,3°C de différence entre le 6^{ème} et le 4^{ème} étage du même immeuble. De nuit, les derniers étages se refroidissent davantage que les autres. En effet, le 6^{ème} étage enregistre des valeurs toujours inférieures aux autres capteurs pendant la nuit avec une différence pouvant atteindre jusqu'à 1,9°C.

L'altitude est un facteur à prendre en compte, tout comme l'exposition, puisqu'ils ont une influence sur les températures extérieures.

Le contexte permet de montrer que la moyenne des températures la plus élevée est pour le capteur 30, situé dans une petite cour intérieure, avec 24,1°C. De nuit, on peut faire le même constat. La chaleur est stockée dans la cour. Vu sa faible superficie, le brassage de l'air est quasi inexistant. On peut supposer que les températures intérieures sont aussi impactées par ce contexte, en plus de la forte isolation réalisée dans ce logement. C'est dans les grands boulevards que la température moyenne est la plus faible avec 23,5°C (capteur 4). Sur cour et sur rue canyon, au 6^{ème} étage, la température moyenne nocturne est la plus faible. Le brassage de l'air peut jouer un rôle.

Enfin, si on compare les températures mesurées à celles des données de Météo-France® (station Montsouris), on constate 1°C de différence pour les températures moyennes et jusqu'à presque 2°C pour les températures diurnes. Météo-France enregistre 24°C en moyenne pour les températures de jour contre 26,4°C pour les capteurs placés au centre de Paris. Cette différence peut provenir de la localisation de la station de Météo-France. Il serait judicieux d'installer une station au centre urbain

de Paris afin d'enregistrer des températures prenant en compte les différents phénomènes urbains engendrés par la ville.

Par ces différents constats, on note que les températures extérieures sont homogènes et ont le même comportement mais avec des amplitudes différentes. L'exposition joue un rôle sur les températures extérieures puisqu'une légère différence existe entre les courbes de températures côté Nord et côté Sud. Ce constat reste à prendre avec précaution puisque la moyenne globale est quasi la même. Les écarts de températures nuit/jour sont bien plus marqués côté Sud que côté Nord. L'altitude entre également en jeu dans la distribution des températures. Il existe des différences entre étages mais seulement côté Sud, si on les compare sur un même bâtiment. Le 6^{ème} étage enregistre des valeurs plus élevées que le 4^{ème} étage. Il est important de prendre en compte la localisation géographique et le contexte de chaque appartement. Une différence non négligeable existe entre le centre urbain non végétalisé et imperméabilisé avec un parc moins central traduisant l'ICU.

- Période de canicule

Météo-France a placé 26 départements en vigilance orange à partir du mardi 30 juin, à 14h, en raison d'un « épisode caniculaire précoce et durable ». L'Ile-de-France fait partie de ces 26 départements. Ainsi, si l'on se focalise davantage sur cette période, on peut faire plusieurs constats. Nous décrivons ci-dessous toutes les températures extérieures, de tous les capteurs, à minuit et à 14h entre le 30 juin et le 7 juillet (Tab.4.19).

Localisations	6 ^{ème} étage Appart A			3 ^{ème} étage Appart B		6 ^{ème} étage Appart D		3 ^{ème} étage Appart C	Moyenne	Météo- France (Montsouris)
	20 _s (cour)	24 _N (cour)	12 _N (canyon)	27 _N (cour)	9 _s (canyon)	3 _s (grd bld)	4 _N (grd bld)	30 _N (cour)		
30/06/2015 14:12	31,33	31,84	39,38	31,40	33,36	31,57	29,31	31,69	32,49	30,2
01/07/2015 00:12	27,74	27,52	27,44	28,17	28,18	28,38	28,24	28,53	28,02	28,9
01/07/2015 14:12	37,41	37,73	43,33	36,22	37,74	38,65	37,76	36,70	38,19	36,1
02/07/2015 00:42	29,79	29,50	29,87	30,00	30,43	30,37	30,38	30,40	30,09	30,6
02/07/2015 14:12	29,80	29,59	36,02	29,26	33,92	32,58	28,87	30,90	31,37	27,6
03/07/2015 00:12	24,21	23,60	24,76	25,33	25,45	25,10	24,73	27,10	25,03	24,2
03/07/2015 14:12	31,63	32,56	40,38	31,79	35,10	32,84	31,18	32,37	33,48	31,4
04/07/2015 00:12	30,45	30,14	30,09	30,31	30,73	31,28	31,04	30,80	30,61	31,6
04/07/2015 14:12	33,74	33,96	36,38	32,97	36,23	33,70	31,68	32,94	34	31,3
05/07/2015 00:12	23,82	22,78	23,73	24,92	25,13	24,84	24,70	27,08	24,62	24,2
05/07/2015 14:12	25,20	23,54	23,48	24,73	23,40	23,93	23,77	25,54	24,20	22,6
06/07/2015 00:12	20,72	19,84	20,30	20,93	21,22	20,47	20,03	22,94	20,80	20,2
06/07/2015 14:12	28,99	29,07	35,34	28,92	32,92	28,84	28,76	28,68	30,19	26,9
07/07/2015 00:12	26,33	26,34	26,63	26,31	27,14	27,35	26,67	27,66	26,80	27,9
07/07/2015 14:12	27,24	26,73	25,65	28,05	26,69	27,14	27,42	27,51	27,05	25,3

Tableau 4.19 : Températures extérieures entre le 30 juin et le 7 juillet 2015

De la donnée brute à la dangerosité

Sur la moyenne des capteurs, on constate effectivement une période de canicule à partir du 30 juin 14h puisque la température diurne est supérieure à 31°C et la température nocturne est supérieure à 21°C et ce, pendant 5 jours consécutifs. A partir du 5 juillet les températures baissent brutalement. Elles passent de 34°C à 24°C en 24h, soit une différence de 10°C.

Les capteurs sont supérieurs à 31°C à partir de 14h, excepté le capteur 4 avec une température de 29,3°C. Il dépasse ce seuil à partir de 15h30 et entre en période caniculaire quelques heures après les autres. Les capteurs 20 et 24, placés au Nord, vont enregistrer une température de 29°C le 2 juillet mais ils vont dépasser le seuil des 31°C à partir de 16h. Ainsi, on peut dire que tous les appartements passent en canicule quasi au même moment. Les capteurs placés au Nord passent en canicule, quelques heures après ceux placés au Sud.

La canicule se termine le 5 juillet en journée. Les températures enregistrées diminuent sous le seuil des 31°C, à l'exception des capteurs 12 et 9. Le 6 juillet, leurs températures sont supérieures à 31°C. Cette « vague de chaleur » est ponctuelle et ne dure pas 24h. Elle est très localisée puisque ces capteurs sont situés sur le même bâtiment. Dû à cette vague de chaleur, les températures nocturnes sont influencées et augmentent pour atteindre le seuil des 26°C pour tous les capteurs.

Les capteurs 20 et 24, on remarque que de jour, le capteur 24 est plus chaud que le capteur 20 et inversement de nuit ; le capteur 24 enregistre des températures plus fraîches que le capteur 20. On peut se poser la question de savoir si leur localisation joue un rôle. Le capteur 20, localisé dans le renforcement de la cour stocke la chaleur de jour et en raison du faible brassage dans cette partie de la cour, les températures sont plus chaudes.

Les données de Météo-France[®], la période de canicule n'a pas lieu puisque les seuils, pendant 3 jours consécutifs, ne sont pas atteints en journée mais seulement la nuit. Une seule journée dépasse le seuil, le 1^{er} juillet. C'est la journée la plus chaude avec 36,1°C. Pendant cette journée, on retrouve une différence de 2,4°C entre les données des capteurs et la station de Météo-France. Pendant, la nuit, les données sont plus ou moins équivalentes, avec 0,5°C en moyenne de différence. Ces différences sont dues à la localisation de la station de Météo-France ne reflétant pas l'exactitude des températures urbaines.

- Journée de fortes chaleurs : 15 au 19 juillet

Comme nous l'avons vu précédemment, une hausse des températures est perceptible à partir du 15 juillet jusqu'au 19 juillet (visible sur la chronique horaire et les différents graphiques). Météo-France n'a pas déclenché l'alerte jaune alors que l'on constate des températures dépassant le seuil de 31°C, d'après nos mesures. Une analyse plus en détail est donc nécessaire afin de mieux caractériser cette période de chaleur. Pour cela, nous avons relevé toutes les températures extérieures, de tous les capteurs, à minuit et à 14h entre le 15 et le 19 juillet (Tab.4.20).

Campagnes de mesures et différenciation des comportements par type d'appartements

Localisations	6 ^{ème} étage Appart A			3 ^{ème} étage Appart B		6 ^{ème} étage Appart D		3 ^{ème} étage Appart C	Moyenne
	20 _s (cour)	24 _N (cour)	12 _N (canyon)	27 _N (cour)	9 _s (canyon)	3 _s (grd bld)	4 _N (grd bld)	30 _N (cour)	
15/07/2015 00:12	21,74	21,13	21,54	22,40	22,13	21,88	21,87	23,01	21,96
15/07/2015 14:12	29,63	30,48	36,35	28,86	32,17	32,87	29,59	29,30	31,16
16/07/2015 00:12	23,12	22,66	23,46	23,91	24,52	24,37	23,75	24,79	23,82
16/07/2015 14:12	34,27	33,78	41,38	33,27	34,70	35,18	34,02	32,86	34,93
17/07/2015 00:42	28,88	28,47	28,74	28,97	29,59	29,82	29,72	29,98	29,27
17/07/2015 14:12	28,32	28,88	32,47	28,12	29,33	30,08	27,30	27,90	29,05
18/07/2015 00:12	22,29	20,87	21,55	22,45	22,98	22,37	21,75	22,78	22,13
18/07/2015 14:12	29,48	28,59	32,29	28,70	31,73	31,50	29,68	27,22	29,90
19/07/2015 00:12	20,37	19,20	19,44	19,45	20,83	19,83	18,84	22,29	20,03
19/07/2015 14:12	25,90	25,98	24,70	26,28	25,27	25,18	23,34	25,83	25,31

Tableau 4.20 : Températures extérieures entre le 15 et le 19 juillet 2015

De ce tableau, on constate que les seuils de 21°C de nuit et de 31°C de jour sont dépassés mais pas pour tous les capteurs. Le capteur 12 enregistre des valeurs largement au-dessus des seuils (atteignant les 41°C, le 16 juillet). Les capteurs situés au Nord ont quasi toutes leurs mesures inférieures aux seuils à l'exemple des capteurs 24, 27 et 30. La moyenne confirme que l'on n'est pas dans une période de canicule mais dans une période de forte chaleur, caractérisée par la vigilance jaune, de Météo-France. La température mesurée dépasse le seuil de 31°C seulement sur deux journées et le seuil de 21°C sur trois nuits consécutives. La journée la plus chaude est le 16 juillet avec 35°C de moyenne et par conséquent la nuit du 16 au 17 juillet est la plus chaude avec 29,3°C. Pendant cette période, on remarque que les températures nocturnes sont très élevées sur quasi la totalité des capteurs et cela jusqu'au 19 juillet.

Cette période ne peut être donc définie comme un épisode caniculaire. C'est à partir du 17 juillet que les températures diurnes vont commencer à se rafraîchir et passer sous la barre des 30°C pour la quasi-totalité des capteurs. Le capteur 12 enregistre les valeurs les plus élevées (moyenne globale) avec 28,2°C, contre 26°C pour les capteurs 4 et 24, situés côté Nord.

Le 19 juillet, les températures diurnes commencent à baisser entre 1,4°C et 7,6°C (capteur 30 et 12) en seulement 24h. Les températures nocturnes enregistrent une plus faible différence de température avec une moyenne de 1,7°C. Ce constat confirme à nouveau que les températures diurnes fluctuent davantage que les températures nocturnes.

L'analyse des températures extérieures de jour et de nuit ainsi que les écarts à la moyenne est présentée en annexe 7.

La CAH vient en complément de notre analyse. Elle permet d'organiser et classer les capteurs en fonction de leurs similitudes. La CAH des températures extérieures permet de classer les capteurs selon deux groupes en fonction de l'orientation et de la valeur des températures des capteurs (Fig.4.42).

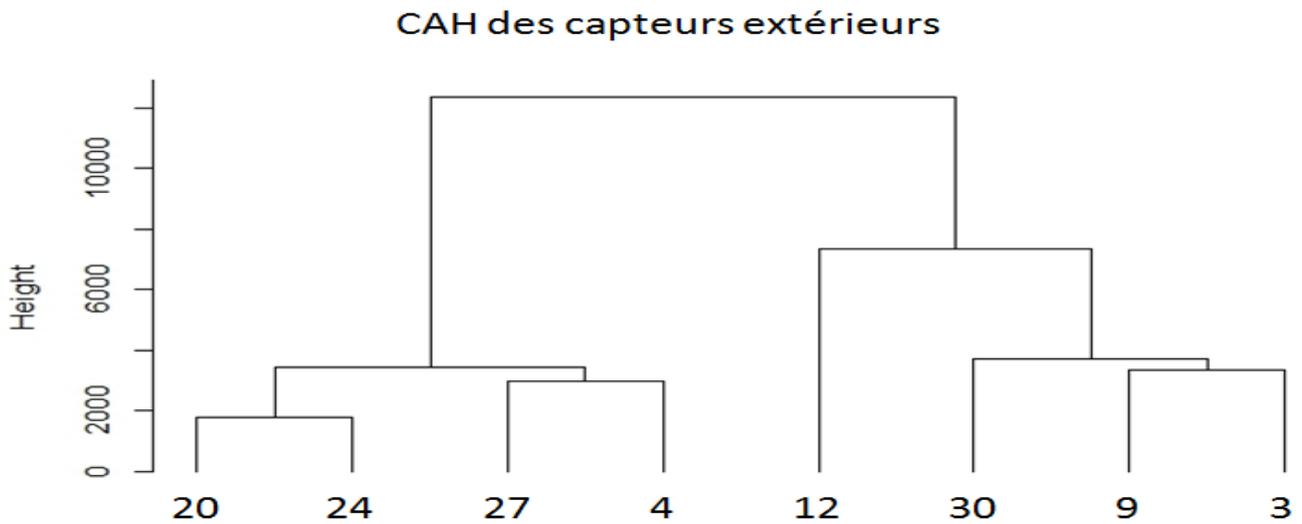


Figure 4.42 : CAH des capteurs extérieurs

- La première classe est définie par les capteurs orientés Nord. Cette branche se divise en deux autres classes. Les capteurs 20 et 24, par leurs localisations et leurs fortes similitudes dans les températures forment une classe. Les capteurs 27 et 4, tous deux orientés Nord, ont de fortes ressemblances. Ils se regroupent.
- La deuxième classe est caractérisée par des températures élevées et des capteurs positionnés au Sud. Le capteur 12 par ses fortes valeurs de températures et sa distinction par rapport aux autres valeurs est isolé sur une branche, tout comme le capteur 30. Ce capteur, orienté Nord, est classé comme ceux positionnés au Sud par ses températures élevées. Les capteurs 9 et 3 forment une branche appartenant au capteur 30.

Cependant, vue la forte ressemblance entre les températures existant d'un capteur à l'autre, une étude sur le comportement thermique de chaque capteur ne serait pas utile. La question est de savoir si les températures extérieures impactent les températures intérieures.

A l'extérieur de chaque appartement testé, on constate plusieurs périodes (de canicule, de refroidissement, de hausse) se définissant par des températures et des propriétés similaires. D'une courbe à l'autre, à une même date, on retrouve de faibles différences. Les températures ont quasiment le même comportement. La phase de canicule débute le 1^{er} juillet pour se terminer le 5 juillet. Les températures extérieures sont supérieures aux seuils de 31°C de jour et de 21°C de nuit pendant plus de trois jours consécutifs. Selon la définition de Météo-France, la période de canicule est reconnue. La deuxième période correspond à une baisse puis stagnation des températures après la canicule. Cette baisse ne dure que quelques jours mais permet de rafraîchir l'air extérieur. Une phase de vague de chaleur est présente pendant cette période. Elle correspond à la troisième phase comprise entre le 15 et le 17 juillet. Les températures sont élevées, de nuit comme de jour, sur plusieurs jours mais ne peuvent pas être qualifiées de canicule. Une nouvelle chute des températures de plusieurs degrés caractérise la quatrième phase. C'est la plus fraîche de la période, suivie d'une augmentation des températures à partir du 29 juillet.

La différence de l'exposition (Nord/Sud) sur les températures extérieures est plus visible si l'on se concentre seulement sur les températures diurnes que sur les températures nocturnes. En effet, de nuit, il existe une faible différence de température entre les capteurs côté Nord et côté Sud avec une différence moyenne de 0,8°C. Si on se focalise sur les températures en journée, on peut avoir une différence de plus de 5°C sur certains capteurs.

Par tous ces graphiques, on remarque que les capteurs 30 et 12 diffèrent des autres. Si on se focalise d'abord sur le capteur 12, on remarque qu'il varie très légèrement (de nuit comme de jour) par rapport aux autres puisqu'il a un écart min-max très faible. Pendant la phase nocturne, sa température reste élevée, avec une différence de plus de 1°C par rapport aux autres capteurs. En journée et pendant les périodes de fortes chaleurs, il enregistre les températures les plus élevées. On suppose que sa localisation, au 6^{ème} étage et son orientation Sud jouent un rôle primordial dans l'influence de ses températures. Il possède toutes les caractéristiques d'un capteur extrême, il enregistre les températures les plus chaudes et des fluctuations constantes et très importantes sur toute la période de test.

Le capteur 30, tout comme le 12, a des particularités différentes par rapport aux autres. Ce capteur placé au Nord, au 3^{ème} étage d'un bâtiment, dans la cour intérieure, reflète le phénomène de cuvette. L'air circule peu et le brassage de l'air est quasi inexistant d'où un faible rafraîchissement durant les périodes nocturnes.

3.3. Températures et appartements

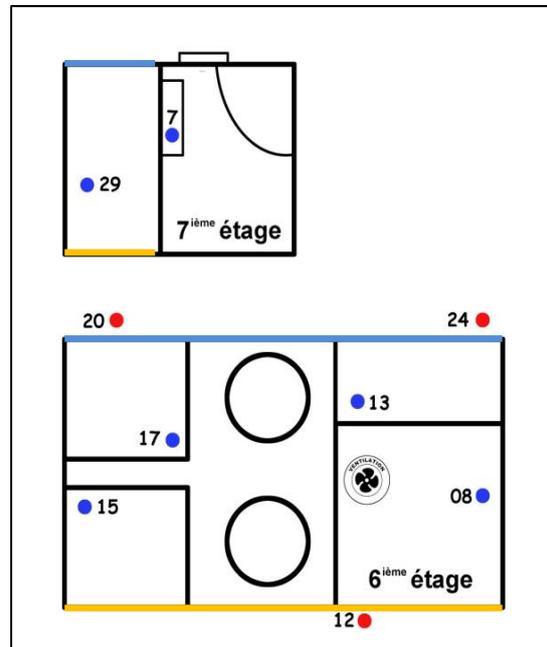
Sur l'ensemble des graphiques, on remarque une grande différence entre les températures intérieures et extérieures notamment par l'amplitude thermique, par l'homogénéisation ou l'hétérogénéité des températures, par la perception des températures diurnes et nocturnes. Par exemple, les écarts de températures nuit/jour sont plus importants à l'extérieur qu'à l'intérieur des bâtiments. L'air se renouvelle moins vite à l'intérieur du fait de l'isolation mais aussi de l'exposition, de l'aménagement et des systèmes de ventilation mis en place par les différents habitants. Ainsi, les périodes de canicule sont plus longues à l'intérieur du bâtiment. Les périodes chaudes sont visibles sur 3-4 jours à l'extérieur contre 6-7 jours à l'intérieur. Cependant, sur tous les graphiques présentés, on visualise bien les périodes chaudes et les périodes de refroidissement.

L'impact des températures extérieures sur les températures intérieures, en fonction des appartements est présenté dans cette partie.

3.3.1. Appartement A

Pour rappel

L'appartement A se localise dans une rue canyon donnant sur rue et sur une cour intérieure (côté Nord). Il se situe aux 6^{ème} et 7^{ème} étages d'un ancien immeuble parisien. Il est à double exposition (Nord-Sud), il possède 4 fenêtres et un velux en duplex, une pièce à vivre (capteur 8), 3 pièces (capteurs 13, 17 et 15). Au centre, un couloir séparant les différentes parties de l'appartement. Le duplex est cloisonné en 2 pièces (capteurs 29 et 7). Le capteur 7 est mieux ventilé que le capteur 29. Une ventilation forcée est utilisée sur 2h, chaque jour, pendant la période de canicule, entre 20h et 22h. Pour les capteurs extérieurs, le 20 et le 24 sont situés dans une cour intérieure ventilée. Le 20 est dans un renforcement. Le capteur 12 donne sur une rue canyon et peut être impacté par la proximité des façades extérieures.



- Températures intérieures-extérieures

Le graphique 4.43 représente les températures intérieures et extérieures, dans l'appartement A. Il permet de montrer l'influence d'une température sur l'autre.

Sur les températures intérieures et extérieures dans l'appartement A, aux 6-7^{ème} étages, on constate que les températures extérieures influencent les températures intérieures puisqu'elles varient de la même manière mais avec une intensité et une amplitude plus faible.

Pendant la phase de canicule, on constate qu'il y a très peu de différence entre les températures extérieures et intérieures nocturnes. Il fait aussi chaud à l'intérieur du logement qu'à l'extérieur pendant la nuit. Les températures intérieures ne peuvent pas descendre plus dans les degrés que la température extérieure.

Le capteur 13 (intérieur Nord) est le moins influencé par les températures extérieures, avec une corrélation de 0,6 avec le capteur 24 (extérieur Nord). C'est d'autant plus marqué en période de forte chaleur. Dès que la température extérieure commence à diminuer, la température du capteur 13 (intérieur Nord), avec 1h de décalage diminue fortement par rapport aux autres capteurs. Cette pièce est la mieux ventilée et, est orientée au Nord.

Le capteur 7 et le 29 (intérieur duplex), sont fortement influencés par les températures extérieures, avec des corrélations de 0,8 et 0,7, avec le capteur 12 (Tab.4.21). Ces capteurs varient en suivant la température extérieure. Leur emplacement joue un rôle. En effet, les capteurs 7 et 29 sont, en

Campagnes de mesures et différenciation des comportements par type d'appartements

duplex avec un seul velux où la ventilation naturelle est très faible. La température intérieure pour le duplex ne fait qu'augmenter. Le duplex se refroidit légèrement lorsque la température extérieure diminue. L'occupant n'est jamais resté dans cette pièce durant la première quinzaine de juillet en raison des fortes températures.

On constate que les températures intérieures se comportent différemment en fonction des périodes. A partir du 12 juillet, on remarque que les températures intérieures sont aussi élevées que les températures extérieures. Ce constat est aussi présent après le 23 juillet et n'est visible que pendant les périodes de rafraîchissement où la température extérieure est inférieure à 29°C. Cette observation montre que l'appartement, même ventilé, stocke et accumule la chaleur, il a du mal à se refroidir alors que l'air extérieur est frais. Une différence de plus de 10°C est visible entre les températures nocturnes intérieures et extérieures pendant les périodes chaudes.

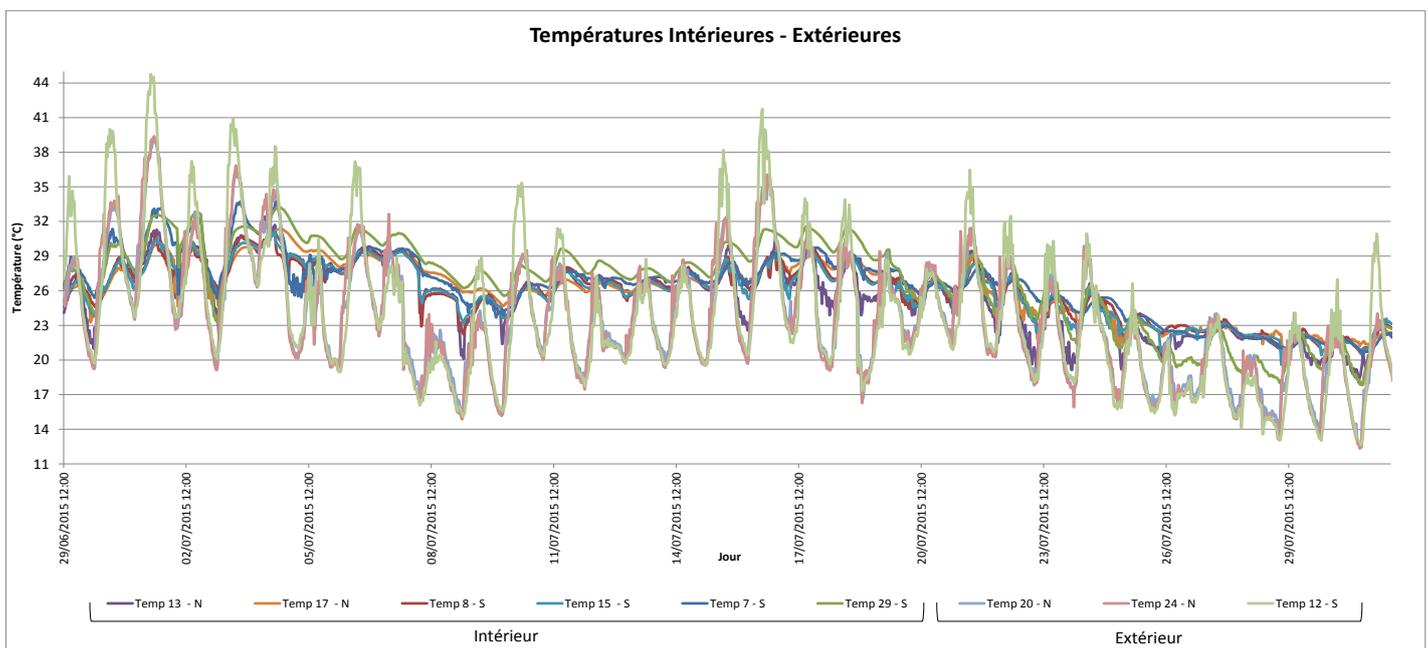


Figure 4.43 : Températures intérieures-extérieures, appartement A

Concernant les capteurs, on constate que le 13 (intérieur Nord) enregistre les valeurs les plus faibles sur la quasi-totalité de la période, avec une moyenne de 25,4°C contrairement au capteur 29 (intérieur duplex) ayant une moyenne de 26,7°C. Ce dernier enregistre une différence de température de 0,3°C à plus de 2°C par rapport aux autres capteurs. Cette forte différence et ces températures élevées sont dues à son emplacement. En effet, situé dans une mezzanine, le capteur enregistre des valeurs plus élevées du fait de l'effet cheminée : l'air chaud monte.

Concernant les variations de températures jour/nuit, on remarque que les températures extérieures ont une plus grande amplitude thermique par rapport aux températures intérieures. Lorsqu'il y a de fortes amplitudes thermiques pour les températures extérieures, on constate que les températures intérieures ont aussi de grandes amplitudes thermiques et inversement. La température extérieure influence avec une grande importance la température intérieure. L'air se refroidit davantage à l'extérieur. L'air intérieur avec la chaleur accumulée durant la journée reste dans la pièce, durant la nuit. Cependant, durant la phase de canicule et sur les journées 23-24 juillet, ce constat est valable

mais à plus faible intensité. La température est quasiment la même entre l'intérieur et l'extérieur, de 1°C à 4°C contre 5°C à 7°C en période non caniculaire.

Au niveau de la corrélation entre les températures intérieures et extérieures, on peut constater que le côté Sud enregistre une meilleure corrélation avec 0,8 contre 0,7 pour le côté Nord (Tab.4.21). Cependant, la corrélation reste très importante d'un côté comme de l'autre. Ainsi, par ces fortes corrélations existant entre les capteurs, nous confirmons que la température extérieure influence la température intérieure et que l'orientation est un élément important dans le comportement des températures.

Capteurs	7 Inté - S	8 Inté - S	29 Inté - S	13 Inté - N	15 Inté - S	17 Inté - N	20 Exté - N	24 Exté - N	12 Exté - S
7	1	0,980	0,949	0,967	0,955	0,965	0,729	0,658	0,816
8	0,980	1	0,932	0,966	0,923	0,949	0,697	0,629	0,778
29	0,949	0,932	1	0,914	0,970	0,955	0,666	0,584	0,773
13	0,967	0,966	0,914	1	0,925	0,949	0,726	0,655	0,799
15	0,955	0,923	0,970	0,925	1	0,964	0,734	0,651	0,836
17	0,965	0,949	0,955	0,949	0,964	1	0,695	0,611	0,798
20	0,729	0,697	0,666	0,726	0,734	0,695	1	0,965	0,900
24	0,658	0,629	0,584	0,655	0,651	0,611	0,965	1	0,847
12	0,816	0,778	0,773	0,779	0,836	0,798	0,900	0,847	1

Tableau 4.21 : Corrélation de l'appartement A

La figure 4.44 représente les chroniques horaires intérieures et extérieures, à la même échelle de valeur. Les températures intérieures trop peu différenciées, un autre graphique est réalisé sur une plage de valeur différente de celle extérieure (Fig.4.45). On constate que lorsque la température extérieure est élevée ou fraîche, la température intérieure l'est également avec quelques degrés en plus. Il fait plus chaud à l'intérieur qu'à l'extérieur durant les périodes nocturnes et inversement en journée. Avec l'inertie thermique, les températures nocturnes intérieures sont plus élevées que les températures nocturnes extérieures. Les périodes les plus chaudes se situent entre 15h et 20h et les heures les plus fraîches entre 3h et 10h. Les températures intérieures durant les périodes de fortes chaleurs se refroidissent peu. Les températures intérieures restent très élevées contrairement aux températures extérieures.

Campagnes de mesures et différenciation des comportements par type d'appartements

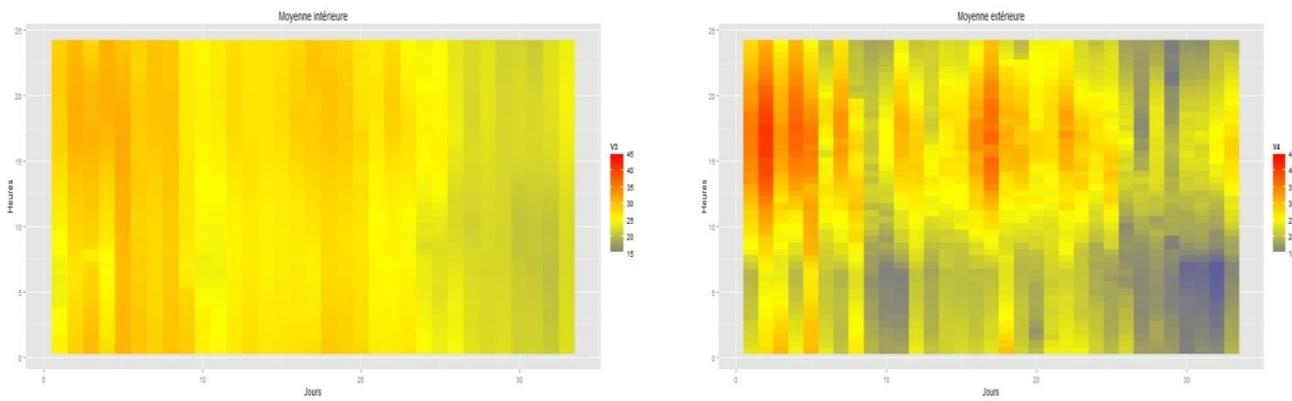


Figure 4.44 : Chronique horaire des températures intérieures (à gauche) et extérieures (à droite) pour l'appartement A, pour une même échelle en juillet 2015

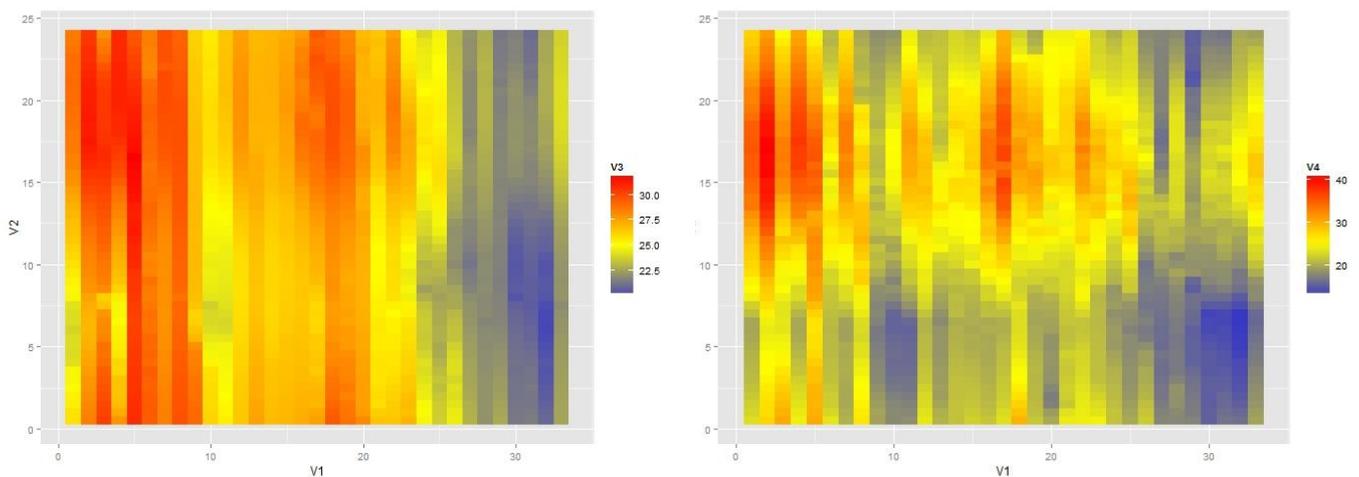


Figure 4.45 : Chronique horaire des températures intérieures (à gauche) et extérieures (à droite), appartement A, juillet 2015

- Description des températures intérieures-extérieures, diurnes-nocturnes

Pour approfondir notre analyse, un zoom sur la variation des températures diurnes et nocturnes est réalisé (Fig. 4.46).

Pendant la journée, on constate deux périodes caractérisant les températures extérieures. Ces dernières augmentent jusqu'à 16h30 puis diminuent progressivement. En période de canicule, les pics de chaleur apparaissent à 15h30. Pendant la nuit, on remarque que les températures chutent jusqu'à 6h puis une forte augmentation de températures est présente jusqu'à 10h.

On constate que la différence de températures entre l'intérieur et l'extérieur est plus importante côté Nord que côté Sud, sauf pour les périodes de rafraîchissement, de jour comme de nuit. Cette différence entre l'exposition est notée avec une plus grande intensité de nuit. L'orientation joue un rôle dans le rafraîchissement des pièces puisque le côté Nord se rafraîchit davantage et avec une plus grande intensité que le côté Sud.

De la donnée brute à la dangerosité

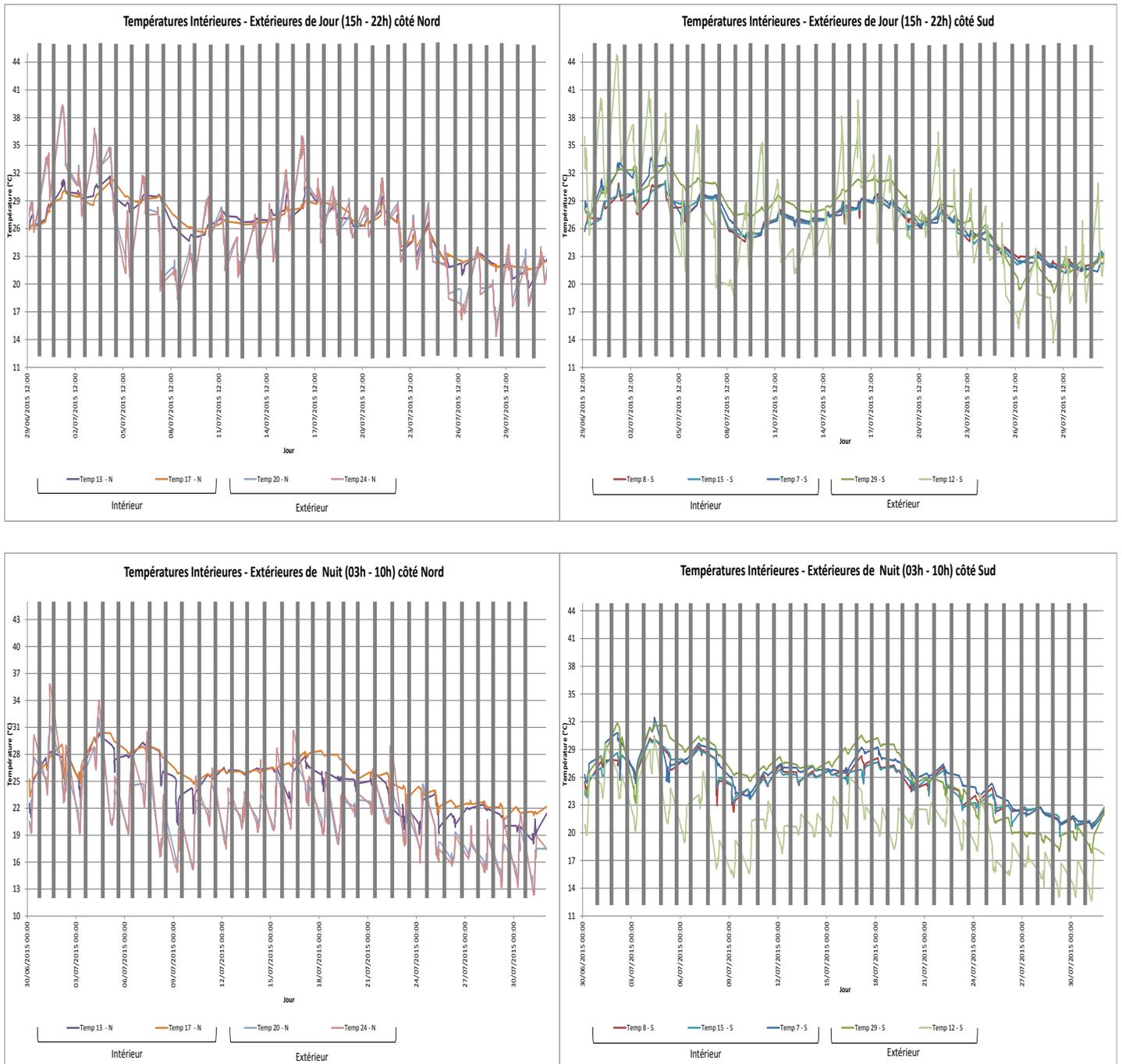


Figure 4.46 : Températures intérieures-extérieures en fonction de l'orientation de nuit et de jour, appartement A, juillet 2015

- **Côté Sud** : durant la nuit du 9 juillet, on remarque une grande différence de température entre l'intérieur et l'extérieur, de 10,6°C et 7,4°C entre les capteurs 12 (extérieur Sud) et 29 (intérieur Sud) et entre les capteurs 12 et 8 (intérieur Sud). Ainsi, on peut dire que lors d'un rafraîchissement brutal de plusieurs degrés, la température intérieure décroît jusqu'à une nouvelle hausse.

Les capteurs intérieurs 8, 15 et 7 (intérieur Nord) se ressemblent par leurs faibles différences de températures, de jour. De nuit, on retrouve une hiérarchisation dans les capteurs. Le capteur 29 a des valeurs plus élevées que le capteur 7, qui lui-même a des températures plus

élevées que les capteurs 8 et 15. Ce constat est valable jusqu'au 20 juillet. Pendant la période de rafraîchissement, les températures du capteur 29 chutent brutalement pour arriver à une différence négative de plus de 3°C avec les autres capteurs. En effet, c'est à partir de cette date que la pièce est habitée, donc mieux ventilée puisque les températures baissent.

- Côté Nord: on peut faire le même constat mais avec une intensité légèrement plus importante puisque les différences de températures, pour la même nuit sont comprises entre 5°C et 11,3°C. La température intérieure peut être la même que la température extérieure, côté Nord, surtout en période de rafraîchissement. De plus, les températures ont des comportements différents sur la journée. Le capteur 13 (intérieur Nord) en journée suit, à quelques degrés près (inférieure à 2°C) le même comportement que le capteur 17 (intérieur Nord). Or, de nuit, le capteur 13 enregistre des valeurs bien plus faibles que le capteur 17. Cette différence de températures entre les deux capteurs intérieurs Nord peut aller jusqu'à 5,8°C (pour la nuit du 9 juillet) en raison de la meilleure ventilation dans la pièce du capteur 13.

Enfin, on remarque que les capteurs intérieurs enregistrent, pour quasi la totalité de la période (sauf pendant les jours de fortes chaleurs), des valeurs plus élevées que les capteurs placés à l'extérieur pendant la nuit. Contrairement aux températures diurnes, on constate que les températures intérieures sont toujours plus élevées que celles extérieures. Cette différence de température va de 9°C (en période de rafraîchissement) à 1°C (en période caniculaire), côté Nord et Sud confondu. Ainsi, en période nocturne, le logement conserve la chaleur accumulée durant la journée et arrive peu à se refroidir à la tombée de la nuit. L'air extérieur se réchauffe dès que la température intérieure commence à se refroidir.

Pour résumer, par ces graphiques, on constate qu'en périodes diurnes, l'orientation influence plus faiblement les températures, contrairement aux périodes nocturnes. En période caniculaire et vague de chaleur, les températures intérieures sont quasi égales aux températures extérieures, côté Nord comme côté Sud et les écarts de températures intérieures entre le côté Nord et Sud sont faibles. Les capteurs 7 et 29 (duplex) sont ceux enregistrant les plus fortes valeurs. Si on regarde tous les autres capteurs, la différence est tout le temps quasi inférieure à 1°C. Ce constat est valable pour toute la période, excepté lors de pics de rafraîchissement. Le capteur 13 (intérieur Nord) se refroidit plus rapidement que les autres créant une différence de plus de 3°C pendant ces pics.

- Zoom sur les périodes

Nous voyons que les températures ont des comportements différents en fonction de l'orientation, de l'heure de la journée mais aussi en fonction des périodes. Un zoom est fait sur les quatre périodes observées afin de montrer avec plus de précision si un stress de chaleur existe ou non.

Périodes de fortes chaleurs : 1 et 3

Concernant les périodes chaudes, à savoir la canicule et la vague de chaleur, durant le mois de juillet 2015, on remarque que les températures intérieures se localisent dans la zone de chaleur modérée comprises entre 26°C et 32°C (Fig.4.47).

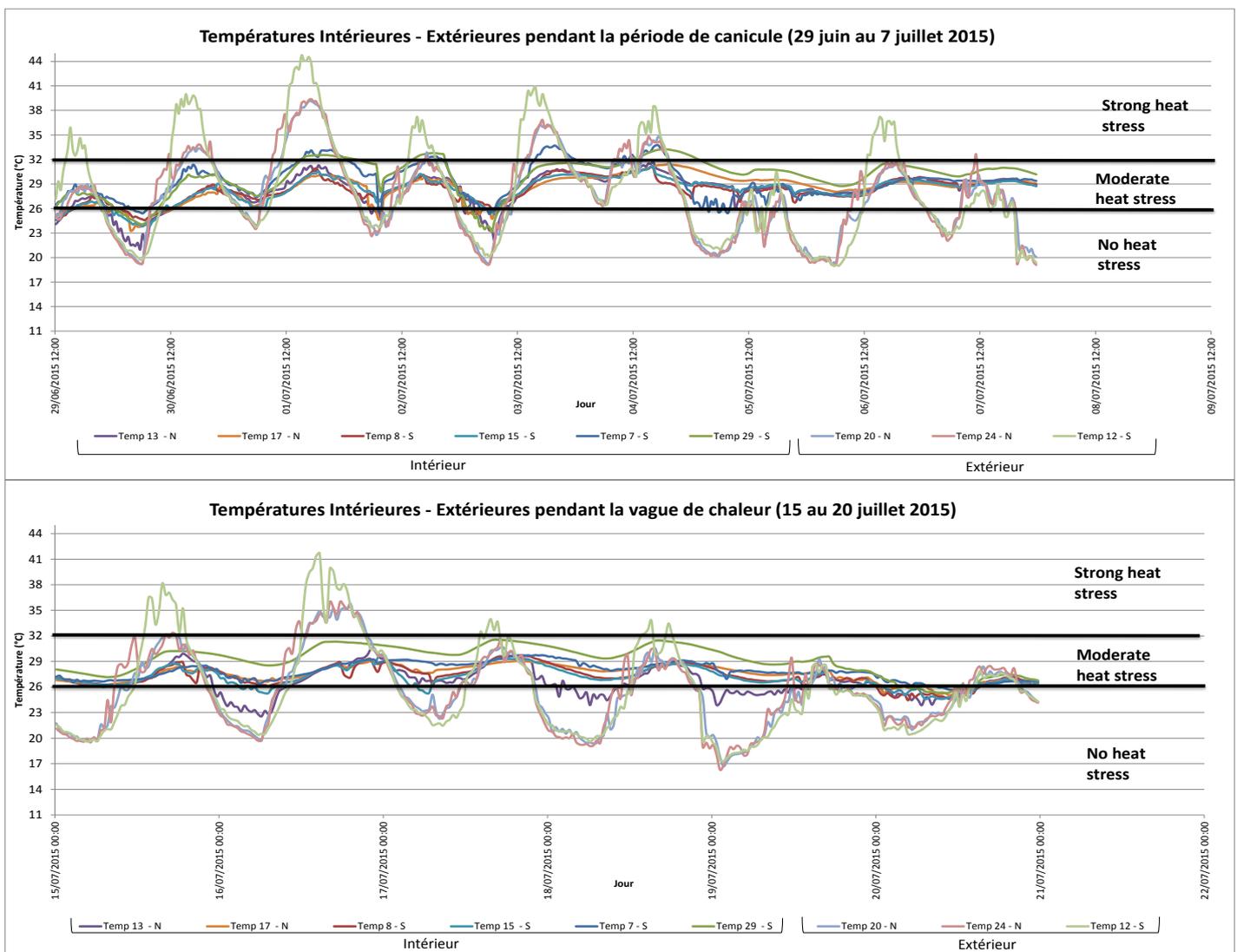


Figure 4.47 : Graphique des températures intérieures et extérieures durant les périodes de fortes chaleurs, juillet 2015

Les capteurs 29 et 7 placés en mezzanine : durant la journée la plus chaude de la canicule, le 1^{er} juillet, enregistrent des valeurs supérieures à 32°C. Les pièces, où ils se localisent, sont dangereuses pour l'occupant puisqu'ils dépassent le seuil tolérable des 32°C. Ces capteurs vont atteindre de nouveau ce seuil sur les journées du 3 et du 4 juillet.

Les autres capteurs se localisent tous dans la zone modérée. Durant les fortes chaleurs, les températures (jour comme nuit) restent très élevées puisqu'elles ne descendent quasi jamais en-dessous du seuil des 26°C représentant la limite entre la zone de non stress et de stress modéré. Après, la grosse canicule de trois jours, les températures restent toujours élevées. Les températures nocturnes extérieures, même si plus fraîches, ont une répercussion sur les températures intérieures. Elles passent sous la barre des 26°C sur deux nuits, non consécutives. Dans la nuit du 1^{er} au 2 juillet, on constate une brusque et furtive chute des températures intérieures surtout pour les capteurs 7 et 29 avec 2,7°C de différence. On se pose donc la question, à savoir, si une ventilation forcée est utilisée à ce moment-là. Sur les jours suivants, les températures nocturnes pendant les quatre premiers jours suivent plus les tendances des températures extérieures.

Campagnes de mesures et différenciation des comportements par type d'appartements

En opposition aux fortes chaleurs, on remarque que pendant la canicule les températures intérieures baissent de quelques degrés, durant la nuit. Cette diminution permet de rafraîchir légèrement l'appartement. Pendant cette période, les températures évoluent très peu. La distinction entre le jour et la nuit est faible. On peut donner l'exemple du capteur 29. Celui-ci enregistre une différence de 3°C entre son minimum et son maximum). Cette différence est trop faible pour sentir une sensation de fraîcheur dans la pièce. Ce constat est élargi sur les autres capteurs intérieurs.

Concernant les températures extérieures, pendant la journée et les pics de températures, on retrouve une grande différence entre les capteurs côté Nord et ceux côté Sud contrairement en période nocturne. En journée, on constate une différence de plus de 5°C entre les températures Nord et Sud. De nuit la différence est inférieure à 0,8°C.

Un décalage de 30 minutes à 1h est présent entre le moment où le pic de chaleur apparaît à l'extérieur et impacte la température à l'intérieur. La température au 1^{er} juillet, on aperçoit un décalage entre les pics. Le capteur 12 (extérieur Sud) enregistre son maximum de température à 15h avec 44,7°C contrairement au capteur 7 (intérieur duplex) qui va atteindre son maximum une heure plus tard, à 16h avec 33°C. Ce constat est valable pour la phase de canicule et la vague de fortes chaleurs.

Période de rafraîchissement : 2

Concernant les températures du 8 au 14 juillet, on constate que les températures intérieures sont toujours dans la zone de stress modéré, alors que les températures extérieures sont bien plus faibles (Fig.4.48).

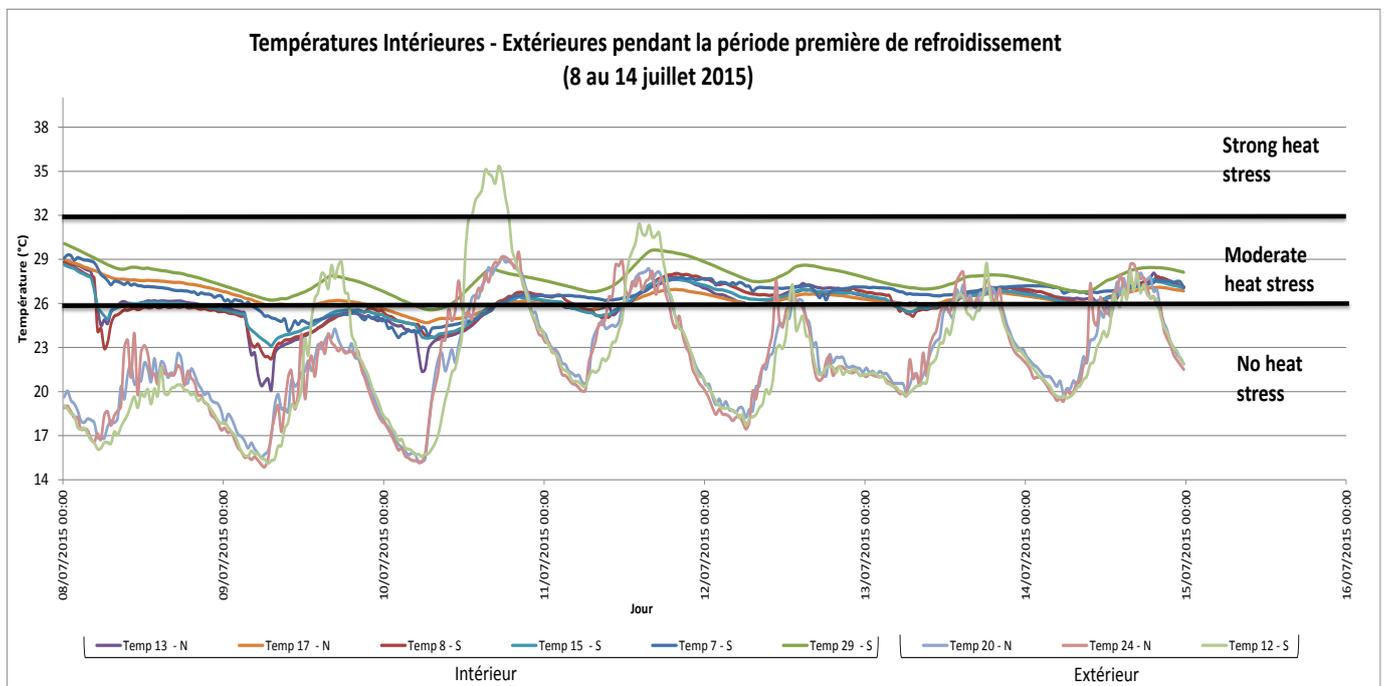


Figure 4.48 : Graphique des températures intérieures et extérieures durant la première période de rafraîchissement, juillet 2015

Malgré la baisse des températures extérieures, les températures intérieures sont toujours aussi élevées même si une baisse est ressentie.

De la donnée brute à la dangerosité

- Entre le 8 et le 10 juillet au soir, les capteurs 8, 13 et 15 enregistrent des températures nocturnes fraîches pendant trois jours consécutifs en raison des chutes des températures extérieures comprises entre 16°C et 18°C. Le 10 juillet, tous les capteurs passent sous le seuil des 26°C. Il est intéressant de constater qu'après deux nuits « froides » et des températures de jours inférieures à 26°C, certaines pièces commencent à se refroidir. Seul le capteur 29 enregistre des températures toujours supérieures aux autres avec une différence de plus de 1,3°C. Une hiérarchisation des capteurs est possible, le 29 est plus chaud que le 7, qui lui-même est plus chaud que les capteurs 17, 15, 8 et 13.
- Après le 10 juillet, les températures intérieures enregistrent les mêmes températures extérieures, en journée. Elles sont supérieures à 26°C. de nuit, les températures extérieures descendent aux alentours des 20°C. Les températures intérieures restent élevées et préoccupantes pour le bien-être de la personne durant cette période de rafraîchissement.

Concernant les températures extérieures, le capteur placé Sud (12) enregistre des valeurs supérieures aux deux autres (pouvant aller jusqu'à plus de 6°C). De nuit, la différence de températures est faible, de même lors de la période de fortes chaleurs. On peut supposer que le capteur placé au Sud, au niveau de la rue canyon perçoit directement les rayonnements solaires contrairement aux capteurs 20 et 24, placés dans une cour intérieure ombragée par les autres bâtiments lui faisant face.

Période de rafraîchissement : 4 et 5

La deuxième vague de rafraîchissement est observée entre le 19 juillet et 1^{er} août (Fig.5.49).

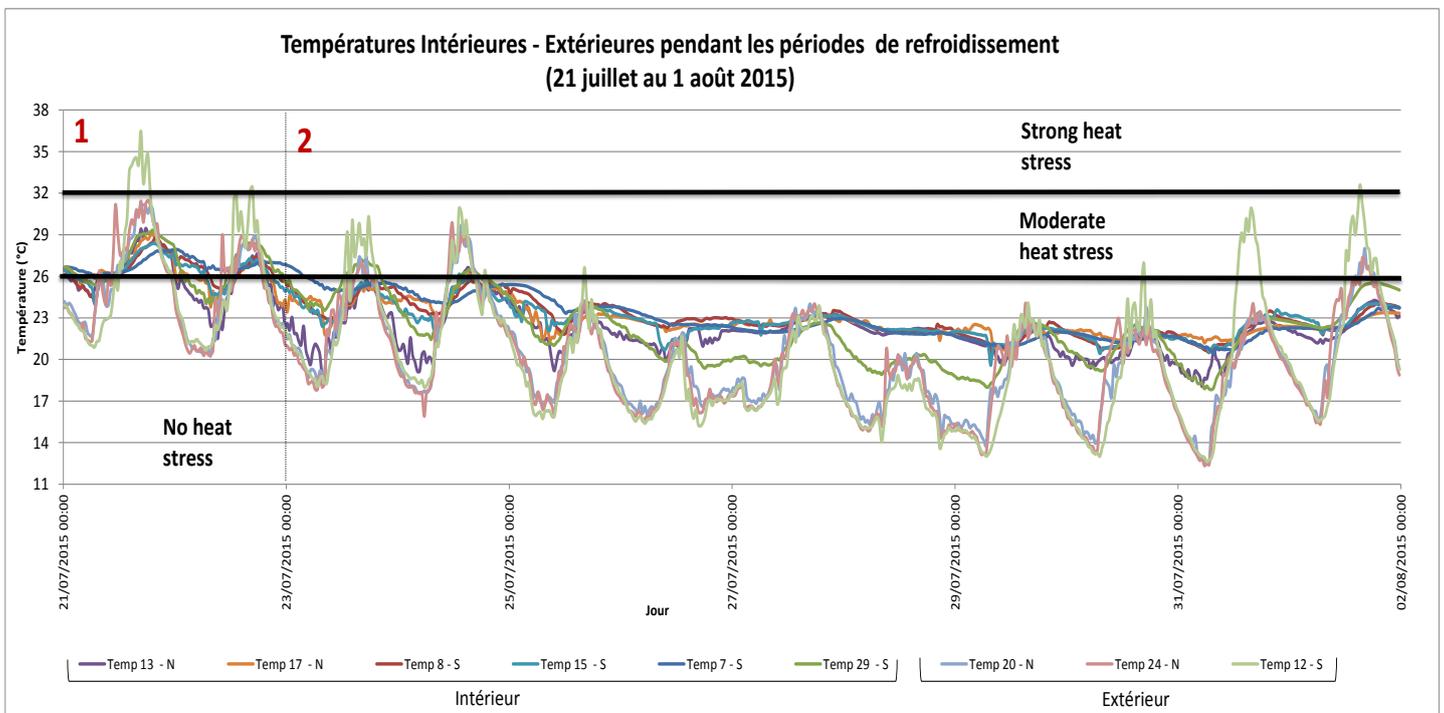


Figure 4.49 : Graphique des températures intérieures et extérieures durant la première période de rafraîchissement, juillet 2015

Cette période est plus fraîche que la première puisque tous les capteurs sont quasi sous le seuil de 26°C. Cette vague de rafraîchissement peut être divisée en deux périodes de températures :

- 1 : la première période s'étend du 21 juillet au 23 août. Pendant ces deux jours, les températures intérieures comme extérieures diminuent progressivement. A partir du 22 juillet elles passent de 29°C à moins de 26°C. Le capteur 12 (extérieur Sud), enregistre les plus fortes valeurs pendant cette période pouvant atteindre plus de 36°C en raison de sa localisation. Au niveau des températures intérieures, on constate une homogénéité des capteurs sauf pour le 13 qui enregistre des valeurs toujours plus basses que les autres. Ce capteur descend aux mêmes températures que celles extérieures, le 23 juillet au soir avec une température avoisinant les 18°C. Une hiérarchisation est visible, tout comme pour l'autre période de rafraîchissement. Le capteur 29 enregistre des valeurs plus élevées que les capteurs 7, 17, 15, 8 et le 13. Le capteur 17, même si orienté au Nord, a des valeurs aussi élevées que les capteurs placés côté sud.
- 2 : la deuxième période de ce graphique débute le 24 juillet et se termine le 1^{er} août. Durant cette période, on constate que les températures intérieures diurnes sont aussi élevées que les températures extérieures diurnes. Même si toutes les pièces ne réagissent pas au même rythme aux températures extérieures, les pièces se rafraîchissent bien, après cinq nuits à des températures inférieures à 17°C. Les températures, autant intérieures qu'extérieures, dépassent très rarement le seuil des 23°C. C'est à partir du 31 juillet qu'on constate une légère augmentation des températures intérieures.

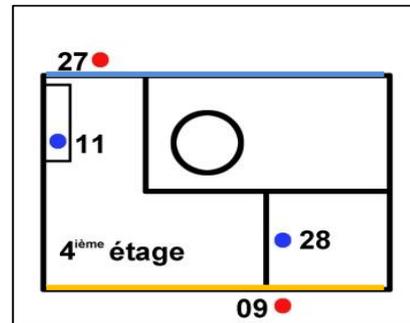
Pour résumer le comportement des températures sur les deux périodes de rafraîchissement, on peut dire que le capteur 12 (extérieur Sud), malgré cette baisse de température a toujours des températures de jour élevées, supérieures de plusieurs degrés. De nuit, ce capteur enregistre les mêmes valeurs (par rapport aux autres). Les températures intérieures comme extérieures sont homogènes entre elles, à l'exception des capteurs 12 et 13 (intérieur Nord) se différenciant par leurs températures. Les températures intérieures diurnes enregistrent les mêmes valeurs que les températures extérieures sur plusieurs jours.

Plusieurs nuits, à une température extérieure inférieure de 17°C et des températures diurnes inférieures à 24°C, permettent aux températures intérieures de se rafraîchir et de passer sous le seuil des 26°C. Même si plusieurs degrés séparent les pièces, celles-ci réagissent aux faibles températures extérieures.

3.3.2. Appartement B

Pour rappel

L'appartement B se localise dans une rue canyon donnant sur rue (côté Sud, capteur 9) et sur cour intérieure bien ventilé (côté Nord, capteur 27). Il se situe au 4^{ème} étage d'un ancien immeuble parisien (même immeuble que l'appartement A). Il a une double exposition (Nord-Sud) avec deux fenêtres. Il est composé d'une pièce à vivre (capteur 11) et de 2 pièces (capteur 28 chambre). Au centre, un couloir séparant les différentes parties de l'appartement.



- Description températures intérieures-extérieures

Sur les températures intérieures et extérieures dans l'appartement B, au 4^{ème} étage, on fait le même constat que pour l'appartement A (Fig.4.50). On confirme l'hypothèse que les températures extérieures influencent les températures intérieures. Une forte similarité des températures est visible mais avec une intensité plus faible (températures intérieures moins élevées). Un décalage de 30min à 1h est noté entre le moment où le pic de chaleur apparaît à l'extérieur et impacte la température à l'intérieur. Ce constat est encore plus visible sur cet appartement puisque l'on remarque la grande homogénéisation des températures. Elles sont proches les unes des autres (intérieur comme extérieur).

La température extérieure influence la température intérieure tout comme l'orientation influence les températures extérieures et intérieures. Si on regarde le capteur 28 (intérieur Sud), on suppose que celui-ci doit varier en fonction du capteur 9 (tous les deux localisés au Sud). Cela est le cas mais avec des irrégularités probablement en raison de la fermeture ou de l'ouverture des fenêtres. Le capteur 11 (intérieur Nord) suit mieux les fluctuations de températures du capteur 9 mais toujours avec un décalage de 30min à 1h. Leur corrélation est plus importante avec 0,84 contre 0,8 pour les capteurs 28 et 9 (Tab.4.22). On peut se poser la question si la pièce au Sud a une meilleure ventilation naturelle que la pièce au Nord ou si l'effet de la cour et/ou de la rue canyon sont présents.

Nous constatons la forte similitude des températures. Les températures extérieures ont peu de différence entre elles. On ne peut dissocier le Nord du Sud et cela est valable aussi pour les températures intérieures. Cependant, pendant la phase de canicule, la différence entre les températures intérieures et extérieures est moins importante que pour le logement A. Le 1^{er} juillet, on constate une différence de 6,4°C entre les capteurs 9 et 28. Cette différence est faible par rapport aux autres logements. On émet l'hypothèse de sa localisation. Au 4^{ème} étage, sur cour comme sur rue, le rayonnement direct est de moindre importance. L'appartement a du mal à se refroidir dû à l'inertie thermique présente. La chaleur est emprisonnée. Il faut plusieurs jours de fraîcheur avant que l'appartement ne descende sous le seuil des 21°C de nuit. C'est pendant la phase de rafraîchissement, à partir du 25 juillet que les températures intérieures commencent à se dissocier entre elles et qu'elles sont aussi élevées voire plus chaudes que les températures extérieures. Les températures intérieures, surtout diurnes, ne se refroidissent pas aussi rapidement que les

températures extérieures d'où cette inversion. La température extérieure est plus fraîche que la température intérieure.

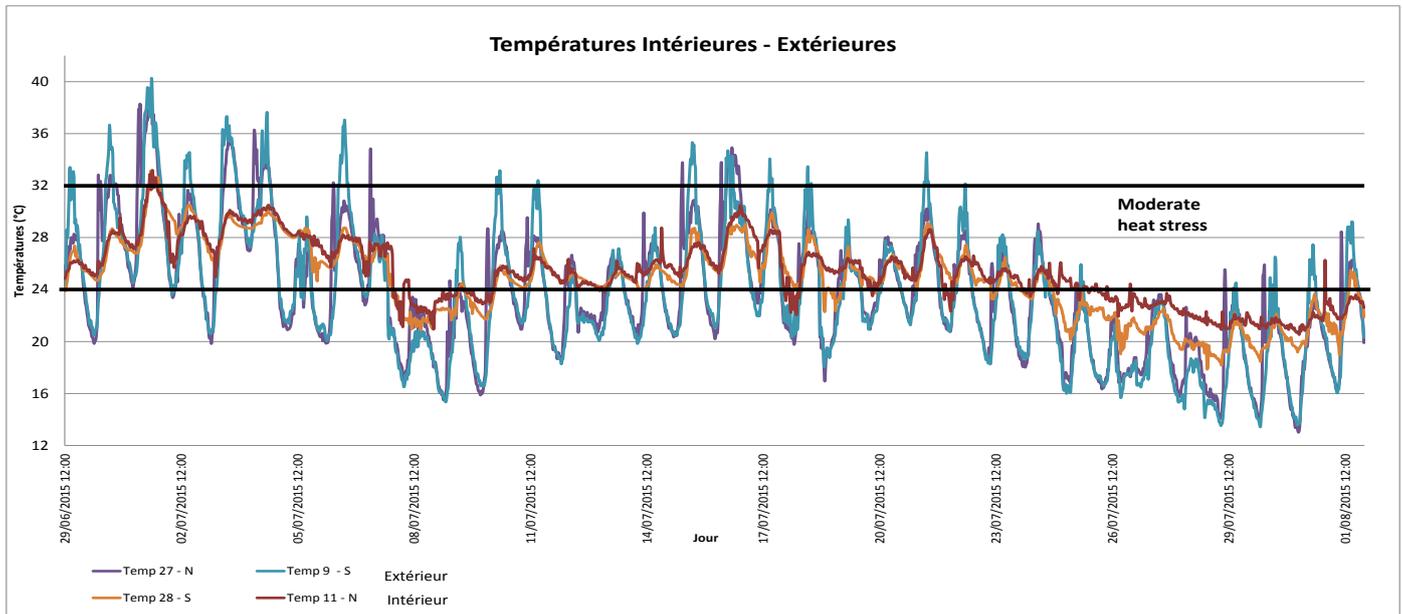


Figure 4.50 : Températures intérieures-extérieures, appartement B

Capteurs	28 Inté - S	11 Inté - N	27 Exté - N	9 Exté - S
28	1	0,948	0,758	0,798
11	0,948	1	0,828	0,843
27	0,758	0,828	1	0,822
9	0,798	0,843	0,822	1

Tableau 4.22 : Corrélations de l'appartement B

Ce qui est intéressant, c'est que les températures du capteur 28 (intérieur Nord) et 13 (intérieur Nord, appartement A) se rafraîchissent plus vite en période froide puisque ces pièces centrées sont mieux ventilées.

La figure 4.51 nous permet de comparer et détailler les températures intérieures et extérieures, de jour et de nuit. On constate une grande différence de comportements entre les deux graphiques :

- De jour : les températures intérieures fluctuent en fonction des températures extérieures sans jamais atteindre les températures extérieures minimales et maximales de la journée. Les températures extérieures diurnes sont toujours plus chaudes ou plus fraîches par rapport aux températures intérieures (sauf pour le 4 juillet) contrairement aux températures nocturnes. Celles-ci sont toujours plus chaudes que les températures extérieures avec une différence moyenne de 2,7°C sauf pour la période de canicule et de vague de chaleur. De nuit, c'est l'inverse. On constate que, dès que la température extérieure augmente ou diminue, alors une répercussion visible est quasi immédiate sur les températures intérieures. Cette répercussion est d'autant plus réelle si l'événement est brusque.

De la donnée brute à la dangerosité

- De nuit : les températures extérieures influencent les températures intérieures avec plus de similarité que pour les températures diurnes.

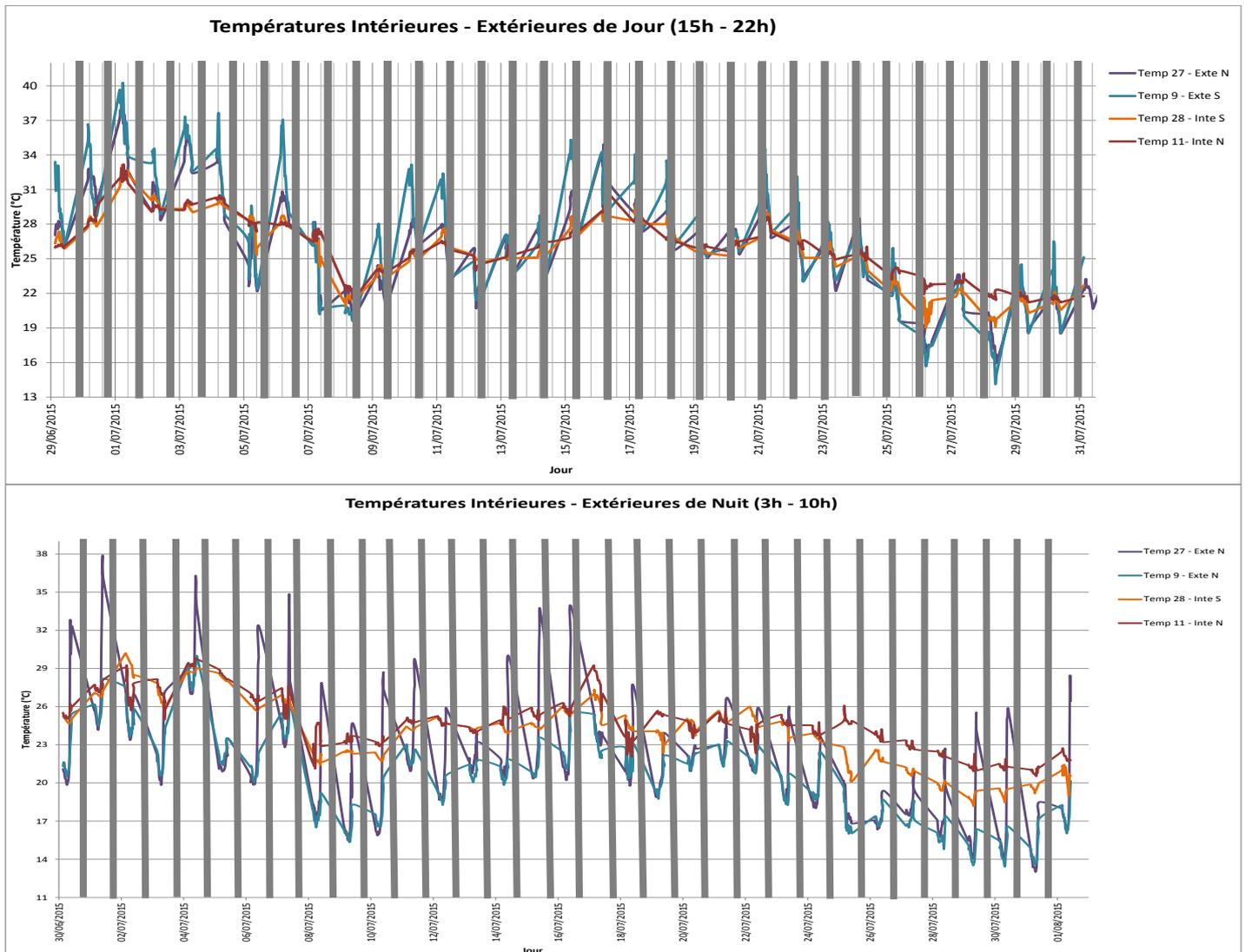


Figure 4.51 : Température intérieures-extérieures en fonction de l'orientation de jour (graphique haut) et de nuit (graphique bas), appartement B, juillet 2015

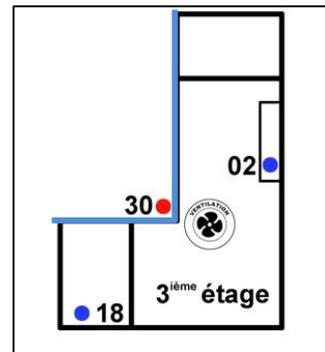
De plus, on observe que pendant la phase de refroidissement l'inversion des valeurs est visible. A partir du 27 juillet, on constate que les capteurs placés Sud, intérieur comme extérieur (9 et 28) enregistrent des températures plus faibles que les capteurs placés Nord (11 et 27). Ce constat est valable autant pour les données nocturnes que diurnes.

L'appartement B se caractérise par des températures extérieures influençant les températures intérieures. Un déphasage est noté surtout pour les pics de température. Une forte similitude des températures est visible. La différence des températures intérieures et extérieures pendant la canicule est faible. On retrouve une inversion des valeurs à partir du 27 juillet. L'orientation joue un faible rôle. Les températures intérieures diurnes se refroidissent moins vite que les températures extérieures diurnes dû à la capacité d'accumulation des matériaux.

3.3.3. Appartement C

Pour rappel

L'appartement C se localise dans une rue canyon donnant sur cour. Il se situe au 3^{ème} étage d'un ancien immeuble parisien. Il a une simple exposition Nord avec deux fenêtres donnant sur cour intérieure peu ventilée (capteur 30). Les capteurs sont placés dans une pièce à vivre (capteur 2 et 18). Un ventilateur a été utilisé, au centre de la pièce principale afin de rafraîchir l'appartement sur quelques heures. Contrairement aux autres logements, il est entièrement rénové et fortement isolé par l'intérieur. Il est caractérisé comme un logement à hautes performances énergétiques.



Cette configuration de logement nous donne de nouvelles indications sur le comportement des températures lorsque l'appartement est d'une seule orientation et avec un fort potentiel d'isolation. Le capteur placé à l'extérieur, côté cour, nous permet de faire une analyse sur les écarts de températures entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment.

Sur les températures intérieures et extérieures dans l'appartement C, au 3^{ème} étage, on constate que le graphique est atypique par rapport aux autres (Fig.4.52). On s'aperçoit que les températures intérieures fluctuent peu par rapport aux températures extérieures. Pour la période de canicule et de vague de chaleur, les températures extérieures sont plus chaudes que celles intérieures. Si on regarde la période de refroidissement et de stagnation, on s'aperçoit que les températures intérieures sont toujours supérieures aux maximales des températures extérieures. Le 10 juillet, à 7h, on retrouve une différence de 10°C et 10,4°C entre le capteur 30 et les capteurs 2 et 18, elle peut être moins importante sur certains jours. Cette différence de température est stable du 24 juillet au 1^{er} août. La différence moyenne est de 5°C entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment, sur l'ensemble de la période. Il existe une faible différence de températures entre les deux capteurs se localisant à l'intérieur du logement. Cet écart est toujours inférieur à 1°C sur l'ensemble de la période sauf pour le 27 juillet on l'on constate une différence de quelques degrés. Cela est sûrement dû à un facteur extérieur.

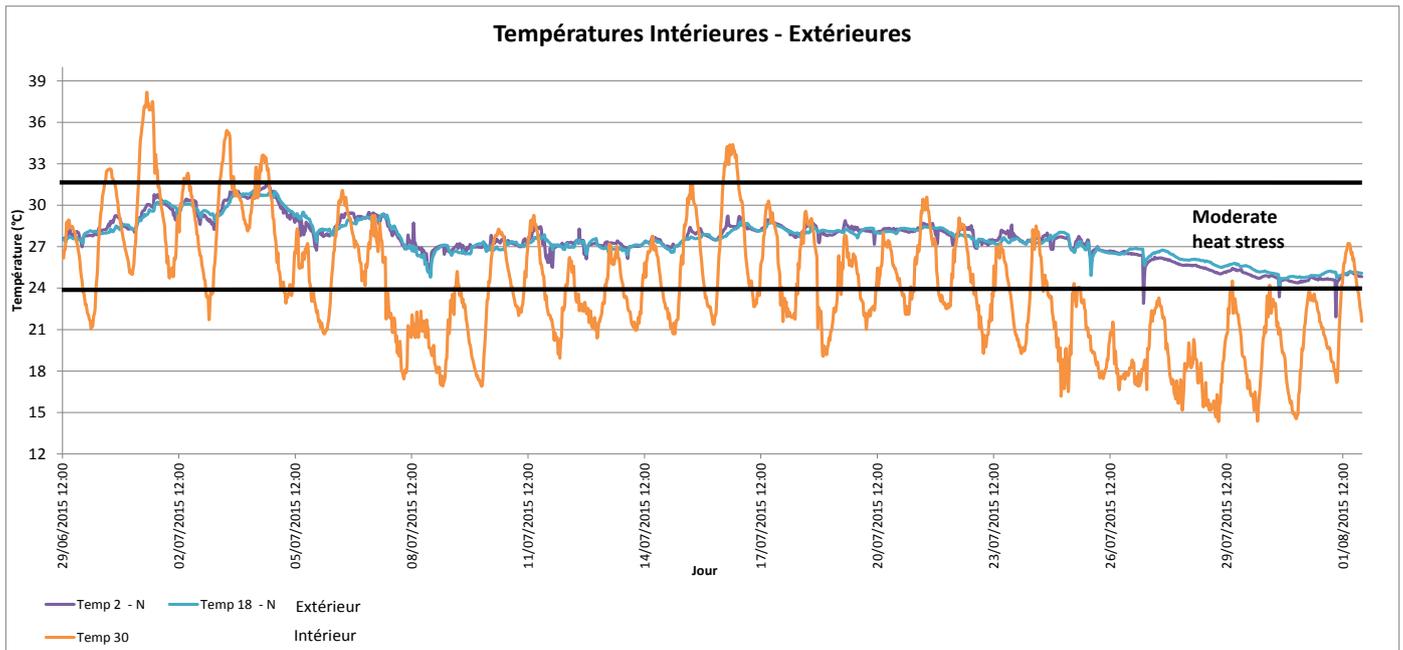


Figure 4.52 : Températures intérieures-extérieures, appartement C

Nous confirmons notre hypothèse : la chaleur, de nuit, s’accumule dans les pièces sans quasi aucun rafraîchissement et avec une différence moyenne de température entre l’intérieur et l’extérieur de 6,2°C sur toute la période. C’est le 4 juillet, après la période de canicule que l’on retrouve la température la plus élevée, à 31°C.

Lors des périodes de canicule et de vague de chaleur, on constate que la température intérieure augmente très faiblement par rapport aux pics de températures présents. Le 1^{er} juillet à 16h, on retrouve une différence de 8°C. Le capteur 18 (intérieur Nord) atteint son maximum à 23h. Une différence de 7h est nécessaire pour que la température intérieure atteigne son maximum. Cela est dû sûrement à l’isolation intérieure réalisée. La résistance thermique de l’isolant augmente le phénomène et déphasage et par conséquent de l’inconfort dans le logement, en période chaude. Une baisse de seulement 1°C s’ensuit pour le capteur 18 contre 12°C pour le capteur 30 (extérieur Nord). Ce décalage horaire est perceptible sur quasi toute la période de test. Sur ce logement, les températures extérieures influencent très légèrement les températures extérieures.

Au niveau des corrélations entre les températures intérieures et extérieures, on retrouve des corrélations satisfaisantes puisqu’elles sont toutes les deux supérieures à 0.6 en fonction des températures extérieures (Tab.4.23). A partir de 0,6 de corrélation, on peut dire que les températures intérieures sont régies par les températures extérieures mais que d’autres facteurs extérieurs interviennent aussi puisque la corrélation n’est pas parfaite. On suppose qu’un des facteurs principaux intervenant est l’effet de l’isolation sur les températures et à la faible ventilation. La corrélation des capteurs extérieurs sur le capteur intérieur est de 0,66 pour le capteur 2 et de 0,62 pour le capteur 18. La corrélation même élevée reste la plus faible de tous les immeubles mesurés. Le facteur de l’isolation rentre en jeu. Le rôle de l’isolation est important à prendre en compte pour le comportement des températures intérieures en période de canicule.

Capteurs	2	18	30
	Inté - N	Inté - N	Exté - N
2	1	0,937	0,666
18	0,937	1	0,620
30	0,666	0,620	1

Tableau 4.23 : Corrélations de l'appartement C

Sur quasi toute la période de test, on remarque que les températures intérieures ne vont jamais descendre en-delà du seuil de stress de chaleur compris entre 26°C et 32°C. C'est à partir du 27 juillet que les températures passent en dessous de ce seuil. Les températures restent néanmoins très élevées malgré la forte chute des températures extérieures.

De jour : les températures intérieures même si anormalement élevées sont, pour la moitié de la période, inférieures aux températures extérieures (Fig.4.53). Les températures intérieures croisent les températures extérieures lors des passages entre les différentes périodes (canicule, rafraîchissement, vague de chaleur, rafraîchissement). Lorsque les températures extérieures sont élevées, les températures intérieures restent inférieures aux températures extérieures mais lorsque les températures extérieures se rafraîchissent de quelques degrés alors, les températures intérieures sont supérieures aux températures extérieures. Durant la dernière phase de rafraîchissement, on retrouve une différence de températures intérieures/extérieures de plus de 10°C pour les 26 et 28 juillet. Même si les températures intérieures baissent, elles restent élevées pour ressentir une sensation de fraîcheur. Tout comme de nuit, c'est pendant la phase de canicule, qu'on voit la température intérieure la plus élevée apparaître trois jours après la journée la plus chaude. Le logement accumule la chaleur de jour en jour pour atteindre son maximum de 31,6°C le 4 juillet.

De nuit : on remarque une très bonne homogénéité des températures intérieures d'une nuit à l'autre (Fig.4.53). Elles sont presque toujours supérieures aux températures extérieures (à l'exception de la période de canicule). La différence entre le maximum et le minimum entre les températures nocturnes intérieures et extérieures est plus élevée avec une différence moyenne de 5,7°C.

Cet appartement n'enregistre pas les températures les plus extrêmes, il est celui où les températures sont les plus élevées durant toute la période de mesures. On peut considérer que cet appartement est dangereux pour la santé humaine en période estivale. Vivre dans un appartement où il fait plus de 26°C sur 30 jours consécutifs n'est pas ressenti de la même manière que vivre dans un appartement où la température atteint 35°C sur 2 ou 3 jours consécutifs. L'impact à court et long terme est différent. Cet appartement résiste mieux au pic de chaleur mais réagit mal aux baisses de températures.

Les notions d'isolation et d'inertie thermique sont importantes à prendre en compte dans ce logement afin de mieux comprendre le fonctionnement des températures. L'isolation des murs par l'intérieur est efficace en période hivernale mais non en période estivale. Une isolation d'hiver efficace ne garantit pas forcément un bon confort en été. Les matériaux utilisés (polystyrène, laine de verre, etc.) protègent du froid mais beaucoup moins de la chaleur. Cela est dû à une caractéristique peu connue : la capacité d'accumulation mesurant l'aptitude du matériau à atténuer les écarts extrêmes de températures en fonction du rythme diurne/nocturne.

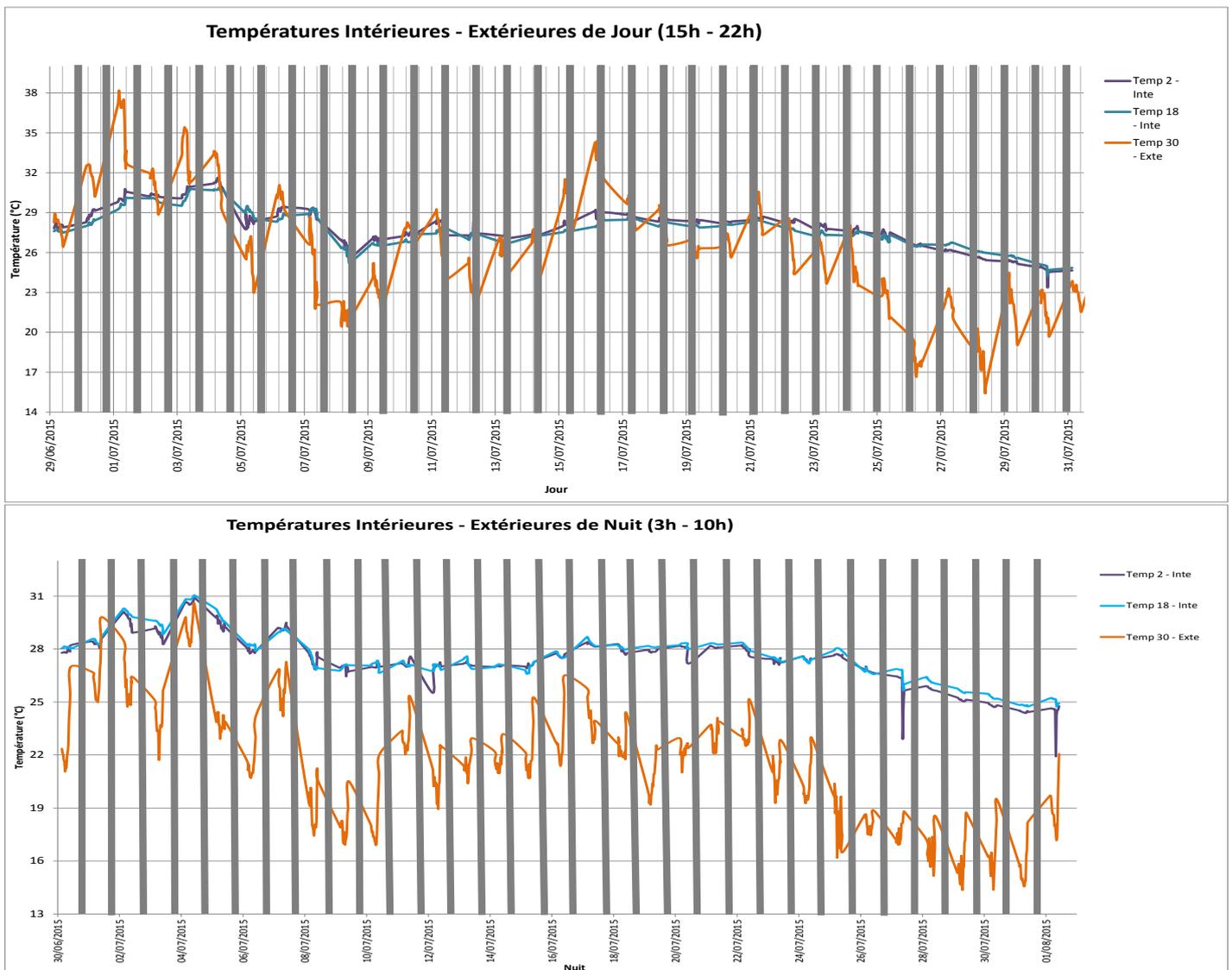


Figure 4.53 : Température intérieure-extérieures en fonction de l'orientation de jour (graphique haut) et de nuit (graphique bas), appartement C, juillet 2015

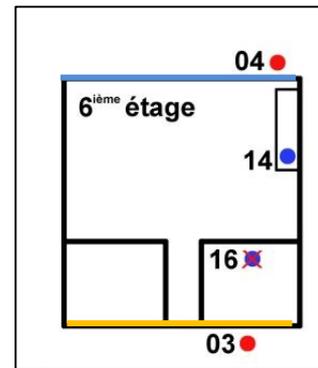
On constate par cet appartement que l'isolation des parois réduit, certes les apports par transmission pendant les heures les plus chaudes mais elle empêche également le refroidissement pendant la nuit malgré une ventilation.

L'appartement C se caractérise par des températures extérieures influençant peu les températures intérieures. Ce qui est « non standard ». Les températures intérieures sont quasi les mêmes que les températures maximales extérieures. Pendant la période de rafraîchissement, une différence de plus de 5°C est constatée entre les températures intérieures et extérieures. L'augmentation des températures pendant les périodes chaudes reste faible. Les températures sont constantes en journée. Elles varient très légèrement. Les températures intérieures diurnes se refroidissent peu par rapport aux températures extérieures diurnes dû à la forte isolation du logement. L'isolation, non compensée par une forte ventilation, en période estivale, est néfaste.

3.3.4. Appartement D

Pour rappel

L'appartement D se localise à l'intersection de deux boulevards. Il se situe au 6^{ème} étage d'un ancien immeuble parisien, de type haussmannien. Il a une double exposition Nord/Sud avec baies vitrées donnant de chaque côté. Les capteurs 4 et 3 sont situés sur chaque façade extérieure (Nord et Sud) Les capteurs sont placés dans la pièce à vivre (capteur 14), et une pièce chambre (capteur 16). Cependant ce dernier ne sera pas utilisé puisqu'il a dysfonctionné pendant cette période de mesures. Deux capteurs sont installés sur chaque face de l'immeuble. Ainsi, seulement 3 capteurs sont analysés pour cet appartement dont deux à l'extérieur.



Sur les températures intérieures et extérieures dans l'appartement D, on constate que les températures intérieures de jour sont aussi élevées que les températures extérieures de jour. Sur la quasi-totalité de la période, en journée, les températures intérieures se superposent ou se différencient, avec moins de 1°C, aux températures extérieures (Fig. 4.54). Elles sont plus élevées pendant la période de rafraîchissement. Les températures varient légèrement et avec une faible amplitude thermique sauf pour les deux périodes de fortes chaleurs. Une exception se fait remarquer, pendant la période de canicule, la température intérieure de jour se différencie de plus de 4°C. Cela peut être dû à la soudaine et forte température extérieure. La température intérieure, dû à la brutalité de l'événement ne suit pas cette forte hausse et entraîne, par conséquent, cette forte différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Nous pouvons faire le même constat pendant la période de vague de chaleur où une différence de plus de 4°C est notée ; l'inverse est aussi observable. Pendant les périodes de rafraîchissement, les températures intérieures vont certes diminuer mais plus faiblement que les températures extérieures. La nuit du 9-10 juillet, on observe une différence de 10,5°C entre le capteur 4 (extérieur Nord) et 14 (intérieur Nord). Le capteur 14 est passé de 27°C à 26,3°C en 12h alors que le capteur 14 lui, est passé de 22,3°C à 15,2°C. Il y a donc de grandes différences de comportement des températures entre les périodes de grande chaleur et de refroidissement.

On retrouve deux comportements distincts en fonction de la phase. En effet, les températures intérieures fluctuent davantage en période de chaleur qu'en période fraîche. Cela est dû à l'inertie des matériaux emprisonnant la chaleur à l'intérieur du logement. Pendant toute la durée du test, les températures intérieures sont encore plus influencées par les températures extérieures que pendant des « extrêmes » de températures. Cela se confirme par le test de corrélation. Le capteur 14 a une très forte corrélation avec les températures extérieures (Tab.4.24). Pour les deux capteurs, la corrélation est supérieure à 0,85 avec le capteur intérieur. Cet appartement est donc un très bon exemple de l'influence de la température extérieure sur la température intérieure puisqu'il enregistre la meilleure corrélation de tous les autres appartements.

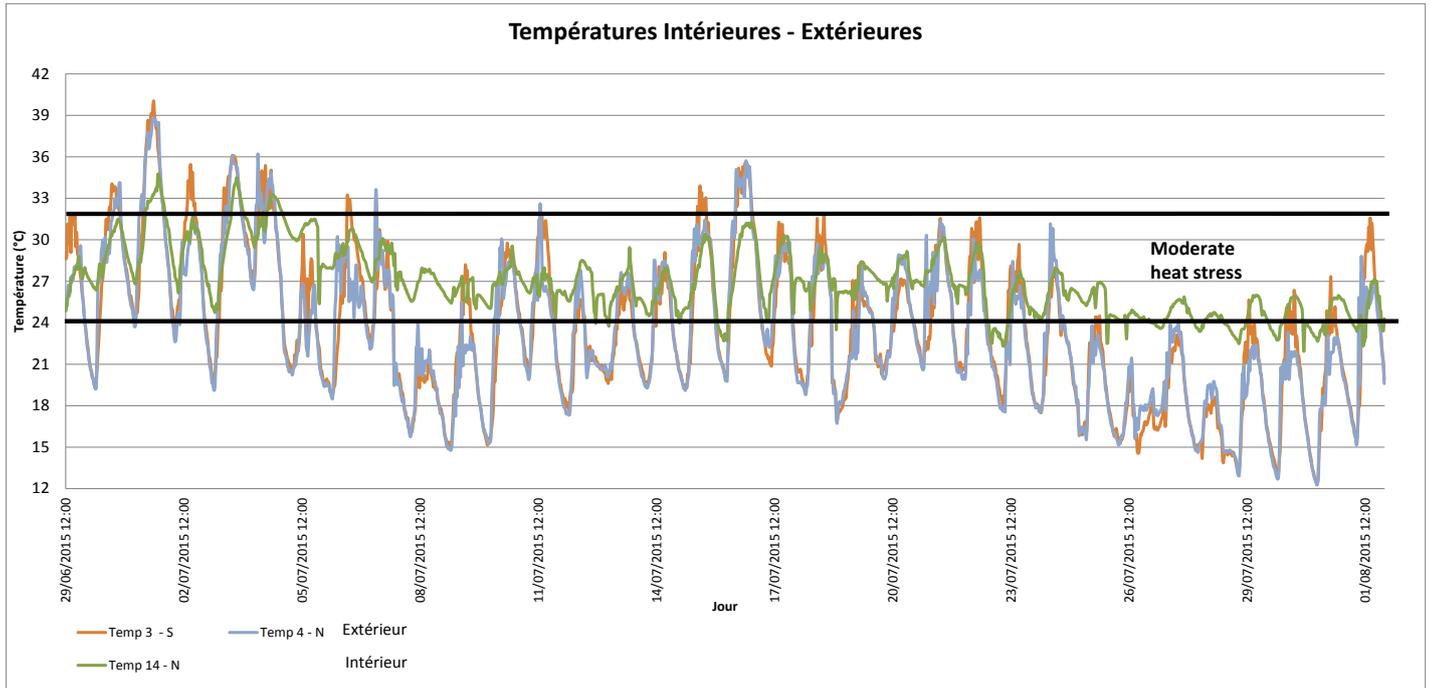


Figure 4.54 : Températures intérieures-extérieures, appartement D

Capteurs	14	3	4
	Inté - N	Exté - S	Exté - N
14	1	0,853	0,888
3	0,853	1	0,967
4	0,888	0,967	1

Tableau 4.24 : Corrélacion de l'appartement D

Une différence de 30mn entre les valeurs intérieures est nécessaire avant que les températures extérieures ne les influencent (Tab.4.25). La journée du 2 juillet ou dans la nuit du 16 au 17 juillet, on remarque, avec une grande facilité, la similitude entre les températures extérieures et les températures intérieures. Elles ont moins de 0,5°C de différence. Ce constat est valable pour plus de la moitié de la période. Les températures intérieures sont donc fortement influencées par les températures extérieures.

Jours	3	14	Jours	3	14
	Exté - S	Inté - N		3	14
16/07/2015 23:12	31,2	30,8	02/07/2015 19:42	31,3	30,8
16/07/2015 23:42	30,9	30,6	02/07/2015 20:12	30,9	30,7
17/07/2015 00:12	30,5	30,4	02/07/2015 20:42	30,2	30,6
17/07/2015 00:42	29,8	30	02/07/2015 21:12	30	30,4

Tableau 4.25 : Concordance entre les températures intérieures et extérieures, appartement D

Concernant la différence entre les températures diurnes et nocturnes, on s'aperçoit que les températures nocturnes suivent et fluctuent de la même manière que les températures extérieures contrairement aux températures diurnes (Fig.4.55). Les deux températures sont très corrélées entre elles sauf pendant la deuxième phase de rafraîchissement. Pendant cette période, on retrouve des températures intérieures assez stables, variant de seulement 1°C et cela sur plusieurs jours consécutifs ne dépassant quasi jamais les 24°C. Les températures intérieures diurnes fluctuent davantage d'un jour à l'autre mais sont en correspondance avec les températures extérieures.

Les températures intérieures de nuit sont toujours plus élevées que les températures extérieures. Cette différence est importante puisque la moyenne est de 6,2°C. Cette dernière est encore plus importante pendant la période de refroidissement. La différence peut atteindre plus de 11°C entre la température intérieure et extérieure. Cette différence est due à l'accumulation de chaleur dans le logement pendant plusieurs jours de canicule. Les pièces ont du mal à se refroidir. C'est à partir de plusieurs nuits de fraîcheur que la température de l'air intérieur commence à baisser. Après la période de canicule, c'est-à-dire le 7 juillet, il faut plus de 3 nuits pour perdre 2°C à l'intérieur de l'appartement sans que l'air extérieur ne se réchauffe.

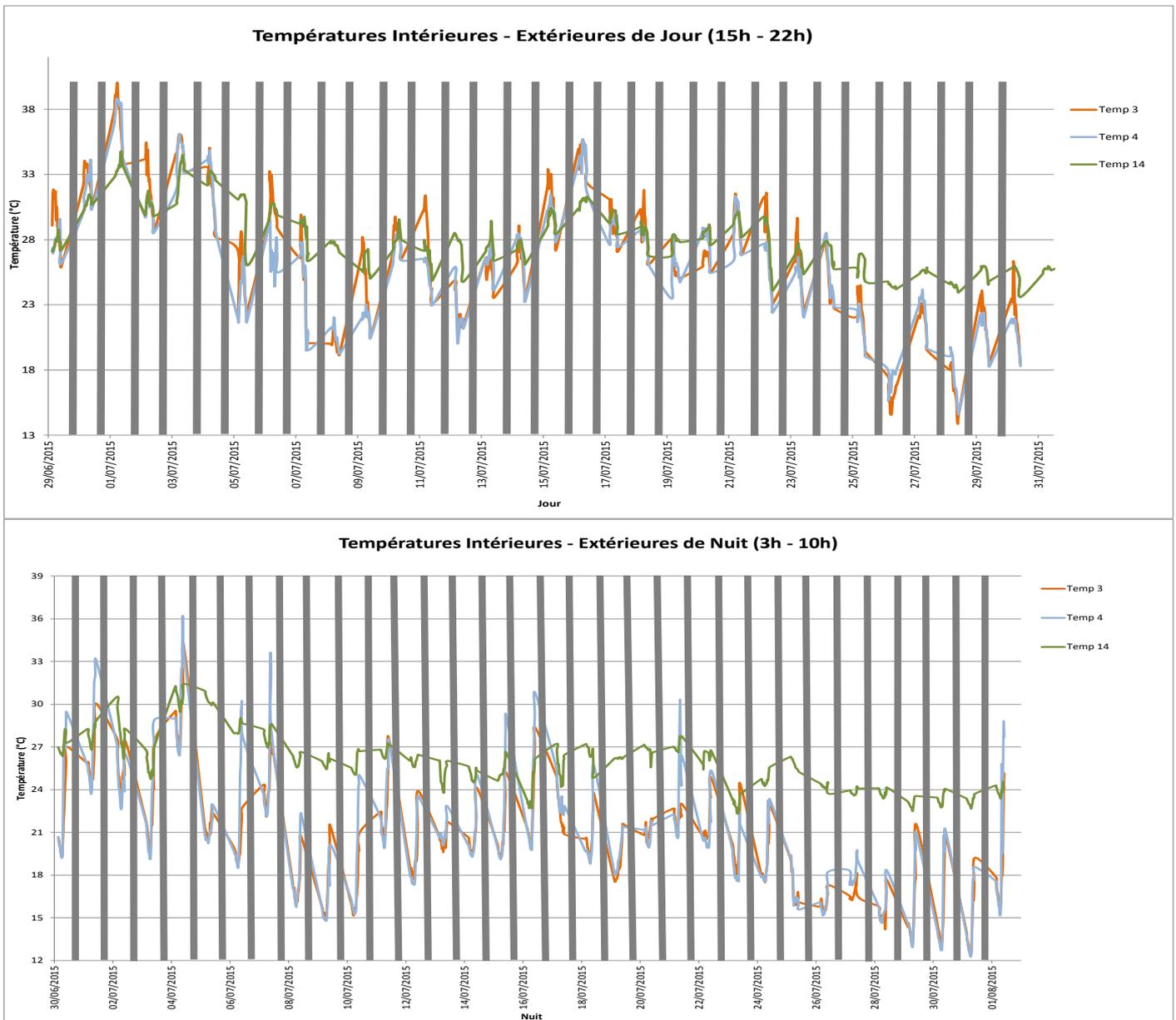


Figure 4.55 : Température intérieures-extérieures en fonction de l'orientation de Jour (graphique haut) et de nuit (graphique bas), appartement D, juillet 2015

Pour résumer la partie 3.3, on peut dire que juillet 2015 se compose d'une canicule, de deux périodes de rafraîchissement et d'une vague de chaleur. D'autres phases sont présentes avec la méthode de segmentation. La phase de canicule est présente du 29 juin au 7 juillet ; elle est au cœur de notre problématique afin de comprendre comment les appartements réagissent à ces fortes chaleurs.

Les températures intérieures sont influencées par les températures extérieures, mais en fonction de la localisation, de l'altitude et de l'orientation, les températures intérieures ont des comportements différents et se distinguent d'un appartement à un autre. Les températures intérieures plus hétérogènes que celles extérieures démontrent que chaque appartement réagit aux fortes chaleurs différemment.

Malgré cette distinction, tous les logements passent en phase canicule en même temps, avec quelques heures de différence dû au déphasage horaire et à l'isolation réalisée dans les appartements ; cette dernière a un impact négatif dû à la capacité d'accumulation du matériau. Les températures intérieures diurnes se refroidissent moins vite que les températures extérieures diurnes. L'impact de la ventilation naturelle est perceptible, mais reste insuffisant pour rafraîchir les appartements, surtout en période caniculaire. Le contexte géographique impacte cette ventilation. La ventilation naturelle est quasi inexistante sur une cour intérieure à faible superficie, de même que sur une rue canyon à mi-hauteur. En opposition, au dernier étage, sur boulevard, la ventilation est ressentie ; la température est moins élevée pour ce contexte. De plus, l'exposition Nord/Sud est plus visible sur les températures intérieures et davantage sur les périodes diurnes et nocturnes.

Une différence de température entre l'intérieur et l'extérieur existe mais également entre les capteurs placés au centre de Paris et la station Montsouris. Le contexte, c'est-à-dire la localisation des capteurs, influence ces températures.

Plusieurs déterminants influencent le comportement des températures :

- l'exposition (Nord/Sud)
- l'isolation et l'aménagement de la pièce avec l'impact de la ventilation naturelle
- l'emplacement (différence entre les capteurs Tinytag et la station Montsouris ou entre les rues canyons et les boulevards)
- l'altitude avec la différence de température d'un étage à un autre

Les faibles amplitudes et les températures élevées sur toute la période se révèlent préoccupant voire dangereux pour la santé humaine. En opposition, on constate que lorsque plusieurs nuits consécutives sont fraîches ($>17^{\circ}\text{C}$), que les températures diurnes ne dépassent pas le seuil des 26°C , alors les températures intérieures se refroidissent et, par conséquent, une récupération physique est possible. Un appartement au RDC connaît des températures plus fraîches que les autres appartements en raison de sa proximité avec le sous-sol et.

D'autres mesures seront nécessaires pour conforter ces résultats. En raison du faible nombre de mesures, seule une analyse visuelle est réalisable. Une analyse descriptive, avec des méthodes statistiques de clustering ou des Analyses en Composantes Principales (ACP, réalisées avec d'autres variables), serait idéale afin de préciser et compléter nos résultats ; ces derniers apportent une première vision et estimation des températures intérieures et extérieures. Toutes ces connaissances sont à traduire en plages de valeur à intégrer lors de nos calculs de dangerosité.

3.4. Les types d'appartements

Les températures intérieures évoluent en fonction de l'appartement dans lequel on se trouve. Le vécu caniculaire est très différent selon les types d'appartements. Pour construire les indices de dangerosité, il faut rassembler et créer des types d'appartements. Ces types sont créés à partir de nos résultats.

3.4.1. Création des types d'appartements

Qualifier et quantifier les variations de températures et la différenciation dans les comportements thermiques des différents appartements permet la création de 5 types de bâtiments. Grâce aux analyses bibliographiques et aux résultats statistiques nous avons créé 5 types d'appartements basés sur différents critères tels que la ventilation, l'exposition ou bien l'orientation :

Le premier type d'appartement correspond aux caractéristiques de l'appartement E :

Type 1: ancien bâti <1850, une seule exposition, rez-de-chaussée, peu ventilé, non ensoleillée et isolé

Le deuxième type de bâtiment correspond aux caractéristiques de l'appartement C :

Type 2: haussmannien <1850, une double exposition (Nord/Sud), isolé et ventilé, situé au 6^{ème} étage sur boulevards, ensoleillée

Le troisième type de bâtiment correspond aux caractéristiques de l'étage supérieur (mezzanine) de l'appartement A :

Type 3: ancien bâti <1850, une seule exposition (Sud), isolé et très peu ventilé, dernier étage (sous les toits) donnant sur rue canyon

Le quatrième type de bâtiment correspond aux caractéristiques de l'appartement D :

Type 4: ancien bâti <1850, une seule exposition (Nord), très isolé et très peu ventilé, 3^{ème} étage

Le cinquième type de bâtiment correspond aux caractéristiques de l'appartement A et B :

Type 5: ancien bâti, double exposition, isolé et ventilé, 4^{ème} / 6^{ème} étage avec double orientation Nord/Sud

Le sixième type de bâtiment correspond aux caractéristiques de l'appartement simulé par le modèle SURFEX-TEB :

Type 6 : bâti haussmannien, isolé et ventilé. La température intérieure n'est pas divisée par étage mais correspond à la température moyenne de l'ensemble du bâtiment. Il a une double exposition Nord/Sud.

Chaque type d'appartement a une configuration spatiale mais aussi thermique spécifique ce qui renvoie à des cartographies de températures intérieures très différentes. Ces données couplées au modèle SURFEX-TEB par fusion de données ont permis de différencier les températures entre les bâtiments.

3.4.2. Schéma de données

Nous complétons le schéma de données présenté au chapitre 3, figure 3.37 en y introduisant es appartements et les mesures (Fig.4.56). Les descriptions et la définition de l'espace géographique et météorologique sont toujours décrites par la *maille*, la *maille-météo* et la *maille-météo-durée*. La *maille-météo-durée* représente les températures sur une durée de 8h. Nous nous sommes focalisées sur les heures représentant au mieux la canicule (les plus chaudes et les plus fraîches) soit de 15h-

22h pour la journée et de 3h-10h pour la nuit. Ces plages horaires correspondent à 13h-20h et 1h-8h en heure solaire. Ces données ont été moyennées sur ces plages horaires, soit une durée de 8h.

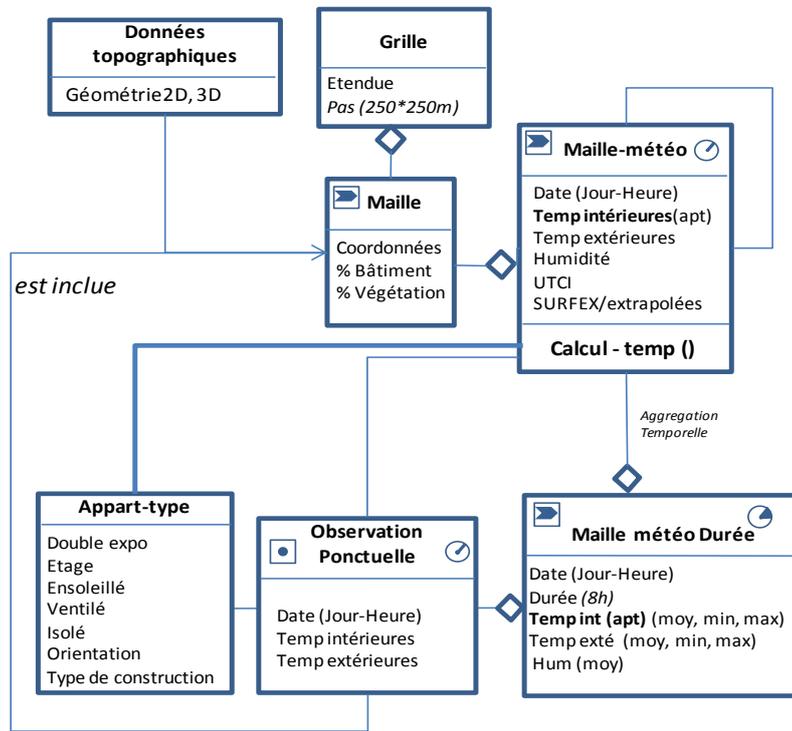


Figure 4.56 : Implémentation du schéma de données initial

La *maille-météo* permet de représenter la température à un instant donné. Cette température peut être donnée par des observations ponctuelles (inclue dans la maille morphologique) ou par les appart-type. Ces *appart-type* proviennent soit du modèle SURFEX-TEB soit sont issus de la création des appartements types. Ils sont caractérisés par des attributs (Fig.4.57).

Appart1 : Appart-type	Appart2 : Appart-type	Appart3 : Appart-type	Appart4 : Appart-type	Appart5 : Appart-type
Bâti <1850 1 seule expo (rue) Isolé Très peu ventilé Rez-de-chaussée Orientation : E	Bâti haussmannien Double expo Bien isolé Ventilé 6 ^{ème} étage Orientation : N/S	Bâti <1850 1 seule expo (rue) Bien isolé Peu ventilé Sous les toits Orientation : S	Bâti <1850 1 seule expo (cour) Très bien isolé Très peu ventilé 3 ^{ème} étage Orientation : N	Bâti <1850 Double exposition Bien isolé Ventilé Etage élevé Orientation : N/S

Figure 4.57 : Classes des Appart-type et leurs attributs

Pour pouvoir visualiser la *Maille-météo*, un calcul de température est nécessaire. Pour expliquer cette méthodologie, nous prenons l'exemple de l'attribut *Temp intérieure*. Si l'appartement type correspond à *Appart-type (AT)* du modèle SURFEX-TEB, alors la *Temp intérieure* de la maille sera la même que la *Temp intérieure* de SURFEX-TEB. Si l'appartement type n'est pas le même que SURFEX-TEB, alors, la *Temp intérieure* de la maille correspondra à la donnée de la classe *Observation Ponctuelle* inclue dans la *maille* et des *Appart-type* définis (Fig. 4.59). Cela peut se traduire comme suit :

```
Calcul tempintérieure(maille, AT)
  if apart-type = surfex-apart-type
  Then tempintérieure.maille = surfex- tempintérieure
    Else if exists Obs in { Observation Ponctuelle } /
      (location.obs inclue in geom.maille and apart-type.obs = AT)
      Then tempintérieure -maille= temp intérieure moy.obs
      Else calcul-contextuel-apart-type-temp
  End
```

Pour passer de l'*Observation ponctuelle* à *Appart-Type*, il est nécessaire d'extrapoler la donnée à toute la zone d'étude. Pour extrapoler cette donnée nous passons par la méthode de fusion de données présentée en 4.1.2.

Ce modèle de données permet la création d'une série de cartographies sur la visualisation différenciée des températures (intérieures et extérieures) en fonction des configurations spatiales (type d'appartement) mais aussi au niveau temporel.

Nous considérons 5 types d'appartements issus de nos mesures de campagnes et un sixième provenant du modèle SURFEX-TEB.

4. Amélioration de l'estimation des températures

4.1. Méthodologie

Les températures issues de SURFEX couvrent tout Paris mais sont calculées pour un type d'appartement standard (type 6). Nos observations sont réalisées de manière ponctuelle dans un appartement donné correspondant à des caractéristiques thermiques et des configurations bien spécifiques. Nous cherchons ici à obtenir la couverture totale de Paris selon le quadrillage de SURFEX mais pour les différents types d'appartements créés. L'objectif est ici d'intégrer les températures mesurées de jour et de nuit et de les recalculer dans un contexte spatial spécifique donné par le modèle SURFEX. Les températures (intérieures comme extérieures) sont localement différenciées en fonction du quartier, de la maille et de la situation géographique.

4.1.1. Localisation et géoréférencement des types d'appartements

Pour passer de la visualisation graphique des données à une représentation cartographique, plusieurs étapes sont nécessaires.

La première étape est de géoréférencer les appartements types sur la grille utilisée pour SURFEX-TEB. Chaque appartement est caractérisé par une couche avec ses attributs (températures intérieures et extérieures). Les températures sont agrégées sur 8h (15h-22h pour la journée et de 3h-10h pour la nuit). Une fois la couche créée et géolocalisée, les températures sont visibles seulement sur cet appartement. Il faut étendre la valeur à toute la maille. Une première extrapolation des données est réalisée sur une maille de 250*250m (Fig.4.58)

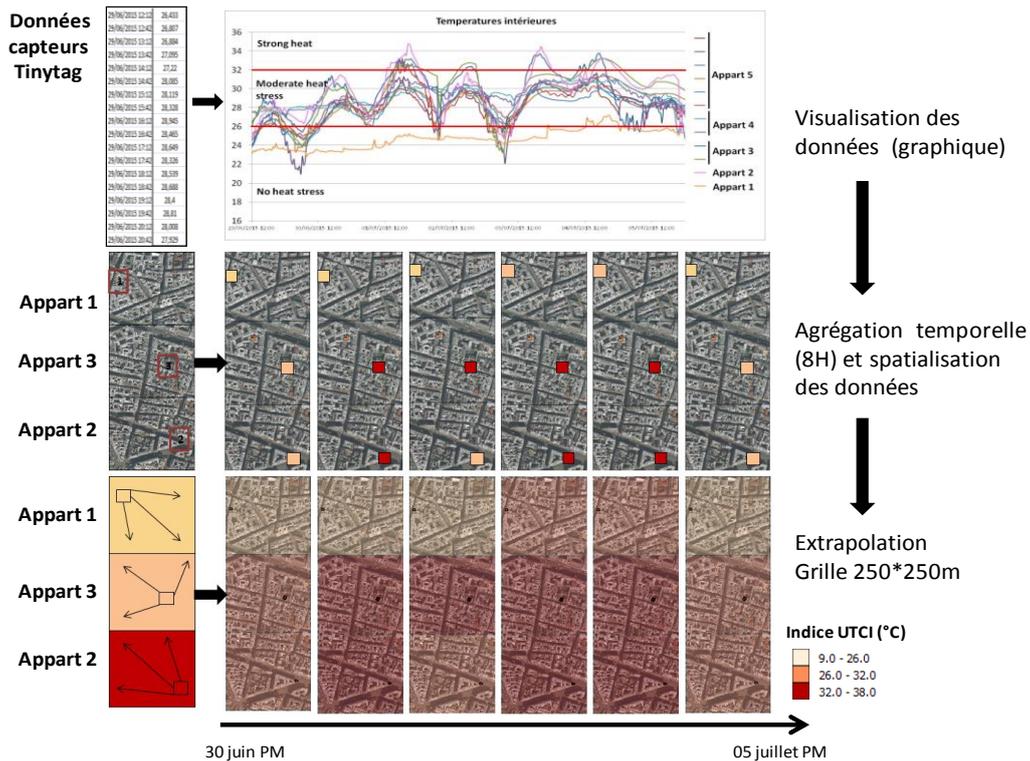


Figure 4.58 : Les différentes étapes nécessaires à la visualisation de la donnée sous une cartographie

La figure 4.58 montre l'évolution des températures intérieures pour les trois premiers types d'appartements. Grâce à ces premières cartographies, il est possible de visualiser tous les états des différents types d'appartements. On constate que le type 1 ne rentre jamais en fort stress thermique. Les types 2 et 3, au 2^{ème} jour atteignent ce seuil. Le type 3 reste dans le seuil 32-38 pendant 4 jours consécutifs. Cette visualisation permet de connaître la température sur une maille.

4.1.2. Fusion de données

Les capteurs de température ne peuvent actuellement fournir que des mesures ponctuelles de la température. Il est nécessaire de pouvoir reconstruire le champ des températures sur l'ensemble de la zone d'étude grâce à une méthode de fusion de données.

L'assimilation est le terme utilisé en météorologie. A partir d'un modèle et d'observations, elle permet de mieux paramétrer le modèle pour obtenir des résultats plus proches des observations. Pour notre méthodologie, on utilise une fusion de données puisque nous recalons les données du modèle grâce à des mesures. Nous utilisons une méthode simple de fusion permettant de recalculer pour chaque pas de temps les températures d'une maille, pour un type d'appartement. Cette fusion de données est réalisée en fonction de la température de la maille choisie pour l'appartement standard et de l'écart de températures entre les appartements dans les mailles mesurées.

Pour recalculer ces observations ponctuelles, notre démarche est d'ajouter la température des sorties de SURFEX-TEB à la maille avec la différence entre la température ponctuelle des données observées (*observation ponctuelle*) et les températures de l'appartement type observé (Fig.4.59). Ainsi, pour un même type d'appartement, on retrouve le même écart sur toute la grille et donc la même structure et configuration spatiale que les sorties du modèle SURFEX-TEB.

Le calcul de la température intérieure de la maille pour l'appartement type AT se traduit par cette équation :

$$\text{tempinte (AT, maille)} = \text{tempinte -surfex-Haus (maille)} + (\text{tempinte -obs (AT, m)} - \text{tempinte -obs (Haus, m)}) \quad (22)$$

m : voisin de la maille

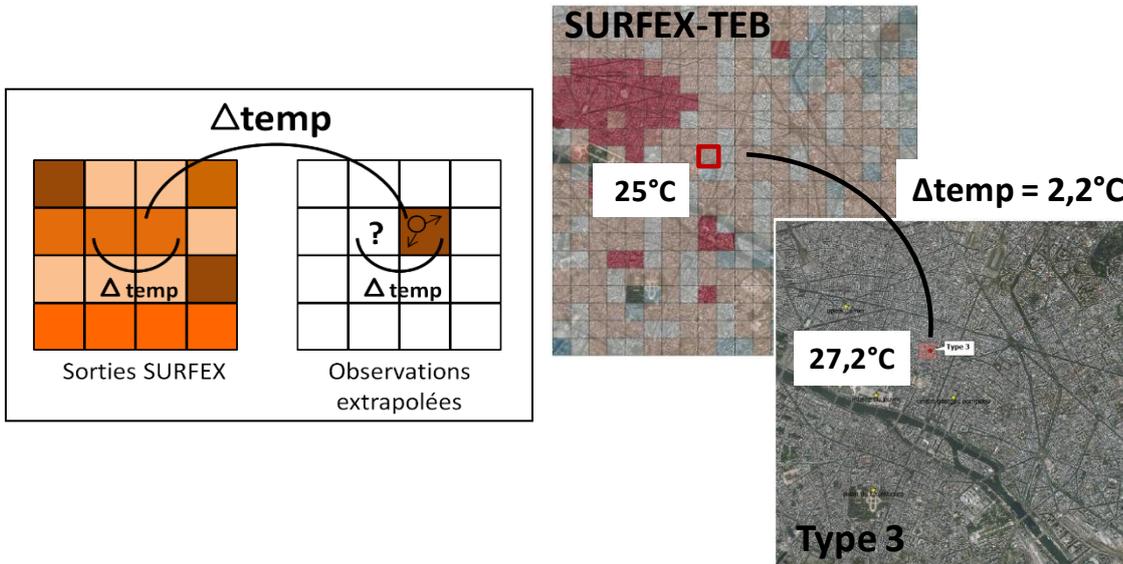


Figure 4.59: Méthode utilisée pour la fusion de données

Bien que très simple, cette méthode donne une estimation différenciée des températures plus pertinente que l'estimation initiale pour un type standard d'appartement. Nous proposons dans les perspectives de réaliser davantage de mesure pour consolider cette méthode de fusion de données et estimer les erreurs résiduelles.

4.2. Visualisation des températures intérieures

Les sorties SURFEX, tout comme les mesures issues des campagnes de mesures permettent une cartographie des températures à l'intérieur d'un tissu urbain dense. Une comparaison entre les températures intérieures tant spatialement que temporellement est primordiale pour montrer que la ville n'est pas un bloc homogène. Chaque type d'appartements a, par conséquent, une configuration spatiale mais aussi thermique spécifique renvoyant à des cartographies de température très différentes.

4.2.1. Différenciation spatiale par type d'appartements

Si on regarde la figure 4.60, les températures intérieures moyennées (15h-22h) du 1^{er} juillet 2015 sont différentes entre les types d'appartements. Les températures montrent une forte différenciation avec plus de 20°C entre les différents types sur la même journée. On constate que certains types ont températures plus basses par rapport à la sortie SURFEX comme le type 1 ou 5 et d'autres des températures plus chaudes à l'exemple du type 2. D'autres, à l'exemple du type 3,

ressemblent par les seuils de températures à la sortie SURFEX. Le long de la Seine et le Nord-est parisien (au niveau du parc de la Villette), enregistrent les températures les plus fraîches. Ces zones sont caractérisées comme des puits de fraîcheur pour l'espace urbain. Le quartier de l'Opéra atteint des températures supérieures à 37°C.

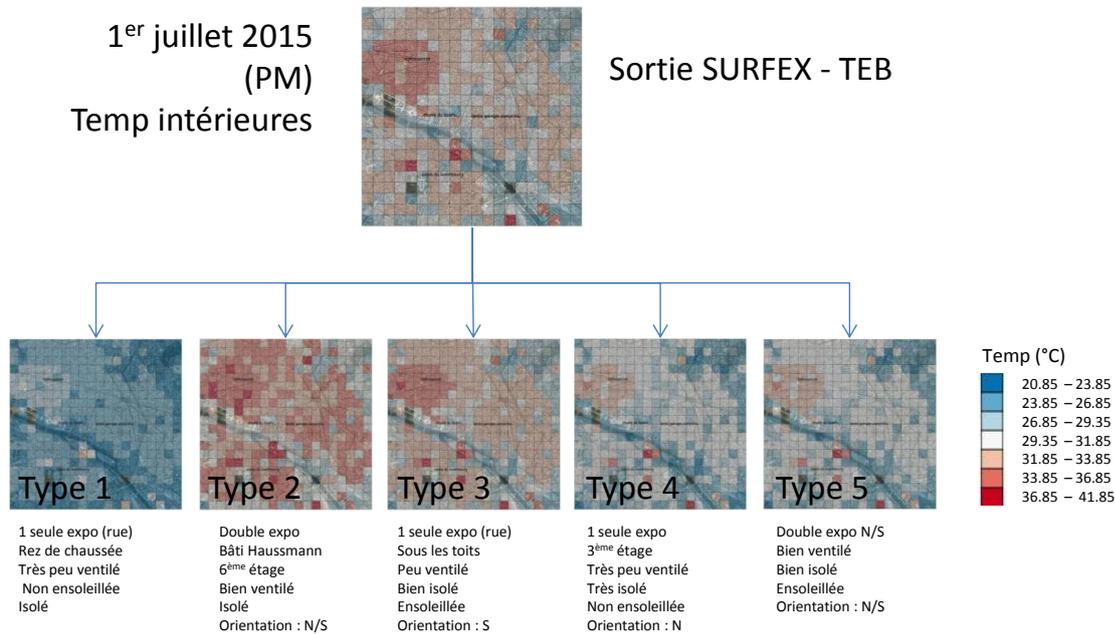


Figure 4.60 : Différenciation spatiales des températures intérieures, de jour, pour les types d'appartements, pour le 1^{er} juillet 2015

Le quartier de l'Opéra se distingue des autres zones par ces températures toujours plus élevées. Ce quartier, en raison de la climatisation enregistre des températures élevées. Cette distinction sera présente tout au long de notre étude.

Ces configurations vont se différencier à l'échelle temporelle, aussi. Chaque type ne passera pas en même temps au seuil de canicule de 31°C de jour.

4.2.2. Différenciation temporelle par type d'appartements

Si on passe à la notion de durée pour intégrer la dangerosité de la canicule dans nos travaux, on remarque qu'en fonction du type, la canicule n'est pas vécue de la même manière et tous les types ne passeront pas en même temps en canicule. Le vécu de la canicule est différent spatialement et temporellement (Fig.4.61). En effet, du 1^{er} au 5 juillet, les températures intérieures du type 1 ne vont jamais dépasser les 30°C et sont en moyenne comprises entre 24°C et 27°C. Le type 2, en opposition au type 1, a des températures intérieures très élevées, pouvant atteindre plus de 37°C sur 2 jours consécutifs et sont en moyenne comprises entre 34°C et 37°C. Les types 3 et 4 sont similaires même si le type 4 a des températures légèrement plus chaudes surtout à partir du 3 juillet. Si on prend en considération la durée, on constate que c'est le type 2 qui est plus proche des sorties du modèle SURFEX-TEB surtout en période de forte chaleur. Leurs températures ont peu de différence.

De la donnée brute à la dangerosité

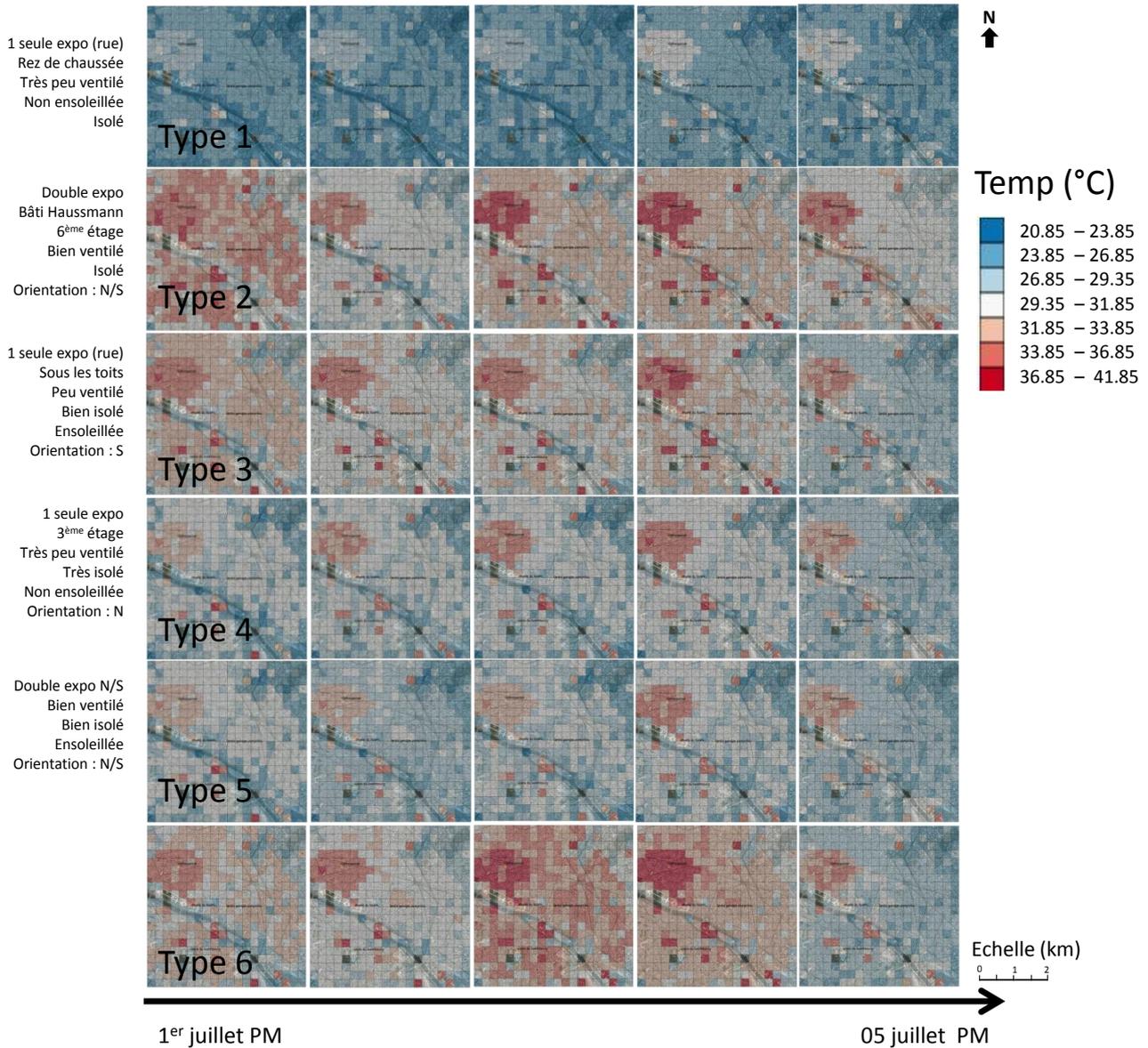


Figure 4.61 : Cartographie des températures intérieures de jour par type d'appartements du 1^{er} au 5 juillet 2015

Si on se focalise sur toute notre période d'étude, on remarque que les températures intérieures de jour et les périodes étudiées sont visibles (Fig.4.62). Une alternance entre périodes de fortes chaleurs et périodes de rafraîchissement caractérise le mois de juillet 2015. Ces périodes se distinguent très faiblement pour le type 1 où la température est basse. Le 25 juillet, les températures descendent sous le seuil des 26,85°C, à l'exception du type 4 (très isolé, peu ventilé) où ses températures restent élevées. Le type 4 se distingue des autres types d'appartements dans la durée.

Campagnes de mesures et différenciation des comportements par type d'appartements

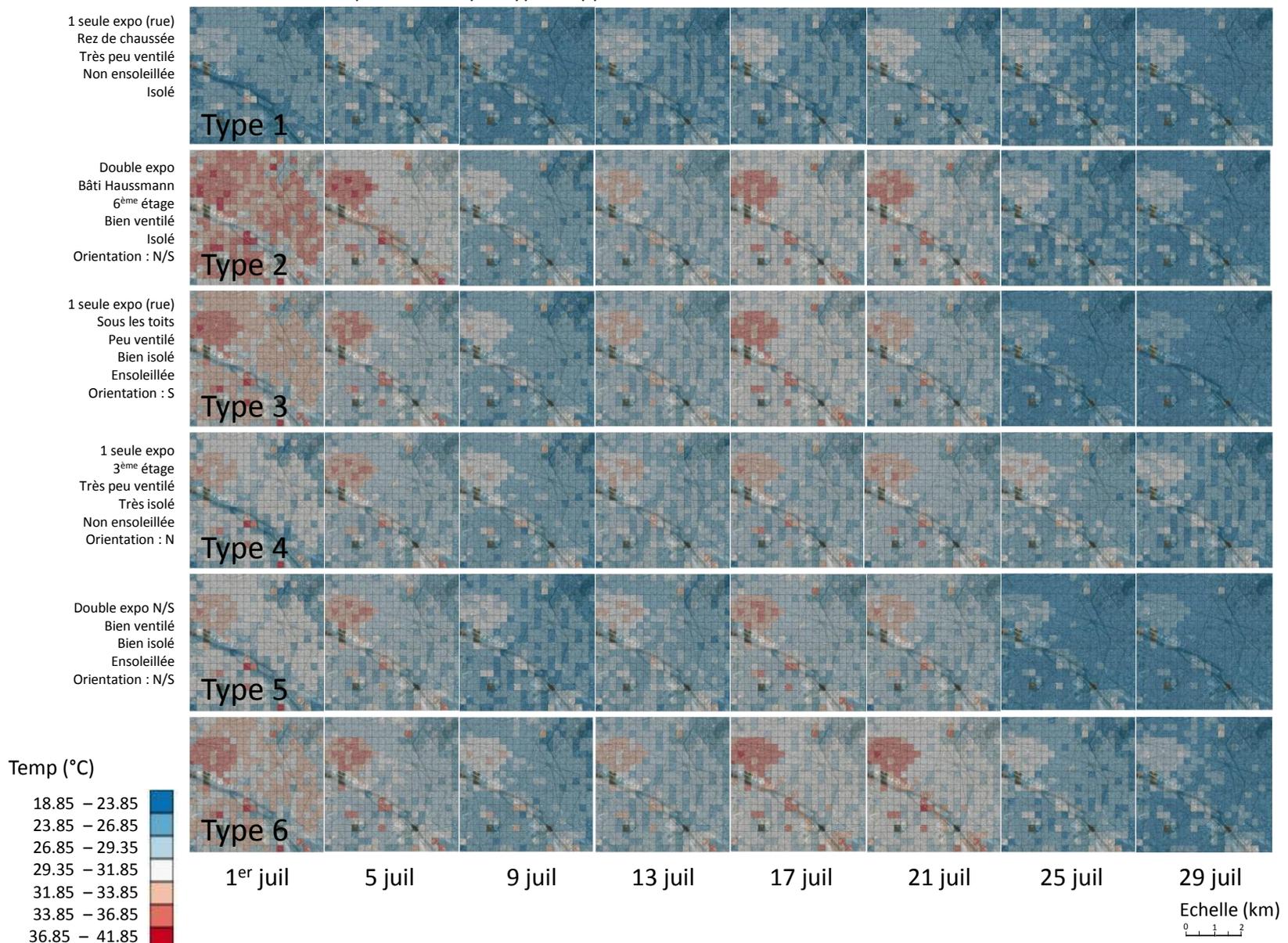


Figure 4.62 : Cartographie des températures intérieures de jour par type d'appartements, juillet 2015

Les températures nocturnes sont importantes à prendre en considération. Comme nous l'avons déjà dit, c'est lors de périodes nocturnes que le corps récupère. Sur la figure 4.63, on remarque que chaque appartement se comporte différemment. Le type 1 enregistre des températures faibles sur toute la période. Le 5 juillet, alors que tous les autres appartements ont une température supérieure à 32°C au niveau de l'Opéra, cet appartement enregistre des températures toujours inférieures à 32°C. Le type 2 et 6, le 5 juillet, enregistrent des températures nocturnes moyennes de 35,2°C dans le quartier de l'Opéra. Les autres nuits, les températures diminuent et des périodes de rafraîchissement sont visibles.

Le type 3, sous les toits, est similaire au type 6 (SURFEX). Malgré des périodes nocturnes de fortes chaleurs, ces appartements se refroidissent. Le type 4 est intéressant à analyser. Même si ses températures ne sont pas extrêmes, on constate l'absence d'une diminution de températures entre les nuits n'est pas présente. Les températures restent constantes sur toute la période. Cet appartement est d'autant plus préoccupant que les températures sont élevées. Les températures nocturnes comme diurnes sont à prendre en compte puisque par l'exemple du type 4, on constate que même si de jour, les températures ne sont pas extrêmes, de nuit, des températures élevées sur toute la période, sans une phase de rafraîchissement, peuvent être dangereuses pour la santé humaine.

Campagnes de mesures et différenciation des comportements par type d'appartements

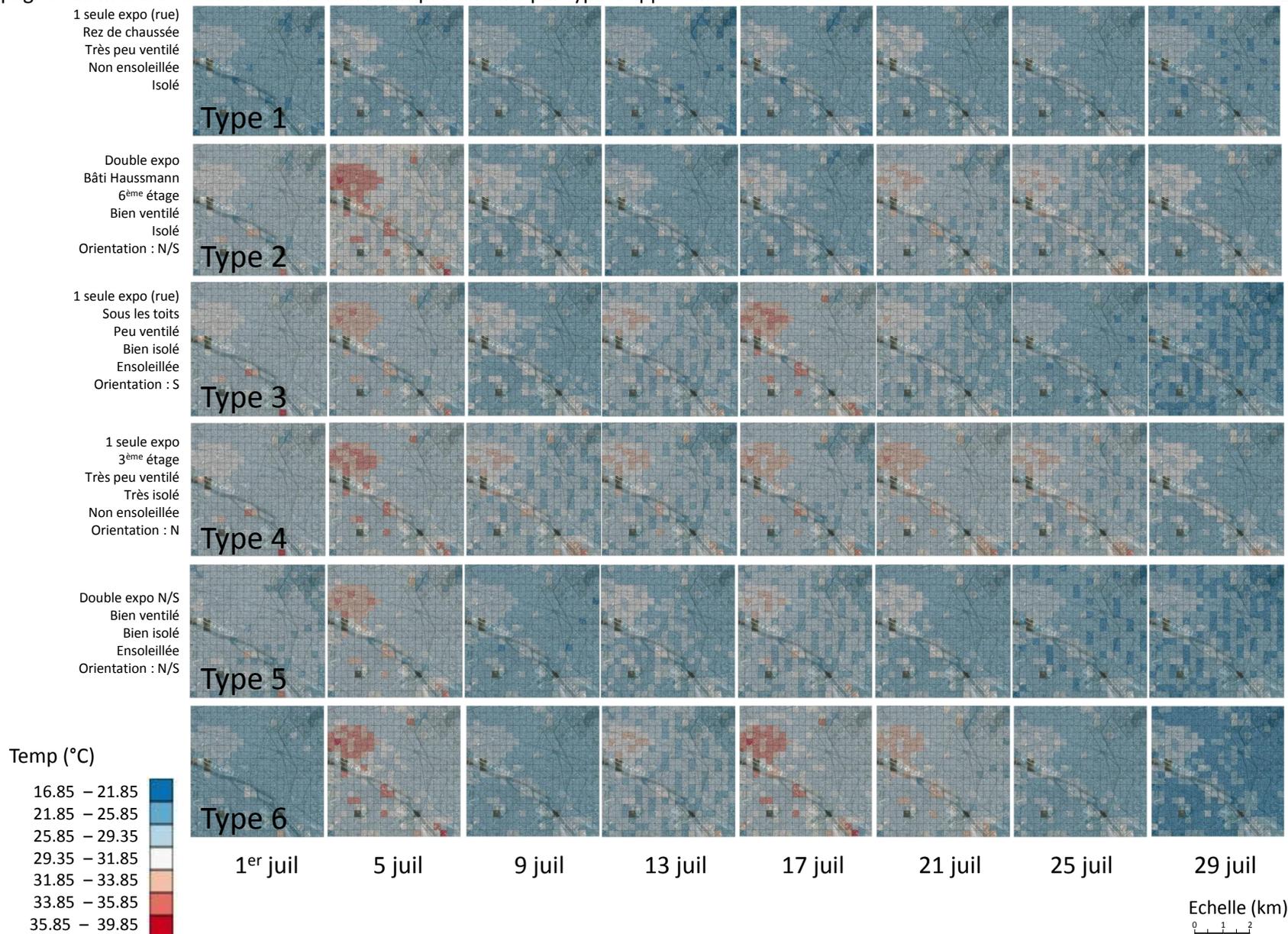


Figure 4.63 : Cartographie des températures intérieures de nuit par type d'appartements, juillet 2015

4.2.3. Indice UTCI par type d'appartements

Les indices UTCI nous permettent de différencier les appartements en fonction de leur stress thermique (Fig.4.64). Ces indices résument la situation des appartements entre le 1^{er} et le 5 juillet en fonction des seuils : <26°C ; entre 26°C et 32°C ; entre 32°C et 38°C. En dessous du seuil des 26°C, l'indice ne considère aucun stress thermique, entre 26°C et 32°C, le stress est modéré. Au-delà des 32°C, le seuil est défini comme un fort stress thermique.

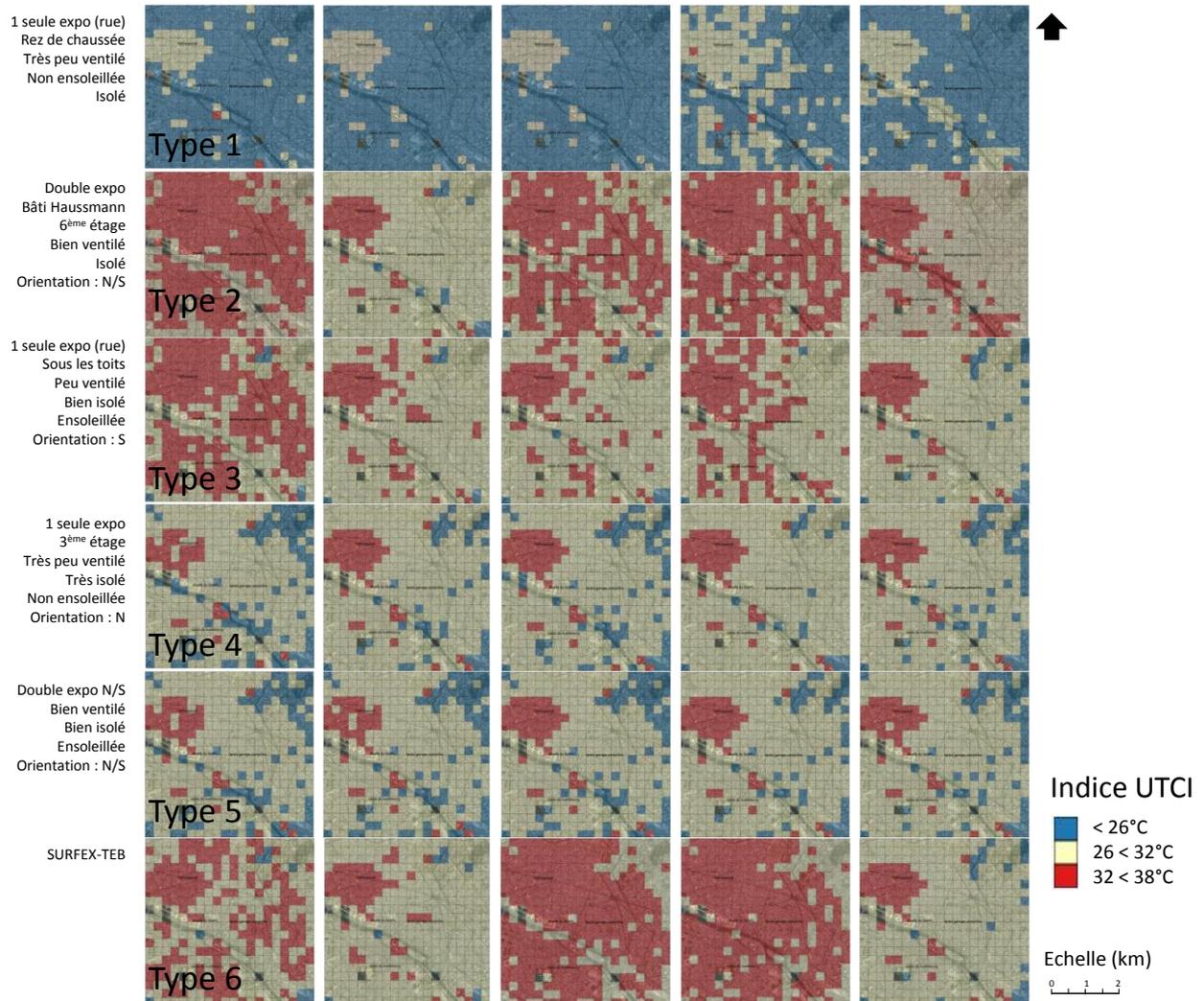


Figure 4.64 : Cartographie de l'UTCI intérieur par type d'appartements du 1^{er} au 5 juillet 2015 (période caniculaire)

4.3. Visualisation des températures extérieures

La figure 4.65 montre les cartographies des températures extérieures pour la journée du 1^{er} juillet 2015 pour différents types de configurations. Contrairement aux températures intérieures et comme nous l'avons vu, les températures extérieures sont spatialement très homogènes entre elles. La différence de températures vient de la localisation des capteurs. La zone peut être plus ventilée grâce aux boulevards ou moins ventilée en raison de la cour intérieure ou d'une rue canyon. La seine est la zone la plus fraîche. Une différence de plus de 10°C est visible avec le reste du territoire parisien.

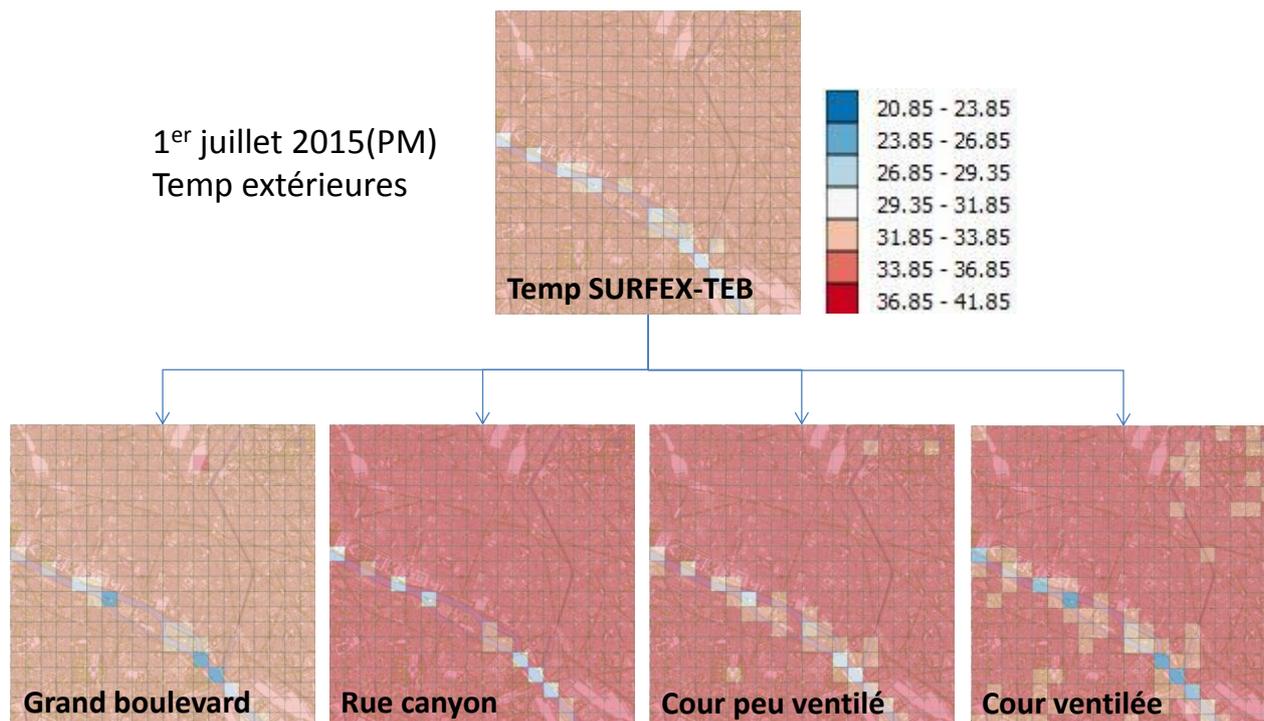


Figure 4.65 : Différenciation spatiales des températures extérieures pour les différentes configurations, 1^{er} juillet 2015

Une analyse temporelle des températures extérieures n'est pas réalisée vu la forte similitude entre les configurations et la faible distinction avec les températures extérieures calculées par le modèle SURFEX-TEB. Cependant, on constate que les températures extérieures sont plus chaudes pour les configurations de rue canyon et de cours. Les températures extérieures à 2m sorties par le modèle SURFEX-TEB sont les références pour nos températures extérieures, sur la suite de notre étude. Cependant, il est intéressant de montrer l'influence des températures extérieures sur les températures intérieures.

4.4. Différenciation spatiale intérieure/extérieure par type d'appartements

Comme nous l'avons déjà constaté par l'analyse statistique, les températures extérieures influencent les températures intérieures mais avec des répercussions différentes en fonction du type d'appartements. Les cartographies des températures extérieures sont réalisées à partir des valeurs de SURFEX-TEB.

- Différenciation des températures de jour

La différenciation entre les températures intérieures et extérieures est spatiale (Fig.4.66). Les températures extérieures sont très homogènes contrairement aux températures intérieures se différenciant d'une maille à une autre et donc d'un quartier à un autre. Par les températures extérieures, il est quasi impossible de visualiser des zones plus chaudes à l'exemple du quartier de l'Opéra, (si on garde la même échelle de température entre l'intérieur et l'extérieur).

Le type 1 se différencie des autres types par ses températures intérieures basses. Elles sont toujours moins élevées que celles extérieures. Ce type, par sa localisation n'a pas le même vécu de la canicule

De la donnée brute à la dangerosité

que les types 2 ou 3 par exemple. Les types 2 et 3, emmagasinent la chaleur pendant plusieurs jours. Même si l'air extérieur se rafraîchit, les températures restent élevées, à l'exemple du 4 juillet et cela est encore plus visible après une journée de forte chaleur. L'effet de l'inertie thermique intervient dans ce phénomène. Ces deux types mais surtout le type 3 sont les plus impactés par la canicule à court terme. Les types 4 et 5 se ressemblent par leur comportement entre le 1^{er} et le 7 juillet. Au-delà de cette date, ils se différencient.

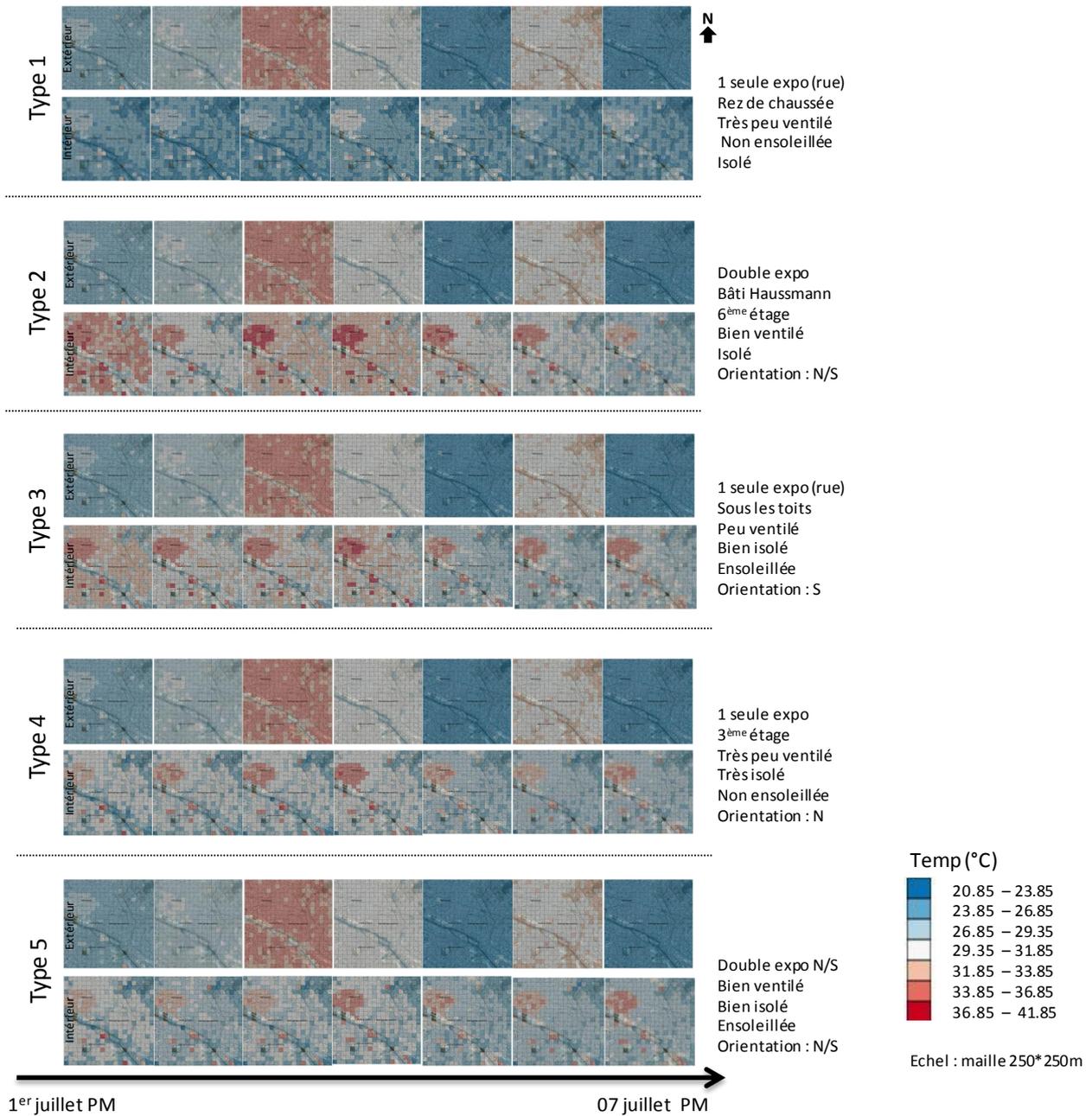


Figure 4.66 : Cartographies des températures intérieures et extérieures de jour (moyennées 15-22h) pour les types d'appartements, du 1^{er} au 7 juillet 2015

- Différenciation des températures de nuit

De nuit, le même constat peut-être fait. Les mailles à températures élevées se visualisent davantage à l'intérieur qu'à l'extérieur du bâtiment (Fig.4.67). Le quartier de l'Opéra atteint ses températures

Campagnes de mesures et différenciation des comportements par type d'appartements

maximales le 4 juillet soit un jour après le pic de canicule. L'effet de l'inertie thermique est à prendre en compte pour l'analyse.

Le type 1 enregistre les mêmes températures à l'intérieur qu'à l'extérieur du logement. Pour les autres types, une faible différence existe dans le comportement des températures. Celles intérieures restent légèrement plus chaudes que celles extérieures. De nuit, la distinction entre les types d'appartements et la différenciation spatiale sont moins marquées que pendant les périodes diurnes. Cela dit, on voit un écart marqué de nuit entre l'extérieur et l'intérieur et les températures intérieures sont très souvent supérieures à 26°C voir 29°C.

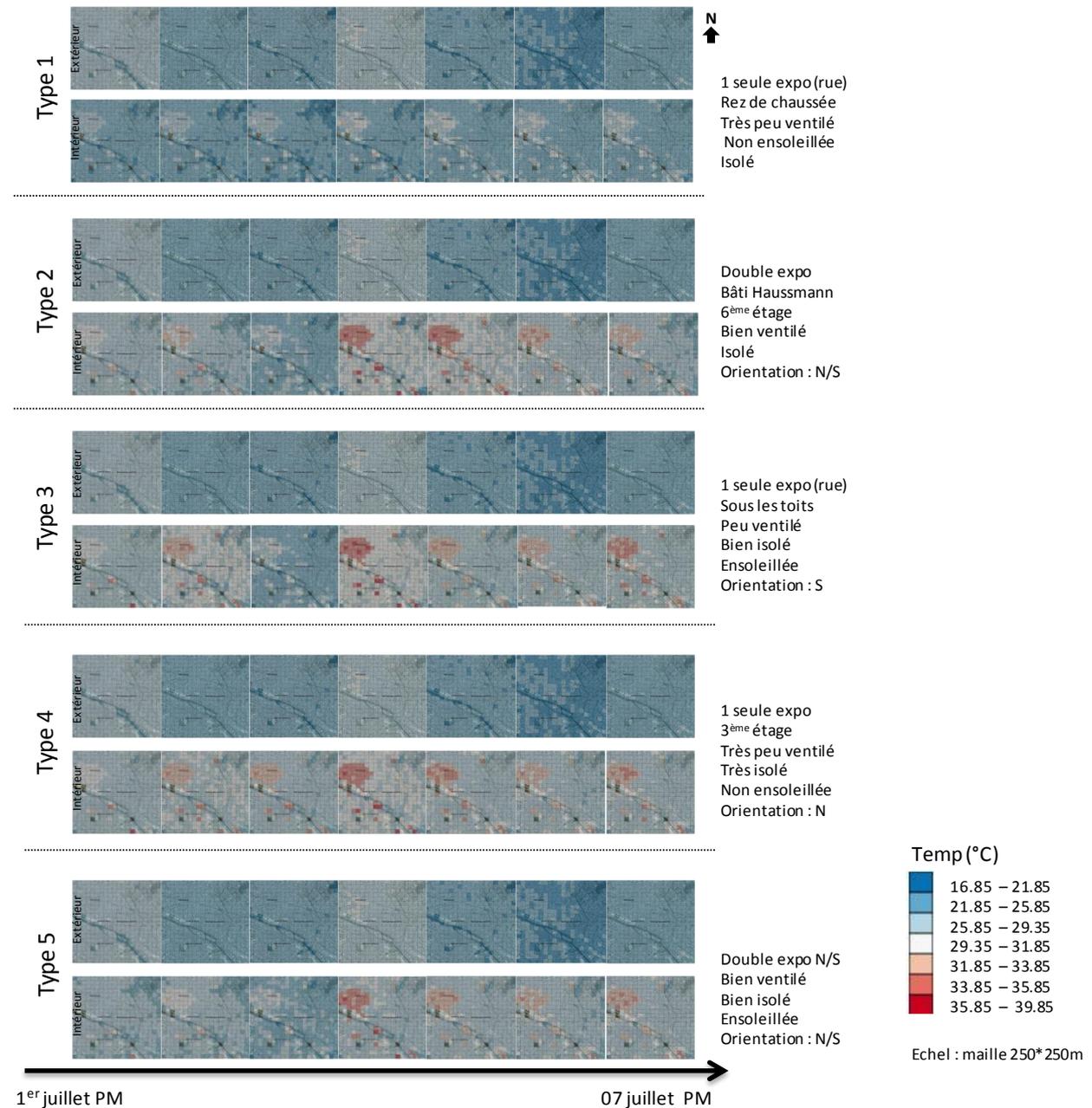


Figure 4.67 : Cartographies des températures intérieures et extérieures de nuit (moyennées 03-10h) pour les types d'appartements, du 1^{er} au 7 juillet 2015

Ces premières cartographies, en fonction du type d'appartements, sont très éclairantes. Elles montrent les différences notables existant entre les sorties SURFEX et les autres types

De la donnée brute à la dangerosité

d'appartements. Les répercussions se font sentir davantage sur les températures intérieures et nocturnes. Les résultats montrent que la ville n'est pas un bloc homogène mais comporte des différences saisissantes en période de canicule selon la localisation, le type d'appartement et la durée. L'effet d'inertie thermique est à prendre en compte dans l'analyse des températures. Celui-ci impacte sur les températures intérieures. Les parcs urbains constituent des îlots de fraîcheur.

Synthèse du chapitre 4

Dans le chapitre 4, des types de bâtiments sont créés à partir de campagnes de mesures et une fusion de données est réalisée pour estimer les températures intérieures et extérieures sur la zone de Paris.

La campagne de mesures 2014 (en période non caniculaire) met en évidence les écarts intérieur/extérieur, les écarts jour/nuit et les variations entre étages. Les températures relevées montrent une variabilité récurrente journalière et une intensité plus forte la nuit que le jour. Les températures intérieures varient nettement moins que celles extérieures. Cette première analyse démontre que la ventilation naturelle et son fonctionnement sont corrélés aux conditions climatiques extérieures du bâtiment, à son orientation, à sa conception mais aussi par l'ouverture des fenêtres.

La campagne de mesures 2015 (en période caniculaire) permet de confirmer nos constats sur l'importance donnée aux températures intérieures et sur les différences de températures entre appartements. La localisation, le type d'appartements et ses caractéristiques thermiques jouent un rôle sur les températures intérieures.

Les premières cartographies issues de la fusion de données montrent que la ville n'est pas un bloc homogène. Des quartiers se distinguent des autres par leurs fortes différences de températures tels que le quartier de l'Opéra ou des Buttes Chaumont. Le confort intérieur et extérieur ne peuvent pas être abordé de la même manière dû à la disparité des températures.

Davantage de campagnes d'observations permettraient de consolider l'estimation des températures intérieures, mais les résultats sont déjà éclairants. Pour compléter notre étude, une représentation de la canicule et des indices de dangers sont réalisés et développés pour mieux identifier les hot-spots. C'est l'objectif du chapitre 5.

Chapitre 5

Représentation de la canicule et construction de l'indice de dangerosité

Les objectifs de ce chapitre sont de :

- Proposer un indice de dangerosité lors d'une période de canicule permettant de coupler la durée et la vulnérabilité
- Expérimenter l'indice avec plusieurs seuils de températures sur différents types de configurations
- Représenter par la cartographie la canicule et les indices de dangerosité

TABLE DES MATIERES

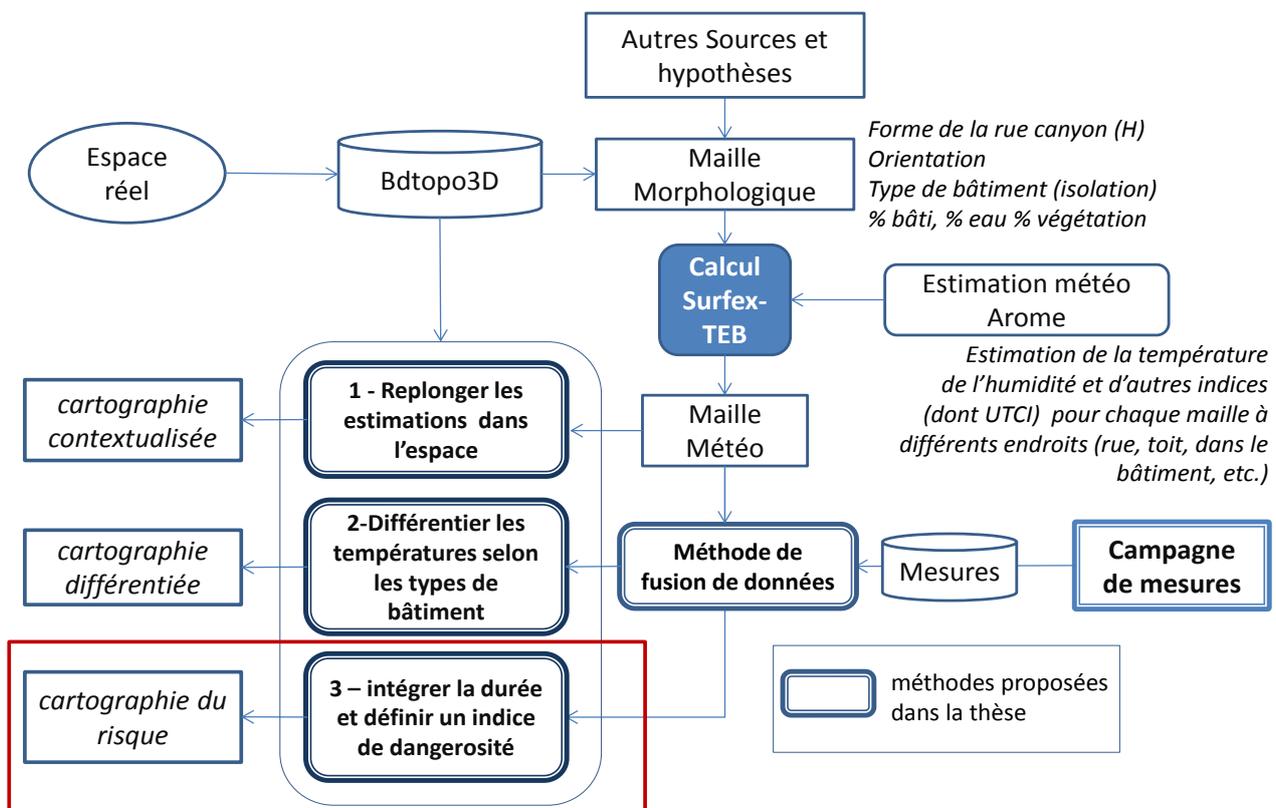
1.	<i>Le climat, un enjeu de santé</i>	290
1.1.	La santé environnementale	290
1.2.	La surmortalité liée à la canicule	291
1.2.1.	Relation entre mortalité et chaleur	291
1.2.2.	La surmortalité due à la canicule dans un contexte de changement climatique	293
1.2.3.	Trois facteurs cruciaux : la localisation, la durée et la vulnérabilité individuelle.....	296
2.	<i>Caractériser la canicule comme phénomène spatio-temporel</i>	297
2.1.	Intégrer la durée et l'intensité pour étudier la canicule : la dimension temporelle	298
2.2.	La dimension spatiale	300
2.3.	La canicule : phénomène spatio-temporel.....	301
3.	<i>Représentation de la canicule</i>	304
3.1.	Canicule extérieure	305
3.2.	Canicule à l'intérieure des appartements non climatisés.....	306
4.	<i>Indice de dangerosité</i>	311
4.1.	Approche méthodologique de la construction de l'indice	311
4.1.1.	Choix des indicateurs.....	312
4.1.2.	Définition des seuils de dangerosité.....	313
4.1.3.	Mise en équation.....	314
4.1.4.	Intérêts et faiblesses de l'indice de dangerosité	314
4.2.	Analyse des valeurs de l'indice.....	315
4.2.1.	Analyse temporelle dans une maille.....	315
4.2.2.	Analyse spatio-temporelle.....	322
4.2.3.	Comparaison avec les données sanitaires de juillet 2015	329
5.	<i>Localisation des hot-spots</i>	331
5.1.	Agrégat spatial.....	331
5.2.	La climatisation : impact et conséquence	334

Au travers des chapitres 3 et 4, les résultats obtenus ont montré que les températures intérieures sont sensiblement différentes des températures extérieures et qu'elles ont des comportements différents en fonction des types d'appartements. Les données des mesures faites au centre de Paris ont permis la création de 5 types d'appartements :

- *Type 1* : bâti ancien <1850, rez-de-chaussée, très peu ventilé, isolé, orientation S.
- *Type 2* : bâti haussmannien, isolé et bien ventilé, 6^{ième} étage, orientation N/S
- *Type 3* : bâti ancien <1850, bien isolé et peu ventilé, sous les toits, orientation S
- *Type 4* : bâti ancien <1850, très isolé, très peu ventilé, 3^{ième} étage, orientation N
- *Type 5* : bâti ancien <1850, bien isolé, ventilé, ensoleillé, orientation N/S

A partir de ces types, il nous a semblé pertinent de les intégrer à nos résultats obtenus pour mieux comprendre la dangerosité face au risque de canicule, d'autant plus que les personnes particulièrement fragiles passent la plupart de leur temps à l'intérieur de leur appartement.

Le chapitre 5 permet d'apporter une analyse et une représentation des phénomènes caniculaires fondées sur la différenciation entre les températures intérieures et extérieures dans les bâtiments. Ce chapitre présente une méthodologie de construction d'indices de dangerosité en prenant en compte les spécificités thermiques des bâtiments et la durée du phénomène afin d'obtenir une cartographie du risque caniculaire pendant son occurrence, pour les différentes configurations urbaines.



Cette dangerosité est d'autant plus importante à prendre en considération que le GIEC annonce une augmentation des phénomènes caniculaires.

1. Le climat, un enjeu de santé

En 2014, l'OMS reconnaissant l'importance des liens entre santé et climat, organise une première conférence internationale. Avec le changement climatique, l'impact sur la biodiversité, l'économie mais aussi sur la santé humaine est de plus en plus médiatisé. Les risques sanitaires intègrent de nombreux facteurs tels que la zone géographique, la nature de l'événement, l'état de santé des individus, leur âge, etc. L'impact touche un large spectre de maladies et de pathologies.

Un lien étroit existe entre l'environnement et la santé. La mise en relation de ces deux paramètres permet d'établir des rapports de dépendance entre les changements environnementaux et la santé. Le climat et l'environnement étant en corrélation, la santé et le climat le sont aussi. Le climat a toujours influencé la santé et le bien-être des hommes. Face à ces effets néfastes, les rapides changements climatiques représentent un véritable défi à relever et il convient de protéger la santé humaine.

Le changement climatique se traduit par une hausse de fréquence, d'intensité ou de durée de phénomènes extrêmes à l'exemple de la canicule. L'été, les fortes chaleurs deviennent un stress pour le corps humain. La chaleur peut engendrer des décès ou aggraver l'état d'une personne malade (Kovats et Hajat, 2008).

La santé devient un enjeu crucial dans notre société. Nous prenons conscience de l'intérêt de bien vieillir et de préserver notre santé. Il est donc important de comprendre les influences de notre climat pour la préserver.

1.1. La santé environnementale

La santé est un terme du vocabulaire courant. Chacun y associe des représentations différentes. Selon l'OMS la santé est « un état de complet bien-être physique, mental et social et ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité »⁷⁴. La santé constitue une dimension essentielle de la qualité de la vie. L'âge, le sexe, le patrimoine génétique, l'alimentation mais également l'environnement influencent la santé d'une personne. En effet, un lien existe entre l'environnement et la santé humaine. Certains environnements réduisent l'espérance de vie telles que les mines, autrefois ou les tanneries en Inde. C'est ce que l'on appelle la santé environnementale. Elle rassemble les effets sur la santé de l'homme dû à ses conditions de vie, la contamination des milieux et les changements environnementaux. L'OMS a déclaré que « l'environnement est la clé d'une meilleure santé »⁷⁵.

Depuis 2004, un Plan national santé environnement est mis en place. Ce plan a pour volonté de réduire, autant que possible et de façon la plus efficace, les impacts négatifs des facteurs environnementaux sur la santé. L'article L.1311 du code de la santé publique prévoit que « ce plan prend notamment en compte les effets sur la santé des agents chimiques, biologiques et

⁷⁴ Préambule à la Constitution de l'Organisation Mondiale de la Santé, tel qu'adopté par la Conférence internationale sur la Santé, New York, 19-22 juin 1946 ; signé le 22 juillet 1946 par les représentants de 61 Etats. 1946 ; (Actes officiels de l'Organisation mondiale de la Santé, n°. 2, p. 100) et entré en vigueur le 7 avril 1948. La définition n'a pas été modifiée depuis 1946

⁷⁵ Juin 1999 conférence ministérielle Santé et environnement

physiques présents dans les différents milieux de vie, y compris le milieu de travail, ainsi que ceux des événements météorologiques extrêmes ».

A l'échelle mondiale, les gens vivent plus longtemps et en meilleure santé que dans les siècles ou décennies passés. Cependant, le climat et le changement climatique ont des retombées majoritairement négatives sur la santé. La charte de l'environnement et de la santé européenne⁷⁶ signée en 1989 souligne que chacun a le droit à « un environnement permettant la réalisation du niveau le plus élevé de santé et de bien-être ». Cependant, un écart existe entre ce droit et la réalité. Il existe deux types de risques : les risques pour la santé, liés à la dégradation de la qualité de l'environnement et les risques liés à des phénomènes de grande ampleur voire catastrophiques. Pour notre étude, ceux qui nous intéressent sont les risques liés aux phénomènes extrêmes, plus précisément la canicule.

La Commission européenne souligne que le changement climatique et ses incidences sur la santé représentent un défi important. Le changement climatique aura des répercussions directes et indirectes sur la santé humaine. En Europe, au cours de ces dernières décennies, on constate déjà une augmentation de certains incidents, à l'exemple des vagues de chaleur. La canicule 2003 a provoqué plus de 70 000 décès supplémentaires en Europe (Robine *et al.*, 2008)

1.2. La surmortalité liée à la canicule

1.2.1. Relation entre mortalité et chaleur

D'après des études épidémiologiques portant sur l'association entre la chaleur et la mortalité deux types d'études se distinguent :

- celles qui ont une portée sur l'association entre la température ambiante et la mortalité. Ces études se basent sur des analyses de séries temporelles (Armstrong 2006) et des analyses cas-croisés⁷⁷, (Maclure 1991). D'après Basu (2009) ces études sont les plus utilisées.
- celles qui ont une portée sur les impacts des vagues de chaleur sur la mortalité. Ces études portent aussi sur des analyses de séries temporelles et cas croisés mais avec des approches plus simples avec une comparaison entre le taux de mortalité et les jours considérés comme vague de chaleur (Rooney *et al.*, 1998). Des études cas-témoins sont également menées (Bouchama *et al.*, 2007).

Les résultats de ces deux types d'études soulignent une relation entre la mortalité et la température. Cette relation est non linéaire (Armstrong 2006; Bhaskaran *et al.*, 2013). Les seuils et la forme de la relation sont influencés par le contexte d'étude (Baccini *et al.*, 2008; Curriero *et al.*, 2002). Analitis (2014) met en évidence que l'ampleur des effets liés à la chaleur varie d'une ville à l'autre. De plus, ces études montrent que la définition que l'on donne aux canicules est un enjeu important lors de calculs d'excès de décès (Kent *et al.*, 2014).

⁷⁶ OMS-Charte européenne de l'environnement et de la santé, adoptée à Frankfurt, Allemagne, en 1989 par les ministres de l'environnement et de la santé des États membres de la région européenne de l'OMS

⁷⁷ Cette analyse de cas-croisés (case-crossover) se base sur une approche cas-témoins avec des intervalles temps.

Représentation de la canicule et construction de l'indice de dangerosité

Dans la quasi-totalité de ces études alliant canicule et mortalité, la vulnérabilité des personnes et les facteurs temporels sont abordés indépendamment. Il est intéressant d'étudier la notion de cumul de facteurs afin d'affiner les mesures prises lors d'interventions de santé publique ad hoc et de montrer la dangerosité du phénomène caniculaire.

L'humidité comme la pollution atmosphérique sont également mis en avant pour expliquer l'excès de mortalité. Cependant Buckley *et al.*, 2014; Reid *et al.*, 2012 recommandent de ne pas inclure ces facteurs lorsque l'on parle des effets de la chaleur sur la santé humaine.

Les facteurs temporels jouent un rôle primordial dans ce type d'étude (Armstrong 2006; Bhaskaran *et al.*, 2013). Si on regarde la figure 5.1 (graphiques établis par l'INSERM), on constate que l'évolution de la surmortalité coïncide avec la courbe des températures minimales et maximales. On souligne que la surmortalité a été très forte dans les départements où l'on a observé plus de 5 jours de grande chaleur (+83% en moyenne) à l'exemple de la région parisienne. La vague de surmortalité a débuté le 4 août et a continué durant toute la période de canicule jusqu'au 13 août. La température maximale a retrouvé des valeurs inférieures à 30°C à partir du 15 août. La décroissance de la surmortalité a suivi la décroissance des températures.

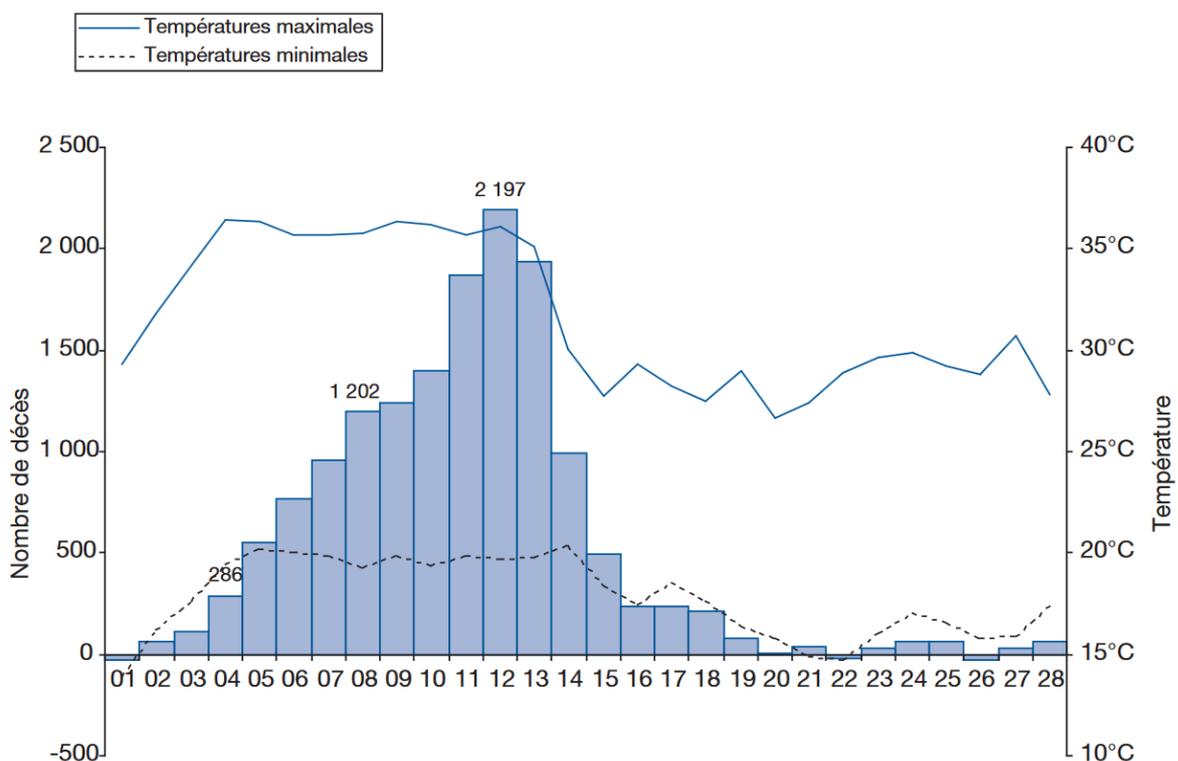


Figure 5.1 : Excès de décès observés quotidiennement pendant le mois d'août 2003 comparé au relevé des températures extérieures (Source : INSERM⁷⁸)

De plus, comme l'indique l'InVS, c'est au moment où les températures nocturnes ont été les plus élevées à Paris que le nombre de décès à domicile a augmenté de façon marquée. Les 11 et 12 août le record absolu de température minimale est battu à Paris, il s'élève à 25,5°C. 80% de la surmortalité observée à Paris est survenue entre le 11 et le 14 août. Les principales causes médicales sont

⁷⁸ Rapport d'étape INSERM : Surmortalité liées à la canicule d'août 2003. – Estimation de la surmortalité et principales caractéristiques épidémiologiques. Rapport remis le 25 septembre 2003

directement liés à la chaleur, dont 29% des excès de décès sont dus à des coups de chaleur et des déshydratations (Rapport annuel 2003, InVS).

La vague de chaleur 2003 a provoqué une surmortalité à court terme estimée à près de 15 000 décès. 42% des décès sont survenus dans des hôpitaux, 35% à domicile et 19% dans des maisons de retraite et 3% en clinique privée. Le décès intervenus dans les maisons de retraite et à domicile ont été multipliés environ par deux par rapport à la valeur habituelle (Rapport annuel 2003, InVS). Le nombre de décès survenus sur la voie publique n'a pas varié par rapport aux années précédentes.

Les chiffres de mortalité de la canicule de l'été 2015 sont traités ultérieurement dans ce chapitre.

Avec la multiplication des documentations et rapports sur les bilans sanitaires dus à une canicule, les pouvoirs publics mettent en place depuis la dernière décennie plusieurs interventions de santé publique pour réduire les impacts sanitaires de la chaleur. L'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) a proposé des lignes directrices sur la mise en place d'actions. En France, suite à ce bilan de l'été 2003, l'InVS et Météo-France engagent des travaux pour proposer un système d'alerte basé sur des indices Bio-météorologiques (Chapitre1). Ces indices se basent sur des températures extérieures. Or la plupart des décès ont lieu chez l'habitant et les températures intérieures peuvent être très variables selon les logements (cf chapitre 4). La prise en compte des températures intérieures est donc tout aussi importante que celles extérieures.

1.2.2. La surmortalité due à la canicule dans un contexte de changement climatique

Le réchauffement climatique présente généralement des risques négatifs. Il va influencer sur les déterminants sociaux de la santé, air, eau, nourriture, etc. (IPPC 2014). Les effets du changement climatique se feront sentir différemment d'un pays à un autre et d'une région à une autre en fonction de la configuration géographique. L'impact de l'environnement sur la santé humaine est une préoccupation majeure de santé publique. Parmi les nombreux déterminants environnementaux (hydrologiques, biologiques, etc.) de la santé des populations, les déterminants climatiques (températures, pluviométrie, etc.) ont fait l'objet de nombreuses recherches ces dernières années. Les températures caniculaires contribuent directement à la mortalité par maladies cardiovasculaires ou respiratoires (IPCC 2014). Le changement climatique impacte donc la santé humaine (Fig.5.2).

La variabilité et la modification du climat ont des conséquences importantes sur les décès et les maladies à travers les catastrophes naturelles telles que les inondations, les vagues de chaleur, etc. le changement climatique contribue à alourdir la morbidité et ce phénomène devrait s'accroître à l'avenir. Le GIEC⁷⁹ fait état d'une probabilité supérieure à 90% sur le fait que, ces canicules entraîneront des conséquences de plus en plus marquées sur la santé des générations futures.

⁷⁹ Smith, K.R., A. Woodward, D. Campbell-Lendrum, D.D. Chadee, Y. Honda, Q. Liu, J.M. Olwoch, B. Revich, and R. Sauerborn, 2014: Human health: impacts, adaptation, and co-benefits. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014, pp. 709-754.

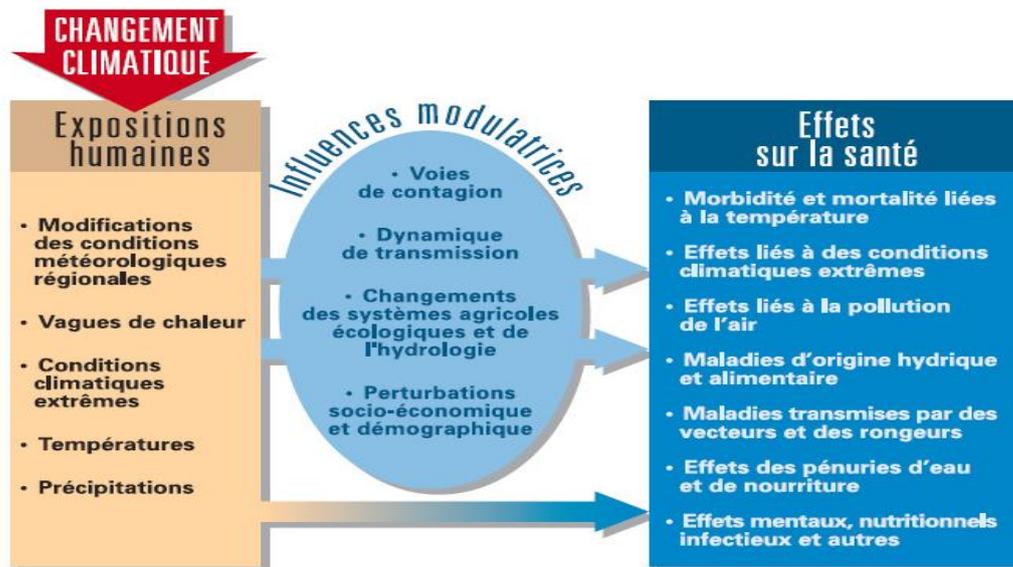


Figure 5.2 : Relation entre changement climatique et santé (Source : OMS⁸⁰)

Chaque année de nombreuses personnes sont hospitalisées ou décèdent suite à une exposition à une température élevée. C'est la principale préoccupation en Europe en raison de l'augmentation des températures annuelles, des pics de chaleurs, de l'intensification et de la répétition des vagues de chaleur. En France, les estimations faites à partir du modèle Arpège Climat de Météo-France montrent que les températures estivales observées et prévues augmentent progressivement (Fig.5.3).

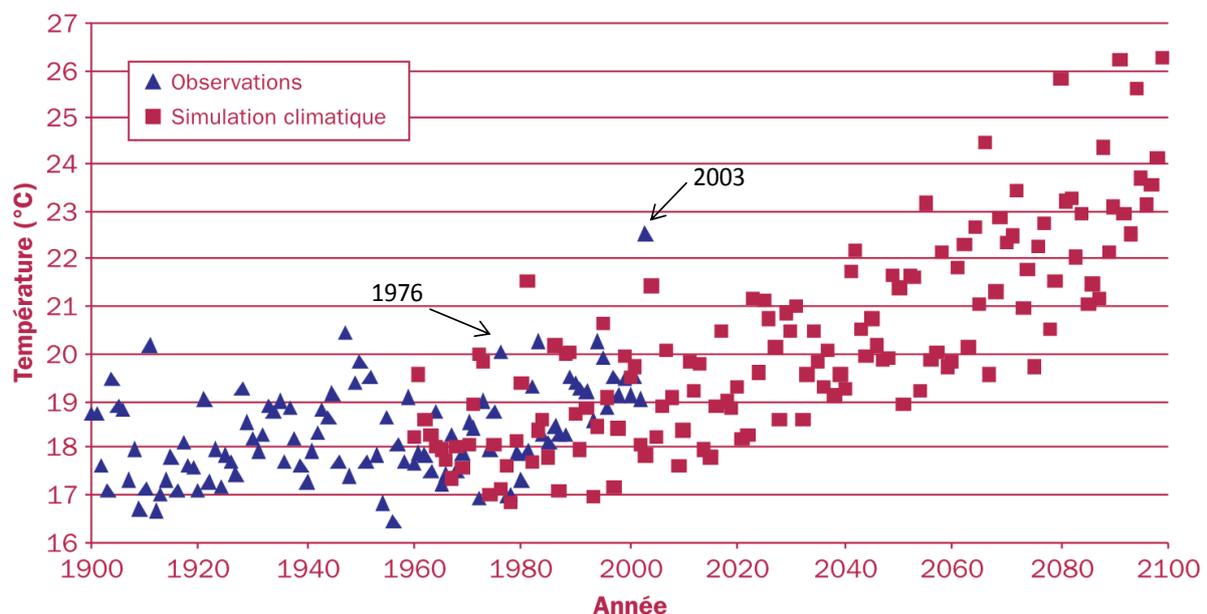


Figure 5.3 : Moyenne des températures estivales observées et simulées en France au cours du XX^{ème} et XXI^{ème} siècle. Les triangles bleus représentent les observations entre 1900 et 2003, les carrés roses s les températures simulées à partir de 1960 par le modèle avec un scénario A2 du GIEC (d'après Météo-France)

⁸⁰ WHO. 2014. Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s. Geneva: World Health Organization

Le modèle régional Aladin-Climat permet de montrer qu'à l'horizon 2021-2050, un réchauffement climatique de 0,5°C à 2°C. La figure 5.4 montre une évolution des jours de vagues de chaleur en été pour un scénario RCP4.5 et RCP8.5⁸¹. Sur la période de référence 1976-2005, le nombre de jours de vagues de chaleur est compris entre 2 et 8, contre 0 à plus de 10 sur l'ensemble du territoire entre 2012 et 2050. Une augmentation plus importante >+20j pour le scénario RCP8.5 et entre 5 et 10 jours pour le scénario RCP4.5. Cette augmentation est généralisée sur tout le territoire pour la période 2071-2100.

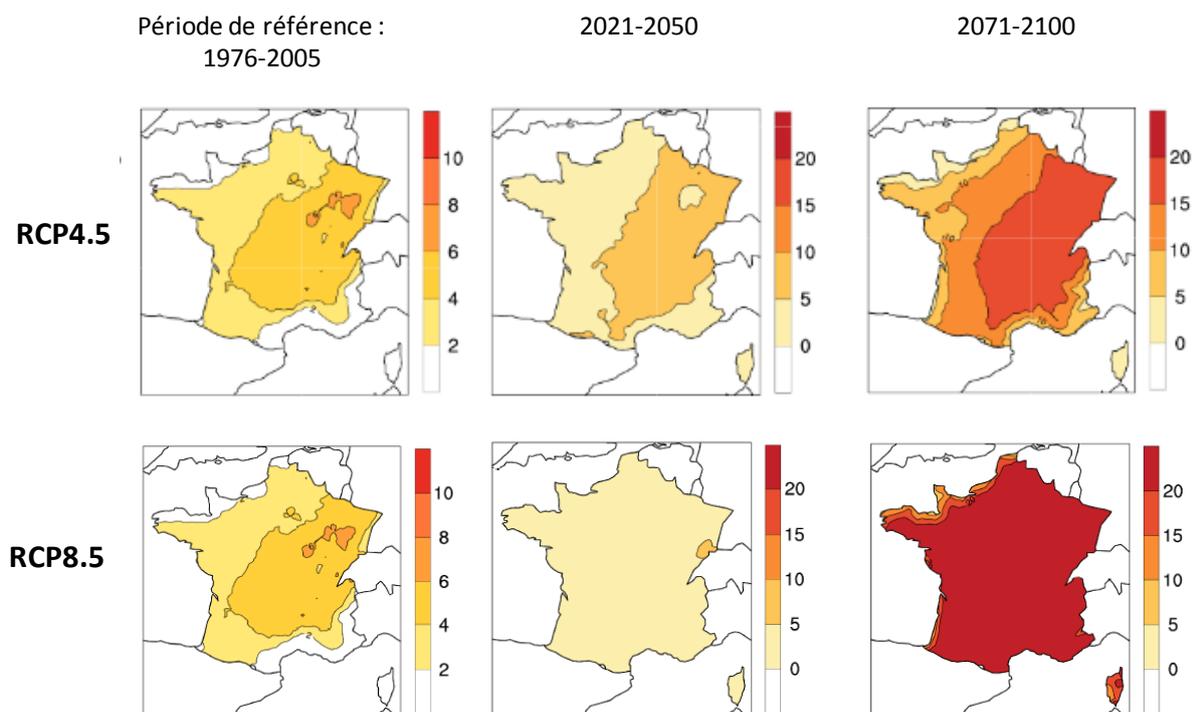


Figure 5.4 : Nombre de jours de vagues de chaleur en été pour la période de référence 1976-2005 et l'écart à cette référence pour le scénario RCP4.5 et RCP8.5 aux horizons 2012-2050 et 2071-2100 (source : Rapport Direction générale de l'Énergie et du Climat : Le climat de la France au XXI^{ème} siècle⁸²)

L'ampleur de ces événements d'un point de vue de santé publique et de leurs impacts médiatiques, montre et révèle un manque en termes de préparation, de programmes de prévention ou même de surveillance ad hoc, et surtout de connaissances sur la dangerosité notamment en lien avec la durée et la vulnérabilité de la population vis-à-vis de la chaleur. L'exposition à une température extérieure ou intérieure trop élevées, pendant une période plus ou moins longue, sans possibilité de récupération peut avoir des conséquences plus ou moins grave sur la santé humaine dues à une réponse insuffisante des mécanismes de thermorégulation.

Les rapports d'enquête sur la canicule 2003 ont mis en avant que le rafraîchissement des personnes sensibles ou vulnérables, pendant une période de deux à trois heures par jour, permettent de réduire sensiblement le risque de surmortalité. L'impact d'une vague de chaleur a des effets immédiats mais peut aussi entraîner des effets plus ou moins retardés si on prend en compte les températures

⁸¹ Le scénario RCP8.5 est le plus élevé des scénarios du GIEC. Il est un peu plus sévère que l'ancien scénario le plus pessimiste A2.

⁸² <http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Le-climat-de-la-France-au-XXIe-.html> : Le climat de la France au XXI^{ème} siècle, volume 4, août 2014

intérieures. Avec l'accumulation de la chaleur et l'inertie des matériaux, l'appartement se rafraîchit peu (cf chapitre 4). Une étude réalisée à Valence (en Espagne) montre que l'effet le plus marqué d'une vague de chaleur sur la surmortalité était plus visible dans les jours suivants (Ballester *et al.*, 1997).

La surmortalité liée à des températures extrêmement élevées pendant plusieurs jours d'affilés est un phénomène bien connu, tant en Europe qu'aux Etats-Unis. Généralement, lors de ces épisodes, la courbe de mortalité s'envole dès le début de la vague de chaleur, pour culminer 24 ou 48 heures après le premier pic de température (Besancenot 2002). Les effets de la chaleur sont donc un enjeu primordial pour la santé des populations aujourd'hui et pour demain, dans un contexte de changement climatique et de modifications environnementales. La hausse des températures ambiantes et la hausse de l'intensité et de la durée des canicules vont contribuer à l'augmentation de la mortalité attribuable à la chaleur (Armstrong *et al.*, 2012 ; Douset *et al.*, 2011). L'effet additionnel de ces composantes permet de créer un indice de dangerosité alliant durée et vulnérabilité.

1.2.3. Trois facteurs cruciaux : la localisation, la durée et la vulnérabilité individuelle

Comme nous l'avons souligné et d'après les rapports de l'InVS les différents facteurs associés à la surmortalité sont l'âge, le nombre de jours de canicule et le degré d'urbanisation. Lors de période caniculaire, les trois facteurs, temporel, spatial et vulnérabilité ont un impact sur la morbidité.

La vulnérabilité est l'estimation des dégâts (mortalité dans notre cas) si un événement particulier se produit en un lieu avéré. Elle peut être définie de plusieurs manières selon le domaine d'application (Alwang *et al.*, 2001). Knol et VanderWeele (2012) notent que la vulnérabilité est fonction de la notion de modification d'été. Ainsi, tout facteur modifiant la relation entre la chaleur et la mortalité est considéré comme facteur de vulnérabilité (Kuh *et al.*, 2003) tels que l'âge, le sexe, la maladie, ou même l'accès à l'air climatisé (Medina-Ramon *et al.*, 2006). Lors de la canicule 2003, les femmes et hommes de plus de 75 ans ont été le plus frappés. Ils concernent plus de 70% des décès contre 10% pour les personnes de moins de 45 ans. Les principales victimes des effets sanitaires de la canicule sont les personnes âgées du fait de leur vulnérabilité particulière. Cette vulnérabilité est complexe puisqu'elle repose sur plusieurs dimensions : physiologique, psychologie et sociale. Il est important de noter aussi que la surmortalité se concentre dans les grandes villes et dans l'agglomération parisienne et les personnes isolées et âgées sont les plus touchées. Les régions les moins touchées sont les régions côtières et méridionales.

Les facteurs contextuels urbains peuvent modifier la relation entre la chaleur et la mortalité (Smargiassi *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2013) tels que la faible densité d'espaces verts, la présence d'UCI ou la densité de population (Chan *et al.*, 2012). En France, la chaleur n'a pas impacté de manière égale la population, sur tout le territoire. La surmortalité est moins marquée dans les zones rurales, les petites agglomérations et les villes moyennes et, est très élevées dans la région parisienne. La surmortalité a été particulièrement importante dans la région Ile-de-France (+141%) contre 40% pour les autres catégories, pour l'été 2003. L'agglomération parisienne a connu de fortes surmortalités de l'ordre de 150% : +147% dans l'Essonne, +161% dans les Hauts de Seine, +160% en Seine-Saint-Denis, et +171% dans le Val de Marne.

Comme nous l'avons vu en figure 5.3 la vague de chaleur de l'été 2003 a été caractérisé par une intensité et une durée importante. D'après le rapport de l'INSERM, la surmortalité a été modérée mais non négligeable pour les départements où on observe au maximum un jour de grande chaleur⁸³ (+34%). Pour ceux observés entre 2 à 5 jours, le taux grimpe à 52% et augmente jusqu'à 83% lorsque les jours de grande chaleur persistent sur plus de 5 jours. La durée fait sensiblement augmenter le nombre de victimes. Cependant, la durée et l'élévation des températures accumulées ne sont pas pris en compte dans les études sanitaires et dans l'indice IBM.

Les mesures prises par les systèmes de santé sont efficaces mais doivent être renforcées ou revues si le changement climatique s'accroît ou s'accélère. Ainsi, il est pertinent de mener une analyse sur l'effet additionnel des trois facteurs pour préciser la dangerosité des canicules. Fournir des données sur la dangerosité de la canicule permettrait de documenter les recommandations et les différentes interventions qui en découlent au niveau local.

Cette partie met en évidence l'existence de la relation entre surmortalité et canicule. Le changement climatique et l'augmentation de l'urbanisation est préoccupant sur l'évolution des impacts des vagues de chaleur. Pour mieux appréhender la canicule, les facteurs, spatial et temporel, doivent être étudiés conjointement.

2. Caractériser la canicule comme phénomène spatio-temporel

En géomatique, l'information géographique représente la relation entre un objet ou un phénomène et une localisation à la surface de la Terre (Denègre et Salgé, 1996). Cette relation permet de structurer l'espace réel sous la forme d'entités correspondant à un phénomène (Plewe, 2002). Ces entités géographiques sont définies dans l'espace et dans le temps et sont associées à une sémantique (Plewe, 2002). Une entité se définit par sa localisation, sa forme et sa période de vie et ses attributs. L'étendue de l'entité géographique est formée par ces trois dimensions. Le chapitre 4 met en évidence deux composantes à analyser pour caractériser une canicule, d'une part la durée de l'événement et d'autre part l'intensité par les températures. Elles sont mises en relation pour identifier leurs interactions. Par exemple : la canicule, au quartier de l'opéra, a débuté le 29 juin pour se terminer le 6 juillet 2015.

Ces trois dimensions (sémantique, spatiale et temporelle) sont présentes depuis de nombreuses années en géographie (Berry, 1964, Sinton, 1978). La prise en compte de ces trois composantes est cruciale pour représenter le phénomène caniculaire.

Une entité spatiale se caractérise par : son empreinte dans l'espace, son identité, ses attributs et sa durée.

⁸³ Les jours de grande chaleur sont définis comme les jours au cours desquels on observe simultanément une température maximale moyennée supérieure ou égale à 35°C et une température minimale moyennée supérieure ou égale à 20°C

2.1. Intégrer la durée et l'intensité pour étudier la canicule : la dimension temporelle

L'analyse de la canicule doit intégrer une dimension temporelle, étant entendu que l'intensité de la canicule évolue dans le temps, que les effets et impacts qui en découlent varient à diverses temporalités et donc que le phénomène caniculaire évolue dans le temps. On se pose la question de savoir comment représenter dans la durée un phénomène et ses pics ?

La dimension temporelle fait l'objet de plusieurs études dans différentes disciplines à l'exemple de la philosophie (Mittelstras 2001) ou des données temporelles avec les travaux de Jensen (2000). Pour être analysé, le temps (tout comme l'espace) peut être structuré et ordonné. Langran et Chrisman (1988) expliquent que la connectivité de l'espace dans une analyse temporelle est tout aussi importante que la connectivité temporelle dans l'analyse spatiale. Le temps est donc associé au mouvement ou au changement d'état.

Worboys (1990) distingue plusieurs structures du temps, suivant le phénomène que l'on souhaite représenter :

- Linéaire : c'est-à-dire la description du déroulement de l'événement. Par exemple, l'évolution d'un groupe d'individus se modélise de façon linéaire, mais elle peut évoluer en temps parallèle si le groupe se divise en plusieurs sous-groupes et donnant naissance à plusieurs scénarii possibles, donc plusieurs évolutions différentes. Cette représentation est la plus utilisée. Elle se modélise sous forme d'une droite orientée, sans début ni fin pour faire apparaître la dimension infinie de la représentation. Sur cette droite, on y place des états temporels (sous forme d'instantanés) ; cette structure s'attache à obtenir des descriptions d'états, des *snapshots* « instantanés ».
- Cyclique : renvoie à un événement se répétant. On peut prendre l'exemple des marées, de l'ouverture des magasins ou des températures.
- Parallèle : décrit plusieurs simulations où l'ordinateur peut effectuer différents calculs simultanément.

Galton (2000) propose une définition des états temporels selon leur dénomination. Il définit les événements (notion employé par Allen, 1984) comme des occurrences discrètes d'un phénomène avec un début et une fin (exemple : une canicule). Ces événements sont constitués de processus (exemple : jour ensoleillé). Galton différencie ces processus des routines. La distinction entre les deux est peu perceptible puisqu'une routine peut devenir un événement dès lors qu'elle devient une action exceptionnelle (exemple : la température élevée en été est une routine mais des températures élevées dépassant les seuils des 31°C et 21°C pendant 3 jours est un événement). Pour notre étude, on utilise le modèle SURFEX-TEB modélisant le processus pour calculer les températures et par ailleurs estimer possiblement la dangerosité à un temps par agrégat des états passés. Au chapitre 4, on représente le temps par une série d'états (*snapshots*). Partant sur la définition des états temporels, pour passer à la représentation de la canicule ou de la dangerosité, il faut intégrer la durée et les seuils de températures.

Pour modéliser la durée, nous nous basons sur notre schéma de données (Fig.5.5). Lorsqu'une période de fortes chaleurs est présente, la question est de savoir si elle va ou non se transformer en

De la donnée brute à la dangerosité

canicule. Les températures peuvent être élevées et dépasser le seuil sans pour autant durer plus de trois jours (selon la définition caractérisant la canicule). Pour assurer le suivi des températures, on propose de créer des objets, appelés *maille-suivi-canicule*, mis à jour toutes les 12h. Cette maille propose de calculer la canicule et un indice de dangerosité.

Pour la représentation de la canicule, trois possibilités sont prises en compte :

- Soit les dernières heures ne répondent pas aux critères de canicule et la valeur de l'objet est égale à 0
- Soit les températures dépassent le seuil, l'objet enregistre et stocke l'information
- Soit la maille est déjà en canicule, elle met à jour ses attributs, dont ses valeurs thermiques, et la valeur de l'objet est égale à 1

Pour la représentation de la dangerosité, on se base également sur quatre possibilités :

- Soit les dernières heures ne répondent pas aux critères de l'indice de dangerosité et la valeur de l'objet est égale à 0
- Soit les températures dépassent le seuil défini, l'objet a une valeur correspondant à l'indice de sa température
- Soit la maille porte déjà un indice de dangerosité et la température est toujours supérieure au seuil, elle met à jour ses attributs, dont ses indices, et la valeur de l'objet est égale à un indice plus élevé
- Soit la maille porte déjà un indice de dangerosité et la température est en-dessous du seuil, elle met à jour ses attributs, dont ses indices, et la valeur de l'objet est égale à un indice plus faible, jusqu'à revenir à une valeur de 0.

L'indice de dangerosité se base sur les notions primordiales de durée et d'intensité mais également sur les seuils de températures (intérieures et extérieures) diurnes et nocturnes, présentés en partie 3 de ce chapitre. Cet indice indique le début d'une canicule, et déclenche l'alerte. Il permet ainsi de mieux vivre les canicules en ville.

Par cette maille, la durée de la canicule, sa date de début et de fin est connue pour chaque type d'appartement. La *maille canicule* est le résultat de la *maille-suivi-canicule*. La *maille canicule* porte, en plus de la durée du phénomène, les températures minimales, maximales et moyennes dans la rue et dans les types d'appartements. On peut ainsi voir si on est dans une phase d'évolution ascendante, descendante ou stagnante du phénomène en comparaison avec l'état précédent.

Pour ces représentations, nous proposons de calculer la moyenne des températures nocturnes et diurnes, sur une durée de 8h basée sur nos plages horaires définies au chapitre 4 : 15h-22h pour les périodes diurnes et 3h-10h pour les périodes nocturnes. Ces plages permettent d'éviter les heures intermédiaires les moins significatives.

Représentation de la canicule et construction de l'indice de dangerosité

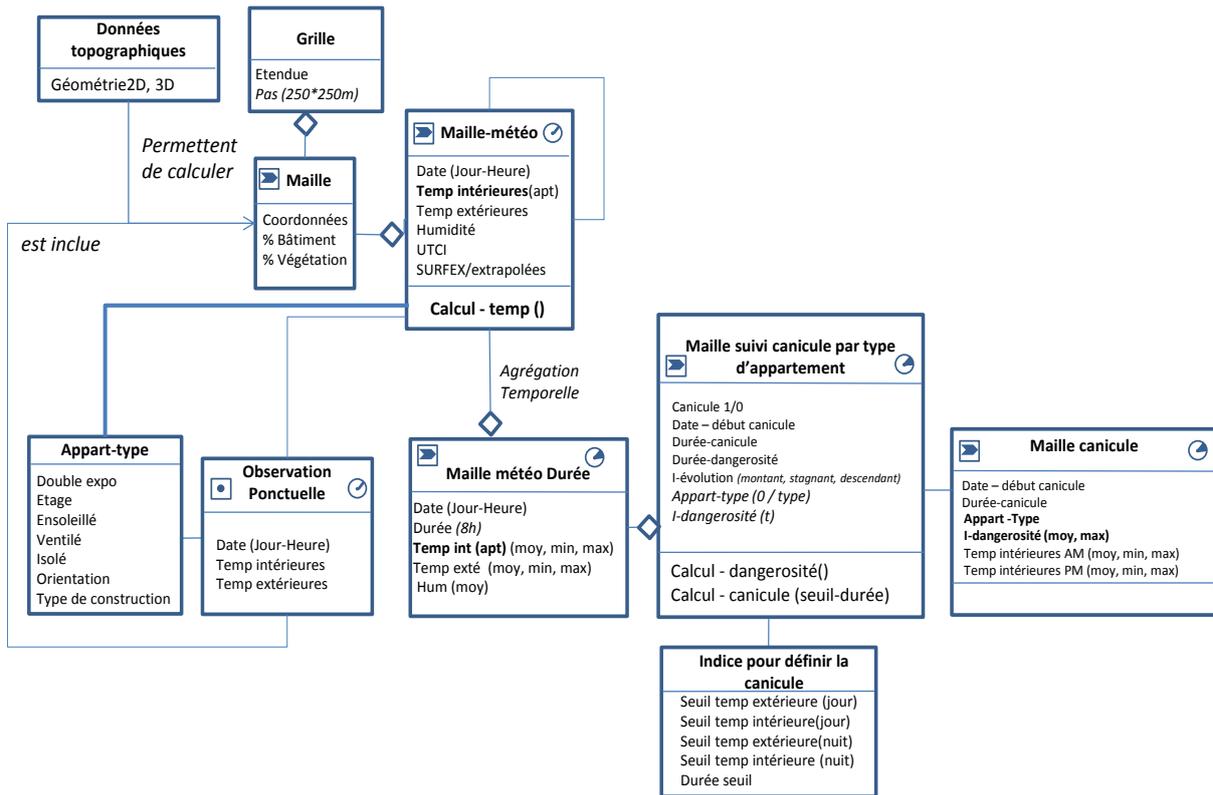


Figure 5.5 : Implémentation du schéma de donnée initiale en intégrant la notion de durée

2.2. La dimension spatiale

Espace et espace géographique sont deux termes distincts. L'espace, terme générique, se rapporte à l'étendue sur laquelle se déploient des phénomènes, quant à l'espace géographique, c'est un tout complexe formé par des éléments visibles : lieux, réseaux, etc.

La modélisation spatiale utilise deux types de modèles conceptuels standards : les modèles d'objet et de champ (Couclelis, 1992). Le premier modèle définit l'espace géographique comme une surface occupée par des entités discrètes, identifiables avec des attributs descriptifs. Il est donc possible de caractériser l'environnement spatial par ses caractéristiques et ses représentations géométriques. Le modèle objet est le plus utilisé (Fonseca *et al.*, 2002). Le deuxième modèle (modèle champ) représente la réalité géographique comme une distribution spatiale de l'espace géographique. Pour donner un exemple, les conditions météorologiques utilisent une modélisation de champ. Concrètement pour représenter l'espace, les objets tangibles ou intangibles ont une position géographique (empreinte spatiale).

Parmi les relations spatiales on distingue :

- Les relations **topologiques** décrivant les relations d'inclusions et d'adhérences entre deux entités. Elles sont décrites par huit relations topologiques⁸⁴ (Randell *et al.*, 1989). Ce type nous permet de situer un objet en fonction d'un autre (Fig.5.6). L'information topologique est purement qualitative et exclut toute mesure quantitative.

⁸⁴ Définies dans le Region Connection Calculus (RCC8)

- Les relations **de proximités** renvoient à la notion de distance. Cette relation fait référence aux points cardinaux et à des notions « floues » à l’instar de « à côté », « loin », « proche », etc. (Worboys, 2001)
- Les relations **d’agencement** renvoient à la notion de positionnement relatif d’influence et d’orientation, approfondies par Frank (1996) ou Ligozat (1998)

	« x est égal à y »	$EQ(x, y)$
	« x est une partie propre non tangentielle de y »	$NTPP(x, y)$
	« x est une partie propre tangentielle de y »	$TPP(x, y)$
	« x possède pour partie propre non tangentielle y »	$NTPP^{-1}(x, y)$
	« x possède pour partie propre tangentielle y »	$TPP^{-1}(x, y)$
	« x recouvre partiellement y »	$PO(x, y)$
	« x est connexe à y »	$EC(x, y)$
	« x est déconnecté de y »	$DC(x, y)$

Figure 5.6 : les relations spatiales topologiques de la théorie RCC8

Les SIG permettent une meilleure représentation de cet espace avec l’utilisation et l’aide de nombreux outils d’analyses numériques afin de préciser les caractéristiques de l’espace étudié.

Les relations spatiales entre entités sont de différentes natures (topologiques, de proximité et d’agencement).

Pour la représentation spatiale du phénomène, comme nous l’avons vu, nous nous basons sur une grille avec des mailles de 250*250m comprenant des données topographiques. Chaque maille morphologique représente l’espace géographique.

2.3. La canicule : phénomène spatio-temporel

Il existe un nombre important de recherche sur la modélisation et représentation de l’information géographique pour ses dimensions spatiales et temporelles (Peuquet, 2002) Le temps et l’espace jouent des rôles différents selon le type d’observation et de description des phénomènes. Le temps et l’espace sont fondamentalement différents. Dans l’espace, ce qui se passe en un lieu A interagit avec ce qui se passe en un autre lieu B. Cette interaction constitue une influence réciproque. A contrario, le temps étant orienté, les événements se produisant après d’autres n’ont pas d’impacts sur ceux qui les précèdent sur la ligne temporelle. Les travaux de Peuquet (2002) et Yuan (1999) soulignent que la représentation spatio-temporelle passe par trois dimensions : temporelle, spatiale et thématique en répondant à trois questions :

- Où se trouvait un objet à un certain moment ?
- Quand se trouvait cet objet à cet endroit ?
- Quel objet se trouvait à cet endroit à ce moment-là ?

Dans notre cas, nous avons deux niveaux d’analyses : le phénomène (l’épisode) et la localisation des variations de température. Ainsi, ces questions peuvent s’interpréter comme tel :

- Où se situe le pic de chaleur à un instant donné ?
- A quel moment le pic de chaleur a-t-il eu lieu ?
- Que se passait-il à tel endroit, à tel moment par rapport à l'épisode de canicule ? (Quelle est la température intérieure/extérieure, par exemple ?)

L'objectif des approches spatio-temporelles est de permettre la représentation et l'analyse d'un ensemble de changements opérés sur les entités spatiales inhérentes à un phénomène. Il existe un ensemble de modèles de bases de données spatio-temporelles. Ces modèles permettent de stocker et manipuler des données spatio-temporelles.

On retrouve des modèles basés sur les états tels que le modèle SPACE TIME Composites (Langran et Chrisman, 1998) ou le modèle de snapshots d'Armstrong (1988). Ce type de représentation représente des séries de données temporelles. Ces modèles représentent seulement les changements soudains, on ne peut donc pas identifier de processus, c'est-à-dire que les concepts de mouvements ou de changements liés à l'identité d'une entité ne sont pas mis en évidence.

D'autres modèles apportent une définition propre de changement dans l'évolution d'une entité comme le modèle basé sur l'identité (Hornsby et Egenhofer, 1997). Les relations spatiales et temporelles ne sont pas aisément manipulables dans ce genre de modèle. Ces modèles ne permettent pas d'analyser complément l'évolution temporelle dans l'espace. La vision événement/processus est mis en avant.

A partir des concepts de Galton (2000) sur les processus et les événements, Peuquet et Duan (1995) proposent le modèle d'Event-Based Spatio-temporal data Model (ESTDM). Ce modèle décrit une succession d'événements organisés sur une droite temporelle où à chaque nouveau changement, un nouvel événement est créé.

La grande majorité des phénomènes est de nature dynamique. Selon Yuan (2009), le concept de dynamique est défini comme un ensemble de forces dynamiques influençant sur le comportement d'un système et des composants, individuellement et collectivement. Les phénomènes météorologiques et climatiques en font partis. Un phénomène spatio-temporel est un processus lié au changement, parfois périodique, pour lequel les caractéristiques d'un ensemble d'entités spatiales sont exprimées par des séries ou séquences d'événements (Nadi et Delavar, 2003).

La modélisation de l'évolution d'entités dans l'espace et dans le temps nécessite la prise en compte des changements s'opérant sur les entités dans ces deux dimensions. Ces modèles basés sur le changement sont compliqués à construire et utiliser. La question est d'avoir un modèle adapté à son besoin.

De nombreux phénomènes spatio-temporels sont observés. La canicule en fait partie. Les températures d'une canicule sont associées à des informations spatiales (coordonnées de la zone) et temporelles (dates de début et de fin). L'information relative pour illustrer la canicule peut être représentée par une base de données dite « spatio-temporelle ». La base contient les composantes géographiques et temporelles permettant de structurer l'information. On les représente sous forme d'une matrice de la forme suivante : (Fig.5.7).

$$\begin{array}{c}
 \text{t} \\
 \text{e} \\
 \text{m} \\
 \text{p} \\
 \text{s}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \text{espace} \\
 \left[\begin{array}{cccc}
 z^{1,1} & \dots & z^{i,1} & \dots & z^{N,1} \\
 \vdots & & \vdots & & \vdots \\
 z^{1,j} & \dots & z^{i,j} & \dots & z^{N,j} \\
 \vdots & & \vdots & & \vdots \\
 z^{1,J} & \dots & z^{i,J} & \dots & z^{N,J}
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

Figure 5.7 : Matrice spatio-temporelle utilisée pour représenter le phénomène caniculaire sur la zone d'étude

La variable z représente la donnée de température. A chaque ligne j correspond l'ensemble des variables enregistrées sur les mailles N de la grille. A chaque colonne i correspond la chronique constituée de J éléments. A la variable z^{ij} correspondent les coordonnées spatio-temporelles (x_i, y_i, t_j). Chaque valeur mesurée ou simulée dans le jeu de données possède une position dans le domaine d'étude.

La température est une donnée de type champs. On la représente sous la forme de matrice dont chaque valeur représente une température en un lieu, à un instant. Dans les faits, la valeur peut être un instantané ou une moyenne.

Deux possibilités de traitements sont possibles :

- A chaque position (x_i, y_i) correspond un champ de température temporel
- A chaque temps t_j correspond un champ de température spatial

Pour notre étude, nous utilisons les deux visions pour analyser la canicule et sa dangerosité.

Connaître la température sur Paris, à différentes altitudes et expositions, au cours de la journée permet de montrer dans quelle mesure les températures sont fonction de la configuration urbaine. Deux possibilités se présentent :

- 1 : soit réaliser une cartographie complète des températures à chaque heure
- 2 : soit simplifier en moyennant les données

Pour la première option, il est nécessaire de connaître le plus finement possible les rues canyons, les boulevards, les rues les plus ventilées, etc. Au final la situation devient difficile à quantifier et il est nécessaire de simplifier voire de négliger certains mécanismes comme d'importance moindre. Ainsi, pour la représentation de la canicule, nous choisissons la deuxième option. Les températures sont moyennées sur une durée de 8h entre 15h et 22h pour les températures diurnes et de 3h à 10h pour les températures nocturnes. Les périodes dites nocturnes sont en réalité les périodes les plus fraîches.

Pour représenter la canicule et sa dangerosité nous utilisons le modèle snapshot d'Armstrong (1988), basé sur une succession d'états. Chaque temps correspond à une couche (Fig.5.8).

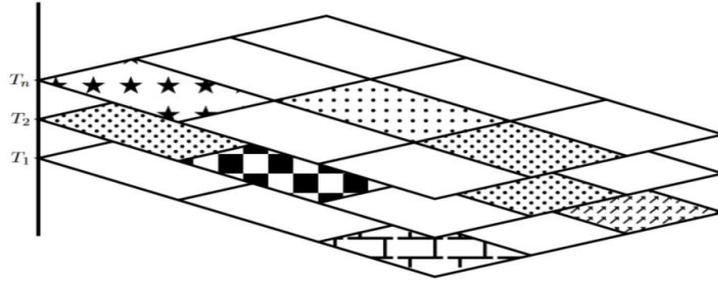


Figure 5.8 : le modèle snapshot (Armstrong, 1988)

3. Représentation de la canicule

Notre démarche consiste à proposer une analyse cartographique, après celle statistique de la canicule à travers les données issues des campagnes de mesures et de la simulation SURFEX-TEB.

La canicule est marquée par une forte chaleur et une sécheresse importante avec un fort ensoleillement rendant l'ambiance éprouvante. Pour le climatologue, il s'agit de définir un seuil de température pour répertorier, classer et comparer ces types de phénomènes extrêmes. Depuis le 1^{er} juin 2004, après la canicule 2003, la définition de la canicule inclut les températures minimales et maximales en fonction des régions. Cette définition est un apport indéniable pour la prévention du risque sanitaire.

La détermination des seuils extérieurs est donnée par l'InVS (Partie A). Les seuils IBM de 21°C et de 31°C (soit 294,15K et 304,15K) sont les seuils de référence pour la région parisienne. Pour rappel, les seuils doivent être dépassés pendant trois jours et trois nuits consécutifs. Ces seuils sont utilisés pour représenter la canicule extérieure pour la simulation SURFEX-TEB. La canicule est aussi vécue à l'intérieur. Les seuils IBM ne peuvent pas être pris en compte pour décrire la canicule intérieure. Les températures intérieures ayant de plus faibles amplitudes thermiques que celles extérieures doivent se différencier par leurs seuils. Nous nous sommes basées sur des seuils correspondant à des températures acceptables à l'intérieur (Pinson L., 2015). La grande majorité des personnes questionnées considère que la température de confort est comprise entre 19°C et 21°C dans un appartement. Or, durant une période de canicule, cette température de confort n'est pas envisageable sauf si un climatiseur est utilisé. Le seuil de 24°C de nuit est retenu suite aux analyses statistiques réalisées et sur entretien.

Le but de ces entretiens est de déterminer un seuil permettant de définir un malaise en fonction de la chaleur. L'approche qualitative par entretien nous semble la méthode la plus appropriée pour avoir une interaction sur le sujet avec des personnes X, de tout âge vivant en zone urbaine dense. Pour notre étude nous avons interrogés plusieurs personnes concernant leur dégradation de santé en fonction de la chaleur. Ces entretiens semi-directifs, permettant de guider notre discussion selon nos objectifs tout en laissant la parole à la personne interrogée, montrent qu'en fonction de la personne, la chaleur est ressentie différemment et accepte des températures plus élevées ou plus fraîches. Le seuil de 24°C de nuit est retenu. Ce seuil nocturne reste acceptable pour les habitants. De jour, le seuil de 28°C est utilisé. La recherche des bons seuils reste à poursuivre.

Pour notre étude, on distingue deux « types de canicules », celle extérieure avec les seuils de 21°C et de 31°C et celle intérieure avec les seuils de 24°C et 28°C. Pour la représentation de la canicule, la durée de trois jours et trois nuits consécutifs est prise en compte.

3.1. Canicule extérieure

La représentation de la canicule extérieure se base sur les températures calculées par le modèle SURFEX-TEB entre le 1^{er} et le 31 juillet, et fin juin, les valeurs sont manquantes. La canicule 2015 référencée par Météo-France n'est pas visible pour nos valeurs. Les trois jours et trois nuits consécutifs ayant des températures supérieures à 31°C et 21°C ne sont pas présents puisque le deuxième jour de nos valeurs (à savoir le 2 juillet), les températures sont inférieures au seuil des 31°C pour toute la zone d'étude (Fig.5.10).

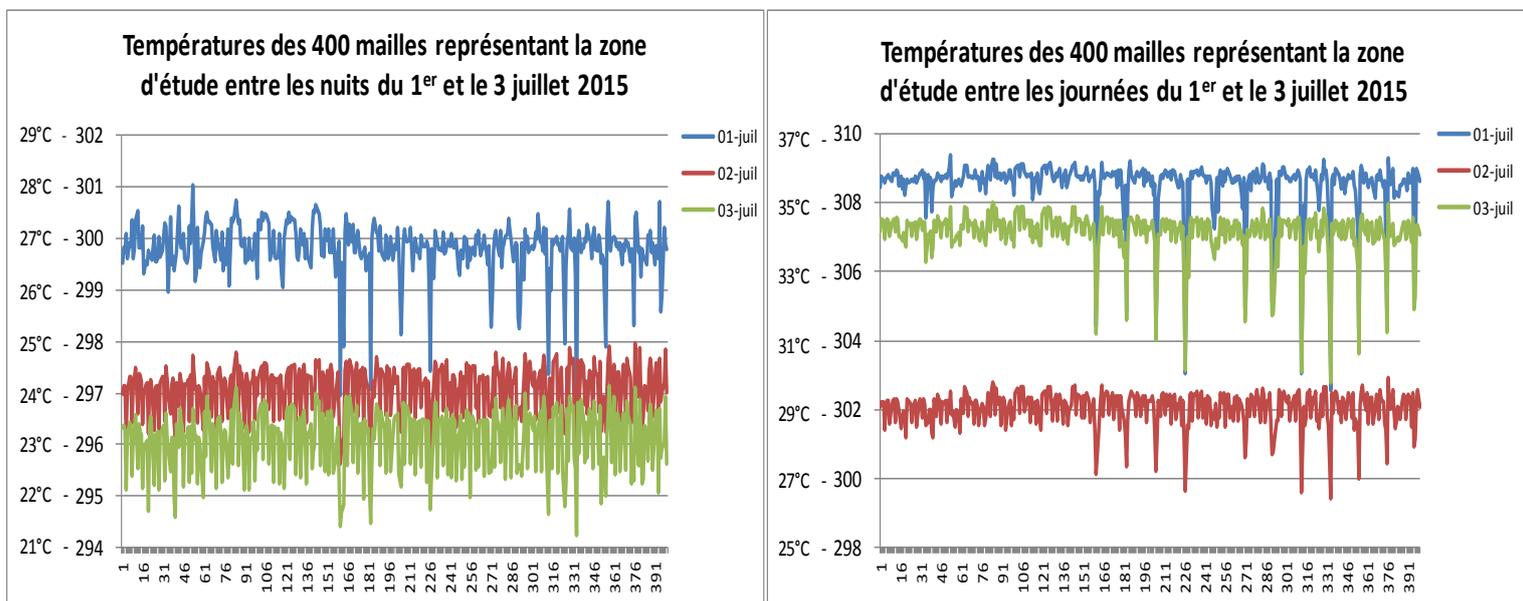


Figure 5.9 : Graphique des températures entre le 1^{er} et le 3 juillet sur les 400 mailles de l'étude, en période nocturne (à gauche) et en période diurne (à droite)

Sur le graphique représentant les périodes nocturnes, on constate que les températures sur les trois premiers jours sont toujours supérieures au seuil de 21°C. Le 1^{er} juillet correspond à la nuit la plus chaude. De jour, le 1^{er} et le 3 juillet enregistrent des températures supérieures au seuil des 31°C sur la majorité des mailles. Le 2 juillet, la température moyenne est de 29°C. Les températures se concentrent entre 30°C et 27°C. Formellement, il n'y a donc pas un épisode de canicule puisque le 2 juillet est sous le seuil des 31°C.

On peut définir cette période comme des journées de fortes chaleurs mais pas de période caniculaire. Même si les températures sont inférieures à 31°C, elles restent élevées et deviennent dangereuses si on les cumule aux jours antérieurs et postérieurs. Nous considérons qu'il s'agit d'une période dangereuse pour la santé.

3.1. Canicule à l'intérieure des appartements non climatisés

L'analyse de la canicule intérieure (seuils de 24°C et 28°C) fait apparaître une inégalité dans la distribution spatiale de la température sur Paris puisque certaines mailles sont supérieures aux seuils pendant plus de trois jours consécutifs.

La figure 5.12 représente la canicule intérieure subie à Paris avec les seuils 24°C et 28°C pour les types d'appartements de 1 à 6. La canicule est représentée tous les trois jours sur les cinq types de bâtiments définis et sur les valeurs du modèle SURFEX-TEB.

On souligne que le quartier de l'Opéra enregistre des périodes caniculaires plus longues que les autres zones. Comme précisé au chapitre 3, le type d'usage de référence dans ce quartier est commercial & bureaux. On suppose que l'utilisation massive de la climatisation réchauffe l'air extérieur dans cette zone. Ainsi la canicule dure plus longtemps dans le nord-ouest de Paris.

Pour rappel :

- Type 1 : ancien bâti <1850, une seule exposition, rez-de-chaussée, peu ventilé, non ensoleillé et isolé
- Type 2 : haussmannien <1850, une double exposition (Nord/Sud), isolé et ventilé, situé au 6^{ème} étage sur boulevards, ensoleillé
- Type 3 : ancien bâti <1850, une seule exposition (Sud), isolé et très peu ventilé, dernier étage (sous les toits) donnant sur rue canyon
- Type 4 : ancien bâti <1850, une seule exposition (Nord), très isolé et très peu ventilé, 3^{ème} étage
- Type 5 : ancien bâti, double exposition, isolé et ventilé, 4^{ème} étage avec double orientation Nord/Sud
- Type 6 : bâti haussmannien, isolé et ventilé. La température intérieure n'est pas divisée par étage mais correspond à la température moyenne de l'ensemble du bâtiment. Il a une double exposition Nord/Sud.

Type 1 : ancien bâti <1850, une seule exposition, rez-de-chaussée, peu ventilé, non ensoleillé et isolé

Les différents snapshots du type 1 montrent une canicule présente du début jusqu'à la fin de notre période d'étude. Les mailles 54, 106, et 416 sont celles où les températures ne descendent jamais en dessous des seuils de 24°C et 28°C (Fig.5.11). De jour comme de nuit, sur ces mailles, les températures sont supérieures à 29°C.

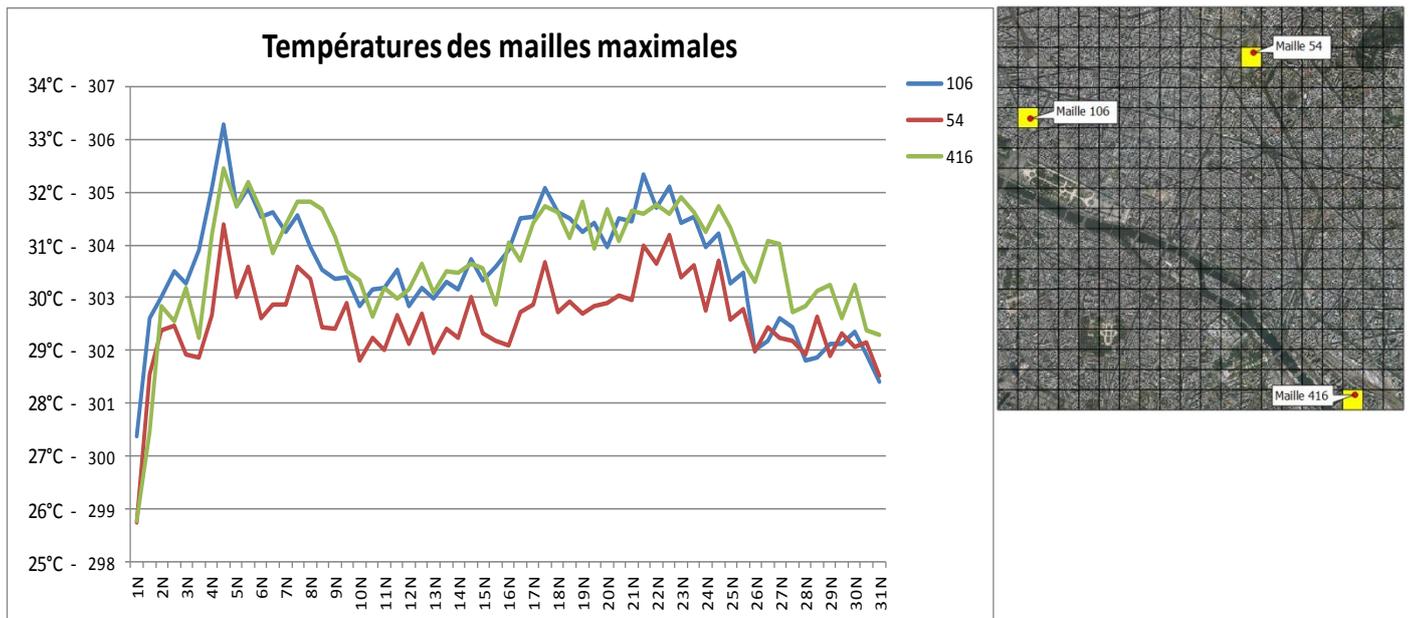


Figure 5.10 : Graphique des mailles enregistrant les températures maximales (54, 106 et 416) entre le 1^{er} et le 31 juillet 2015

Le quartier de l'Opéra est le plus impacté par la canicule. Les autres secteurs de la zone d'étude n'enregistrent aucune canicule sur la période. La journée de canicule la plus importante spatialement observée est celle du 24 juillet. Les premiers jours sont peu impactés par la canicule par rapport à l'inertie thermique du bâtiment. La canicule se fait davantage ressentir à partir de la deuxième période de fortes chaleurs.

Type 2 : haussmannien <1850, une double exposition (Nord/Sud), isolé et ventilé, situé au 6^{ème} étage sur boulevards, ensoleillé

Le type 2, en opposition au type 1 présente une canicule largement ressentie sur la zone d'étude dès les premiers jours. Seule la zone du parc des Buttes Chaumont n'est pas recensée comme caniculaire. A noter que ce parc est un parc boisé, à dénivelé (+de 40m) et, est parcouru par trois cours d'eau et un lac. Les six premiers jours sont définis comme une période caniculaire pour quasi l'ensemble de la zone d'étude. La canicule est davantage soulignée le 6^{ème} jour. A partir de cette date, seul le quartier de l'Opéra et le long de la Seine sont encore touchés par la canicule. Le 18 juillet, elle s'intensifie sur la partie Nord-Est et Sud. Le 30 juillet, la canicule est encore enregistrée pour une dizaine de mailles se situant dans la zone de l'Opéra.

La zone du parc des Buttes Chaumont ne connaît pas la canicule et cela pour toute la période de l'étude. On peut se demander si le rôle de la végétation est important dans le rafraîchissement de la température. En effet, avec 25hc, ce parc est l'un des plus grands espaces verts de Paris. C'est le 5^{ème} espace vert après les bois de Vincennes et de Boulogne, le parc de la Villette, et des Tuileries.

Type 3 : ancien bâti <1850, une seule exposition (Sud), isolé et très peu ventilé, dernier étage (sous les toits) donnant sur rue canyon

Le 3 juillet, le type 3 similaire au type 2, recense la période caniculaire la plus importante spatialement. A cette date, la canicule s'étend sur toute la zone à l'exception du parc des Buttes

Représentation de la canicule et construction de l'indice de dangerosité

Chaumont. Le 18 juillet une nouvelle période caniculaire est présente. A partir du 21 juillet, la canicule s'atténue jusqu'à cesser le 27 juillet. Le quartier de l'Opéra est toujours mis en avant par sa forte différence avec le reste de la zone d'étude.

Type 4 : ancien bâti <1850, une seule exposition (Nord), très isolé et très peu ventilé, 3^{ème} étage

Les cartographies du type 4 montrent une canicule présente du début jusqu'à la fin de notre période d'étude. L'effet d'inertie thermique, l'isolation de ce type de bâtiment très peu ventilé et donnant sur une petite cour intérieure peuvent jouer un rôle dans le maintien de la canicule jusqu'au 30 juillet voire plus. Une faible répercussion de la deuxième vague de chaleur est constatée les 18 et 21 juillet. La canicule se localise davantage sur le quartier de l'Opéra et le long de la Seine. Elle est visible dès le premier jour puisque le 3 juillet, une large zone est impactée.

Type 5 : ancien bâti, double exposition, isolé et ventilé, 4^{ème} étage avec double orientation Nord/Sud

Le type 5 fait partie des appartements où la canicule est la moins ressentie sur la zone d'étude mais bien plus que le type 1. La période entre le 1^{er} et le 6 juillet correspond à la présence de la canicule la plus importante sur la zone. Les journées de pics de chaleur entre le 18 et 21 juillet impactent peu sur le phénomène caniculaire dans ce type d'appartement à double orientations. Ainsi, même si les pics sont forts, il suffit d'un peu de fraîcheur pour que la température diminue. Quelques zones vont être de nouveau en canicule mais cela reste très faible. A partir du 27 juillet, le type 5 n'est plus en période caniculaire et cela sur toute la zone.

Type 6 : SURFEX-TEB

Le type 6, simulation réalisée avec SURFEX-TEB, est très similaire au type 3. Les six premières journées et la période entre le 18 et le 21 juillet sont caractérisées par la forte présence du phénomène caniculaire. Le parc des Buttes Chaumont représente une zone fraîche. La canicule est ressentie jusqu'au 30 juillet sur une très faible zone.

De la donnée brute à la dangerosité

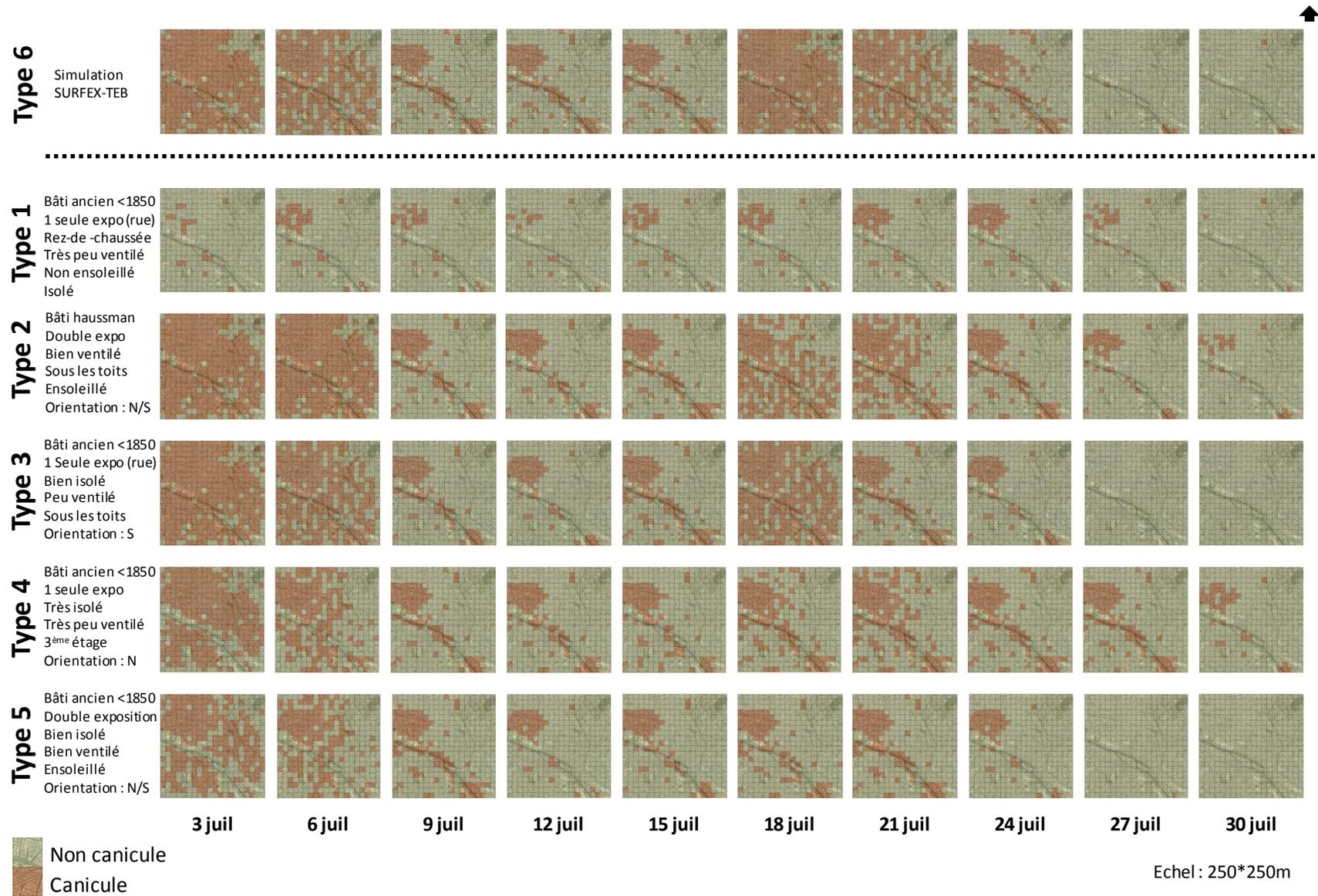


Figure 5.11 : Cartographie de la canicule intérieure (seuil 24°C-28°C) pour les types de 1 à 6, juillet 2015

Ces différentes cartographies illustrent que certaines zones et quartiers de Paris sont en période caniculaire alors même que Météo-France a retiré le PNC. Même si les seuils de canicules intérieures sont choisis par nos soins, cela nous permet de mettre en avant les différences spatiales et de contexte.

La chronologie des températures maximales moyennées sur 8h a mis en évidence le phénomène caniculaire intérieure. Une montée progressive et brutale des températures maximales est enregistrée entre le 1^{er} et le 6 juillet avec des seuils supérieurs à 24°C et 28°C. Un maintien de ces températures est constaté sur le quartier de l'Opéra jusqu'au 24 juillet, voire jusqu'à la fin de la période d'étude. Une diminution lente mais continue des températures est remarqué à partir du 24 juillet sur l'ensemble de la zone d'étude. La seconde vague de chaleur entre le 18 et le 21 juillet se visualise sur l'ensemble des bâtiments avec plus ou moins d'importance.

Il nous est difficile de comparer sur une même maille l'intensité de la canicule entre les bâtiments. On sait que la zone est en canicule ou non mais on ne visualise pas si un logement est plus dangereux qu'un autre. La différence de température entre les logements n'est pas assez prise en compte. La figure 5.18 met en avant notre propos.

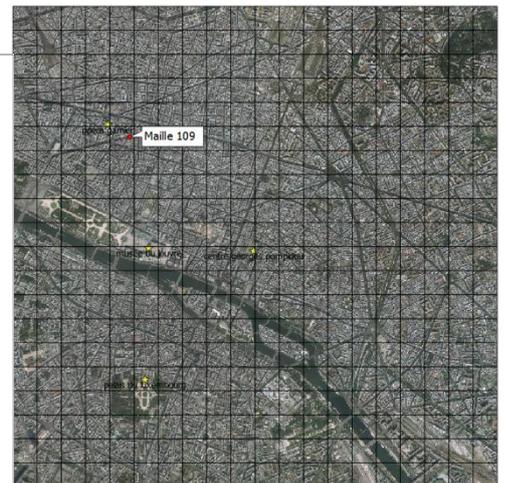
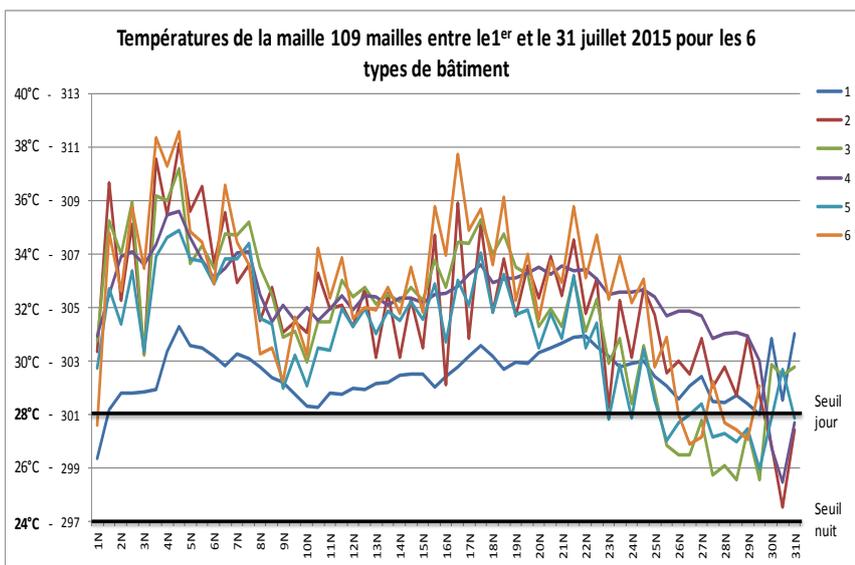


Figure 5.12 : Graphique des températures de la maille 109 entre le 1^{er} et le 31 juillet 2015 pour les six types de bâtiments

La maille 109 est choisie puisqu'elle met en évidence les fortes différences de températures entre les bâtiments en période caniculaire. Tous les bâtiments sur cette maille enregistrent des températures intérieures supérieures à 24°C et 28°C. On constate une forte différence de plus de 4°C en moyenne entre le type 1 et les autres types. La canicule est plus dangereuse pour le type 2 que pour le type 1 en raison de ses températures élevées. Ainsi l'intensité et la durée des températures élevées sont à prendre en compte dans l'élaboration de l'indice de dangerosité de la canicule.

Les fortes températures sont fonction de la configuration spatiale et de l'inertie thermique des bâtiments entraînant une augmentation importante des risques sanitaires. Il est crucial de prendre en considération ces différents facteurs pour montrer la dangerosité de l'événement caniculaire. La meilleure estimation de la dangerosité du phénomène de canicule passe par le calcul d'un indice de

dangerosité basé sur les températures des différents types d'appartements, sur toute la durée du phénomène.

4. Indice de dangerosité

Dans cette première approche, nous nous sommes limités à l'exploitation des informations relatives aux températures. La prise en considération conjointe des données de températures et des autres informations, notamment sur l'humidité ou la pollution atmosphérique devra faire l'objet de travaux ultérieurs approfondis. Par ailleurs, pendant la période concernée, l'humidité était très faible. Nous n'avons également pas pu aborder les analyses sur tous les êtres vivants. Nous nous sommes concentrés sur l'Homme.

Nous entendons et lisons souvent que la canicule représente un danger pour la santé humaine. Ce danger n'a pas d'échelle et de définition. Le danger réel est fonction de la vulnérabilité de chaque personne. La dangerosité des uns n'est pas forcément celles des autres. Cette notion reste subjective. Pour notre part, nous définissons le terme de *dangerosité* pour souligner le fait que nous cherchons à identifier le moment à partir duquel certaines personnes peuvent être en danger, il s'agit donc d'une dangerosité potentielle. Nous parlons de situation dangereuse et non de risque. Le risque est le résultat d'une estimation. Il est hypothétique alors qu'une situation dangereuse est une réalité pouvant se constater et des décisions peuvent être prise pour diminuer les effets. Lorsqu'une situation est dangereuse, on peut la contrôler et avoir des solutions pour y remédier.

L'indice de dangerosité présenté ici est imparfait mais il doit permettre d'alerter sur une dangerosité potentielle. Il vient en complément de l'indice de canicule. Cet indice de dangerosité permet d'accumuler les températures au cours du temps, c'est-à-dire que si deux canicules s'enchaînent avec peu de jours d'intervalle, l'habitant est davantage fragilisé à la deuxième canicule. Ceci est important à prendre en considération alors que les indices existants ne prennent pas en compte cet effet d'accumulation. Le risque final est biaisé par un manque d'informations. Une série de canicules ou de fortes températures sur un été est, au final plus préjudiciable à la santé des plus fragiles qu'une seule canicule.

4.1. Approche méthodologique de la construction de l'indice

Suite aux campagnes de mesures réalisées et à la fusion de données, la construction d'un indice de dangerosité est proposée afin d'intégrer la notion de durée. Par ailleurs, s'il existe de nombreux indices extérieurs, ce n'est pas le cas pour les indices intérieurs. Il n'existe pas, à notre connaissance, d'étude sur les seuils de dangerosité d'une canicule à l'intérieur d'un appartement. Les mêmes seuils UTCI sont utilisés pour définir le stress thermal à l'intérieur et à l'extérieur d'un logement. Les difficultés principales de cet indice sont donc :

- D'identifier et de sélectionner des indicateurs prédictifs au danger sur une période estivale et caniculaire
- De définir des valeurs seuils au-delà desquelles la température devient difficilement acceptable pour l'habitant dans un appartement. L'originalité de cet indice réside dans la prise en compte des températures intérieures et du temps

4.1.1. Choix des indicateurs

Nous avons déterminé les paramètres à prendre en compte pour définir la dangerosité en analysant les campagnes de mesures réalisées sur Paris en 2014 et 2015 sur cinq types de configurations.

Les différents indicateurs choisis sont les suivants :

- Un indicateur lié uniquement à la température : température moyenne diurne et nocturne en intégrant la notion d'accumulation. Par les campagnes de mesures nous avons constaté l'importance de prendre en compte les températures diurnes et nocturnes. Ce sont donc les couples de températures maximales diurnes et minimales nocturnes qui sont pris en compte pour définir les seuils de dangerosité.
- Un indicateur intégrant le temps de récupération : nous avons établi deux valeurs spécifiques pour caractériser la vulnérabilité selon le type de personne.

L'humidité n'est pas prise en compte dans cet indice du fait que les canicules précédentes en France ont été peu humides. Ce paramètre constitue un indicateur de dangerosité supplémentaire, tout comme la pollution atmosphérique.

Par l'analyse bibliographique et statistique, l'indice souhaité doit donc intégrer la durée de l'événement caniculaire et son intensité (en se basant sur les températures moyennes) pour montrer l'accumulation des températures et la récupération d'une personne se basant sur sa vulnérabilité. L'indice de dangerosité proposé permet d'évaluer le niveau de risque pour les habitants dans différents types d'appartements et de configurations, dans un centre urbain lors d'épisodes de canicule (Fig.5.19).

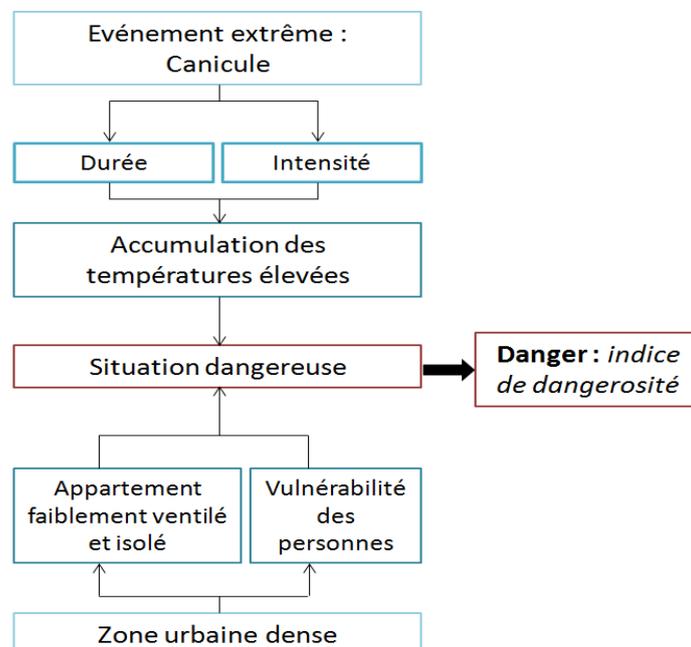


Figure 5.13 : Structure de l'indice de dangerosité

L'indice de dangerosité applicable aux canicules et en zones urbaines denses prend en compte comme indicateur l'accumulation des températures et la vulnérabilité des personnes par le temps de récupération. On notera que pour une même zone géographique (une même maille), il y aura des valeurs de dangerosité différentes en fonction des types d'appartements.

4.1.2. Définition des seuils de dangerosité

La détermination des seuils de dangerosité se base sur le vécu des personnes et sur l'analyse bibliographique des indices de confort thermique. Calculer l'indice sur l'extérieur permet de réfléchir au fait de pouvoir le faire, ce qui est intéressant, c'est de démontrer en quoi les deux prises en compte des températures sont différentes.

- Seuils extérieurs

Les seuils IBM de 21°C et de 31°C (soit 294,15K et 304,15K) pour Paris ont été conservés concernant la dangerosité potentielle extérieure. Ces seuils spécifiques et sensibles sont les seuils issus de l'étude de l'InVS.

- Seuils intérieurs

Les seuils intérieurs sont l'objet de plusieurs tests. Les indices IBM n'ont pas été conservés pour calculer la dangerosité potentielle intérieure. Ils sont basés sur des seuils fixés pour des températures extérieures, or, on sait que la population passe plus de 80% de son temps dans un espace clos. Comme nous l'avons déjà souligné, les amplitudes thermiques sont plus faibles pour les températures intérieures que pour celles extérieures (cf chapitre 4). Nous avons donc fait évoluer les seuils afin qu'ils correspondent à des températures acceptables à l'intérieur. Durant une période de canicule, les températures de confort intérieures, comprises entre 19°C et 21°C ne sont pas réalisées. Le seuil de 24°C de nuit a été retenu suite aux analyses statistiques réalisées sur les campagnes de mesures et sur discussion auprès de personnes vivant au centre de Paris. Nous n'avons pas pris en considération l'âge des personnes. Des entretiens semi-directifs sont réalisés auprès de 28 personnes dont 7 personnes âgées de plus de 60 ans. Ces entretiens se sont basés sur trois questions :

1 : Avez-vous ressenti la canicule de 2015 ?

2 : Si oui, avec-vous ressenti un inconfort durant la nuit ou la journée ?

3 : A partir de quelle température avez-vous ressenti une gêne et/ou la sensation de mal dormir ?

Le seuil nocturne de 24°C reste acceptable pour les habitants. De jour, deux seuils ont été définis : 28°C et 31°C (pour reprendre le seuil IBM). Pour aller plus loin dans la détermination des seuils, il faudrait travailler avec des spécialistes de la santé.

Il est important de noter que ces seuils définis ne sont pas parfaits. Le choix de ces seuils destinés à prévoir une dangerosité intérieure comme extérieure est variable selon les individus et resterait à préciser. Pour notre étude nous cherchons un seuil d'alerte.

L'indice est construit en prenant en compte les seuils extérieurs de températures de jour, c'est-à-dire de 304,15K soit 31°C et de nuit 294,15K soit 21°C. Pour les valeurs intérieures plusieurs seuils sont testés.

4.1.3. Mise en équation

Comme nous l'avons dit précédemment, plusieurs fonctions sont testées et analysées pour les seuils intérieurs diurnes. Les tests consistent à mettre en relation les seuils de dangerosité choisis (température moyennées sur 7h du 1^{er} au 31 juillet 2015)⁸⁵ et les indicateurs. Les valeurs d'indice sont calculées toutes les 12h. Les fonctions sont du type :

Si température-jour > seuil-jour ou température-nuit > seuil-nuit alors :

$$\text{Indice}_{t_i} = \text{Indice}_{t_{i-1}} + p1 + \text{Entier-sup}(\text{température}_{\text{Kelvin}} - \text{seuil}(\text{jour, nuit})) * p2 \quad (23)$$

Sinon l'indice diminue en fonction du profil. La personne récupère progressivement :

$$\text{Indice}_{t_i} = \max(0, \text{Indice}_{t_{i-1}} - p3(\text{profil})) \quad (24)$$

Avec :

- **p1** représente le fait que si la température continue à être au-dessus du seuil, alors la situation s'aggrave. Expérimentalement nous avons choisi $p1 = 0,45$
- **p2** représente l'accumulation des températures à savoir la durée de la chaleur dépassant les seuils définis. L'expression exprime le fait que plus la température est élevée au-dessus du seuil, plus l'indice augmente. Expérimentalement nous avons choisi $p2 = 0,05$. Ainsi, l'indice s'incrémente de 0,5 point pour un degré au-dessus du seuil (soit : $p1 + 0,05$). L'indice $t+1$ se base sur l'indice $t0$. Si l'on prend un seuil-nuit de 294,15K (soit 21°C), le premier jour, son indice sera de 0,50 et évoluera de 0,05 à chaque Kelvin en plus.
(Exemple : $p0 = 0,70$ alors $p1 = 1,65$ si la température dépasse de 9°C le seuil définit $0,70 + 0,95$). Le tableau représentant $p2$ est décrit en annexe 8.
- **p3** est la récupération. La vulnérabilité de la personne est prise en compte par $p3$. Si la température est inférieure au seuil alors formellement (comme les autres indices) l'épisode de canicule est fini. Cependant, la chaleur accumulée pendant la canicule a encore un impact sur la santé humaine. Les personnes récupèrent progressivement. Ainsi, nous distinguons deux profils : une personne fragilisée et une personne en bonne santé. Pour le premier cas nous prenons $p3 = 0.5$, pour le deuxième cas $p3 = 1$.

4.1.4. Intérêts et faiblesses de l'indice de dangerosité

L'indice de dangerosité met en avant ses faiblesses et ses avantages.

L'accessibilité des données proviennent de la campagne de mesure 2015 et de la simulation du modèle SURFEX-TEB. Les mesures sont réalisées lors d'une période de canicule. La zone d'étude se localise dans un centre urbain à forte densité de populations. L'utilisation des SIG permet des représentations cartographiques et la visualisation spatiale du danger.

⁸⁵ Pour rappel : les températures moyennées sur 7h reprennent les classes définies dans le chapitre 4 :

- 15h-22h : températures diurnes
- 03-10h : températures nocturnes

Par ailleurs, cet indice doit être interprété avec prudence notamment à cause du manque d'indicateurs (pollution, humidité, etc.) et de l'absence des données de l'avant-canicule. Les études sur les seuils de confort intérieurs sont trop peu nombreuses pour avoir une référence dans le seuil.

Les canicules arrivent à un rythme au mieux annuel. Nous avons été limités pour la conception de notre indice et surtout de sa validité. L'indice que nous proposons est à prendre comme une proposition à améliorer en particulier en réalisant davantage d'interviews et enquêtes auprès d'une population vivant dans un même quartier.

Loin d'être parfait, cet indice permet de donner les premières pistes de réflexion sur la dangerosité de la canicule. Plusieurs tests sont réalisés, avec plusieurs seuils et plusieurs pas de récupération. Le vécu habitants est également pris en compte dans notre analyse, lors de nos campagnes de mesures de 2015. Les résultats et les illustrations sont présentés dans la partie suivante.

4.2. Analyse des valeurs de l'indice

Dans le domaine de la géomatique en relation avec la santé humaine, l'analyse temporelle et spatiale de l'indice de dangerosité permet différents objectifs : d'une part, la description des variations temporelles à différents seuils et d'autre part, la mise en évidence des associations entre les indices de dangerosité et les types d'appartements (types de configurations).

4.2.1. Analyse temporelle dans une maille

L'indice de dangerosité est appliqué aux différentes configurations des appartements observés. On remarque qu'en fonction du seuil de température choisi et de l'importance que l'on donne à la récupération, les indices évoluent très sensiblement, différemment.

- Indice de dangerosité intérieur

Pour représenter graphiquement les indices de dangerosité intérieurs, nous nous basons sur les mailles correspondant à la localisation des appartements, à savoir (Fig.5.20) :

- type 1 : maille 134
- type 2 : maille 176
- type 3, 4 & 5 : maille 155

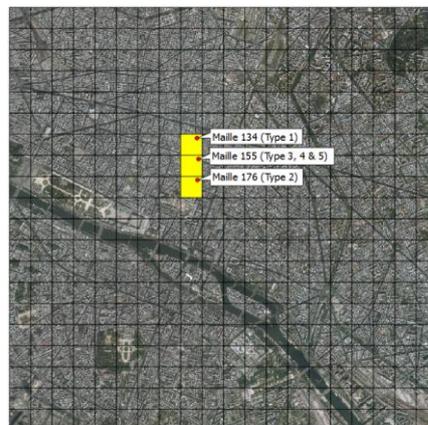


Figure 5.14 : Correspondance entre la localisation des appartements et les mailles géographiques

Seuils 21°C – 31°C

Le premier test réalisé pour la dangerosité intérieure est avec les seuils IBM. Les figures 5.21 et 2.22 représentent l'indice de dangerosité intérieure entre les appartements pour les seuils 21°C et 31°C avec un pas de récupération de 1 et 0,5.

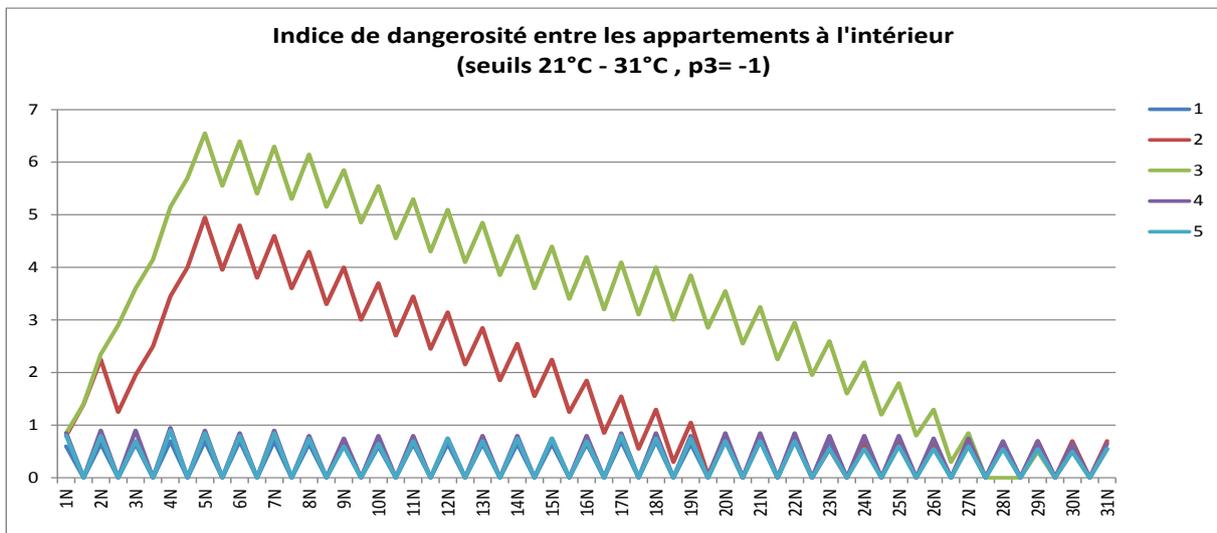


Figure 5.15 : Graphique de l'indice de dangerosité intérieure pour les seuils 21°C et 31°C avec un pas de récupération de -1, pour les 5 types d'appartements entre le 1^{er} et le 31 juillet 2015

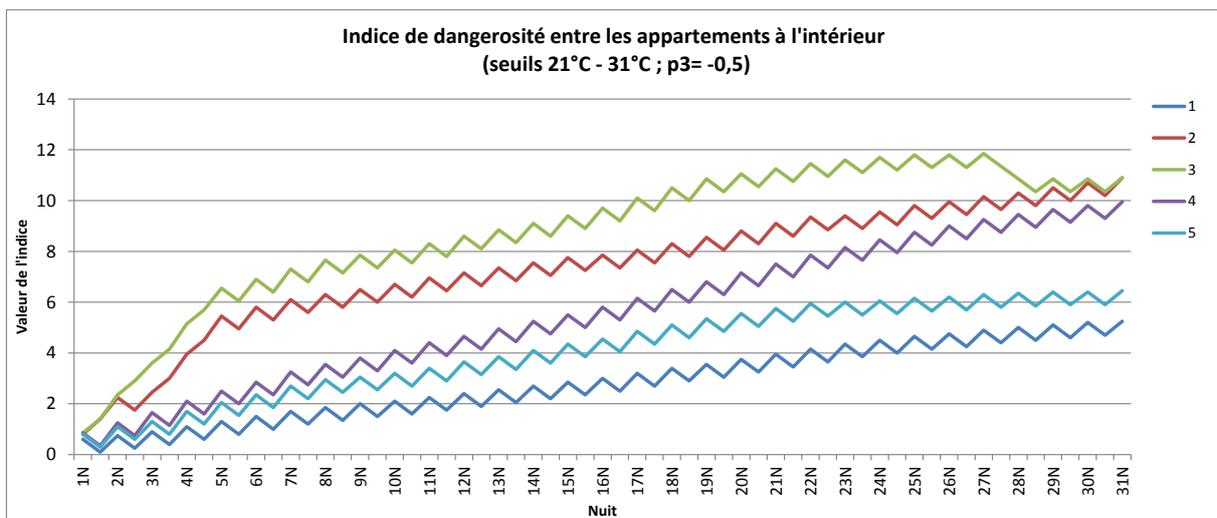


Figure 5.16 : Graphique de l'indice de dangerosité intérieure pour les seuils 21°C et 31°C avec un pas de récupération de -0,5, pour les 5 types d'appartements entre le 1^{er} et le 31 juillet 2015

Pour la figure 5.21, ces seuils mettent en évidence le premier épisode de canicule. Les appartements 2 et 3 ont les indices les plus élevés. La température nocturne est toujours supérieure à 21°C contrairement aux autres types. Les types 1, 4 et 5 ont des températures diurnes inférieures à 31°C mais des températures diurnes supérieures à 21°C. Leurs indices sont faibles, inférieurs à 1.

On remarque que lorsque les seuils IBM sont utilisés pour p 3=1, pour les températures intérieures, les courbes ne sont pas satisfaisantes. Les températures intérieures nocturnes sont généralement supérieures à 21°C (dû à l'inertie thermique des bâtiments avec l'accumulation de chaleur diurne) et

De la donnée brute à la dangerosité

les températures diurnes inférieures à 31°C. Tous les types enregistrent une hausse constante de la dangerosité sur toute la période d'étude. Les phases de baisse ou de stagnation de la température intérieure ne sont pas présentes. Même si les premiers jours on constate une hausse constante de la dangerosité pour les types 2 et 3, ces courbes ne sont visiblement pas représentatives de la dangerosité intérieure.

Seuils 24°C – 31°C

Le deuxième test se base sur des seuils de 24°C pour les températures nocturnes et de 31°C pour les températures diurnes. Les figures 5.23 et 5.24 représentent l'indice de dangerosité intérieure entre les appartements pour les seuils 24°C et 31°C avec un pas, respectivement de récupération de 0,5 et de 1.

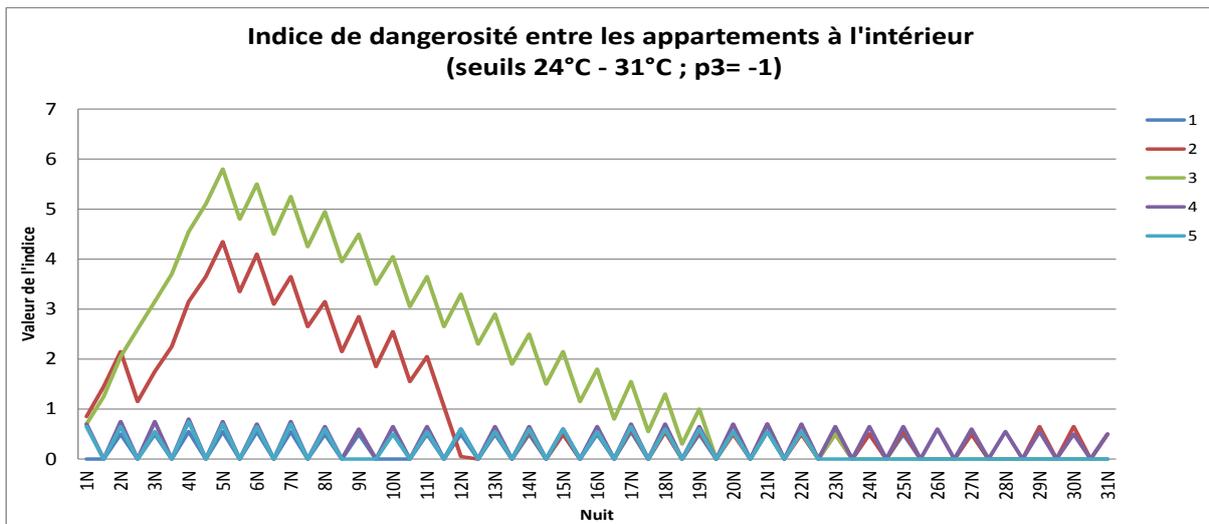


Figure 5.17 : Graphique de l'indice de dangerosité intérieure pour les seuils 24°C et 31°C avec un pas de récupération de -1, pour les 5 types d'appartements entre le 1^{er} et le 31 juillet 2015

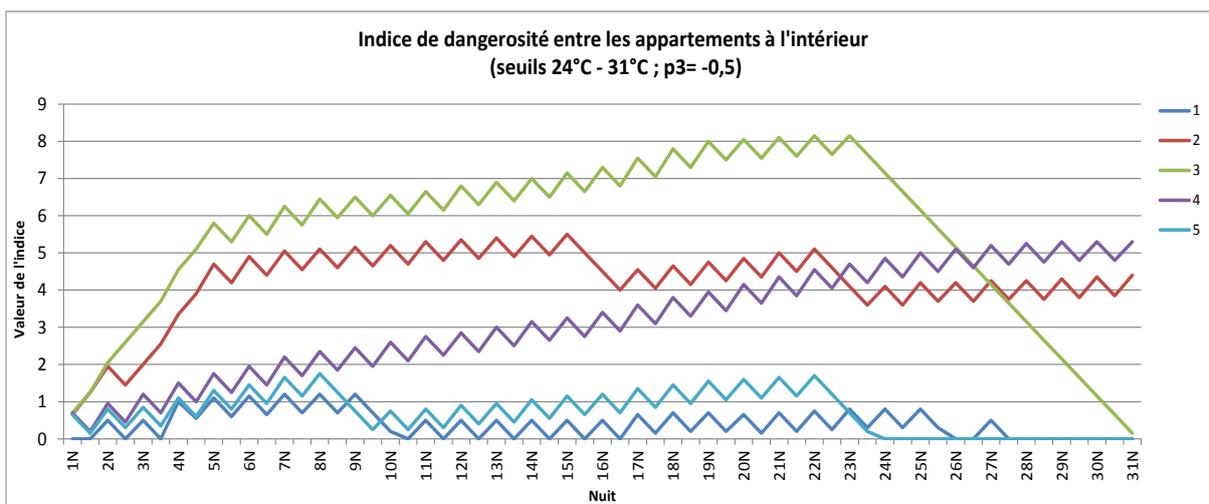


Figure 5.18 : Graphique de l'indice de dangerosité intérieure pour les seuils 24°C et 31°C avec un pas de récupération de -0,5, pour les 5 types d'appartements entre le 1^{er} et le 31 juillet 2015

Représentation de la canicule et construction de l'indice de dangerosité

On remarque que les périodes de vagues de chaleur sont toujours aussi peu visibles mais l'indice met en valeur les particularités des appartements, tout comme pour les seuils 21°C - 31°C. Les appartements 2 et 3 sont distincts des autres, surtout pour un pas p3 de -1. Ils enregistrent des indices de dangerosité toujours plus élevés que les autres types. Sur les deux figures, l'indice de dangerosité atteint les 5,8 et 4,35 pour les types 3 et 2. Ces derniers se distinguent avec le temps de récupération. Sur la figure 5.24, on constate que la dangerosité pour le type 3 croît jusqu'au 23 juillet. A partir de cette date, les températures intérieures du type 3 sont toujours inférieures aux seuils contrairement au type 2 correspondant au ressenti. Le type 4 a une dangerosité linéaire et constante. Les températures de nuits sont toujours supérieures à 24°C. Les autres types ont un indice toujours inférieur à 1 sur la figure 5.23 à partir du 20 juillet. Les appartements 1 et 5 ont des indices similaires sur les deux graphiques. De ces constats, on peut dire que les températures nocturnes sont supérieures au seuil de 24°C pour la quasi-totalité de l'étude. Les températures diurnes, elles, sont inférieures au seuil des 31°C, ce qui est problématique pour un indice destiné à représenter la dangerosité intérieure pendant une canicule puisqu'il ne reflète pas le ressenti dans l'appartement.

Chaque appartement a des caractéristiques thermiques qui lui sont propres. La dangerosité de la canicule intérieure ne peut pas se définir si les seuils ne sont jamais dépassés, c'est pourquoi, nous réalisons un nouveau test. Il est donc important de comparer plusieurs scénarii avec des seuils de températures de jour et de nuit qui se distinguent des seuils IBM.

Seuils 24°C – 28°C

La dernière expérimentation est réalisée avec des seuils de 24°C pour les températures nocturnes et de 28°C pour les températures diurnes. Avec les plus faibles amplitudes thermiques que l'on a constatées lors de nos campagnes de mesures, nous avons décidé de réduire aussi l'amplitude entre le seuil de jour et de nuit. Comme le seuil de jour de 31°C est trop élevé, nous l'avons descendu à 28°C. Les figures 5.25 et 5.26 représentent l'indice de dangerosité intérieure entre les appartements pour les seuils 24°C et 28°C avec un pas de récupération respectivement de 0,5 et de 1. Cet indice met davantage en valeur les particularités des appartements. Le temps de récupération a un impact réel sur la dangerosité. Il serait donc important d'améliorer, à l'avenir, la détermination du seuil.

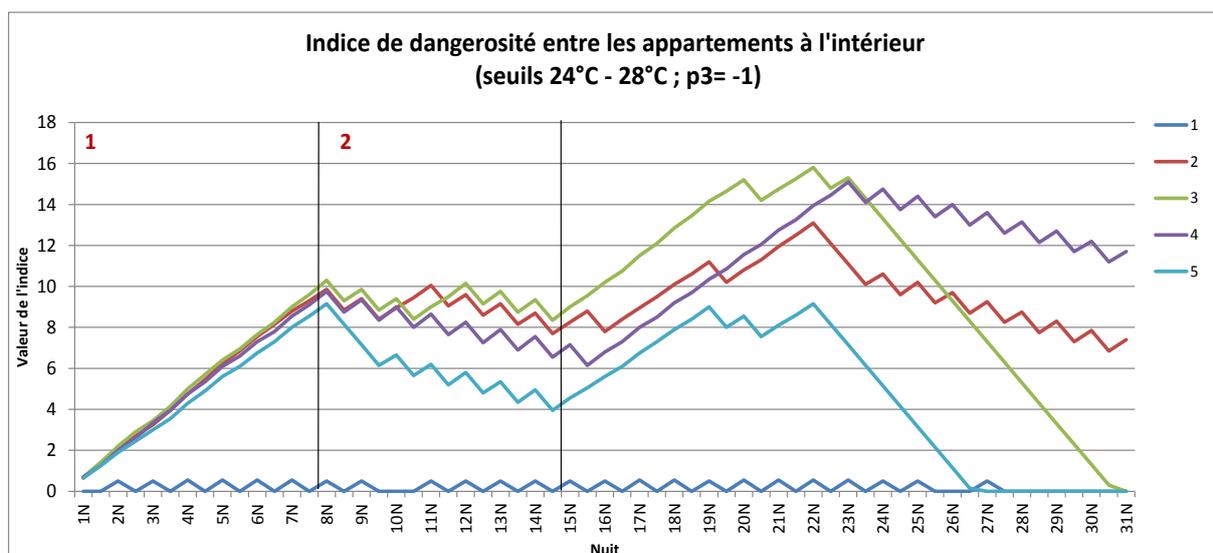


Figure 5.19 : Graphique de l'indice de dangerosité intérieure pour les seuils 24°C et 28°C avec un pas de récupération de -1, pour les 5 types d'appartements entre le 1^{er} et le 31 juillet 2015

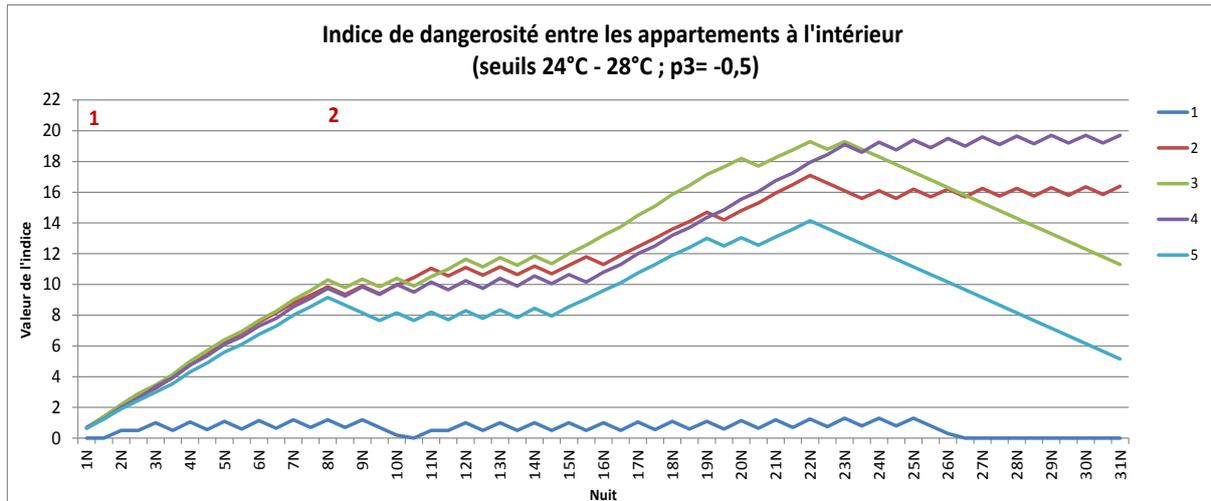


Figure 5.20 : Graphique de l'indice de dangerosité intérieure pour les seuils 24°C et 28°C avec un pas de récupération de -0,5, pour les 5 types d'appartements entre le 1^{er} et le 31 juillet 2015

Ces graphiques permettent de distinguer les différentes périodes que nous avons pu constater lors de notre analyse statistique et lors de l'indice de dangerosité extérieur :

- La première période de canicule de J1 à J8 : les courbes croissent avec une forte ressemblance pour atteindre un indice de 10 la 8^{ème} nuit. Le type 1, au RDC, ne croît pas durant cette phase de canicule puisque ses températures diurnes sont toujours inférieures à 28°C. Cet appartement a une dangerosité quasi nul voire nul, correspondant au vécu.
- La deuxième période de J9 à J14 varie en fonction de l'importance de la récupération, les courbes vont croître ou décroître. Dans le cas d'une faible récupération ($p3 = -0,5$), les courbes croissent très légèrement avec un indice de dangerosité augmentant de 1,4 en moyenne. Le type 5, à double orientation, commence à se distinguer des 3 autres puisque son indice baisse légèrement. Ses températures diurnes sont inférieures à 28°C puisque cet appartement est bien ventilé. Dans l'autre cas, les courbes diminuent. Les indices perdent en moyenne 2,2 points. Le type 5 enregistre la plus forte baisse passant d'un indice de dangerosité de 9,15 à 3,95 soit 5,2 points.
- La deuxième période de vague de chaleur (de J15 à J22) se caractérise par une forte et continue augmentation pour atteindre quasi les indices 16 ou 20, pour les appartements les plus chauds. Le type 1 est toujours caractérisé par une très faible dangerosité lors de cette deuxième vague de chaleur.
- La dernière période (J23 à J30) se caractérise par une décroissance des indices de dangerosité. Dans le cas où la récupération a un pas de -1, on constate qu'il suffit de 5 jours pour revenir à un indice de 0 pour les appartements 3 et 5. Il faudra attendre encore quelques jours de plus pour les autres appartements (2 et 4, bien moins ventilés) puisque leur inertie thermique est plus importante. Dans l'autre cas, seul le type 5 a un indice égal à 0. Les types 4 et 2 sont les appartements avec la dangerosité la plus importante puisque les températures nocturnes dépassent toujours le seuil des 24°C. Les types 2 et 5 ont des

Représentation de la canicule et construction de l'indice de dangerosité

courbes similaires, à deux jours de différence. Ces courbes tendent vers une dangerosité nulle si les températures n'évoluent pas au-dessus des seuils de 24°C et 28°C.

De ces graphiques, on peut observer que le type 1 a un indice toujours très faible, voire nul. Cela est dû, en grande partie, à la localisation du logement : au rez-de-chaussée, jamais ensoleillé, l'appartement ne va jamais être trop chaud et pas dangereux. De plus, pour ces seuils (24°, 28°, p 3 = -0.5 ou -1), on constate que lors des vagues de chaleur (J1-8 et J15-22) les seuils, de jour comme de nuit, sont dépassés puisque les courbes sont toutes ascendantes (à dérivée positive) (à l'exception du type 1). Ces seuils mettent davantage en valeur les vagues de chaleur et les périodes de rafraîchissements où les températures intérieures de jours sont inférieures au seuil des 28°C. Les particularités des appartements constatées au chapitre 4 se retrouvent dans cet indice de dangerosité.

Seuils 24°C – 28°C, maille Maximale

Un graphique est réalisé pour montrer l'évolution de la maille la plus chaude sur notre zone d'étude. Cette maille correspond à la maille 87, se localisant dans le quartier de l'Opéra. La figure 5.27 représente l'indice de dangerosité intérieur entre les appartements pour les seuils 24°C et 28°C avec un pas de récupération de 1 et 0,5 pour la maille 87.

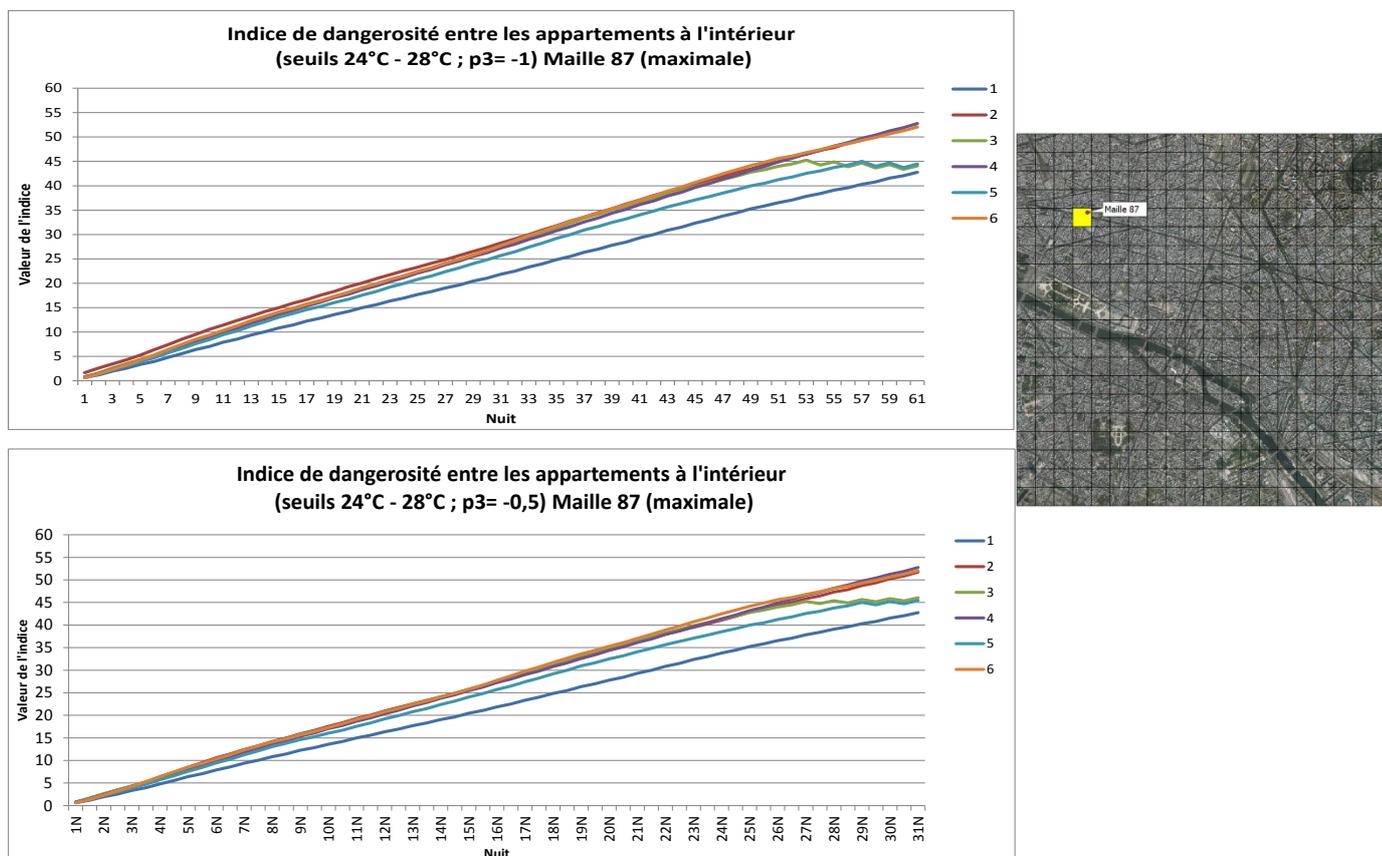


Figure 5.21 : Graphique de l'indice de dangerosité intérieur pour les seuils 24°C et 28°C avec un pas de récupération de -1 (graphique haut) et de -0,5 (graphique bas), pour les 6 types d'appartements, à la maille 87, entre le 1^{er} et le 31 juillet 2015

Si on focalise notre attention sur la maille 87 où l'indice est le plus fort sur toute la durée de l'étude, on constate que les seuils sont toujours dépassés jusqu'à la 25^{ème} journée de juillet. Ainsi, le pas de récupération n'a pas d'impact pour les mailles à températures élevées. Les courbes augmentent en continu. Cet indice, en relation avec les températures élevées simulées, va dépasser la valeur 40 pour tous les types et la valeur 50 pour les types 4 et 6.

Plusieurs mailles dans notre zone d'étude sont similaires à celle-ci. Elles se concentrent sur le quartier de l'Opéra.

- Synthèse

Pour résumer cette partie, plusieurs observations sont faites. Ces analyses nous permettent de mettre en valeur l'importance des seuils de température et de récupération :

- Les seuils IBM utilisés pour la dangerosité extérieure sont satisfaisants. Les courbes reproduisent les périodes observées. Cette dangerosité est nécessaire pour les travailleurs extérieurs et les personnes vivant dans la rue.
- Lorsque les seuils IBM sont utilisés, pour les températures intérieures, les courbes ne sont pas satisfaisantes. Le seuil de 21°C est généralement dépassé (dû à l'inertie thermique des bâtiments avec l'accumulation de chaleur diurne) et celui de 31°C n'est que très rarement dépassé (seulement en période de forte chaleur). Pour mieux appréhender la dangerosité à l'intérieure, il est nécessaire de choisir des seuils intérieurs et extérieurs différents.
- Les seuils de 24°C et de 28°C sont les seuils permettant de mettre en valeur les vagues de chaleur, le comportement thermique, la configuration spatiale et l'inertie de chaque type d'appartements. Par rapport au vécu des personnes et à l'analyse statistique, ces seuils sont plus cohérents. Cependant, pour les mailles où les températures sont élevées, l'indice croît continuellement sans marquer un temps de récupération. Ces mailles posent problèmes pour l'interprétation de l'indice de dangerosité. Un travail supplémentaire à base d'enquêtes est nécessaire pour améliorer la fonction de récupération.
- L'indice est sensible à la valeur du pas de récupération. En fonction de la vulnérabilité, la dangerosité n'est pas la même entre deux personnes. Face aux températures élevées, une personne jeune et en bonne santé récupérera plus facilement qu'une personne âgée.
- Avec ces graphiques, surtout les deux derniers, on constate que même si une période de « rafraîchissement » est présente, cela ne signifie pas que le risque n'existe plus. Il faut plusieurs jours, en fonction des personnes et des configurations, pour atteindre une situation sans risque. La canicule finie, la dangerosité est toujours présente.
- La dangerosité est plus marquée à l'intérieure qu'à l'extérieure des appartements. Les indices intérieurs sont plus élevés dû à différents facteurs tels que la ventilation naturelle, la composition thermique des appartements, la configuration des logements, etc.

- Pour être plus juste, et montrer l'impact réel et la dangerosité de la canicule dans les appartements, des données avant le 1^{er} juillet, début de la canicule, auraient été nécessaires. Des campagnes de mesures sont réalisées en 2016 pour étudier l'entrée en période chaude.

Les seuils retenus pour l'extérieure sont de 31°C et de 21°C pour la nuit. Les seuils intérieurs, les plus cohérents avec nos analyses et le vécu sont les seuils de 24°C pour les températures nocturnes et de 28°C pour les températures diurnes. L'événement caniculaire, même s'il ne dure que quelques jours à une dangerosité s'étalant dans la durée. Des travaux complémentaires sont nécessaires pour améliorer la fonction et notamment le temps de récupération.

4.2.2. Analyse spatio-temporelle

La dangerosité de la canicule varie dans le temps mais aussi dans l'espace. Le modèle spatio-temporel est utilisé ici pour décrire l'évolution dans le temps de la structure spatiale de l'indice.

Avec la méthode de fusion de données développée au chapitre 4, la représentation des indices de dangerosité extérieurs et intérieurs sur la zone d'étude pour les différents types d'appartements est possible. Dans cette étude nous nous focalisons sur les températures intérieures, souvent sous estimées. Les variations spatiales des indices de dangerosité et des indicateurs sont étudiées dans un but descriptif, de validation et afin de suggérer des hypothèses sur la dangerosité intérieure.

D'une part, les représentations cartographiques sur une zone visent à déterminer s'il existe des disparités spatiales liées à la dangerosité de la canicule. D'autre part, elles permettent de confirmer les disparités thermiques entre les types d'appartements. La représentation cartographique permet de détecter visuellement les zones de forte intensité (dites hotspots) à chaque temporalité, ainsi qu'au cours du temps. La mise en évidence de zones avec un indice de dangerosité élevé confirmera l'importance de prendre en considération les températures intérieures et les types de configurations.

Les valeurs de dangerosité sont classées pour pouvoir les cartographier. Une échelle logarithmique est calculée pour créer le niveau de dangerosité (Fig.5.28).

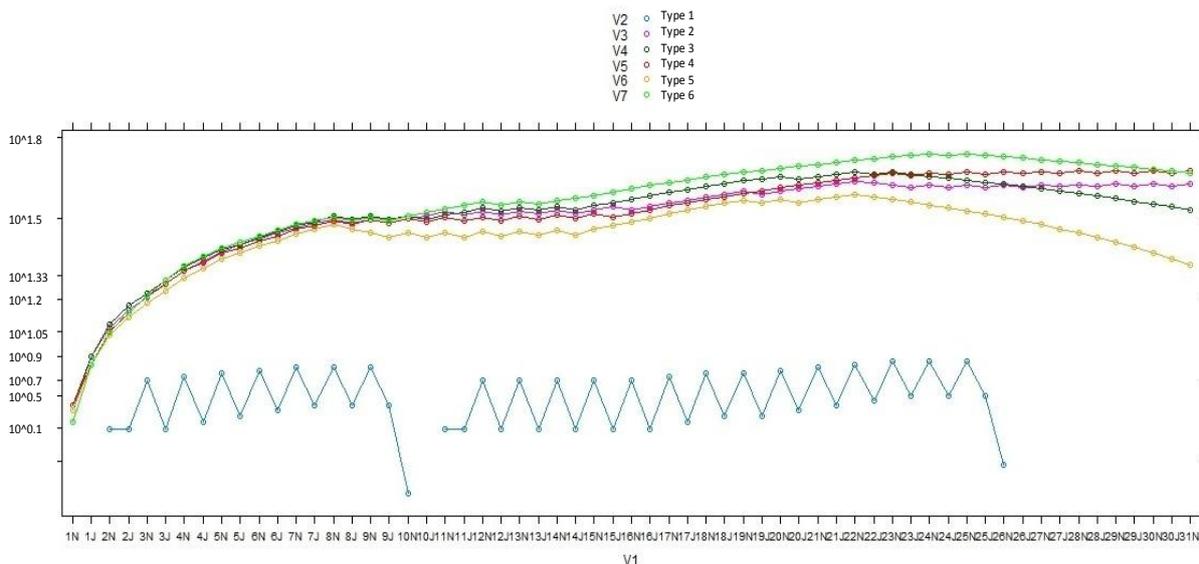


Figure 5.22 : Echelle logarithmique des six types de bâtiments

Huit classes sont représentées : 0-3 ; 3-5 ; 5-8 ; 8-11 ; 11-15 ; 15-22 ; 22-35 ; 35-60

De la donnée brute à la dangerosité

- Indice de dangerosité intérieur

Nous avons réalisé les cartographies avec différents indices de récupération : p3 : 1 et p3 : 0,5.

Les cartographies suivantes (5.29 et 5.30) représentent les indices de dangerosités intérieures avec les seuils 24°C et 28°C pour les pas récupérations de 1 et 0,5. Les indices sont représentés tous les 2,5 jours. De forts indices de dangerosité sont localisés dans le quartier de l'Opéra. Cette concentration n'est pas due seulement aux types d'appartements ou configuration spatiale mais à l'influence de la climatisation.

Type 1 : ancien bâti <1850, une seule exposition, rez-de-chaussée, peu ventilé, non ensoleillé et isolé

Le type 1, comparé aux cinq autres, est celui qui concentre les hot-spots de plus faible intensité. Pour ce type, les indices restent faibles mais les seuils de températures sont dépassés pour la plupart des mailles étudiées. La première nuit, les seuils ne sont pas dépassés. Il faut attendre 2 nuits avant que les températures intérieures augmentent. A l'exception du quartier de l'Opéra, l'indice dépasse très rarement la valeur 3. A partir de la 8^{ème} nuit et jusqu'à la 13^{ème} journée, on constate spatialement une baisse de dangerosité. C'est à partir de la 25^{ème} nuit (sauf pour le quartier de l'Opéra).

L'indice de dangerosité reflète la situation thermique du type 1. Cet appartement situé au rez-de-chaussée reste frais sur toute la période de l'étude. La fraîcheur du sous-sol permet à ce type de conserver une température ambiante fraîche pour la saison estivale.

Type 2 : haussmannien <1850, une double exposition (Nord/Sud), isolé et ventilé, situé au 6^{ème} étage sur boulevards, ensoleillé

Le type 2, dès la première nuit dépasse le seuil des 24°C sur toute la zone d'étude. L'indice de dangerosité augmente fortement jusqu'à la 8^{ème} nuit. Pendant 5 jours l'indice croît mais avec une intensité plus faible. A partir de la 15^{ème} journée, l'indice atteint des valeurs supérieures à 15 et ne cesse d'augmenter. Les indices restent stables sur une grande partie de la zone d'étude à partir de la 23^{ème} nuit. Le Nord-est de la zone est la plus fraîche.

Sur ce type d'appartement, cet indice met en valeur l'accumulation de la chaleur sur toute la période et le faible rafraîchissement de l'appartement.

Type 3 : ancien bâti <1850, une seule exposition (Sud), isolé et très peu ventilé, dernier étage (sous les toits) donnant sur rue canyon

Le type 3 a des indices légèrement plus élevés que le type 2. Après le 20^{ème} jour, les indices décroissent de jour en jour. La 20^{ème} journée est la plus chaude sur la figure. Le quartier de l'opéra reste le plus chaud avec des indices toujours élevés entre le 20^{ème} et 30^{ème} jour. La zone avec l'indice le plus faible voire nul se localise aux alentours du parc des Buttes Chaumont. La végétation et la proximité du canal St Martin peuvent influencer les températures et créer un îlot de fraîcheur. Cependant, contrairement à nos hypothèses, le long de la Seine, on constate un indice de dangerosité plus élevé que dans le cœur de Paris.

Tout comme le type 2, on remarque que sur les huit premiers jours, la différence spatiale est faible entre les indices. Toute la zone d'étude a été touchée de la même manière par la canicule. C'est à partir du 10^{ème} jour que l'on constate une différenciation spatiale entre les quartiers au niveau de l'indice de dangerosité. Le quartier de l'Opéra mais aussi le long de la Seine enregistre les indices les plus élevés.

Type 4 : ancien bâti <1850, une seule exposition (Nord), très isolé et très peu ventilé, 3^{ème} étage

Le type 4 permet de constater une évolution continue de l'indice de dangerosité sur toute la zone d'étude. Les huit premières journées, l'indice évolue exponentiellement passant d'un indice supérieur à 0 et 3 jusqu'à la valeur 15 (pour le quartier de l'Opéra). C'est à partir du 8^{ème} jour qu'on remarque une différenciation spatiale de la dangerosité. Cette différenciation va s'accroître avec le temps le 20^{ème} jour, pour le quartier de l'Opéra, des Buttes Chaumont, de la gare de Lyon ou de l'Île de la Cité. Ils se différencient des autres par leurs valeurs de l'indice. Les indices les plus élevés se localisent à Opéra, à l'Île de la Cité et aux alentours de la gare de Lyon.

A partir de la 23^{ème} nuit, une stagnation de l'indice est visible. Sur les 4 dernières cartes du type 4, l'indice évolue peu. Seule la zone des Buttes Chaumont connaît un rafraîchissement les derniers jours.

Comme le type 2, l'indice permet de montrer la forte dangerosité de ce type d'appartement. La chaleur s'accumule dans l'appartement. Le temps de récupération trop faible par rapport aux températures élevées, l'indice augmente de journée en journée pour arriver à des valeurs supérieures à 50. Il faudra attendre encore plusieurs jours avant d'arriver à un indice inférieur à 3. Ce type d'appartement est dangereux pour la santé humaine puisque le corps ne peut pas se reposer.

Type 5 : ancien bâti, double exposition, isolé et ventilé, 4^{ème} étage avec double orientation Nord/Sud

Le type 5 enregistre des indices de dangerosité faibles par rapport aux autres appartements. Les indices les plus élevés se localisent dans le quartier de l'Opéra. L'autre partie de la zone d'étude a des valeurs d'indice faibles. On remarque que les premiers jours, la canicule se localise sur tout le territoire puisque l'indice de dangerosité est visible sur tout Paris. La journée du 10^{ème} jour est marquée par une baisse des valeurs de l'indice (à l'exception du quartier de l'Opéra). C'est à partir de la 23^{ème} nuit que les indices vont diminuer pour arriver le 30^{ème} jour à un territoire quasi sans dangerosité, à l'exception du quartier de l'Opéra et de la gare de Lyon.

La zone des Buttes Chaumont est celle enregistrant les plus faibles valeurs et ayant la durée de dangerosité la plus faible.

Type 6 : SURFEX-TEB

Le type 6, type simulé par le modèle SURFEX-TEB, a des indices de dangerosité augmentant tout au long de la période. La première nuit, la canicule ne touche pas toute la zone d'étude. Les zones du parc des Buttes Chaumont ne connaissent pas la canicule. Après cette nuit, toute la zone connaît la canicule. Une faible baisse de la valeur des indices est constatée après la 8^{ème} nuit et ne dure que quelques jours. A partir de la 15^{ème} journée, l'indice de dangerosité s'amplifie et aggrave la situation de danger dans le quartier de l'Opéra ou l'indice dépasse la valeur 35. On constate une nette progression de l'indice de dangerosité sur 10 jours. A partir de la 28^{ème} nuit, l'indice diminue progressivement et la zone des Buttes Chaumont confirme l'hypothèse de l'îlot de fraîcheur. C'est la zone où l'indice de dangerosité est le plus faible voire nul.

Les quartiers de l'Opéra, de l'Île de la Cité et de la gare de Lyon sont définis par les indices de dangerosité les plus élevés sur toute la période.

Ces cartes sont faites à partir de données dont nous disposons : le modèle SURFEX-TEB et des mesures de campagnes dans les appartements et des ressentis associés. Il nous semble

indispensable d'aller examiner de plus près les lieux où les températures sont particulièrement chaudes ou fraîches. Dans cette partie, nous avons produit :

- **La représentation de l'indice de canicule mettant en avant les températures à l'intérieur des bâtiments et basée sur des seuils IBM**
- **Un indice de dangerosité mettant en avant les risques et la dégradation de l'état de santé lié à la durée du phénomène et venant en complément de l'indice de canicule.**

Pour l'ensemble des types, pendant la période de canicule entre le 1^{er} et le 8 juillet, on constate que toute la zone est touchée par la canicule. Les indices augmentent sur toute la période et commencent à décroître à partir de la 23^{ème} nuit avec une faible baisse entre la 8^{ème} et la 13^{ème} nuit.

Les quartiers de l'Opéra, de l'Île de la Cité et de la gare de Lyon sont des lieux à forte dangerosité puisque leurs indices sont très élevés sur toute la période contrairement à la zone du parc des Buttes Chaumont. Cette zone, faiblement dangereuse, connaît les plus faibles indices voire nuls.

Ces cartographies nous permettent, par conséquent de comparer avec l'état précédent, afin de désigner si la canicule est en période ascendante (la température continue à augmenter dans la durée), stagnante ou descendante (la température régresse pour passer en-dessous des seuils fixés de jour et de nuit). Cette représentation illustre bien que les appartements en rez-de-chaussée (type 1) résistent mieux à la canicule, les appartements très peu ventilés (type 4) subissent plus longtemps les vagues de chaleurs que les autres. On voit également que les configurations spatiales et les aménagements (lacs, parcs, végétation, etc.) semblent jouer un rôle non négligeable puisque la température, et à fortiori la dangerosité, connaissent d'importantes variations spatiales.

Deux points d'amélioration nous semblent essentiels :

- **Confirmer les répartitions spatiales pour améliorer la fonction de fusion de données**
- **Améliorer la fonction de calcul de dangerosité, notamment de récupération en réalisant des enquêtes sur les terrains associés à des campagnes de mesures dans les appartements.**

Il faudrait réaliser de nouvelles campagnes de mesure sur Paris et utiliser comme nous l'avons fait des capteurs météo bien étalonnés. Dans notre thèse, nous avons placé les capteurs dans la même zone pour étudier l'influence des appartements sur les températures.

Représentation de la canicule et construction de l'indice de dangerosité

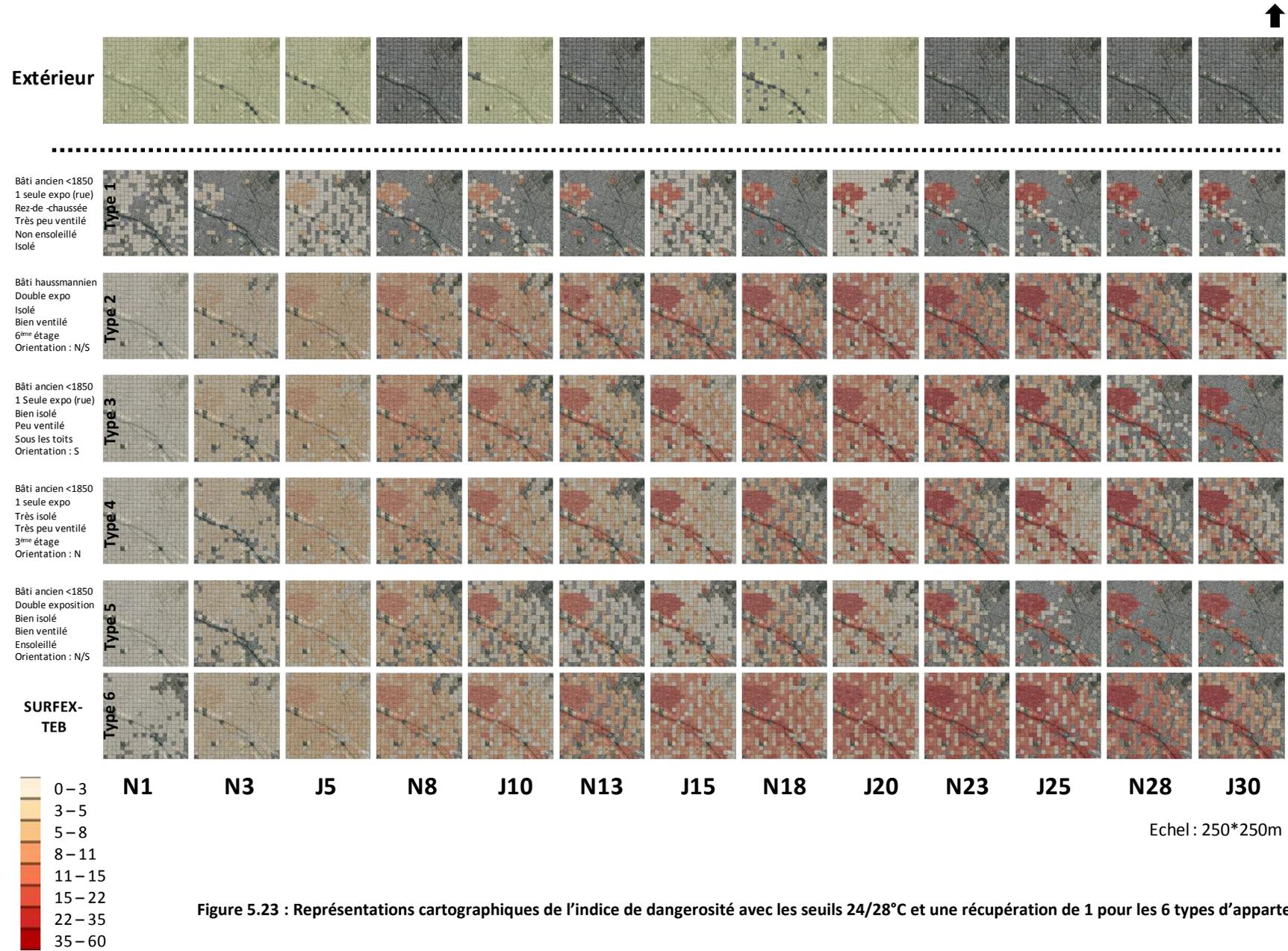


Figure 5.23 : Représentations cartographiques de l'indice de dangerosité avec les seuils 24/28°C et une récupération de 1 pour les 6 types d'appartements

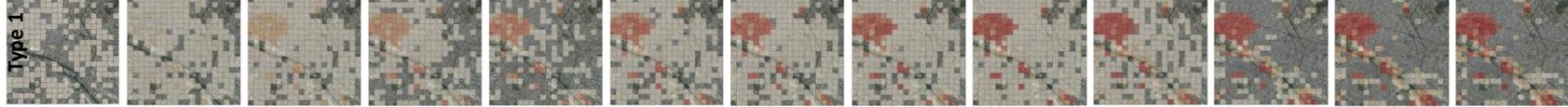
De la donnée brute à la dangerosité



Extérieur



Bâti ancien <1850
1 seule expo (rue)
Rez-de-chaussée
Très peu ventilé
Non ensoleillé
Isolé



Bâti haussmannien
Double expo
Isolé
Bien ventilé
6^{ème} étage
Orientation : N/S



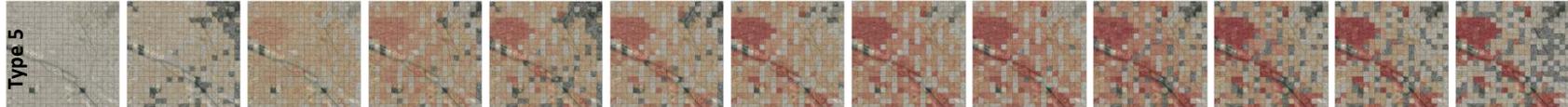
Bâti ancien <1850
1 Seule expo (rue)
Bien isolé
Peu ventilé
Sous les toits
Orientation : S



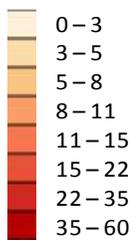
Bâti ancien <1850
1 seule expo
Très isolé
Très peu ventilé
3^{ème} étage
Orientation : N



Bâti ancien <1850
Double exposition
Bien isolé
Bien ventilé
Ensoleillé
Orientation : N/S



SURFEX-TEB



N1 N3 J5 N8 J10 N13 J15 N18 J20 N23 J25 N28 J30

Echel : 250*250m

Figure 5.24 : Représentations cartographiques de l'indice de dangerosité avec les seuils 24/28°C et une récupération de 0,5 pour les 6 types d'appartements

Représentation de la canicule et construction de l'indice de dangerosité

- Indice de dangerosité extérieur

Contrairement aux indices de dangerosité intérieurs, on constate une faible dangerosité sur la zone d'étude. La 5^{ème} journée, l'indice de dangerosité connaît son maximum avec des valeurs pouvant atteindre 8. Le graphique permet de mettre en avant le faible indice de dangerosité (Fig.5.41). La valeur du graphique se base sur la maille relevant l'indice de dangerosité maximale (maille 87). On remarque qu'il atteint son maximum la nuit du 7 juillet avec 4,2.

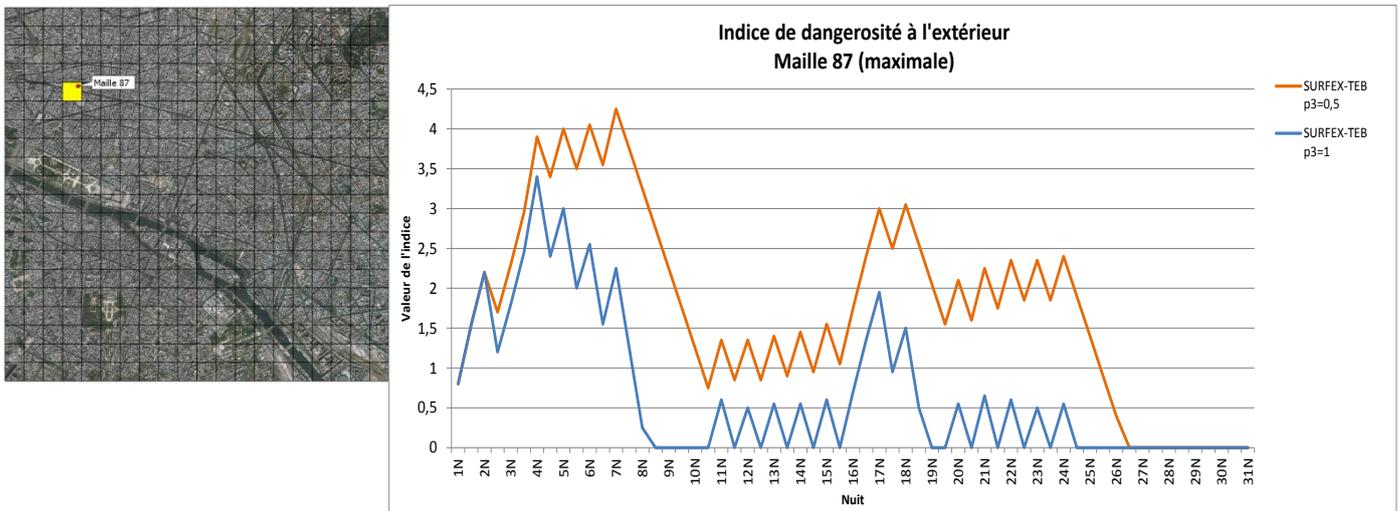


Figure 5.25 : Graphique de l'indice de dangerosité extérieur pour les seuils 21°C et 31°C avec un pas de récupération de -0,5, pour la maille numéro 87 (maille max) pour le type 6 entre le 1^{er} et le 31 juillet 2015

La représentation cartographique pour l'indice de dangerosité est réalisée avec le type 6 (simulation SURFEX-TEB) pour un pas de récupération de 1 et 0,5 (Fig.5.42 et 5.43).

Au niveau spatial on constate que la canicule est ressentie sur toute la zone d'étude jusqu'à la 10^{ème} journée. La valeur de la dangerosité devient nulle la 13^{ème} nuit sur plus de la moitié de la zone. A partir de la 15^{ème} journée, une nouvelle vague de chaleur est ressentie sur cinq jours consécutifs. Les effets de la canicule n'ont plus aucune dangerosité à partir de la 25^{ème} journée et cela jusqu'à la fin de la période. Les différentes périodes constatées lors de campagnes de mesures sont présentes.

Par ce graphique, on constate que même si la période de canicule est terminée, la dangerosité est présente. C'est seulement à partir du 26^{ème} jour que le risque est nul dans cette maille particulièrement chaude.

Par rapport à l'indice de dangerosité intérieur, on constate que la configuration urbaine joue un faible rôle dans la distribution de la dangerosité. Les hot-spots de chaleur sont peu visibles voire inexistants. Une différenciation de dangerosité entre quartiers n'est possible qu'avec les températures intérieures. Il est donc crucial de prendre en compte ces données lorsque l'on souhaite concevoir un indice de dangerosité.

Ces cartographies ont pour objectif de montrer les différences de dangerosité entre les types d'appartements pour la santé humaine. Il est intéressant de noter que les températures intérieures sont plus dangereuses pour la santé humaine que les températures extérieures. L'indice de dangerosité met en avant ce constat.

4.2.3. Comparaison avec les données sanitaires de juillet 2015

Il est nécessaire de comparer les indices calculés et représentés, avec les données de surmortalité pour le mois de juillet 2015. L'InVS a réalisé un rapport sur les épisodes de canicule survenus en juillet 2015⁸⁶. Ce rapport souligne plusieurs observations.

Pour la synthèse nationale, deux épisodes caniculaires sont recensés :

Période de 10 jours : du 29 juin au 8 juillet. Cette vague de chaleur entraîne le déclenchement de la vigilance orange dans 51 départements. Durant cette première période, l'InVS comptabilise 3 748 passages aux urgences dont 2 076 hospitalisations (55% des passages liés à la chaleur) et 1 456 consultations SOS médecins. Une surmortalité de 700 décès (+7%) est constatée entre le 29 juin et le 5 juillet.

Période de 11 jours : du 13 au 23 juillet avec une intensité moins importante que la première période. L'InVS dénombre un peu moins d'hospitalisations et de consultations mais le taux reste élevé : un pic de 277 passages aux urgences relevé le 16 juillet et 103 consultations SOS Médecins le 18 juillet. 2 461 passages aux urgences sont recensés en lien avec la chaleur. Cependant, le taux d'hospitalisation, après passage aux urgences, est supérieur avec 62% (contre 56% pour la première période). Ceci nous laisse penser que l'accumulation des deux périodes est peut-être la cause de ce plus grand nombre.

Les passages aux urgences pour des pathologies liées à la chaleur sont observés, en grande partie chez des personnes de plus de 75 ans et plus de 75% d'entre elles ont été hospitalisées (proportion équivalente pour les deux périodes).

Le nombre de décès, toutes causes confondues, est supérieur d'environ 3 300 décès par rapport au nombre attendu sur l'ensemble de la période soit une hausse de 6,5% de la mortalité. Le nombre de décès est extrapolé à l'échelle nationale et, est estimé en semaine calendaire (quelle que soit la durée de l'épisode caniculaire)⁸⁷.

La figure 5.44 présente le nombre de passages journaliers aux urgences, de consultations SOS Médecins et la part d'hospitalisations pour les pathologies en lien avec la chaleur entre le 1^{er} juillet et le 31 août 2015 ; cette période met en évidence les deux épisodes de canicules mesurés (zone violette et grise).

Le 5 juillet est le premier pic du nombre de passages aux urgences, le deuxième survient deux jours plus tard, le 7 juillet. Sur ces deux dates le nombre de passages aux urgences est supérieur à 400. La part d'hospitalisation suit les mêmes directives. Par rapport à notre indice de dangerosité, un décalage d'un à trois jours est noté. La journée la plus chaude, survenue le 1^{er} juillet a un décalage de 5 à 7 jours avec la hausse des passages aux urgences contre 7 à 9 jours pour notre indice. Du fait de

⁸⁶ Bilan au 15 septembre 2015 des épisodes de canicule survenus durant l'été 2015 (9 octobre 2015).

⁸⁷ Compte tenu des effectifs, l'analyse de la mortalité est effectuée exclusivement sur un pas de temps hebdomadaire. C'est pourquoi dans le cadre de ce bilan, l'estimation de la hausse de la mortalité sur les périodes caniculaires est effectuée sur les semaines.

Représentation de la canicule et construction de l'indice de dangerosité

l'accumulation de chaleur, l'indice suppose un temps plus long pour percevoir la dangerosité. Notre indice met davantage en avant la durée que l'intensité.

Pour la deuxième période, moins importante, les pics du nombre de passages aux urgences, supérieurs à 250, sont datés entre le 17 et le 19 juillet et les 22 et 23 juillet. Sur ces dates notre indice de dangerosité est plus élevé que pour la première période alors que le nombre de passages aux urgences est divisé par 2. Sur le reste de la période, on ne constate pas de nouvelle hausse.

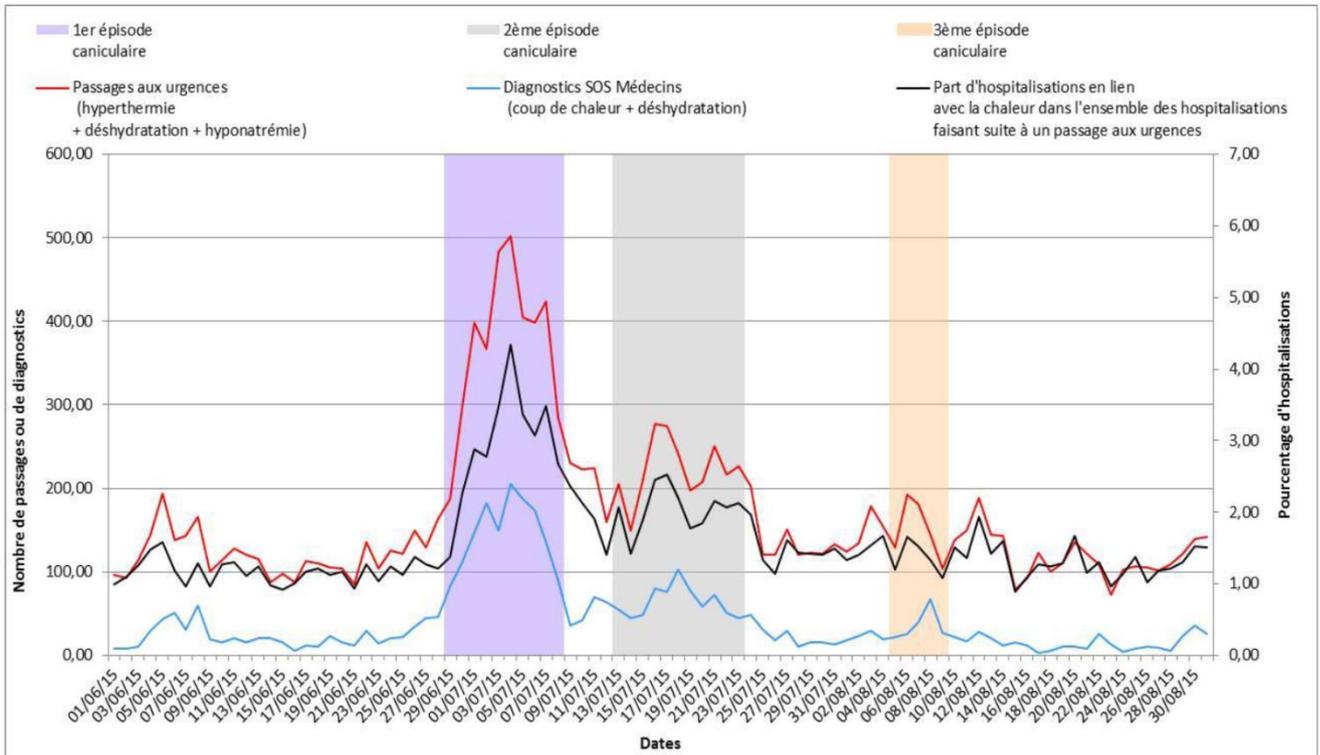


Figure 5.26 : Evolution du nombre de passages journaliers aux urgences, de consultations et parts d'hospitalisation, en lien avec la chaleur, entre le 1^{er} juin et le 31 août 2015 (Source : Rapport InVS)

Ainsi, on peut se poser la question du temps de récupération de notre indice et de la valeur que l'on donne à l'accumulation de la chaleur (p_2). Cependant, les seuils extérieurs de 21°C et de 31°C sont en corrélation avec les données sanitaires. Le choix des seuils 24°C et 28°C, pour les températures intérieures, doit être revu. En revanche, les seuils de 24°C et de 31°C sont les seuils ayant les plus grandes similarités avec les données sanitaires. Il est donc intéressant de faire évoluer cet indice dans la direction des seuils de 24°C et 31°C.

De plus, dans son rapport, l'InVS souligne qu'un excès significatif de mortalité, tous âges confondus, est observé sur les deux premières semaines de juillet (+290 décès pour la région Ile-de-France).

5. Localisation des hot-spots

Pour nous les hot-spots sont des lieux particulièrement préoccupants par l'intensité et la durée de l'évènement. Dans notre schéma de données, nous souhaitons, tout en gardant l'information de la maille-suivi-canicule, définir des zones de canicules (Fig.5.45). Cette définition se fait par agrégation spatiale.

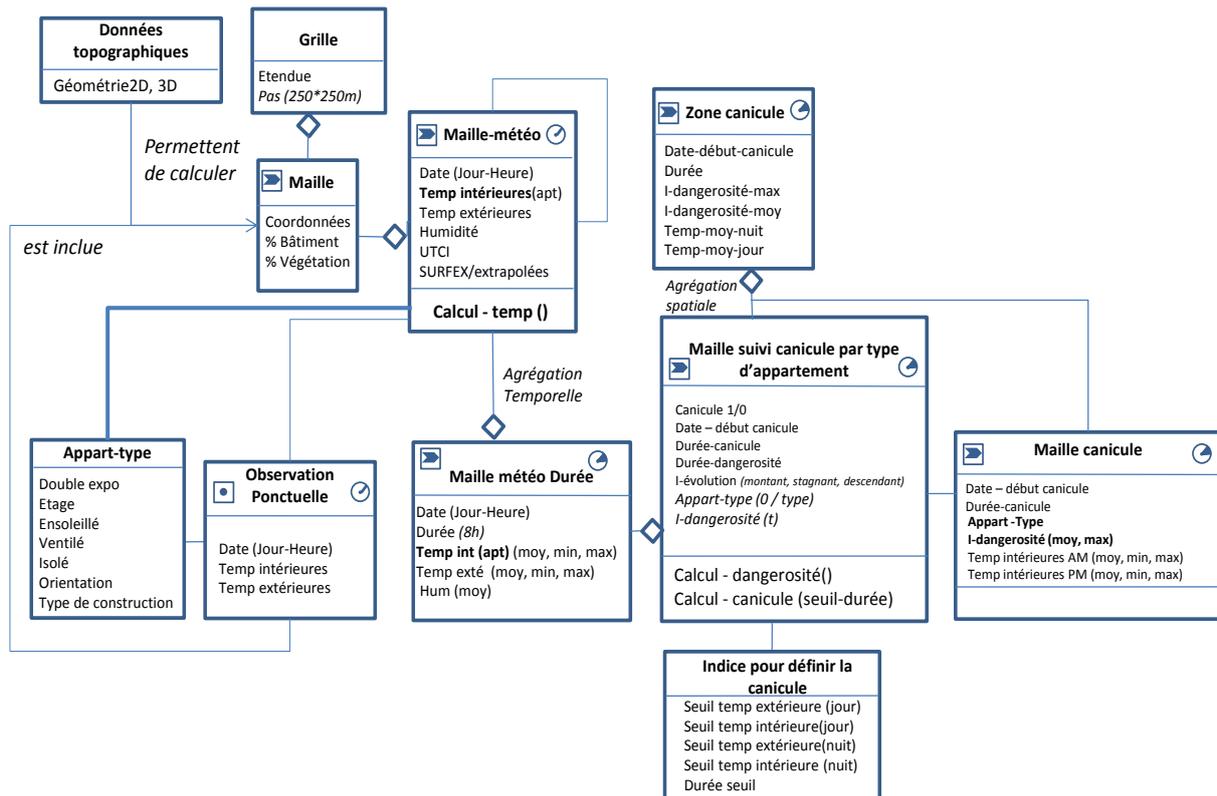


Figure 5.27 : implémentation du schéma de donnée initial en intégrant l'objet Zone canicule

Pour représenter la zone canicule, nous agrégeons (toutes les 12h) les mailles-suivi-canicule en fonction de la valeur de l'indice de dangerosité. Cet objet comporte une date et un début de canicule avec sa durée, les indices de dangerosité avec les températures moyennes de jour et de nuit.

5.1. Agrégat spatial

Une partie du travail de l'analyse spatiale consiste à explorer quels sont les regroupements d'unités de base les plus pertinents, selon différents types de critères, pour produire des découpages intéressants à plus petites échelles (Pumain et Saint-Julien, 1997). Pour notre étude, on se place dans un cadre géomatique-géographique utilisant les fonctionnalités des SIG. Ces dernières permettent la relation entre les couches d'informations liées à différents aspects du phénomène étudié et mettre en évidence d'éventuelles régularités spatiales. Des requêtes sont effectuées permettant de repérer les hot-spots ayant un indice de dangerosité et une période de canicule.

Les températures calculées par le modèle et mesurées sont définies par maille, dans une grille, pour toute la zone d'étude et elles sont traitées par quartier. C'est une agrégation spatiale qui permet de résumer l'information en simplifiant la répartition spatiale et la variation locale des températures. Ce passage d'une échelle à une autre peut s'effectuer en réunissant des unités spatiales de niveau inférieur pour créer des unités spatiales d'un niveau supérieur. Les combinaisons possibles de former des agrégats sont nombreuses mais elles ne sont pas toutes intéressantes car elles entraînent des conséquences sur l'interprétation et l'analyse des informations. Nous nous donnons donc des critères à respecter pour réduire le nombre de possibilités. On réalise un découpage regroupant toutes les mailles « canicule » (à savoir les mailles supérieures aux seuils définis) et les mailles ayant un indice supérieur à 15.

Il existe plusieurs méthodes d'agrégats en fonction de l'échelle et la problématique de recherche. Pour notre étude nous avons choisi de nous baser sur l'agrégat de type⁸⁸ hot-spot.

Les agrégats de type hot-spot se définissent par une élévation constante du risque caniculaire dans la zone qu'ils occupent. En dehors de cette zone, le risque de dangerosité correspond au risque nominal⁸⁹ que l'on peut qualifier de risque de base. Pour interroger les données géographiques, nous utilisons le langage de requête SQL. L'exemple de requête en spatial-SQL ci-dessous sélectionne les mailles où l'indice de dangerosité est supérieure à 15 et où la canicule est ressentie pour la nuit du 10 juillet :

```
SELECT canicule.*,indice.*
      FROM canicule, indice
      WHERE canicule.nuit10=190 AND indice.nuit10>=15
```

SELECT définit le résultat
WHERE définit la sélection

Dans les SIG, avec l'aide des interfaces graphiques, la construction de ces requêtes ne nécessite pas la connaissance du langage SQL. Cependant, leur expressivité reste limitée puisque l'interrogation ne peut se faire généralement que sur une seule couche (notamment pour la requête spatiale). Il faut réaliser successivement plusieurs sous-requêtes.

Pour cette requête, nous corrélons l'indice de dangerosité et les mailles canicule (Fig.5.46)

⁸⁸ Les hotspots sont basés sur un découpage mixte c'est-à-dire basés sur différents types de critères

⁸⁹ Au sens de conforme à une référence prédéterminée, aux erreurs de mesure près, en parlant d'une grandeur, un état ou d'un processus.

⁹⁰ Dans notre table de données 1 correspond à des mailles canicules et 0 à des mailles non canicules

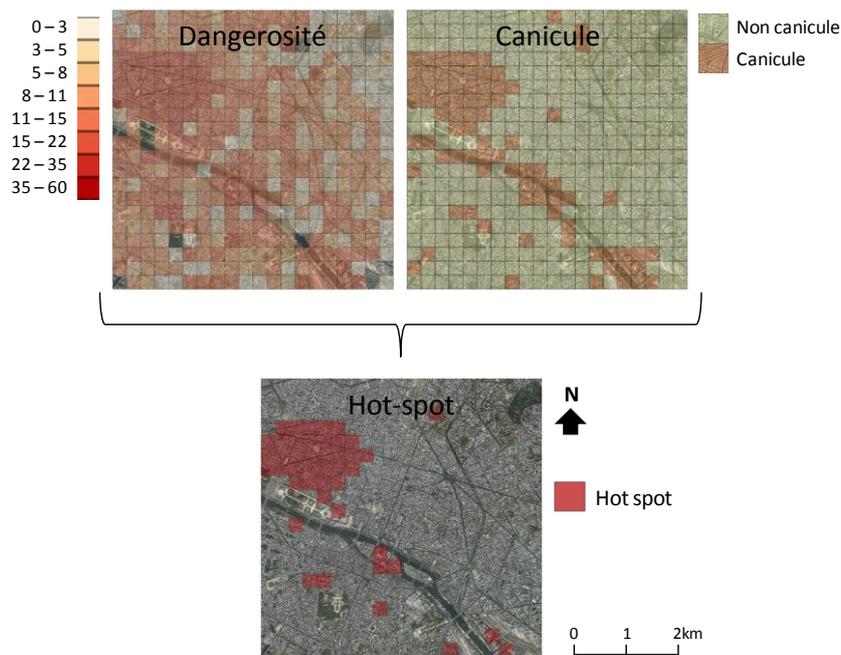


Figure 5.28 : Création des hot-spots par requête spatiale

Comme nous souhaitons faire ressortir les lieux où le phénomène dure, l'utilisation de l'indice de dangerosité est parfaite puisqu'il est bâti sur la durée. Nous avons choisi de représenter les zones où le seuil de dangerosité est supérieur à 15 pour deux raisons :

- La première est directement associée à nos données. Les premiers jours, l'indice reste faible et dépasse que très faiblement l'indice compris entre 11 et 15. Pour représenter les zones de hot-spot, il est nécessaire d'attendre plusieurs jours pour commencer à avoir une tendance zonale de dangerosité
- La deuxième est liée à la répartition des valeurs. On constate que c'est à partir de cette valeur que les données se stabilisent. Leurs évolutions sont plus faibles. La tendance se vérifie avec nos cartes.

L'accumulation des zones de fortes chaleurs produit des zones de hot-spot dues à la durée du phénomène. L'analyse de la requête spatiale entre la carte de la dangerosité et celle de la canicule montre les zones les plus vulnérables (Fig.5.47). Plus précisément, le quartier de l'Opéra et quelques zones le long de la Seine sont fortement impactées. Ces lieux sont plus vulnérables dû à leurs configurations spatiales : rues canyons, immeubles orientés Sud, non ombragés, etc. La climatisation, comme nous allons le voir, est un facteur aggravant les zones déjà vulnérables. Ces zones de hot-spot sont soumises au final à des conséquences sanitaires différentes et bien plus élevées que d'autres quartiers.

Il serait intéressant de positionner plusieurs capteurs dans les zones de hot-spot afin d'identifier avec plus de précision les risques encourus et le ressenti des habitants. Des études complémentaires pourraient être pertinentes pour évaluer les mesures de santé publique prise durant les vagues de chaleur dans ces zones.

Représentation de la canicule et construction de l'indice de dangerosité



Figure 5.29 : Cartographies des hot-spots pour le 10 juillet 2015 sur les 6 types de bâtiments

Pour avoir une vision dynamique du phénomène et de son évolution, une traçabilité de l'information est nécessaire. Pour cela, une table est créée, indiquant la date du début, de fin de canicule ainsi que sa zone géographique. Les données archivées pourront être interrogées, par exemple, pour mesurer l'évolution des zones de dangerosité, la durée des canicules.

5.2. La climatisation : impact et conséquence

Avec les vagues de chaleur, la climatisation des locaux est généralement utilisée (Semenza, 1996). Cette affirmation n'est pas totalement avérée. Notre étude montre que le quartier de l'Opéra, principalement caractérisé par des bureaux et les grands magasins est le plus vulnérable. On suppose que l'utilisation de la climatisation joue un rôle prédominant dans l'élévation de la température dans ce quartier. Si on compare nos cartes à celle des fractions de bâtiments climatisés, on constate que le quartier où la fraction est la plus élevée se situe au niveau de l'Opéra et de l'Etoile (hors zone pour notre étude) (Fig.5.48).

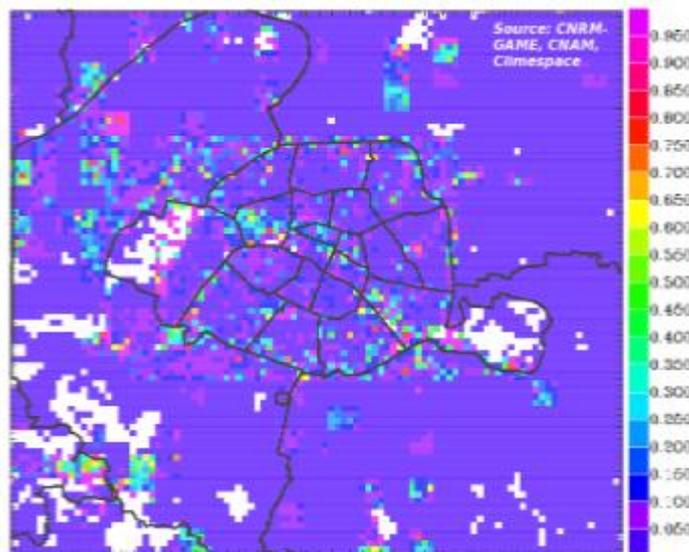


Figure 5.30 : Fractions de bâtiments climatisés pour le cas climatisé REEL⁹¹

La corrélation entre la carte issue du projet CLIM2⁹² et nos cartes est flagrante.

⁹¹ Les rejets issus de la climatisation dans leur forme actuelle (rejets humides et secs). Installations autonomes existantes + réseau de froid Climespace

Le projet CLIM2 de Météo-France montre que les rejets du parc actuel des systèmes de refroidissement (secs et humides) entraînent une augmentation locale de 0,25°C à 1°C (par rapport à un cas de référence sans climatisation) de la température nocturne dans les rues (Fig. 5.31). La climatisation a un impact plus important la nuit que le jour. Alors que le jour, les impacts sont relativement limités, la nuit, ils sont bien plus importants, notamment du fait de la faible épaisseur de la couche limite (~100m) et du faible mélange turbulent. Si les rejets sont uniquement secs, l'augmentation est alors de l'ordre de 0,5°C à 2°C. Ces résultats sont simulés par le modèle SURFEX avec un processus de climatisation pour le bâtiment (TEB-BEM).

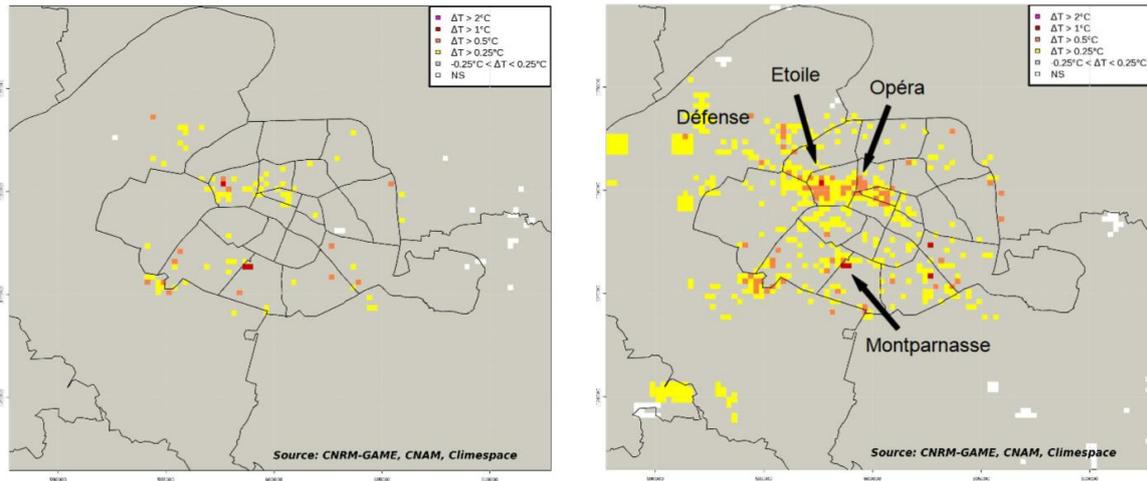


Figure 5.31 : Anomalies de températures à 2m pour le cas climatisé réel en journée (à gauche), la nuit (à droite)

En conclusion, ce projet démontre que les moyens mis en place pour satisfaire les besoins en froid dans les bâtiments parisiens, lors d'une canicule, influencent sur la température des rues et l'îlot de chaleur. La gestion de la climatisation pour le futur doit être réfléchie pour limiter les impacts sur le climat urbain. Si en 2030, pour pallier la chaleur des bureaux, commerces et bâtiments publics, les systèmes secs s'amplifient, ils pourraient entraîner, dans Paris, une hausse de 2°C le jour et 2,5°C la nuit. Ainsi, la climatisation n'est pas une solution efficace pour éviter les effets sanitaires des vagues de chaleur. Certaines réponses préventives concernent le territoire mais il est essentiel de trouver et d'apporter des solutions à l'échelle du bâtiment. Si une climatisation ciblée en hôpital et maison de retraite est conseillée, sa généralisation est à questionner. En effet, la climatisation, non seulement, augmente la température urbaine mais aussi la consommation énergétique. Elle habitue le corps à des températures fraîches ce qui augmente le besoin en climatisation. C'est un cercle vicieux.

⁹² Le projet CLIM2 (Climat urbain et climatisation) étudie l'impact, en termes de température de l'air dans les rues, de différentes solutions de climatisation, avec des rejets dans l'air ou dans la Seine, sur l'agglomération parisienne, lors d'un épisode de canicule similaire à celui de 2003. Ce projet est réalisé en collaboration avec le Laboratoire de Génie des Procédés pour l'Énergie, l'Environnement et la Santé (CNAM), le Groupe d'Études de l'Atmosphère Météorologique (CNRS-Météo-France), et la société Climespace. Source : Rapport final du projet – Rapport scientifique (Novembre 2010)

Synthèse du chapitre 5

Dans le chapitre 5, nous réfléchissons à la santé humaine face au climat en zone urbaine et climat tempéré. Les effets directs sur la santé font intervenir le stress thermique dû à l'accroissement de la fréquence, de l'intensité et/ou de la persistance des canicules. Cette partie met en avant la préoccupation et la dangerosité des canicules sur la santé humaine en analysant la relation entre mortalité et vague de chaleur.

La canicule varie dans le temps et dans l'espace. Nous utilisons les cartes de canicules et de dangerosité pour identifier les lieux particulièrement délicats (les hot-spot).

La représentation de la canicule et l'estimation de sa dangerosité est fonction de la durée du phénomène, de son intensité et des caractéristiques urbaines et humaines. La durée est une composante essentielle puisque le risque sanitaire en dépend, notamment le nombre de jours et nuits consécutif au-dessus de certains seuils. Pour la dangerosité intérieure, les seuils 24°C et 28°C ont été retenus dans un premier temps. Cette dangerosité a mis en avant la disparité du phénomène sur notre zone d'étude.

Les résultats sont d'une grande diversité et mettent en évidence une complémentarité des analyses entre la canicule et la dangerosité. Les sorties cartographiques montrent bien que chaque quartier, bâtiment ou appartement ne sont pas des blocs homogènes et similaires mais que des différences existent et modifient la dangerosité de la canicule. Cela veut dire qu'une campagne d'alerte et de prévention pourrait être mieux ciblée.

La climatisation est mise en avant comme un facteur influençant la température extérieure et par conséquent la température intérieure. Les habitants du quartier de l'Opéra subissent les effets de la climatisation.

Conclusion et perspectives

Ce chapitre de conclusion rappelle les enjeux, la méthode utilisée, la structure de cette thèse de doctorat et les principaux résultats. Les résultats obtenus tout au long de ce travail sont résumés et leur caractère innovant est souligné. Des pistes sont lancées pour des recherches ultérieures permettant d'approfondir encore le sujet traité. Quelques éléments de réflexion clôturent enfin ce mémoire. Ils mettent en évidence l'importance des recherches multidisciplinaires et rappellent surtout notre responsabilité en tant qu'être humain face à l'urgence d'adaptation des sociétés face au changement climatique.

Le milieu urbain influe sur le climat de la ville alors que traditionnellement, le climat concourt dans la conception du cadre bâti et par conséquent, de la ville. Les villes modifient ainsi localement les paramètres climatiques et engendrent une augmentation des températures, de la pollution atmosphérique mais aussi une diminution de la vitesse du vent, une modification de la pluviométrie, etc. Ces modifications ont des conséquences potentielles sur la consommation énergétique due à la climatisation, la mise en péril de la biodiversité, la dégradation du confort en extérieur et en intérieur, impactant indirectement la santé humaine. L'impact des événements caniculaires et de vagues de chaleurs est problématique puisque la durée et l'intensité de ces événements avec l'accroissement et le vieillissement de la population entraînent une surmortalité. En Europe, la canicule de 2003, a permis de mettre en évidence les liens entre l'effet d'îlot de chaleur urbain et les vagues de chaleur sur la mortalité. L'îlot de chaleur limite la baisse des températures durant la nuit et augmente la température de jour. Lors des vagues de chaleur, la diminution des températures nocturnes est vitale pour permettre à l'organisme une récupération lors des fortes chaleurs du jour. L'absence de baisse de température peut être mortelle.

Face au nombre important de décès lors de chaque canicule recensée, les collectivités territoriales et organismes ont mieux appréhendé et mieux intégré les modifications climatiques locales induites par la ville. Malgré ces efforts, la canicule 2015 a causé en France un pic de mortalité. Dans ce mémoire, nous proposons un suivi pour mieux vivre les canicules en ville.

Cette thèse est réalisée dans ce contexte actuel en mettant l'accent sur la représentation, la prise en compte de la durée et de l'intensité d'une canicule. Cette thèse propose un éclairage spécifique et méthodologique, elle est centrée sur l'étude de multiples interactions entre les composantes urbaines, le confort des citoyens et le phénomène caniculaire dans une situation de changement climatique.

Dans cette recherche, nous étendons le point de vue habituellement porté sur les actions de préventions extérieures par la prise en compte des températures intérieures, des caractéristiques des bâtiments et de la vulnérabilité des habitants. Ainsi, ce doctorat devrait impulser et aider les décideurs à tenir compte de la multi-dimensionnalité des phénomènes caniculaires avec les interactions du confort intérieur et la morphologie du bâti.

Nous nous sommes donc intéressés aux trois aspects suivants constituant le cœur de la problématique de ce travail de recherche : 1) contextualiser l'information des sorties de modèles météorologiques, 2) différencier les températures en fonction des types d'appartements en passant par la compréhension de l'influence des températures extérieures et des caractéristiques des bâtiments sur les températures intérieures, 3) intégrer la notion de durée et d'intensité par l'intégration d'un indice de dangerosité pour une meilleure représentation de la canicule, de son suivi et de sa dangerosité.

I. Rappel des objectifs de la thèse

La question soulevée dans cette thèse est l'analyse et la représentation de la canicule dans un espace urbain dense. Cette question soulève des enjeux puisque les canicules et le milieu urbain sont en constante évolution en raison du changement climatique et de l'urbanisation croissante. Ces enjeux entraînent des risques locaux avec un inconfort vécu par les citoyens.

Cette question a été abordée en mettant en place une démarche consistant à identifier les zones de hot-spots. La démarche proposée est originale dans la mesure où elle relève de trois domaines : géographie, climatologie et géomatique. Elle mobilise ainsi des notions et des outils propres à chaque discipline ou spécialité, par exemple la contextualisation des appartements, des analyses descriptives en adaptant des concepts statistiques ou encore le traitement des données par des logiciels de SIG et la représentation du phénomène spatio-temporel par la notion de snapshot.

La zone d'étude est le centre urbain de Paris où la plupart des caractéristiques urbaines sont présentes : espaces verts, réseaux hydrologiques, centre historique et denses, bâtis industriels, centres commerciaux, etc.

Du modèle SURFEX-TEB, on souhaite arriver à quantifier les écarts avec nos données. Même si on retrouve de l'imprécision sur les valeurs de nos données, elles sont bien plus fines que le modèle général et permettent d'estimer la dangerosité. De ces éléments, trois sous objectifs sont visés plus particulièrement dans cette thèse :

- Plusieurs études et projets étudient les impacts croisés du changement climatique et de l'expansion urbaine sur de grandes agglomérations jusqu'à l'échelle du quartier. Des modèles météorologiques estiment et prennent en compte à la fois les effets d'îlots de chaleur urbain à l'échelle de l'agglomération et l'estimation plus détaillée des températures à des mailles de 250* 250m. Cependant, il reste à affiner la description de ces impacts à échelle plus fine et à mieux exploiter les données.

Le premier objectif consiste à replonger les estimations dans l'espace pour une meilleure visualisation des sorties du modèle SURFEX-TEB (données sous-exploitées) : création d'une cartographie contextualisée.

- Les sorties SURFEX-TEB présentent les températures extérieures et intérieures. L'information peut être améliorée en prenant en compte la configuration du bâti et ses caractéristiques tels que la thermique du bâtiment, l'isolation, l'agencement, l'exposition, etc. Il reste donc à mieux estimer les températures intérieures et à quantifier ces écarts entre les différents appartements.

Le deuxième objectif est d'enrichir l'analyse et les estimations du modèle SURFEX-TEB par des campagnes de mesures. La connaissance des températures intérieures en fonction du type de bâtiment permet d'identifier les appartements à priori vulnérables aux épisodes de chaleur (orientés Sud, rues et cour encastrées, isolation, etc.) : création d'une cartographie différenciée.

- Par rapport à d'autres phénomènes, la canicule prend sa dangerosité dans la durée. Le risque caniculaire est difficile à représenter puisque ce n'est pas uniquement la température dépassant une valeur seuil à un instant donné ou la vulnérabilité de l'individu qui conditionnent l'alerte, mais plutôt la durée pendant laquelle une valeur seuil est dépassée. De plus, la température n'étant pas stable, les rafraîchissements nocturnes sont essentiels à la récupération physique. L'accumulation des zones de fortes chaleurs produit des zones de dangerosité s'accroissant par les prévisions de la continuité ou de l'aggravation du phénomène.

Le troisième objectif est d'analyser la durée et l'intensité des phénomènes pour en déduire des zones de dangerosité : hot-spots, à l'échelle du quartier en fonction des types d'appartements : création d'une cartographie du risque et de la canicule.

La démarche proposée (Fig.6.1) comprend une chaîne de méthodes permettant de traiter, d'analyser les températures intérieures et extérieures dans un espace géographique, sur une période donnée et de valider nos objectifs. Pour mettre au point notre méthodologie (décrite au chapitre 2), nous proposons un schéma conceptuel de données et nous nous aidons des logiciels suivants pour traiter les données et générer les cartographies associées :

- QGIS pour visualiser les données issues des sorties SURFEX-TEB de types vecteurs
- Postgres SQL pour stocker et requêter les données
- R pour effectuer des tests statistiques et réaliser la fusion de données

Les sources de données proviennent des sorties du modèle SURFEX-TEB et de deux campagnes de mesures réalisées au centre urbain de Paris. Nous avons proposé des méthodes de fusion de données permettant de les croiser, de façon à enrichir les résultats et à apporter des connaissances plus complètes pour décrire le comportement des températures en fonction des types d'appartements. Ces données reposent sur des mailles géographiques, observées pendant le mois de juillet 2015 (pour les dernières températures calculées). Ces différentes données permettent de construire différentes cartographies amenant à la représentation de la canicule et sa dangerosité. Cependant, en raison des temps de calculs, on se focalise sur le mois de juillet 2015 et sur la zone urbaine dense de Paris.

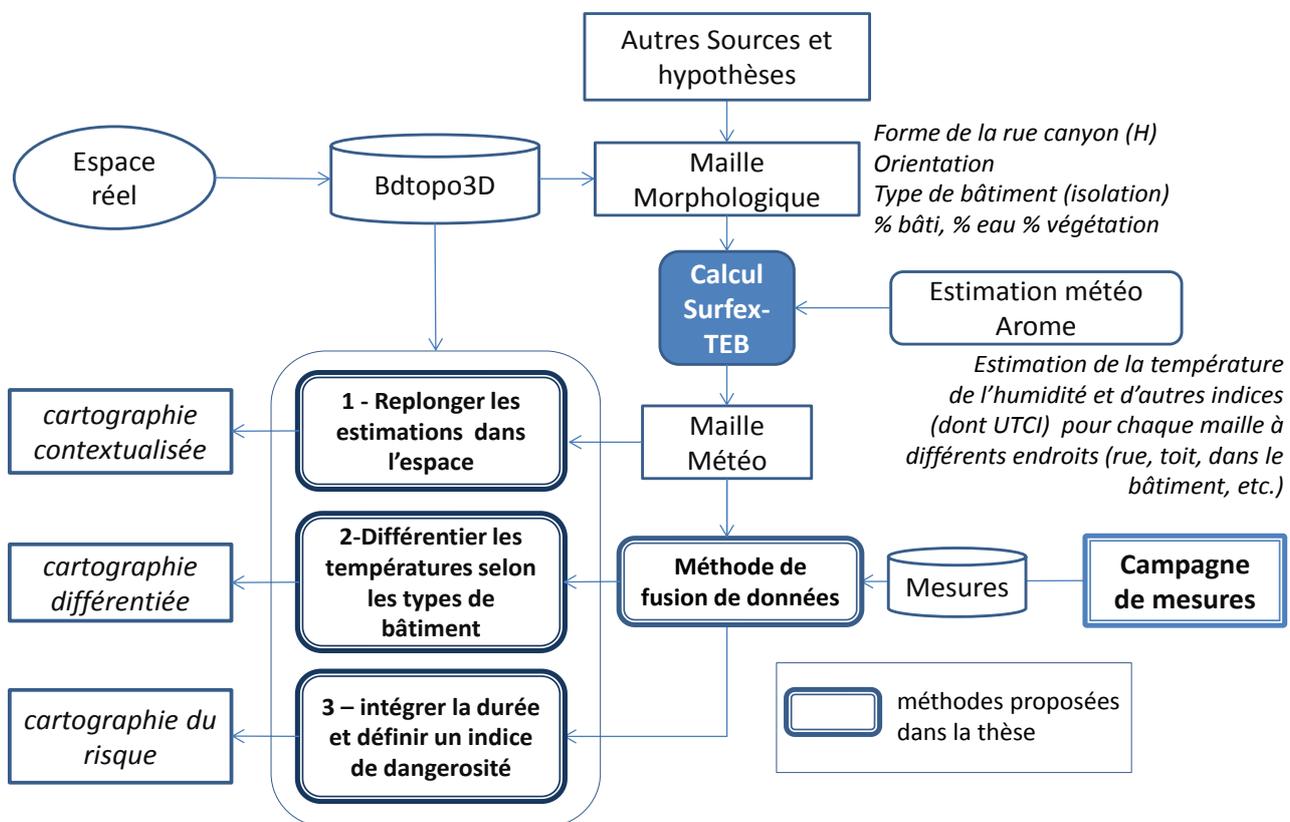


Figure 6.1 : Proposition de trois cartographies

Nos résultats ont été confrontés avec la mortalité de la canicule 2015, alimentant ainsi certaines hypothèses et réflexions.

II. Résumé de nos propositions de recherche

En préambule de ce travail, une revue bibliographique permet de dresser un panorama théorique et identifier un ensemble de travaux se rapportant au plus proche de la question. Nous nous sommes appuyées sur l'état de l'art de la formation du climat urbain, du phénomène caniculaire et des risques associés pour comprendre le rôle joué par les différents facteurs. Nous avons explicité la formation de l'îlot de chaleur urbain par le bilan énergétique et rappelé les facteurs participant à la formation du climat urbain (facteurs naturels, urbains et anthropiques). Le PNC est décrit afin de mieux comprendre les actions mises en place lors d'épisodes caniculaires. Quelques références sur des modèles météorologiques sont nécessaires pour expliquer notre choix. Le modèle SURFEX-TEB est choisi pour simuler la canicule 2015 sur Paris. Cette ville, compacte, dense, est particulièrement sensible à l'effet de l'ICU qui s'intensifie lors d'épisodes caniculaires.

Afin d'identifier les trois objectifs, nous présentons un ensemble de propositions :

- Cartographie contextualisée : à partir du modèle numérique développé par Météo-France pour paramétrer les échanges en énergie et en eau entre les surfaces bâties et l'atmosphère, les sorties du modèle SURFEX-TEB (à partir de mesures réelles des hautes couches atmosphériques) nous donnent des températures intérieures et extérieures sur une période de 31 jours (du 1^{er} au 31 juillet 2015). Pour contextualiser ces données, on réalise une restructuration de ces données autour de la maille, après la création d'une grille. On affecte à chaque objet géographique de la maille la valeur de la donnée. On projette les sorties pour mieux donner à voir la richesse des sorties de ce modèle. Cette représentation permet également d'identifier les zones les plus chaudes des plus froides. Nous montrons ainsi, comment des sorties d'un modèle peuvent être utilisées pour analyser les températures sur une zone définie.
- Cartographie différenciée : nous proposons de compléter les sorties du modèle par des mesures de campagnes réalisées au cœur de Paris pour une meilleure estimation et prédiction des températures. Ces campagnes permettent de visualiser les températures extérieures mais aussi intérieures pour différents types de configuration de bâti. L'analyse des données climatiques contribue à la connaissance des comportements thermiques pour chaque type de bâtiment et l'impact des températures extérieures sur les températures intérieures lors de canicules. Ce phénomène climatique extrême, variable dans l'espace et dans le temps est ressenti différemment en fonction du bâti mais aussi de la vulnérabilité de l'occupant. Le premier travail consiste donc à mieux estimer la température à l'intérieur des appartements, à chiffrer ces écarts de températures et définir par ces températures des types d'appartements :
 - Type 1 : bâti ancien <1850, rez-de-chaussée, très peu ventilé, isolé, orientation S
 - Type 2 : bâti haussmannien, isolé et bien ventilé, 6^{ième} étage, orientation N/S
 - Type 3 : bâti ancien <1850, bien isolé et peu ventilé, sous les toits, orientation S
 - Type 4 : bâti ancien <1850, très isolé, très peu ventilé, 3^{ème} étage, orientation N

- Type5 : bâti ancien <1850, bien isolé, ventilé, ensoleillé, orientation N/S

De ces analyses et types d'appartements, on réalise une fusion de données. En connaissant le delta de températures entre les mailles de SURFEX-TEB et la maille où se situe le type d'appartement, la grille de 11*11km² apporte une visualisation différenciée en fonction des types d'appartements. Par cette fusion, on construit une base de données des températures associées aux cinq types de bâtiments combinant les analyses des températures intérieures et extérieures sur le mois de juillet 2015 et la simulation SURFEX-TEB, sur notre zone d'étude.

- Cartographie du risque caniculaire : l'utilisation de la base de données issue de la fusion de données permet de produire des cartographies de canicule caractéristiques des six bâtiments (incluant la simulation SURFEX-TEB). Ces cartographies soulignent le fait que le temps est une donnée cruciale pour appréhender les épisodes caniculaires. Pour introduire la notion de durée, nous utilisons notre schéma conceptuel de données pour expliquer notre méthodologie. Nous construisons un indice de dangerosité sur cette base. Nous définissons une fonction par des seuils et des indicateurs pour évaluer le risque sanitaire pour les habitants. L'InVS définit le phénomène caniculaire par des seuils et une durée minimum de trois jours pour des températures extérieures. De ce fait, l'intensité et la durée du phénomène ne sont pas prises en compte dans l'IBM, la distinction entre les températures intérieures et extérieures, non plus (ou du moins pas directement). Nous montrons que les écarts ne sont pas négligeables entre appartements et selon les quartiers. Ces analyses confirment l'intérêt de prendre en considération les températures intérieures et de montrer leur dangerosité en fonction des différentes configurations spatiales, de l'intensité et de la durée du phénomène.

III. Apports et contributions de la thèse

Le principal apport de la thèse est d'explorer le problème de la dangerosité à l'intérieur des bâtiments pendant une période de canicule, en combinant les connaissances issues des domaines scientifiques et de la santé. De manière plus détaillée, la thèse contribue à des apports méthodologiques et thématiques dans ces domaines.

Apports méthodologiques : Adaptation des méthodes développées

- Une méthode de fusion de données sur les sorties de SURFEX-TEB est appliquée sur nos données mesurées. Cette méthode permet de visualiser, sur l'ensemble de la zone, les températures extraites sur une maille. Cependant, cette fusion peut être améliorée. Les données mesurées peuvent être directement intégrées au modèle TEB.
- Nous avons mis au point cet indice pour comprendre et mieux visualiser la dangerosité et l'intensité de la canicule.
L'indice de dangerosité est une fonction avec des seuils de températures et des pas de récupérations. Cet indice varie en fonction des seuils et du pas de récupération. Nous évaluons ces seuils sur quelques interviews. Nous menons une réflexion autour de la durée du phénomène en intégrant la subjectivité de l'individu face aux températures élevées. Cet

Conclusion et perspectives

indice est une première proposition et reste à améliorer grâce à davantage d'enquêtes semi-directives sur le terrain et à confirmer sur d'autres types d'appartements. De plus, on pourrait introduire, dans la fonction, une racine carrée pour éviter une montée importante de l'indice.

Apports thématiques : Résultats

Dans le cadre de cette recherche, le modèle SURFEX-TEB contribue ainsi à la mise en place d'une méthode de fusion de données. Les analyses des campagnes de mesures et leurs représentations cartographiques permettent d'asseoir un certain nombre de conclusions scientifiques. Nos résultats permettent d'abord d'estimer, de quantifier et de chiffrer l'écart des températures entre les types d'appartements et de montrer la corrélation entre les températures extérieures et intérieures.

Cette recherche aboutit à plusieurs conclusions importantes :

- La ville n'est pas un espace homogène. Les configurations spatiales font que les températures extérieures et intérieures se distinguent d'un quartier à un autre. Le quartier de l'Opéra, fortement climatisé, dû à une densité importante de bureaux et de grands magasins, connaît des températures plus élevées que d'autres quartiers, à l'exemple des Buttes Chaumont. Le quartier de l'Opéra, îlot de chaleur, intensifie la canicule en absorbant la chaleur diurne et en augmentant les températures nocturnes. Ce quartier est le plus préoccupant au niveau de la santé humaine. En opposition au quartier du parc des Buttes Chaumont, de par sa végétation, cette zone connaît des températures plus fraîches de plusieurs degrés. Ces différences sont à prendre en compte lorsque l'on s'intéresse au confort humain. Durant la période de canicule de juillet 2015, de jour, on constate une différence de plus de 10°C entre ces deux quartiers pour un même type d'appartement. Entre types d'appartements, la différence peut être tout aussi importante. Entre le type 1 (RDC) et 2 (bien ventilé, donnant sur les grands boulevards), pour le quartier de l'Opéra, on remarque une différence de 8°C, pour la journée du 3 juillet. L'influence des températures extérieures sur celles intérieures diffère en fonction des types d'appartements. L'inertie thermique joue un rôle faible pour le type 1 en opposition au type 3 (sous les toits) ou 5 (bien ventilé).
- Nous préconisons de dissocier les températures intérieures et extérieures sur différents types d'appartements lors de la création d'indice de dangerosité. Le vécu de la personne est différent en fonction de la localisation, de l'isolation, de l'étage, de l'orientation, etc. Nos cartographies confirment le rôle prédominant des configurations spatiales dans la représentation du phénomène caniculaire. Les caractéristiques thermiques telles que l'isolation ont une grande influence sur les températures. Nous avons identifié plusieurs scénarii (chapitre 4) en fonction des types d'appartements :
 - o Le type 1 par sa localisation géographique est peu impacté par les températures extérieures et enregistre des températures basses,
 - o Le type 2, donnant sur des boulevards et à double exposition enregistre des températures élevées en journée mais basses en période nocturne. Ce type d'appartement se rafraîchit la nuit,

Conclusion et perspectives

- Le type 3, malgré sa localisation sous les toits est bien ventilé et se rafraîchit dès que les températures extérieures baissent,
 - Le type 4 par sa forte isolation et son contexte (donnant sur une petite cour intérieure) est mal ventilé donc se rafraîchit moins vite que le type 5 et enregistre des températures toujours élevées,
 - Le type 5, à double orientation, est bien ventilé et se rafraichit plus vite que les autres types.
- L'indice de dangerosité vient en complément de l'IBM. Les températures intérieures plus chaudes de nuit que celles extérieures, et la durée des fortes chaleurs sont à prendre en considération. L'indice de dangerosité construit permet d'appréhender ces facteurs ainsi que la vulnérabilité des personnes pour une meilleure connaissance du risque caniculaire. Les résultats des premiers indices développés sont très intéressants : les indices reproduisent bien les observations du comportement des températures intérieures, ainsi que les cycles diurnes/nocturnes. Les sorties graphiques mais aussi cartographiques montrent bien que chaque bâtiment, appartement et quartier de vie ne sont pas des blocs homogènes et similaires mais qu'il existe des différences qui modifient la dangerosité de la canicule. Là encore, il devrait être possible d'améliorer l'indice (notamment le choix des seuils) en élargissant la campagne d'observations.
- Si les indices donnent des résultats corrects sur le ressenti de la canicule, la corrélation entre la morbidité et la mortalité ne montre pas une relation suffisamment différenciée, quel que soit le type de bâti. Pour mieux décrire la dangerosité intérieure, il faudrait reprendre l'indice avec d'autres pas de récupérations et/ou d'autres seuils de températures et le confronter à des enquêtes et entretiens.

IV. Perspectives

Ce travail de recherche a investigué des domaines de connaissances distincts que sont la climatologie urbaine, la géographie et la géomatique. Il s'inscrit ainsi dans un cadre pluridisciplinaire tendant à créer une passerelle entre deux champs qui ont encore peu l'habitude de se côtoyer : la climatologie et la géomatique. Cette thèse ne clôt pas la problématique de la dangerosité et de la représentation des canicules mais ouvre au contraire plusieurs perspectives de recherche sur ce sujet. De nombreux points n'ont été abordés que partiellement et ouvrent des perspectives de recherches variées.

- Reproductibilité de la fusion et de l'analyse de données

La question de la reproductibilité se pose. Il faudrait valider l'indice par d'autres mesures sur d'autres types de bâtiments. Les cartographies n'étant valables que pour cinq types de configurations, il pourrait être utile de tester de nouvelles configurations qui permettraient de définir un type de configuration où la dangerosité est faible. Une nouvelle campagne de mesure 2016 a été réalisée pour trois appartements. (Fig.6.1).

- Appartement A, double exposition (Est/Ouest) donnant sur une cour et sur une rue canyon. Il se situe au 4^{ème} étage et est faiblement isolé,
- Appartement B, double exposition (Nord/Sud) donnant sur une cour et sur une rue canyon. Il se situe au 4^{ème} étage. Les occupants ont fermé les volets (bois blanc) tous les jours sur la journée entre 9h et 20h,

Conclusion et perspectives

- Appartement C, double exposition (Nord/Sud) donnant sur une cour et sur une rue canyon. Il se situe au dernier étage et est bien ventilé.

Ils se localisent tous dans le centre urbain de Paris (Fig.6.2)

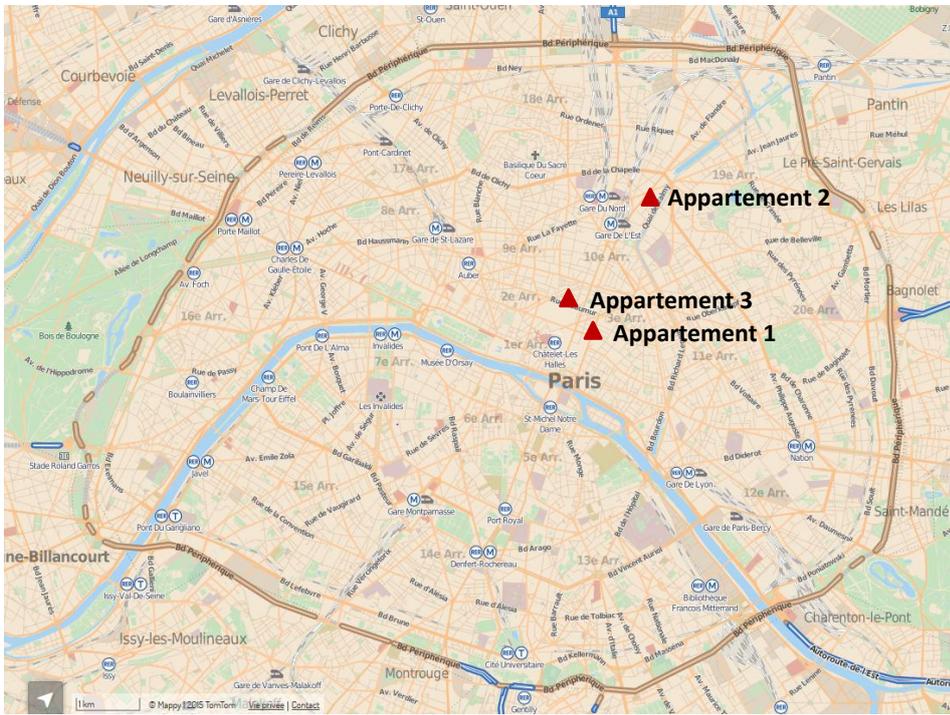


Figure 6.2 : Localisations des appartements pour la campagne 2016 (réalisé à partir du site web Mappy)

On remarque par ces nouveaux bâtiments testés, de nouveaux comportements thermiques pendant la période de canicule, fin août 2016 (Fig.6.3).

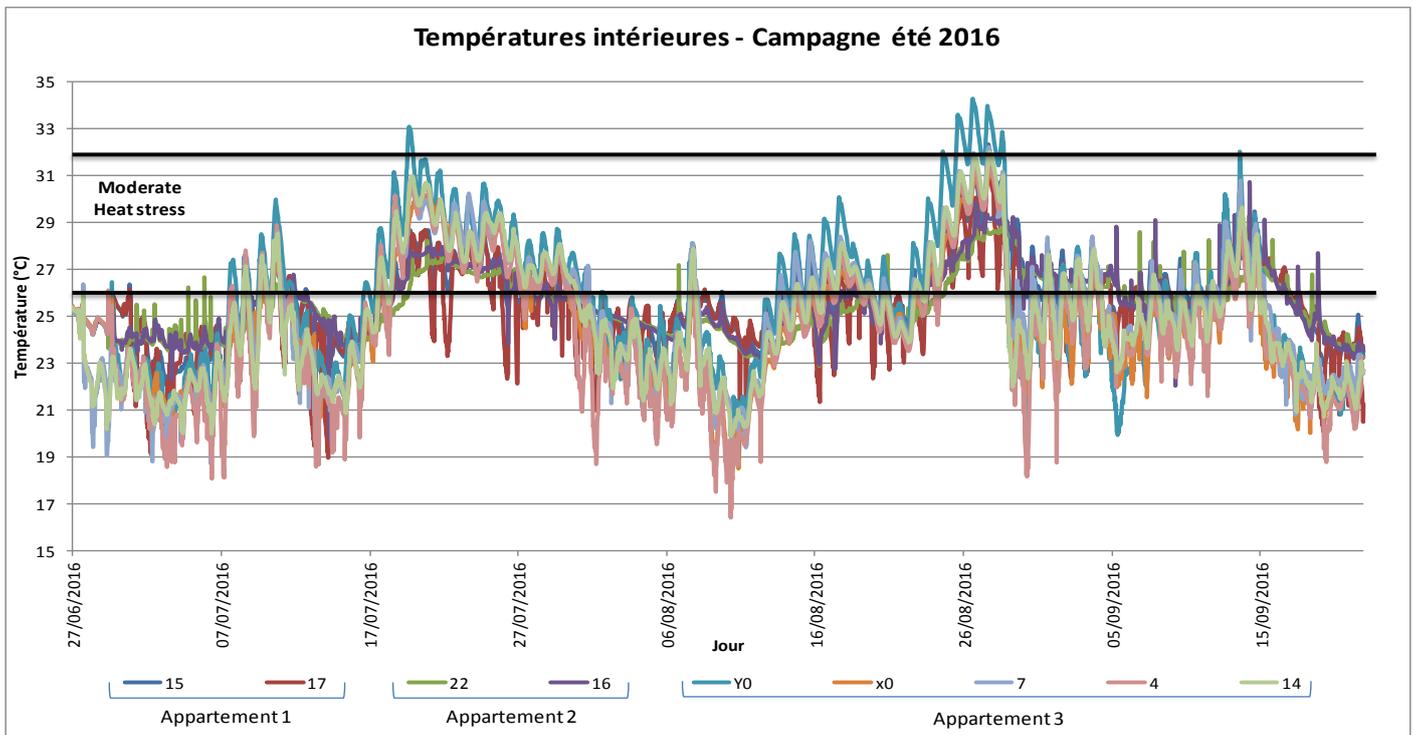


Figure 6.3 : Températures intérieures de la campagne d'été 2016

Conclusion et perspectives

Les occupants de l'appartement 2, ont eu un vécu de la canicule différent par rapport aux autres. L'amplitude thermique diurne/nocturne est faible (Fig.6.4). Les températures de cet appartement pendant la période de canicule d'août 2016 sont plus basses en opposition aux températures de l'appartement 1 et 3. On suppose que la fermeture quotidienne des volets impacte sur la température intérieure. Le capteur 7 (côté Sud) enregistre des températures toujours plus élevées de 1 à 2°C par rapport aux autres capteurs. Sa localisation sous les toits peut être le facteur de différenciation.

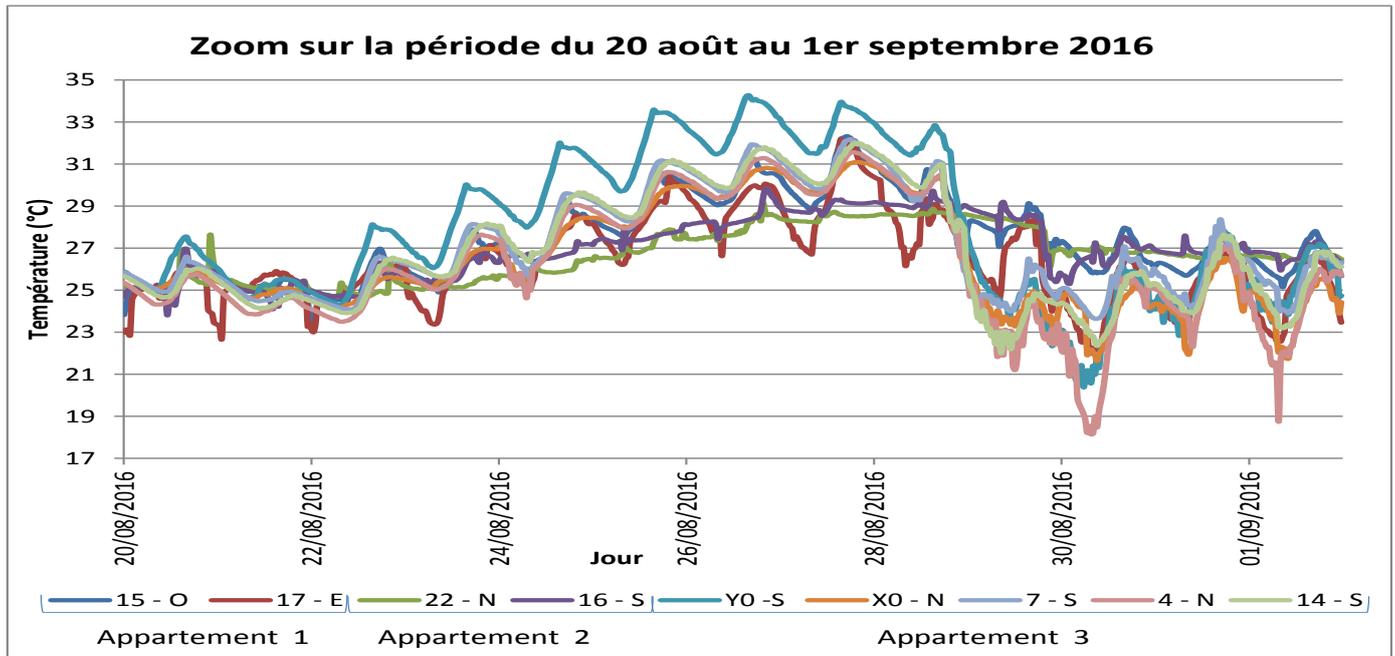


Figure 6.4 : Zoom de la figure 6.3 sur la période du 20 août au 1^{er} septembre 2016

Cette campagne de mesure permettra de confirmer ou d'invalider notre méthode de fusion de données avec les sorties de SURFEX-TEB.

- Amélioration de l'indice de dangerosité

L'indice de dangerosité développé pour représenter l'intensité et la durée de l'événement nécessite d'être amélioré pour être utilisé pour d'autres types d'appartements. Nous nous focaliserons sur cette tâche par la suite. L'indice et la méthode pourront être ainsi réemployés.

Avec cette nouvelle campagne de mesure, il serait intéressant de prendre plus en compte le vécu des personnes et son analyse afin d'avoir le ressenti de la personne sur la canicule 2016. Cela apporterait une consolidation à l'indice de dangerosité et notamment sur les seuils choisis et le pas de récupération. Un entretien semi-directif est réalisé avec les occupants de chaque appartement. Les occupants de l'appartement 2 ont eu « très chaud » pendant la période de canicule. Ils ont vécu « l'enfer » pendant plus d'une semaine et ont eu du mal à trouver le sommeil. Malgré la différence de température avec les autres appartements, les occupants ont ressenti un mal-être.

On pourrait envisager d'avoir des seuils de températures différents avec un nouveau pas de récupération. Une racine carrée pourrait être intégrée afin que l'indice n'évolue pas trop rapidement.

Conclusion et perspectives

- Vers une meilleure communication

Les analyses sur le suivi de la canicule produisent d'importants volumes de données et de couches géographiques à superposer. Afin de mieux communiquer et de faciliter la compréhension du phénomène, nous développons un site web. Ce site web, en cours de conception permet de choisir de visualiser les températures intérieures ou extérieures, les indices de dangerosité développés pour chaque type de bâtiments défini (Fig.6.5). Ce site web est réalisé par Ha Pham, doctorante à l'IFSTTAR et spécialisée en symbologie. Il sera disponible sur le site :

<http://représentation-phénomènes.ifsttar.fr>

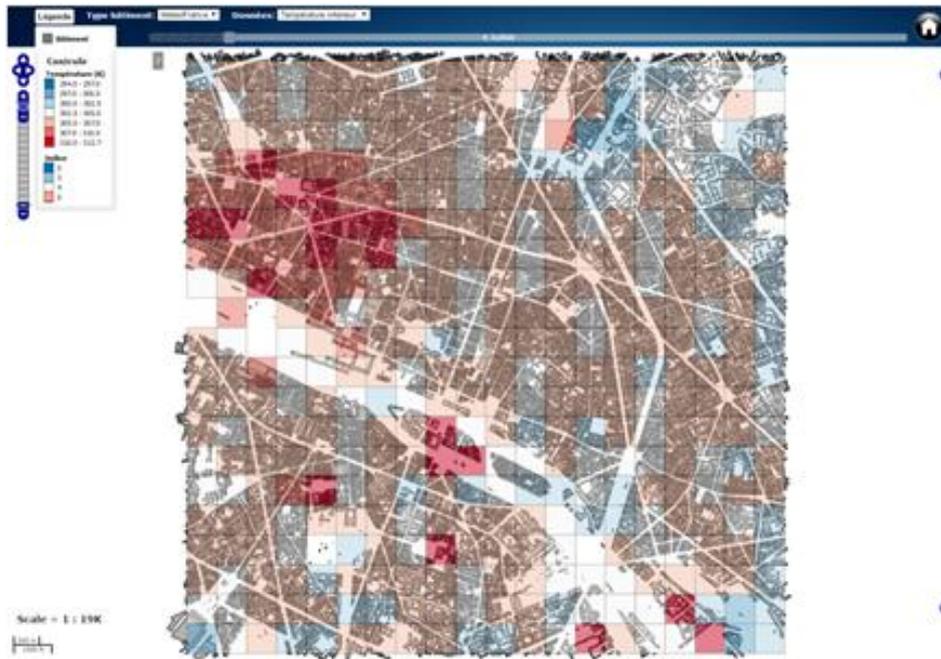


Figure 6.5 : Services web de visualisation du projet RepExtrem

- Vers d'autres disciplines et domaines

A ces perspectives, principalement du domaine des sciences physiques, s'ajoutent la nécessité d'interroger d'autres domaines tels que la santé ou la sociologie. En effet, la question de la dangerosité intérieure, peut être intégrée consciemment à une étude sur la perception et le ressenti du risque auprès de la population et des acteurs. Cette recherche pourrait apporter des éléments utiles et de nouvelles connaissances. De manière générale, il faudrait interagir et échanger avec les experts en santé, notamment pour valider l'indice développé.

La question des phénomènes extrêmes et plus particulièrement des canicules s'inscrit dans le sujet plus général de l'adaptation aux impacts des changements climatiques. Les collectivités territoriales sont aujourd'hui en demande croissante de connaissances sur les impacts mais également sur les moyens disponibles et les solutions locales à envisager. Cette thèse soulève une interrogation sur l'action de l'homme, par son influence sur l'évolution du changement climatique et par conséquent sur la hausse du nombre d'événements extrêmes. Il faudra attendre encore plusieurs années avant que des mesures d'atténuation sur le changement climatique soient mises en place. L'adaptation à la récurrence des vagues de chaleurs repose sur une meilleure communication mais aussi sur des décisions en matière d'urbanisme, d'habitat et de thermique du bâtiment.

Conclusion et perspectives

Concernant l'urbanisme, une conception urbaine tenant compte du confort des personnes peut être mise en place :

- La protection du rayonnement solaire par la végétation : l'accroissement des zones végétalisées dans le centre urbain. Plusieurs pays comme le Canada ont planté de nombreux arbres en zones urbaines. Les toits et les murs peuvent être aussi recouverts de verdure afin de diminuer les températures intérieures.
- L'agencement des bâtiments : éviter la formation de canyons urbains participant à la mauvaise circulation de l'air.

Concernant l'habitat et la thermique, une diminution des consommations d'énergies liées à l'utilisation des bâtiments (ventilation, ensoleillement des façades, etc.) impacterait les températures intérieures. Le recours à la climatisation a un impact négatif sur les consommations énergétiques et entraîne le réchauffement de l'air (comme nous avons pu le voir tout au long de cette recherche). Des solutions alternatives comme l'habitat bioclimatique est envisageable et, est déjà présent sur Paris. Cet habitat utilise des matériaux moins conducteurs et plus clairs pour lutter contre les apports de chaleur.

L'isolation est nécessaire en période hivernale mais on a vu qu'elle peut être un frein au rafraîchissement du logement en période estivale. Il faudrait penser aux différents principes de ventilation naturelle pouvant être mis en place. Une connaissance sur le type d'agencement intérieur facilitant la dispersion de la chaleur et par conséquent le rafraîchissement du logement par une ventilation naturelle serait utile.

Cette thèse contribue ainsi à une meilleure analyse de la canicule extérieure comme intérieure sur le confort et la santé humaine.

Annexes

Annexe 1

Les seuils d'alerte canicule définis à partir des indicateurs Biométéorologiques IBMn et IBMx

En rouge : les seuils déterminés à partir des études de l'InVS. Pour les autres villes, les seuils correspondent aux percentiles 99.5 des indicateurs biométéorologiques (moyenne glissante sur 3 jours des températures maximales et minimales). En Haute-Savoie, la station de Chamonix jugée peu représentative a été remplacée par celle de Chambéry (Savoie)

Département	Commune de référence	Seuils	
		IBMn	IBMx
Ain	Ambérieu (Château-Gaillard)	20	35
Aisne	Saint-Quentin (Fontaine-lès-Clercs)	18	33
Allier	Vichy (Charmeil)	18	34
Alpes-de-Haute-Provence	Saint-Auban-sur-Durance	19	36
Hautes-Alpes	Embrun	18	33
Alpes-Maritimes	Nice	24	31
Ardèche	Aubenas (Lanas)	20	35
Ardennes	Charleville	18	33
Ariège	Saint-Girons (Lorp-Sentarail)	19	34
Aube	Troyes (Barbèrey-Saint-Sulpice)	18	35
Aude	Carcassonne	22	35
Aveyron	Salles-la-Source (Rodez)	19	36
Bouches-du-Rhône	Marseille (Marignane)	22	34
Calvados	Caen (Carpiquet)	18	31
Cantal	Aurillac	18	32
Charente	Cognac (Châteaubernard)	20	36
Charente-Maritime	La Rochelle	21	34
Cher	Bourges	18	35
Corrèze	Brive-la-Gaillarde	19	36
Haute-Corse	Bastia (Lucciana)	23	34
Corse-du-Sud	Ajaccio	23	33
Côte-d'Or	Dijon (Ouges)	19	34
Côtes-d'Armor	Saint-Brieuc (Trémuson)	18	31
Creuse	Guéret (Lepaud)	20	34
Dordogne	Périgueux	20	36
Doubs	Besançon	19	33
Drôme	Montélimar	21	36
Eure	Evreux (Huest)	19	34
Eure-et-Loir	Chartres (Champhol)	18	34
Finistère	Quimper (Pluguffan)	19	32
Gard	Nîmes (Courbessac)	23	36
Haute-Garonne	Toulouse (Blagnac)	21	36
Gers	Auch	20	36
Gironde	Bordeaux (Mérignac)	21	35
Hérault	Montpellier (Mauguio)	22	35
Ille-et-Vilaine	Rennes (Saint-Jacques-de-la-Lande)	19	34
Indre	Châteauroux (Déols)	19	35
Indre-et-Loire	Tours (Parcay-Meslay)	19	35
Isère	Grenoble (Le Versoud)	19	34
Jura	Lons-le-Saunier (Montmorot)	20	34
Landes	Mont-de-Marsan	20	34
Loir-et-Cher	Blois	19	35
Loire	Saint-Etienne (Bouthéon)	19	35
Haute-Loire	Le Puy (Chaspuzac)	18	32
Loire-Atlantique	Nantes (Bouguenais)	20	34
Loiret	Orléans (Bricy)	19	34
Lot	Gourdon	20	36
Lot-et-Garonne	Agen (Estillac)	20	36
Lozère	Saint-Pierre-des-Tripiers	18	32

Département	Commune de référence	Seuils	
		IBMn	IBMx
Maine-et-Loire	Angers (Beaucouzé)	19	34
Manche	Valognes	18	31
Marne	Reims (Courcy)	18	34
Haute-Marne	Langres	19	34
Mayenne	Laval (Entrammes)	19	34
Meurthe-et-Moselle	Nancy /Essey (Tomblaine)	18	34
Meuse	Nancy /Essey (Tomblaine)	18	34
Morbihan	Vannes (Séné)	19	32
Moselle	Metz/Frescaty (Augny)	19	34
Nièvre	Nevers (Marzy)	18	34
Nord	Lille (Lesquin)	18	33
Oise	Beauvais (Tille)	18	34
Orne	Alençon	18	34
Pas-de-Calais	Cambrai (Epinoy)	18	33
Puy-de-Dôme	Clermont-Ferrand	19	34
Pyrénées-Atlantiques	Pau (uzerche)	20	34
Hautes-Pyrénées	Tarbes (Ossun)	19	34
Pyrénées-Orientales	Perpignan	23	35
Bas-Rhin	Strasbourg (Entzheim)	19	34
Haut-Rhin	Colmar (Meyenheim)	19	35
Rhône	Lyon (Bron)	20	34
Haute-Saône	Luxeuil (Saint-Sauveur)	18	34
Saône-et-Loire	Mâcon (Charnay-lès-Mâcon)	20	34
Sarthe	Le Mans	20	35
Savoie	Chambéry (Voglans)	19	34
Haute-Savoie	Chambéry (Voglans)	19	34
Paris	Paris/Montsouris	21	31
Seine-Maritime	Rouen (Boos)	19	33
Seine-et-Marne	Melun (Montereau-sur-le-Jard)	18	34
Yvelines	Trappes	20	33
Deux-Sèvres	Niort	20	35
Somme	Abbeville	18	33
Tarn	Albi (Le Sequestre)	21	36
Tarn-et-Garonne	Montauban	21	36
Var	Toulon	23	35
Vaucluse	Avignon	21	36
Vendée	La Roche-sur-Yon	20	34
Vienne	Poitiers (Biard)	19	35
Haute-Vienne	Limoges	20	34
Vosges	Epinal (Dogneville)	18	34
Yonne	Auxerre (Saint-Georges-sur-Baulche)	19	35
Territoire-de-Belfort	Belfort	18	33
Essonne	Paris/Orly	20	35
Hauts-de-Seine	Paris/Montsouris	21	31
Seine-Saint-Denis	Paris/Montsouris	21	31
Val-de-Marne	Paris/Montsouris	21	31
Val-d'Oise	Paris/Roissy	20	35

Annexe 2

Présentation du modèle TEB

Les paramètres descriptifs des surfaces urbaines et les variables du modèle TEB s'appuient en grande partie sur l'article de Valéry Masson (Masson 2000) et d'Aude Lemonsu (Lemonsu, 2003).

TEB définit la morphologie urbaine comme une surface découpée en maille. Chaque maille a ses caractéristiques s'appuyant sur le concept de canyon urbain. Ce canyon urbain est décrit par trois surfaces : toit, mur et routes.

Le modèle décrit cette géométrie par la définition de plusieurs paramètres (Fig. A.1) et variables (Fig. A.2)

Symbol	Designation of symbol	Unit
Geometric parameters		
a_{town}	Fractional area occupied by artificial material	–
a_{bld}	Fractional artificial area occupied by buildings	–
$1 - a_{\text{bld}}$	Fractional artificial area occupied by roads	–
h	Building height	m
h/l	Building aspect ratio	–
h/w	Canyon aspect ratio	–
$z_{0\text{town}}$	Dynamic roughness length for the building/canyon system	m
Radiative parameters		
$\alpha_R, \alpha_r, \alpha_w$	Roof, road and wall albedos	–
$\epsilon_R, \epsilon_r, \epsilon_w$	Roof, road and wall emissivities	–
Thermal parameters		
$d_{R_k}, d_{r_k}, d_{w_k}$	Thickness of the k th roof, road or wall layer	m
$\lambda_{R_k}, \lambda_{r_k}, \lambda_{w_k}$	Thermal conductivity of the k th roof, road or wall layer	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
$C_{R_k}, C_{r_k}, C_{w_k}$	Heat capacity of the k th roof, road or wall layer	$\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$

Figure A.1 : Les paramètres de surfaces (données entrées) du modèle TEB : paramètres géométriques, paramètres radiatifs et paramètres thermiques

Symbol	Designation of symbol	Unit
Prognostic variables		
T_{Rk}, T_{rk}, T_{wk}	Temperature of the k th roof, road or wall layer	K
W_R, W_r	Roof and road water interception reservoir	kg m^{-2}
$W_{\text{snow}_R}, W_{\text{snow}_r}$	Roof and road snow interception reservoir	kg m^{-2}
$T_{\text{snow}_R}, T_{\text{snow}_r}$	Roof and road snow temperature	K
$\rho_{\text{snow}_R}, \rho_{\text{snow}_r}$	Roof and road snow density	kg m^{-3}
$\alpha_{\text{snow}_R}, \alpha_{\text{snow}_r}$	Roof and road snow albedo	-
Diagnostic variables		
T_{can}	Canyon air temperature	K
q_{can}	Canyon air specific humidity	kg kg^{-1}
U_{can}	Along canyon horizontal wind	m s^{-1}
α_{town}	Town effective albedo	-
T_{town}	Town area averaged radiative surface temperature	K
Input energy fluxes		
L_{\downarrow}	Downward infrared radiation on an horizontal surface	W m^{-2}
S_{\downarrow}	Downward <i>diffuse</i> solar radiation on an horizontal surface	W m^{-2}
S_{\Downarrow}	Downward <i>direct</i> solar radiation on an horizontal surface	W m^{-2}
H_{traffic}	Anthropogenic sensible heat flux released in the canyon	W m^{-2}
LE_{traffic}	Anthropogenic latent heat flux released in the canyon	W m^{-2}
H_{industry}	Anthropogenic sensible heat flux released by industries	W m^{-2}
LE_{industry}	Anthropogenic latent heat flux released by industries	W m^{-2}
Other energy input		
T_{ibd}	Building interior temperature	K
Output energy fluxes		
S_R^*, S_r^*, S_w^*	Net solar radiation budget for roofs, roads and walls	W m^{-2}
L_R^*, L_r^*, L_w^*	Net infra-red radiation budget for roofs, roads and walls	W m^{-2}
H_R, H_r, H_w	Turbulent sensible heat flux for roofs, roads and walls	W m^{-2}
LE_R, LE_r, LE_w	Turbulent latent heat flux for roofs, roads and walls	W m^{-2}
$G_{R_{k,k+1}}, G_{r_{k,k+1}}, G_{w_{k,k+1}}$	Conduction heat flux between k th and $k + 1$ th roof, road or wall layers	W m^{-2}
H_{town}	Town averaged turbulent sensible heat flux	W m^{-2}
LE_{town}	Town averaged turbulent latent heat flux	W m^{-2}

Figure A.2 : Position des variables du modèle TEB et les flux: couches de températures pour les toits, rues, murs et réservoirs (eau et neige)

- Température de surface

Pour analyser au mieux les flux de conduction, chaque surface urbaine est constituée de plusieurs couches et l'évolution des températures est calculée pour chacune d'elles (Fig. A.3).

Annexe 2
Présentation du modèle TEB

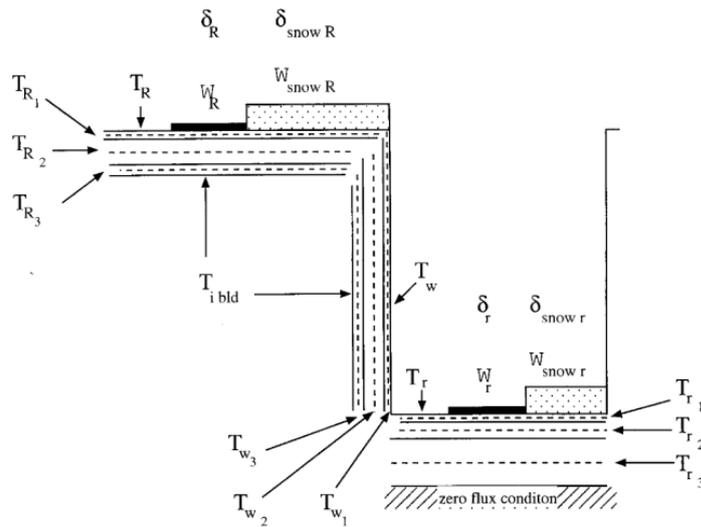


Figure A.3 : Description des variables de surfaces (toit, mur, route)

Les équations décrivant l'évolution des températures pour chacune des surfaces (route, toit et murs T_R , T_w et T_r) et pour chacune des couches (températures au centre de chaque couche surface et la couche avec l'indice 1 est celle étant en contact direct avec l'air) sont basées sur le bilan d'énergie. Les températures des autres couches évoluent selon une équation simple de conduction de la chaleur.

Plusieurs équations sont nécessaires pour connaître l'évolution des températures entre les différentes couches. Les flux sont mis en équation aussi. L'évaluation des flux transmis par conduction, dépend de la température interne des bâtiments $T_{i\text{bld}}$ (donnée fixée avant d'entamer les simulations), de la conductivité thermique de chaque couche et leurs épaisseurs.

- Le réservoir d'eau

La prise en compte, par le modèle TEB, des températures de surfaces rend plus aisé le calcul des flux de chaleur latente et l'humidité spécifique de saturation. Seules les surfaces toit et route sont associées à un bilan d'eau. Elles constituent une forme de réservoir. Les précipitations seront par la suite rejetées dans les égouts. Les routes et les toits peuvent être recouverts par une certaine quantité d'eau w et/ou par une certaine quantité de neige W_{snow} évoluant en fonction des apports et des pertes, selon une période spécifiée. La densité de neige, l'albédo et la température sont calculés indépendamment pour le toit et la route. La capacité maximale d'interception est fixée habituellement à $1\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (pour la route comme pour le toit). Les réservoirs se remplissent sous l'effet des précipitations (R) ou de la condensation. Tant que subsiste de l'eau sur la surface des toits ou du sol, et tant que l'humidité de l'air n'est pas saturé, il existe un processus d'évaporation jusqu'à épuisement de la fraction d'eau. De plus, la rosée urbaine est prise en compte (dans le cas de flux de chaleur latente) puisqu'elle peut avoir des effets significatifs quand les conditions physiques sont réunies⁹³) (Richards et Oke 1998).

⁹³ Humidité de l'air est plus importante que l'humidité de saturation de la surface

Concernant la neige, nous ne rentrerons pas dans les détails disponibles dans l'article de Masson (1999) mais il est important de savoir que la neige a un effet sur :

- le bilan d'énergie des surfaces,
 - Les flux de chaleur de la route vers le canyon ou du toit vers l'atmosphère,
 - Les calculs radiatifs pour les surfaces du canyon varient du fait de l'albédo de la neige, de son émissivité et de sa température.
- Les flux énergétiques

Pour simuler les échanges de chaleur et d'eau entre la surface urbaine et l'atmosphère, TEB établit un bilan radiatif (S et L les rayonnements de courtes et grandes longueurs d'onde) et énergétique pour chaque surface générique du canyon (toit, mur et route) et prend en compte, sous leurs formes latentes et sensibles, les rejets de chaleur anthropiques et industriels, s'ils sont connus. La prise en compte de la hauteur du bâtiment et la décomposition de la surface urbaine (route, toit et mur) permet d'évaluer le bilan des flux d'énergie et des flux dynamiques à l'intérieur des rues et donc de simuler les phénomènes physiques liés à l'échelle climatique locale. Les paramètres énergétiques et microclimatiques calculés par TEB sont présentés en figure A.2.

Le fonctionnement thermique d'un bâtiment générique est réalisé en établissant le bilan d'énergie des faces extérieures des deux parois (mur et toit) en tenant compte du rayonnement solaire et infrarouge (calculé en tenant compte d'une seule réflexion ; sinon la quantité d'énergie devient en effet très faible et peut être négligée dans le calcul (Lemonsu, 2003)).

Le rayonnement solaire incident comprend le rayonnement solaire direct et le rayonnement solaire diffus (s'exprimant à partir des facteurs vus du ciel). Pour estimer au mieux les flux solaires reçus par les murs et les routes, des calculs particuliers sont nécessaires du fait des effets d'ombre. Du fait des ombres portées, les murs et les sols des rues ne reçoivent les rayonnement solaires que sur une partie de leurs surfaces, alors que les toits reçoivent le même rayonnement que ceux reçus par une surface horizontale complètement dégagée (Fig. A.4).

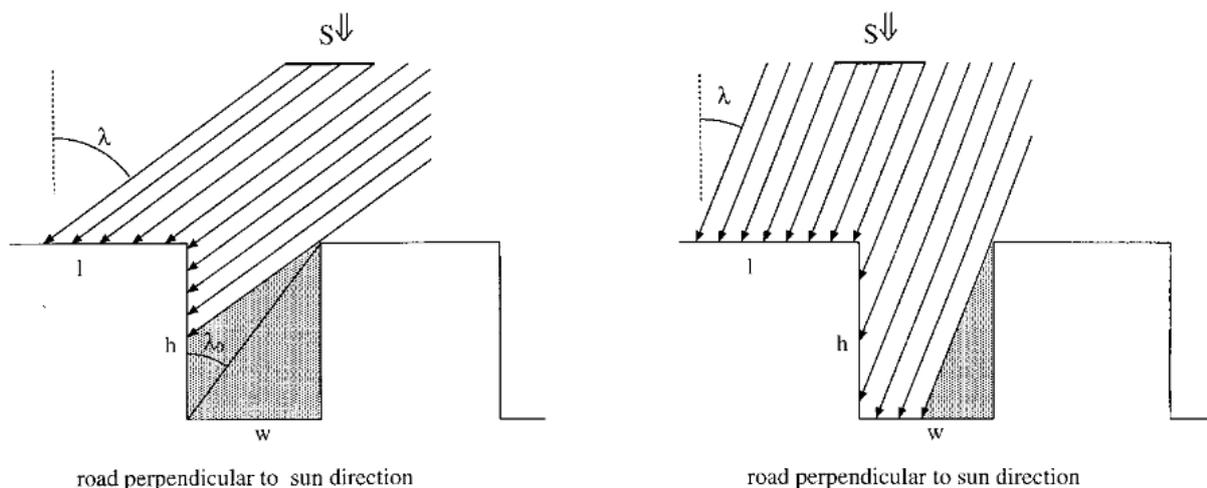


Figure A.4 : Le rayonnement solaire reçu dans une rue perpendiculaire à la direction du soleil (Masson 1999)

En considérant S_x^\downarrow comme étant le rayonnement solaire reçu par une surface horizontale, θ l'angle défini par les rayonnements directs et l'axe de la rue, λ l'angle zénithal à partir duquel le soleil illumine le sol de la rue permettent de calculer le rayonnement total. Ainsi, d'après Masson (2000), le rayonnement total absorbé par les différentes surfaces, s'exprime de la façon suivante :

$$S_r^* = (1 - \alpha_r)S_r^\downarrow + (1 - \alpha_r)S_r^\downarrow + (1 - \alpha_r)(1 - \psi_r)M_w$$

$$S_w^* = (1 - \alpha_w)S_w^\downarrow + (1 - \alpha_w)S_w^\downarrow + (1 - \alpha_w)(1 - 2\psi_w)M_w + (1 - \alpha_w)\psi_w M_r$$

$$S_R^* = (1 - \alpha_R)S_R^\downarrow + (1 - \alpha_R)S_R^\downarrow$$

Le caractère (*) remplace les représentations R, r ou w des différents types de surfaces toits, sols et murs.

S_x^\downarrow et S_x^\downarrow sont les rayonnements solaires directs et diffus reçus, sans réflexion préalable par les surfaces, M_x^{\uparrow} correspond au rayonnement solaire absorbé par les surfaces lors des réflexions sur la route et les murs et α_x sont les albédos des surfaces.

Ce bilan d'énergie permet de calculer la modification des températures internes des parois par conduction de chaleur. Sur les faces internes, les échanges avec l'air intérieur du bâtiment sont calculés à partir de la température interne du bâtiment.

- Les flux anthropogéniques

Les activités humaines dans la ville produisent une quantité considérable de chaleur et d'humidité (vapeur d'eau) se rajoutant aux sources naturelles. Les deux sources principales sont le chauffage des bâtiments et la combustion. En effet, le chauffage permet le maintien forcé d'une température constante à l'intérieur du bâtiment $T_{i,bld}$. La valeur par défaut prise en compte dans TEB est de 17°C soit 290,15K. Le flux de chaleur est alors transmis par conduction à travers les toits et les murs.

Si la chaleur produite par les chauffages est prise en compte dans TEB, les contributions de l'industrie et du trafic de véhicules sont introduits par les termes suivants ($H_{traffic}$ et $LE_{traffic}$, $H_{industry}$ et $LE_{industry}$, voir Fig. A.2). Les flux de chaleur et d'humidité diffèrent d'une ville à une autre, ainsi les flux anthropogéniques sont des paramètres sources ne dépendant pas des propriétés morphologiques des surfaces.

- Les flux turbulents

L'approche du schéma TEB est de supposer que le toit et le système canyon (issues de la couverture artificielle vers l'atmosphère) et entraîne deux flux de chaleur turbulents. Pour calculer ces flux, une moyenne est calculée en fonction de leur surface horizontale. De ces flux, les résistances aérodynamiques sont calculées pour connaître la chaleur emmagasinée par les surfaces bâties.

- Le vent dans le canyon

L'écoulement du vent est très important pour le calcul du transfert des flux entre l'air de la rue et les surfaces du sol et des murs. TEB définit ainsi la composante verticale de la vitesse du vent le long des murs W_{can} et sa composante horizontale C_{can} .

La vitesse verticale W_{can} le long des murs est supposée égale à la vitesse de frottement u_* . A partir de la littérature (masson 1999, p374) la formulation retenue de W_{can} est la suivante :

$$W_{can} = u_* = \sqrt{C_d |U_a|}$$

U_a représente la vitesse (au premier niveau atmosphérique du modèle) et C_d le coefficient de drainage de l'air. Il est calculé à partir des températures et humidités au-dessus, dans le canyon, et à partir de la longueur de rugosité : Z_{0town} .

Une approximation du vent au sommet du canyon peut être définie par un profil logarithmique. Elle est calculée à partir de la vitesse du vent au-dessus du canyon et par la hauteur de déplacement Zd (supposée égale à $2U_{top}/3$ de la hauteur de la rue à partir du sol). Après intégration sur 360° , pour pouvoir prendre en compte toutes les directions, le vent à l'altitude U_{top} est donné par :

$$U_{top} = \frac{2}{\pi} \frac{\ln\left(\frac{h/3}{z_{0town}}\right)}{\ln} |U_a|$$

Où Δ_z est la hauteur de la canopée urbaine au-dessus des toits.

De plus, Masson V, précise qu'à l'intérieur du canyon la composante horizontale du vent suit un profil exponentiel (Arya 1988).

La longueur de rugosité est définie par une approximation à partir de travaux divers (Bottema 1997).

- Flux de chaleur entre l'air du canyon et l'atmosphère

Ces flux turbulents sont déterminés à partir du système de résistances aérodynamiques (RES calculé selon la longueur de rugosité) et des différences de températures et d'humidité entre les parois.

- Flux de chaleur latente et sensible dans la rue

Des formulations aérodynamiques sont utilisées à partir de la littérature pour définir les échanges entre les surfaces composant la rue et l'air (Mills, 1993).

Les flux de chaleur latente des murs sont toujours nuls parce que TEB fait l'hypothèse que ces surfaces n'interceptent pas les précipitations. Les flux de chaleur sensible dépendent de 4 paramètres : H_r , H_w , LE_r , LE_w .

- Les flux à l'échelle de la ville

Pour obtenir un flux moyen à l'échelle de la ville, il faut tout d'abord calculer différents flux turbulents :

- Les flux turbulents entre les parois et l'air du canyon

Annexe 2

Présentation du modèle TEB

- Les flux turbulents entre l'air du canyon et l'atmosphère (au-dessus de la canopée urbaine)
- Les flux turbulents entre les toits et l'atmosphère

Le mélange des différentes sources de flux turbulents de chaleur produit des flux représentatifs de la partie supérieure de la couche de surface, au-dessus de la sous-couche de rugosité. Les flux liés à l'activité industrielle sont ajoutés à partir de ce calcul.

- Température et humidité dans la rue

Le calcul des flux de chaleurs latentes et sensibles au-dessus de la rue, de même que la température moyenne et l'humidité de l'air de la rue intègrent l'ensemble des flux anthropogéniques. Ainsi, la température de l'air au milieu du canyon correspond à des contributions en énergie des parois du canyon et de l'atmosphère au-dessus de la canopée urbaine.

$$H_{\text{top}} = (1 - \delta_{\text{snowr}})H_r + \frac{2h}{w}H_w + H_{\text{traffic}} \frac{1}{1 - a_{\text{bld}}} + \delta_{\text{snowr}}H_{\text{snowr}}$$

$$LE_{\text{top}} = (1 - \delta_{\text{snowr}})LE_r + LE_{\text{traffic}} \frac{1}{1 - a_{\text{bld}}} + \delta_{\text{snow}}H_{\text{snow}}$$

Ces valeurs peuvent être considérées comme des résultats, des sorties d'une prévision météorologique.

Annexe 3

Propriétés des équipements (pour tous les types de bâtiment) : utilisées pour les projets MUSCADE et ACCLIMAT

Annexe 3

Propriétés des équipements (pour tous les types de bâtiment) : utilisées pour les projets MUSCADE et ACCLIMAT

Annexes PROPRIETES DES EQUIPEMENTS LIEES AUX BATIMENTS - PROJETS MUSCADE & ACCLIMAT									certaines valeurs sont fictives (non utilisées mais renseignées pour respecter une cohérence numérique)				
Proprietes non liees a l'age des batiments									Actuel	Fil de l'eau	Vertueux	HYP4	HYP5
Element (1)	Type de batiments	N° type bat	Type d'usage	N° type usage	Element (2)	Parametre	unite	Parametre - Unite	1	2	3	4	5
EQUIPEMENT	Ancien_Haussmann	1			Chauffage	Taux de rejets en toitures	%	Taux de rejets en toitures (%)	100	100	100	-999	
EQUIPEMENT	Ancien_Haussmann	1			Climatisation	Taux de rejets en toitures	%	Taux de rejets en toitures (%)	100	100	100	-999	
EQUIPEMENT	Ancien_Haussmann	1			Climatisation	Taux de rejets secs	%	Taux de rejets secs (%)	100	100	100	100	
EQUIPEMENT	Ancien_Haussmann	1			Infiltration	Taux de renouvellement d'air	vol.interieur.h-1	Taux de renouvellement d'air (vol.interieur.h-1)	0,14	0,05	0	-999	
EQUIPEMENT	Ancien_Haussmann	1			Panneau solaire	Surface des panneaux / surface du toit	%	Surface des panneaux / surface du toit (%)	0	0	19	-999	
REGLEMENTATION	Ancien_Haussmann	1			Reglementations	Temps de penetration	Annees	Temps de penetration (Annees)	120	120	60	200	
EQUIPEMENT	Ancien_Haussmann	1			Toits vegetalises	Implantation	0=non 1=oui	Implantation (0=non 1=oui)	0	0	0	0	
EQUIPEMENT	Ancien_Haussmann	1			Ventilation Mecanique Controlee	Taux de renouvellement d'air	vol.interieur.h-1	Taux de renouvellement d'air (vol.interieur.h-1)	0,65	0,65	0,7	-999	
USAGE			Bureau	2	Apports internes	Flux	W.m-2 plancher	Flux (W.m-2 plancher)	14	14	14	-999	
USAGE			Bureau	2	Apports internes	Fraction latente	%	Fraction latente (%)	10	10	10	-999	
USAGE			Bureau	2	Chauffage	Temp. de consigne	DegC	Temp. de consigne (DegC)	21	21	19	-999	
USAGE			Bureau	2	Climatisation	Temp. de consigne	DegC	Temp. de consigne (DegC)	23	23	26	60	
USAGE			Bureau	2	Protection solaire	Active	0=non 1=oui	Active (0=non 1=oui)	0	0	1	0	
USAGE			Bureau	2	Protection solaire	Facteur solaire m	-	Facteur solaire m (-)	0,12	0,12	0,12	0	
USAGE			Bureau	2	Sur-ventilation	Taux de renouvellement d'air	vol.interieur.h-1	Taux de renouvellement d'air (vol.interieur.h-1)	5	5	5	-999	
USAGE			Bureau	2	Sur-ventilation	Type d'ouverture	0=aucune 1=nat+manu 2=nat+auto 3=meca+auto	Type d'ouverture (0=aucune 1=nat+manu 2=nat+auto 3=meca+auto)	0	0	3	0	
EQUIPEMENT	Collectif	3			Chauffage	Taux de rejets en toitures	%	Taux de rejets en toitures (%)	100	100	100	-999	
EQUIPEMENT	Collectif	3			Climatisation	Taux de rejets en toitures	%	Taux de rejets en toitures (%)	50	50	50	-999	
EQUIPEMENT	Collectif	3			Climatisation	Taux de rejets secs	%	Taux de rejets secs (%)	25	25	25	100	
EQUIPEMENT	Collectif	3			Infiltration	Taux de renouvellement d'air	vol.interieur.h-1	Taux de renouvellement d'air (vol.interieur.h-1)	0,05	0,05	0	-999	
EQUIPEMENT	Collectif	3			Panneau solaire	Surface des panneaux / surface du toit	%	Surface des panneaux / surface du toit (%)	0	0	50	-999	
REGLEMENTATION	Collectif	3			Reglementations	Temps de penetration	Annees	Temps de penetration (Annees)	80	80	40	200	
EQUIPEMENT	Collectif	3			Toits vegetalises	Implantation	0=non 1=oui	Implantation (0=non 1=oui)	0	0	1	1	
EQUIPEMENT	Collectif	3			Ventilation Mecanique Controlee	Taux de renouvellement d'air	vol.interieur.h-1	Taux de renouvellement d'air (vol.interieur.h-1)	0,65	0,65	0,7	-999	

USAGE			Commercial	4	Apports internes	Flux	W.m-2 plancher	Flux (W.m-2 plancher)	14	14	14	-999	
USAGE			Commercial	4	Apports internes	Fraction latente	%	Fraction latente (%)	10	10	10	-999	
USAGE			Commercial	4	Chauffage	Temp. de consigne	DegC	Temp. de consigne (DegC)	21	21	19	-999	
USAGE			Commercial	4	Climatisation	Temp. de consigne	DegC	Temp. de consigne (DegC)	23	23	26	60	
USAGE			Commercial	4	Protection solaire	Active	0=non 1=oui	Active (0=non 1=oui)	0	0	0	0	
USAGE			Commercial	4	Protection solaire	Facteur solaire m	-	Facteur solaire m (-)	0	0	0	0	
USAGE			Commercial	4	Sur-ventilation	Taux de renouvellement d'air	vol.interieur.h-1	Taux de renouvellement d'air (vol.interieur.h-1)	5	5	5	-999	
USAGE			Commercial	4	Sur-ventilation	Type d'ouverture	0=aucune 1=nat+manu 2=nat+auto 3=meca+auto	Type d'ouverture (0=aucune 1=nat+manu 2=nat+auto 3=meca+auto)	0	0	3	0	
EQUIPEMENT	Hangar	5			Chauffage	Taux de rejets en toitures	%	Taux de rejets en toitures (%)	100	100	100	-999	
EQUIPEMENT	Hangar	5			Climatisation	Taux de rejets en toitures	%	Taux de rejets en toitures (%)	100	100	100	-999	
EQUIPEMENT	Hangar	5			Climatisation	Taux de rejets secs	%	Taux de rejets secs (%)	25	25	25	100	
EQUIPEMENT	Hangar	5			Infiltration	Taux de renouvellement d'air	vol.interieur.h-1	Taux de renouvellement d'air (vol.interieur.h-1)	0,05	0,05	0	-999	
EQUIPEMENT	Hangar	5			Panneau solaire	Surface des panneaux / surface du toit	%	Surface des panneaux / surface du toit (%)	0	0	50	-999	
REGLEMENTATION	Hangar	5			Reglementations	Temps de penetration	Annees	Temps de penetration (Annees)	30	30	15	200	
EQUIPEMENT	Hangar	5			Toits vegetalises	Implantation	0=non 1=oui	Implantation (0=non 1=oui)	0	0	0	1	
EQUIPEMENT	Hangar	5			Ventilation Mecanique Controlee	Taux de renouvellement d'air	vol.interieur.h-1	Taux de renouvellement d'air (vol.interieur.h-1)	0,65	0,65	0,7	-999	
EQUIPEMENT	Individuel	2			Chauffage	Taux de rejets en toitures	%	Taux de rejets en toitures (%)	100	100	100	-999	
EQUIPEMENT	Individuel	2			Climatisation	Taux de rejets en toitures	%	Taux de rejets en toitures (%)	0	0	0	-999	
EQUIPEMENT	Ancien_Haussmann	1			Climatisation	Taux d'equipement en ilot majoritairement residentiel	%	Taux d'equipement en ilot majoritairement residentiel (%)	22	100	100	100	
EQUIPEMENT	Individuel	2			Climatisation	Taux d'equipement en ilot majoritairement residentiel	%	Taux d'equipement en ilot majoritairement residentiel (%)	10	100	100	100	
EQUIPEMENT	Collectif	3			Climatisation	Taux d'equipement en ilot majoritairement residentiel	%	Taux d'equipement en ilot majoritairement residentiel (%)	22	100	100	100	
EQUIPEMENT	Tour Bureau	4			Climatisation	Taux d'equipement en ilot majoritairement residentiel	%	Taux d'equipement en ilot majoritairement residentiel (%)	100	100	100	100	
EQUIPEMENT	Ancien_Brique	6			Climatisation	Taux d'equipement en ilot majoritairement residentiel	%	Taux d'equipement en ilot majoritairement residentiel (%)	22	100	100	100	
EQUIPEMENT	Hangar	5			Climatisation	Taux d'equipement en ilot majoritairement residentiel	%	Taux d'equipement en ilot majoritairement residentiel (%)	0	100	100	100	
EQUIPEMENT	Individuel	2			Climatisation	Taux de rejets secs	%	Taux de rejets secs (%)	100	100	100	100	
EQUIPEMENT	Individuel	2			Infiltration	Taux de renouvellement d'air	vol.interieur.h-1	Taux de renouvellement d'air (vol.interieur.h-1)	0,05	0,05	0	-999	
EQUIPEMENT	Individuel	2			Panneau solaire	Surface des panneaux / surface du toit	%	Surface des panneaux / surface du toit (%)	0	0	19	-999	
REGLEMENTATION	Individuel	2			Reglementations	Temps de penetration	Annees	Temps de penetration (Annees)	80	80	40	200	
EQUIPEMENT	Individuel	2			Toits vegetalises	Implantation	0=non 1=oui	Implantation (0=non 1=oui)	0	0	0	1	
EQUIPEMENT	Individuel	2			Ventilation Mecanique Controlee	Taux de renouvellement d'air	vol.interieur.h-1	Taux de renouvellement d'air (vol.interieur.h-1)	0,65	0,65	0,7	-999	

USAGE			Industriel	3	Apports internes	Flux	W.m-2 plancher	Flux (W.m-2 plancher)	14	14	14	-999	
USAGE			Industriel	3	Apports internes	Fraction latente	%	Fraction latente (%)	10	10	10	-999	
USAGE			Industriel	3	Chauffage	Temp. de consigne	DegC	Temp. de consigne (DegC)	-20	-20	-20	-999	
USAGE			Industriel	3	Climatisation	Temp. de consigne	DegC	Temp. de consigne (DegC)	60	60	60	60	
USAGE			Industriel	3	Protection solaire	Active	0=non 1=oui	Active (0=non 1=oui)	0	0	0	0	
USAGE			Industriel	3	Protection solaire	Facteur solaire m	-	Facteur solaire m (-)	0	0	0	0	
USAGE			Industriel	3	Sur-ventilation	Taux de renouvellement d'air	vol.interieur.h-1	Taux de renouvellement d'air (vol.interieur.h-1)	5	5	5	-999	
USAGE			Industriel	3	Sur-ventilation	Type d'ouverture	0=aucune 1=nat+manu 2=nat+auto 3=meca+auto	Type d'ouverture (0=aucune 1=nat+manu 2=nat+auto 3=meca+auto)	0	0	0	0	
USAGE			Residentiel	1	Apports internes	Flux	W.m-2 plancher	Flux (W.m-2 plancher)	5	5	5	-999	
USAGE			Residentiel	1	Apports internes	Fraction latente	%	Fraction latente (%)	20	20	20	-999	
USAGE			Residentiel	1	Chauffage	Temp. de consigne	DegC	Temp. de consigne (DegC)	21	21	19	-999	
USAGE			Residentiel	1	Climatisation	Temp. de consigne	DegC	Temp. de consigne (DegC)	23	23	26	60	
USAGE			Residentiel	1	Protection solaire	Active	0=non 1=oui	Active (0=non 1=oui)	1	1	1	0	
USAGE			Residentiel	1	Protection solaire	Facteur solaire m	-	Facteur solaire m (-)	0,025	0,025	0,025	0	
USAGE			Residentiel	1	Sur-ventilation	Taux de renouvellement d'air	vol.interieur.h-1	Taux de renouvellement d'air (vol.interieur.h-1)	0	0	0	-999	
USAGE			Residentiel	1	Sur-ventilation	Type d'ouverture	0=aucune 1=nat+manu 2=nat+auto 3=meca+auto	Type d'ouverture (0=aucune 1=nat+manu 2=nat+auto 3=meca+auto)	1	1	2	0	
EQUIPEMENT	Tour Bureau	4			Chauffage	Taux de rejets en toitures	%	Taux de rejets en toitures (%)	100	100	100	-999	
EQUIPEMENT	Tour Bureau	4			Climatisation	Taux de rejets en toitures	%	Taux de rejets en toitures (%)	100	100	100	-999	
EQUIPEMENT	Tour Bureau	4			Climatisation	Taux de rejets secs	%	Taux de rejets secs (%)	25	25	25	100	
EQUIPEMENT	Tour Bureau	4			Infiltration	Taux de renouvellement d'air	vol.interieur.h-1	Taux de renouvellement d'air (vol.interieur.h-1)	0,05	0,05	0	-999	
EQUIPEMENT	Tour Bureau	4			Panneau solaire	Surface des panneaux / surface du toit	%	Surface des panneaux / surface du toit (%)	0	0	50	-999	
REGLEMENTATION	Tour Bureau	4			Reglementations	Temps de penetration	Annees	Temps de penetration (Annees)	30	30	15	200	
EQUIPEMENT	Tour Bureau	4			Toits vegetalises	Implantation	0=non 1=oui	Implantation (0=non 1=oui)	0	0	0	0	
EQUIPEMENT	Tour Bureau	4			Ventilation Mecanique Controlee	Taux de renouvellement d'air	vol.interieur.h-1	Taux de renouvellement d'air (vol.interieur.h-1)	0,65	0,65	0,7	-999	
EQUIPEMENT	Tous batiments	99			Climatisation	Performance (COP)	-	Performance (COP) (-)	2,5	5	5	-999	
EQUIPEMENT	Tous batiments	99			Panneau solaire	Coefficient d'absorption	[1]	Coefficient d'absorption ([1])	0,9	0,9	0,9	-999	
EQUIPEMENT	Tous batiments	99			Panneau solaire	Emissivite	[1]	Emissivite ([1])	0,9	0,9	0,9	-999	
EQUIPEMENT	Tous batiments	99			Panneau solaire	Rendement	%	Rendement (%)	14	14	18	-999	
ENERGIE	Tous batiments	99			Source = Combustible Fossile	Efficacite energetique	[1]	Efficacite energetique ([1])	0,8	0,8	0,8	-999	
ENERGIE	Tous batiments	99			Source = Combustible Fossile	Emissions de CO2	Kg eq CO2/KWh d_energie finale	Emissions de CO2 (Kg eq CO2/KWh d_energie finale)	0,234	0,234	0,021	-999	
ENERGIE	Tous batiments	99			Source = Electricite Nucleaire	Efficacite energetique	[1]	Efficacite energetique ([1])	1	1	1	-999	
ENERGIE	Tous batiments	99			Source = Electricite Nucleaire	Emissions de CO2	Kg eq CO2/KWh d_energie finale	Emissions de CO2 (Kg eq CO2/KWh d_energie finale)	0,037	0,037	0,022	-999	

EQUIPEMENT	Ancien_Brique	6			Chauffage	Taux de rejets en toitures	%	Taux de rejets en toitures (%)	100	100	100	-999	
EQUIPEMENT	Ancien_Brique	6			Climatisation	Taux de rejets en toitures	%	Taux de rejets en toitures (%)	100	100	100	-999	
EQUIPEMENT	Ancien_Brique	6			Climatisation	Taux de rejets secs	%	Taux de rejets secs (%)	100	100	100	100	
EQUIPEMENT	Ancien_Brique	6			Infiltration	Taux de renouvellement d'air	vol.interieur.h-1	Taux de renouvellement d'air (vol.interieur.h-1)	0,14	0,05	0	-999	
EQUIPEMENT	Ancien_Brique	6			Panneau solaire	Surface des panneaux / surface du toit	%	Surface des panneaux / surface du toit (%)	0	0	19	-999	
REGLEMENTATION	Ancien_Brique	6			Reglementations	Temps de penetration	Annees	Temps de penetration (Annees)	120	120	60	200	
EQUIPEMENT	Ancien_Brique	6			Toits vegetalises	Implantation	0=non 1=oui	Implantation (0=non 1=oui)	0	0	0	0	
EQUIPEMENT	Ancien_Brique	6			Ventilation Mecanique Controlee	Taux de renouvellement d'air	vol.interieur.h-1	Taux de renouvellement d'air (vol.interieur.h-1)	0,65	0,65	0,7	-999	
USAGE			Agricole	5	Apports internes	Flux	W.m-2 plancher	Flux (W.m-2 plancher)	14	14	14	-999	
USAGE			Agricole	5	Apports internes	Fraction latente	%	Fraction latente (%)	10	10	10	-999	
USAGE			Agricole	5	Chauffage	Temp. de consigne	DegC	Temp. de consigne (DegC)	-20	-20	-20	-999	
USAGE			Agricole	5	Climatisation	Temp. de consigne	DegC	Temp. de consigne (DegC)	60	60	60	60	
USAGE			Agricole	5	Protection solaire	Active	0=non 1=oui	Active (0=non 1=oui)	0	0	0	0	
USAGE			Agricole	5	Protection solaire	Facteur solaire m	-	Facteur solaire m (-)	0	0	0	0	
USAGE			Agricole	5	Sur-ventilation	Taux de renouvellement d'air	vol.interieur.h-1	Taux de renouvellement d'air (vol.interieur.h-1)	5	5	5	-999	
USAGE			Agricole	5	Sur-ventilation	Type d'ouverture	0=aucune 1=nat+manu 2=nat+auto 3=meca+auto	Type d'ouverture (0=aucune 1=nat+manu 2=nat+auto 3=meca+auto)	0	0	0	0	

Annexe 4

Segmentation des températures intérieures pour le mois de juillet 2015

Lorsque l'on travaille sur des séries temporelles, l'analyse la plus intuitive consiste à découper la série temporelle en segments « homogènes ». Cette homogénéité peut provenir de la moyenne ou de la variance. Pour réaliser la segmentation ou la détection automatique de ruptures dans un signal l'outil R est utilisé avec le package *changepoint* de Killick et Eckley(2011)⁹⁴. On se base sur la courbe de la moyenne des températures.

La segmentation se base sur la moyenne. Pour paramétrer notre fonction, nous avons réalisé différents test faisant varier l'algorithme, le type de pénalité ou bien même la valeur de la pénalité. Pour choisir cet algorithme nous nous sommes basé sur des critères empiriques. Nous avons choisi la méthode donnant les résultats les plus exploitables. Leviandier *et al.*, en 2012⁹⁵ se sont penchés sur la question à savoir déterminer la meilleure méthode en utilisant de multiples critères.

Après ces différents tests, nous nous basons sur l'algorithme PELT avec une pénalité de $5 \cdot \log(n)$ (Fig. A.5).

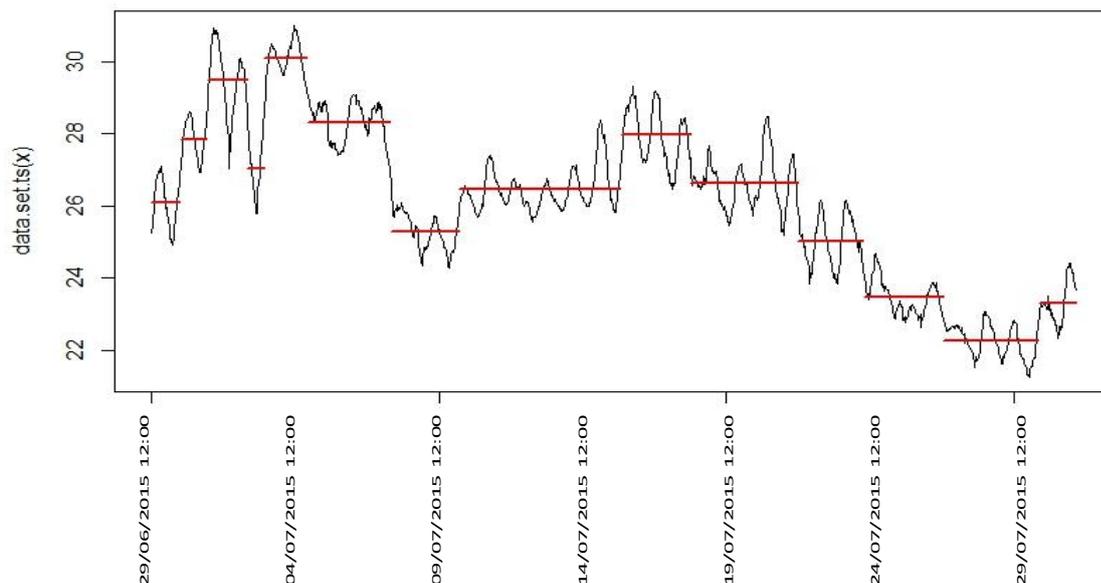


Figure A.5 : Segmentation des températures intérieures avec une pénalité de $5 \cdot \log(n)$

L'homogénéité en moyenne segmente notre période d'étude en 14 phases. Cette segmentation, certes juste reste trop détaillée pour notre série temporelle. La pénalité est revue avec $15 \cdot \log(n)$ (Fig. A.6).

⁹⁴ Killick R. et Eckley A.. 2011. *changepoint*: An R Package for Changepoint Analysis. <http://CRAN.R-project.org/package=changepoint>.

⁹⁵ Leviandier, Thierry, A. Alber, F. Le Ber, and H. Piégay. 2012. Comparison of Statistical Algorithms for Detecting Homogeneous River Reaches Along a Longitudinal Continuum. *Geomorphology*, vol 138, p. 130-144.

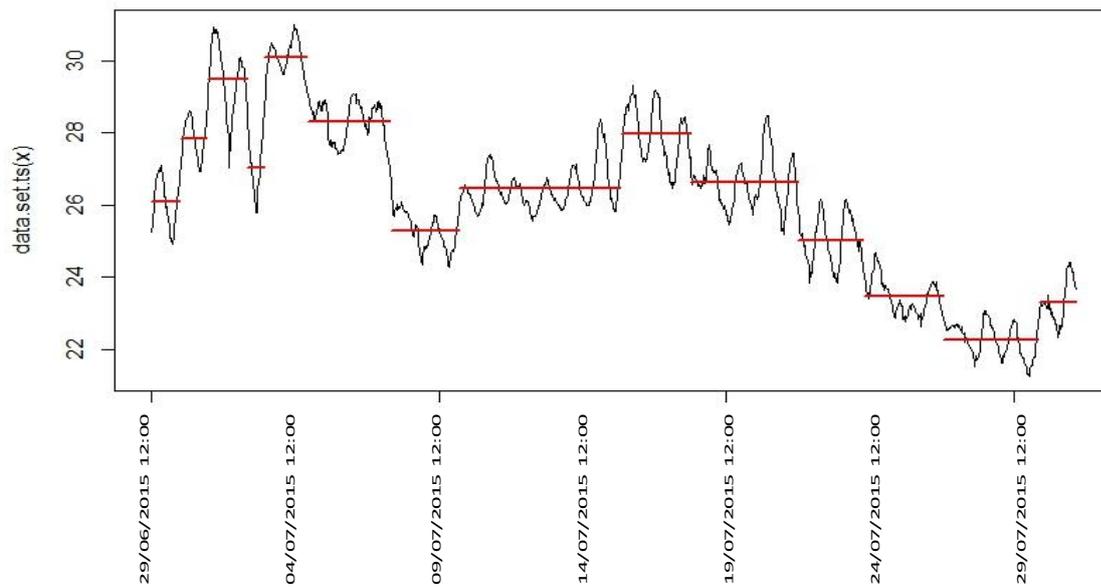


Figure A.6 : Segmentation des températures intérieures avec une pénalité de $15 \cdot \log(n)$

Cette nouvelle segmentation permet une meilleure analyse puisque la période se divise en 6 phases. Pour faciliter l'analyse de notre étude, nous regroupons les phases 1 et 2.

Les périodes se divisent comme suit :

- 29 juin au 7 juillet
- 8 au 14 juillet
- 15 au 20 juillet
- 21 au 23 juillet
- 24 juillet au 1^{er} août

Annexe 5

Ecart Min Max Des Températures Intérieures

Les écarts à la moyenne à chaque instant nous permettent d'identifier les capteurs atypiques et affiner notre analyse sur les pièces dans lesquelles sont les capteurs (Fig. A.7).

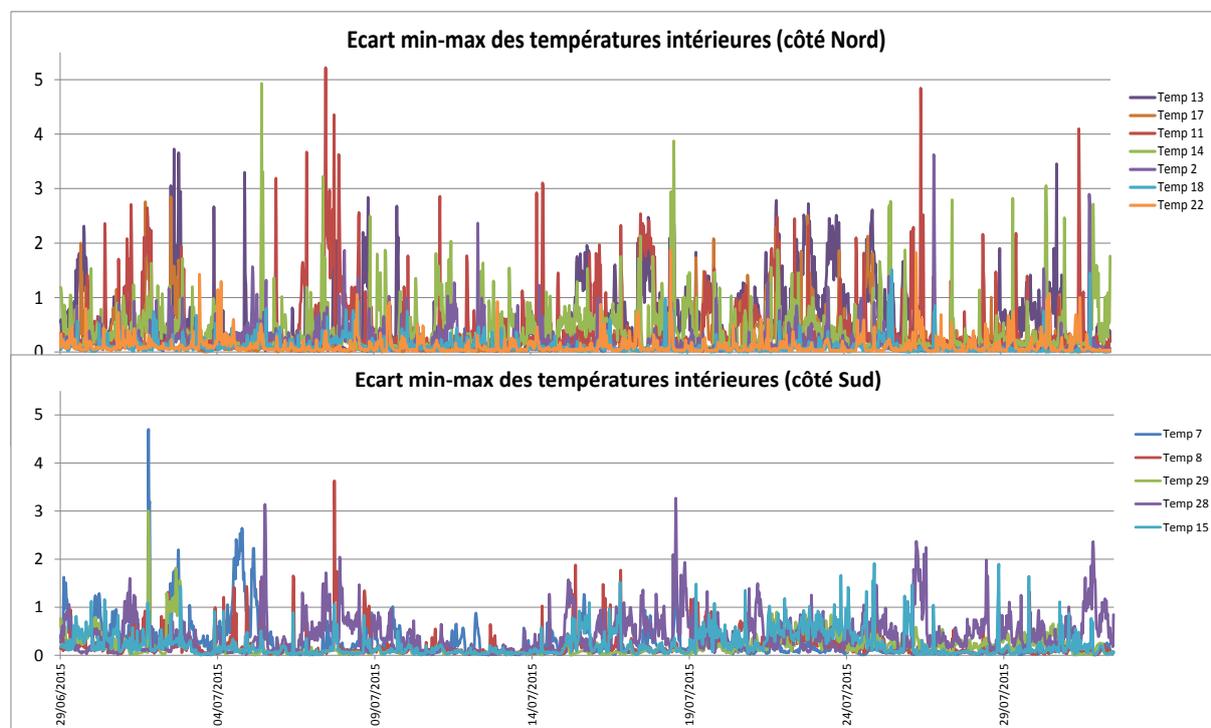


Figure A.7: Ecart min-max des températures intérieures côté Nord (haut) et côté Sud (bas) pour juillet 2015

De ces écarts, on remarque la forte différence entre les températures côté Nord et les températures côté Sud. L'étendue est bien plus importante au Nord qu'au Sud avec des écarts de plus de 3°C (pour les capteurs 11, 13 et 14) et une majorité de données supérieures à 1.5°C contre moins de 1°C côté Sud (Tab. 1).

Le capteur 7 (7^{ème} étage, appartement A) enregistre le plus grand "pic" d'écart mais c'est le capteur 28 qui a la plus grande dispersion de températures, côté Sud. Le capteur 28 (3^{ème} étage, côté Sud) n'enregistre jamais de très grands écarts min-max mais les températures de ce capteur fluctuent énormément. On peut déduire que l'air se refroidit un peu plus vite au Nord qu'au Sud puisque les températures se refroidissent et se réchauffent avec une plus grande intensité de ce côté que de l'autre. Il sera important de compléter cette analyse par une étude logement par logement pour le confirmer.

Côté Nord, les capteurs 22 et 18 (3^{ème} étage, côté Nord) ont des écarts min-max faibles. Leurs écarts moyens sont de 0,1°C. Le capteur 2, très similaire au capteur 18 voit son écart à la moyenne plus important avec 0,2°C de différence. Ces deux capteurs, 2 et 18, enregistrent les moyennes maximales les plus importantes avec 27,6°C et 26,7°C. Ils ont été placés dans le même appartement. Une analyse plus poussée sur ce logement nous permettra d'expliquer la raison de ces valeurs très élevées.

Capteurs	Côté Nord							Côté Sud				
	13 (6 ^{ème})	17 (6 ^{ème})	11 (4 ^{ème})	22 (RDC)	14 (6 ^{ème})	18 (3 ^{ème})	2 (3 ^{ème})	8 (6 ^{ème})	15 (6 ^{ème})	29 (7 ^{ème})	7 (7 ^{ème})	28 (3 ^{ème})
Temp moy max ⁹⁶ (°C)	25,68	26,11	25,57	24,50	27,19	27,62	27,66	26,00	25,95	26,85	26,54	24,99
Temp moy min ⁹⁷ (°C)	25,16	25,90	25,13	24,39	26,78	27,52	27,48	25,80	25,72	26,66	26,27	24,58
Moy Ecart (min-max)	0,52	0,21	0,45	0,11	0,41	0,10	0,19	0,20	0,22	0,19	0,27	0,41
Temp moy (°C)	25,44	26,01	25,35	24,44	27	27,57	27,57	25,9	25,84	26,76	26,42	24,79

Tableau 1 : Moyenne des écarts min-max entre les capteurs

⁹⁶ Température moyenne maximale : moyenne des températures maximales enregistrées sur toute la période de test, juillet 2015.

⁹⁷ Température moyenne minimale : moyenne des températures minimales enregistrées sur toute la période de test, juillet 2015.

Annexe 6

Segmentation des températures extérieures pour le mois de juillet 2015

Lorsque l'on travaille sur des séries temporelles, l'analyse la plus intuitive consiste à découper la série temporelle en segments « homogènes ». Cette homogénéité peut provenir de la moyenne ou de la variance. Pour réaliser la segmentation ou la détection automatique de ruptures dans un signal l'outil R est utilisé avec le package *changepoint* de Killick et Eckley(2011)⁹⁸. On se base sur la courbe de la moyenne des températures.

La segmentation se base sur la moyenne. Pour paramétrer notre fonction, nous avons réalisé différents test faisant varier l'algorithme, le type de pénalité ou bien même la valeur de la pénalité. Pour choisir cet algorithme nous nous sommes basé sur des critères empiriques. Nous avons choisi la méthode donnant les résultats les plus exploitables. Leviandier *et al.*, en 2012⁹⁹ se sont penchés sur la question à savoir déterminer la meilleure méthode en utilisant de multiples critères.

Après ces différents tests, nous nous basons sur l'algorithme PELT avec une pénalité de $15 \cdot \log(n)$ (Fig. A.8). Même pénalité que pour les températures intérieures

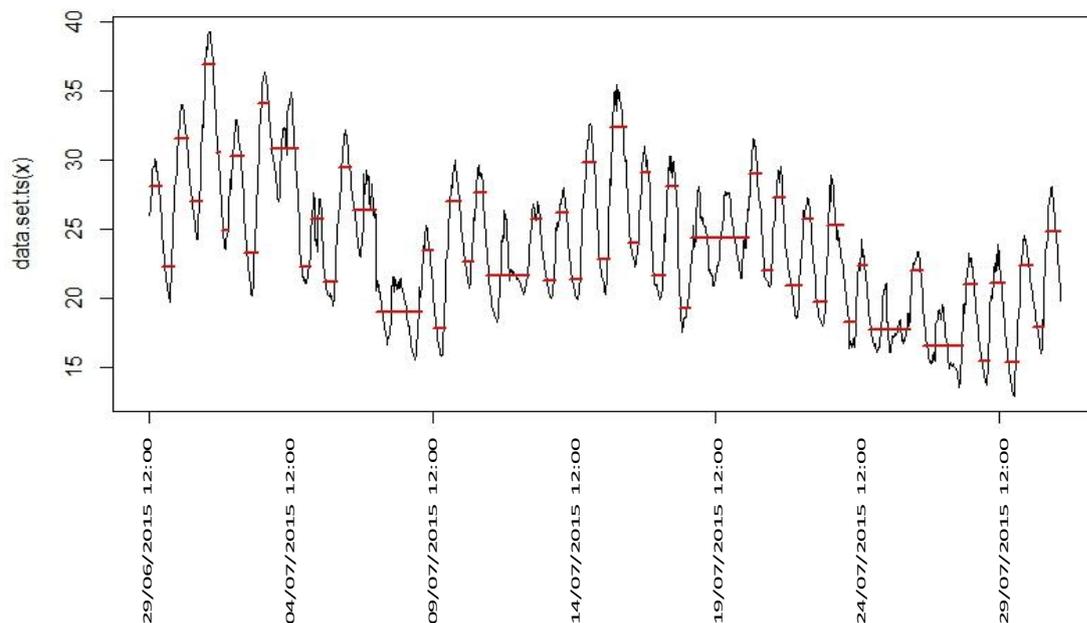


Figure A.8 : Segmentation des températures intérieures avec une pénalité de $15 \cdot \log(n)$

⁹⁸ Killick R. et Eckley A.. 2011. *changepoint*: An R Package for Changepoint Analysis. <http://CRAN.R-project.org/package=changepoint>.

⁹⁹ Leviandier, Thierry, A. Alber, F. Le Ber, and H. Piégay. 2012. Comparison of Statistical Algorithms for Detecting Homogeneous River Reaches Along a Longitudinal Continuum. *Geomorphology*, vol 138, p. 130-144.

L'homogénéité en moyenne segmente notre période d'étude en multitude de phases. Cette segmentation, certes juste reste vraiment trop détaillée pour notre série temporelle. La pénalité est revue avec $150 \cdot \log(n)$ (Fig. A.9).

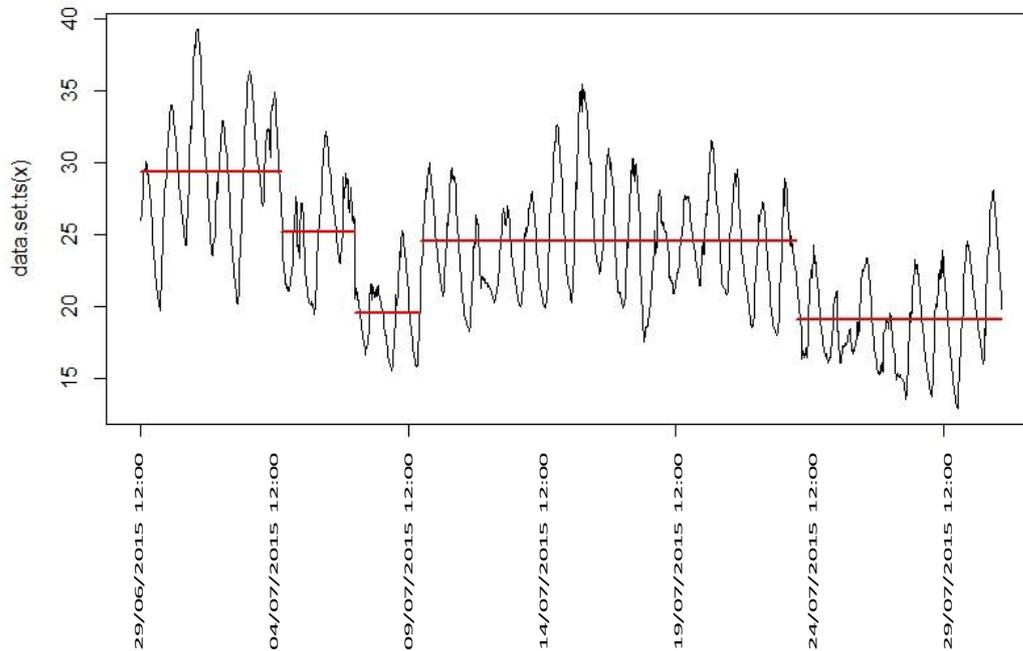


Figure A.9 : Segmentation des températures intérieures avec une pénalité de $150 \cdot \log(n)$

Cette nouvelle segmentation permet une meilleure analyse puisque la période se divise en 5 phases.

Les périodes se divisent comme suit :

- 29 juin au 4 juillet
- 5 au 7 juillet
- 8 au 10 juillet
- 11 au 24 juillet
- 25 juillet au 1^{er} août

Annexe 7

Analyse jour et nuit et écart à la moyenne des températures extérieures

Les écarts à la moyenne nous permettent de mettre en avant les capteurs atypiques et affiner notre analyse sur l'orientation des capteurs (Fig.A.10)

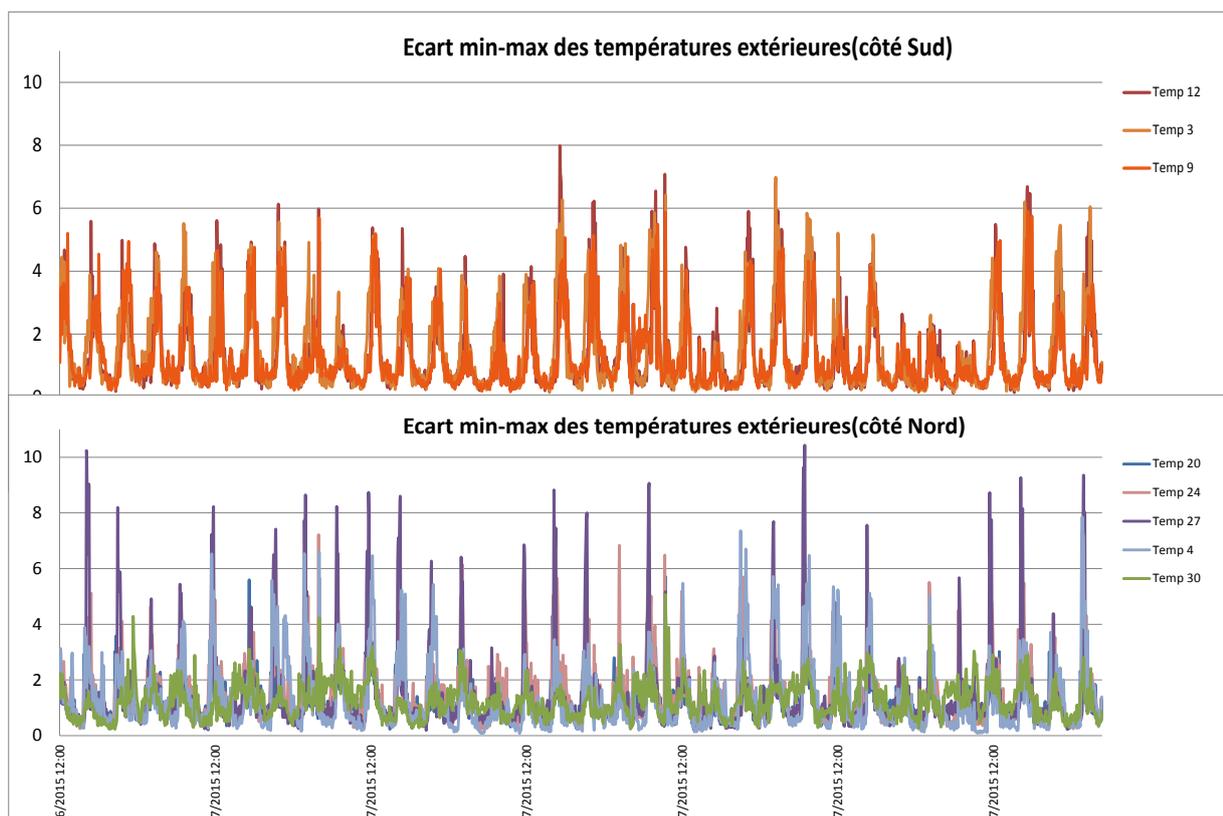


Figure A.10 : Ecarts min-max des températures intérieures côté Nord (haut) et côté Sud (bas) pour juillet 2015

Tout comme pour les températures intérieures, on constate que les écarts min-max sont nettement plus importants côté Nord que côté Sud.

Une forte dispersion des températures est notée côté Nord puisque les étendues varient de 10°C à moins de 1°C. Les températures varient et fluctuent très rapidement. Chaque capteur enregistre un comportement thermique spécifique à sa localisation. Le capteur 27 enregistre un nombre important de "pics" atteignant plus d'une dizaine de fois un écart de plus de 8°C entre le minimum et le maximum. Ce capteur a une moyenne de dispersion de 1,4°C (Tab. 2). Contrairement à lui, le 30, a une faible étendue. Ses écarts min-max sont relativement peu importants. Sa moyenne de dispersion est la plus faible avec 1,2°C. Les capteurs 20 et 24, placés sur le même bâtiment, au même étage (6^{ème}) mais à quelques mètres de différence, ont des comportements contraires. Le capteur 24 enregistre une forte dispersion avec un écart moyen de 1,5°C. Le capteur 20 a un écart moyen de 1,3°C soit 02°C de différence avec le capteur 24. La dispersion du capteur 20 est plus faible que celle

du capteur 24. On peut supposer que les rayonnements reçus par le capteur 24, en début de matinée, augmentent sa variabilité par rapport au capteur 20 ne recevant aucun rayonnement direct.

Capteurs	Côté Sud			Côté Nord				
	12 N canyon	9 S canyon	3 S Grd bld	20 S cour	24 N cour	27 N cour	4 N Grd bld	30 N cour
Temp moyenne max (°C)	24,55	24,3	24,41	24,26	24,39	24,55	24,16	24,71
Temp moyenne min (°C)	23,19	23,04	22,94	23,01	22,87	23,13	22,9	23,48
Ecart (min-max) moyen	1,36	1,26	1,47	1,25	1,52	1,42	1,27	1,23
Temp moyenne (°C)	27,35	26,11	26,51	21,14	26,59	26,27	26,12	26,10

Tableau 2 : Moyenne des écarts min-max entre les capteurs

Côté Sud, on constate une homogénéité des étendues. On note que presque tous les capteurs ont la même dispersion, atteignant très rarement les 6°C d'écart entre le minimum et le maximum. La journée du 15 juillet enregistre le plus grand écart min-max avec 8,1°C de différence pour le capteur 12, le capteur 3 a 6°C de différence et le capteur 9 enregistre un écart de plus de 5°C. Cette forte différence est constatée sur plusieurs graphiques. Le capteur 12 recense les étendues les plus importantes, mais c'est le capteur 3 qui a l'écart moyen le plus élevé, avec en moyenne 1,5°C.

Dans la globalité, on constate que les moyennes des températures maximales et minimales varient peu entre le Nord et le Sud, à l'exception du capteur 30. Il est toujours supérieur aux autres avec une moyenne maximale de 24,7°C et une moyenne minimale de 23,5°C, soit une différence de 0,3°C pour les températures maximales et de 0,5°C pour les températures minimales. On peut soumettre l'idée que ce capteur, étant placé côté Nord, mais à l'intérieur d'une cour, ses températures varient très faiblement et concentrent des températures élevées par l'effet « cuvette » de la cour. Le brassage naturel de l'air est quasi inexistant.

- Températures extérieures de nuit

Les températures de nuit sont importantes à prendre en considération puisqu'elles permettent un rafraîchissement de l'air et entraîne une récupération pour la santé humaine. C'est pendant cette phase de rafraîchissement que le corps peut se refroidir de la chaleur accumulée durant la journée.

Annexe 7

Analyse jour et nuit et écart à la moyenne des températures extérieures

Sur le graphique, représentant les températures extérieures de nuit, on constate une forte homogénéité des températures (Fig.A.11).

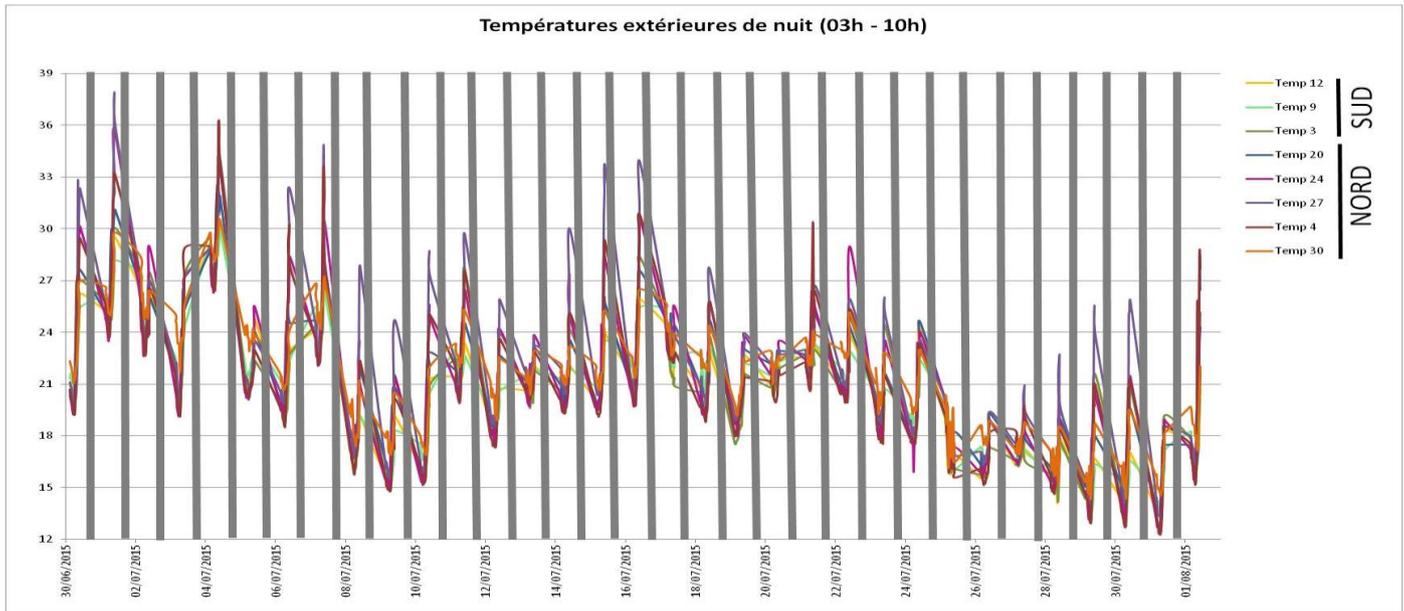


Figure A.11 : Graphique des températures extérieures de nuit (03h-10h) pour juillet 2015

Les courbes de températures suivent la même tendance (contrairement aux températures intérieures nocturnes) mais quelques différences de températures persistent. Le capteur 27 est le plus atypique. Il enregistre les pics de températures de nuit les plus extrêmes. Sa moyenne est la plus élevée avec 21,2°C (Tab.3). Le capteur 30 est toujours supérieur aux capteurs sud. On retrouve des écarts de températures de quelques degrés, entre le capteur 30 et les autres, dans les nuits du 5, 10 et du 25 juillet. Une différence moyenne de 3°C est visible. Ces écarts aussi importants restent peu présents pendant la période étudiée. Le capteur 30 est donc à mettre en relation avec ses températures intérieures pour mieux comprendre son impact sur l'intérieur. On suppose que sa localisation joue un rôle primordial dans cette différence.

Les capteurs 24 et 20 enregistrent aussi des températures extrêmes et créent des différences de températures avec les autres. Le 7 juillet, le capteur 24 a une différence de plus de 5°C avec le capteur 30, par exemple. Il existe de faibles différences de températures sur certaines dates, à l'exemple des 2, 16 ou 21 juillet. Les différences sont inférieures à 1°C. C'est pendant la phase de canicule que les températures sont les plus homogènes, avec la plus faible différence de températures entre les courbes.

Il est difficile de faire une différence entre les températures côté Sud et les données côté Nord du fait du faible écart entre les températures. Cependant, on constate par ce graphique que les températures les plus chaudes sont données par les capteurs exposés au Nord. Les capteurs au Sud ont des températures nocturnes plus fraîches.

	Côté Sud			Côté Nord				
Capteurs	12	9	3	20	24	27	4	30
Temp moy (°C)	20,0	20,2	20,0	20,7	20,8	21,2	20,4	21,2
Moyenne totale	20,1			20,9				

Tableau 3 : Moyenne des températures de nuit entre les capteurs côté Nord et Sud pour juillet 2015

D'après le tableau, on constate que c'est le côté nord où la température moyenne est la plus élevée avec 20,9°C contre 20,1°C côté Sud. Cette différence de 0,8°C est importante pour notre analyse. On peut dire que pendant la nuit, l'orientation joue un rôle régulateur sur les températures extérieures. Pour les températures intérieures, nous constatons l'inverse, le côté Nord est plus frais que le côté sud. Au Nord, les températures nocturnes se rafraîchissent plus rapidement à l'intérieur puisque la chaleur accumulée et stockée durant journée est moins importante que le côté Sud. A l'extérieur, dû à l'effet cuvette, la chaleur s'accumule dans les cours intérieures. Les températures ont du mal à se rafraîchir contrairement aux températures sud où le brassage de l'air a un impact direct sur les températures extérieures.

De plus, on constate que les capteurs 30 et 27 enregistrent la plus forte température moyenne avec 21,2°C, soit une différence de plus de 1°C avec les autres capteurs exposés Sud.

La moyenne de ces températures est inférieure aux seuils IBM. Il est important d'étudier ces moyennes non sur un mois mais à l'échelle de la journée pour faire ressortir les caractéristiques de chaque capteur. La moyenne permet seulement de positionner un capteur par rapport à un autre mais sa fonction reste limitée. Une moyenne par nuit est l'idéal pour mieux caractériser le mois.

- Températures extérieures de jour

Concernant les températures extérieures de jour, 15h à 22h, on constate une similitude par rapport au graphique précédent (Fig.A.12). Cependant, les températures extérieures de jour se différencient des températures extérieures nocturnes puisque les capteurs sud sont plus chauds que les capteurs nord. On distingue les capteurs positionnés côté Sud et ceux positionnés côté Nord. Une différence de températures entre les courbes (Nord et Sud) existe. Les capteurs 12, 9 et 3 voient leurs températures supérieures aux autres contrairement aux températures nocturnes. Leurs moyennes sont supérieures à 27°C contre 26,3°C pour les capteurs nord (Tab.4). Le capteur 12 enregistre les plus fortes valeurs et réalise des pics de températures avec plus de 5°C de différence avec les autres capteurs, sur les journées du 2 et du 16 juillet. Sa moyenne est environ 0,4°C de plus que les autres capteurs positionnés au Sud. Sa moyenne est de 27,3°C. Contrairement au capteur 12, les capteurs 24 et 4 enregistrent les plus faibles températures avec une moyenne globale de 26,2°C. Les autres capteurs côté Nord ont une moyenne semblable aux capteurs 24 et 4. Il existe peu de différence entre ces capteurs.

Annexe 7

Analyse jour et nuit et écart à la moyenne des températures extérieures

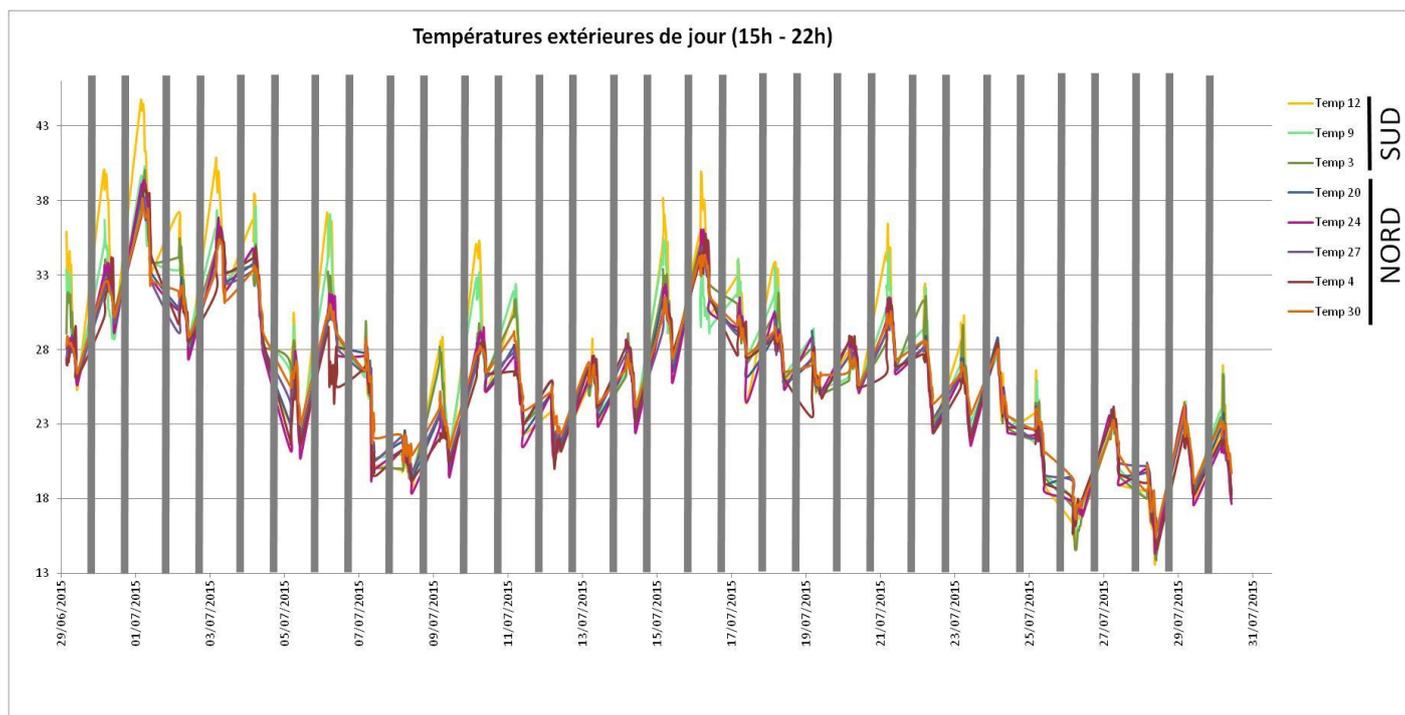


Figure A.12: Graphique des températures extérieures de jour (03-10h) pour juillet 2015

De ce graphique, on remarque que lors des périodes de fortes températures une distinction entre les capteurs nord et sud est visible. Lorsque les températures extérieures dépassent les 28°C une différenciation Nord/Sud est possible. Si on regarde les périodes entre le 12 et le 15 juillet et entre le 24 et le 29 juillet, on remarque une très faible différence entre les capteurs. Elle est inférieure à 0,5°C. La journée du 6 juillet, enregistre une différence nette entre les capteurs nord et sud.

Les différentes périodes décrites précédemment sont plus marquées de jour que de nuit. Les périodes de canicule et de fortes chaleurs sont visibles sur ce graphique. Les températures durant ces périodes sont toutes supérieures aux seuils diurnes de l'IBM soit 31°C. Les températures diurnes évoluent davantage que les températures nocturnes.

Les températures diurnes durant ce mois fluctuent énormément. Elles passent de plus de 41°C à moins de 18°C pour le même capteur sur un mois.

Capteurs	Côté Sud			Côté Nord				
	12 canyon	9 canyon	3 Grd bld	20 cour	24 cour	27 cour	4 Grd bld	30 cour
Temp moyenne (°C)	27,3	26,9	26,7	26,4	26,2	26,3	26,2	26,6
Moyenne totale	27			26,3				

Tableau 4 : Moyenne des températures de nuit entre les capteurs côté nord et sud pour juillet 2015

Annexes

Par rapport aux normales de saison, Paris, au mois de juillet, a une température moyenne supérieure de plus de 2°C. Ce mois reste relativement chaud malgré la forte baisse de température à la fin du mois.

Annexe 8

Indice p2 en fonction des températures nocturnes et diurnes

Températures nocturnes	Températures diurnes	P2
294,15	304,15	0,50
295,15	305,15	0,55
296,15	306,15	0,60
297,15	307,15	0,65
298,15	308,15	0,70
299,15	309,15	0,75
300,15	310,15	0,80
301,15	311,15	0,85
302,15	312,15	0,90
303,15	313,15	0,95
304,15	314,15	1
305,15	315,15	1,05
306,15	316,15	1,10
307,15	317,15	1,15
308,15	318,15	1,20

TABLE DES FIGURES

Figure 1: Enjeux de la thèse - Analyse et représentation des épisodes caniculaires en zones urbaines denses.....	22
Figure 1.1 : Les échelles spatio-temporelles (source : Lambert. D)	34
Figure 1.2 : Représentation des différentes échelles climatiques et atmosphériques, adaptée de Oke, 1987.....	36
Figure 1.3 : Les bilans radiatifs et énergétiques.....	39
Figure 1.4 : Représentation des phénomènes jouant sur la différence de température nuit/jour et ville/ campagne, extrait du site web : http://www.cnrm-game-meteo.fr	41
Figure 1.5 : Formation de l'îlot de chaleur urbain (d'après Rizwan <i>et al.</i> , 2008).....	43
Figure 1.6 : Cartographie de l'îlot de chaleur urbain nocturne en août 2003 et 2000 en Ile-de-France (Source : Météo-France).....	44
Figure 1.7 : Flux quotidien de rayonnement visible réfléchi le 10 août 2003 où le bâti est majoritairement recouvert de zinc. Source : Projet EPICEA.....	45
Figure 1.8 : Température de l'air à 2m du sol le 10 août 2003 à 6h du matin (4h UTC). Source : Projet EPICEA	45
Figure 1.9 : Graphique représentant les vagues de chaleur en France entre 1947 et 2015 (l'axe des ordonnées représente l'indicateur thermique en degrés Celsius et l'axe des abscisses représente le nombre de jours de canicule).....	47
Figure 1.10 : Carte de vigilance météorologique caniculaire (période du 1 ^{er} au 2 juillet 2015) Météo-France®	54
Figure 1.11 : Schéma de déclenchement de l'alerte canicule.....	56
Figure 1.12 : Schéma de maintien ou levée de l'alerte canicule.....	56
Figure 1.13 : Zone de confort (établie par le COSTIC, d'après le Memento Technique du bâtiment : le confort thermique ; Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, juillet 2012	60
Figure 1.14 : Ordres de grandeurs de diffusivité thermique (Memento Technique du bâtiment : le confort thermique ; Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, juillet 2012).....	64
Figure 1.15 : Ordres de grandeur d'effusivité thermique (Memento Technique du bâtiment : le confort thermique ; Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, juillet 2012).....	65
Figure 1.16 : Graphique représentant les températures sur des scénarii dans un immeuble non rénové. Source Guide ABC, CSTB.....	66
Figure 1.17 : Graphique représentant les températures sur des scénarii dans un immeuble rénové. Source Guide ABC, CSTB.....	67
Figure 1.18 : Valeur de Heat Index en fonction de la température et de l'humidité relative. Ces valeurs peuvent être reliées à un niveau d'inconfort selon un code de couleurs allant du jaune clair au rouge. (Source : National oceanic and Atmospheric Administration, INRS)	72
Figure 1.19 : Humidex : lecture de la température de l'air ambiant en degrés Celsius (à la verticale) et de l'humidité relative en pourcentage (à l'horizontale). Extrait du site web : Environnement Canada : >z">http://www.msc.ec.gc.ca/cd/brochures/humidity_cfm>>z	73
Figure 1.20 : Winchill : Tableau de calcul du refroidissement éolien avec la température (en degrés Celsius, à la verticale) et de la vitesse du vent (en km/h, à l'horizontale)	74

TABLE DES FIGURES

Figure 1.21 : Echelle PMV et comparaison avec les indices PT et PET	77
Figure 1.22 : Seuils des indicateurs BioMétéorologiques maximaux et minimaux (IBMmax et IBMmin) pour l'année 2015 (Source Météo-France)	79
Figure 1.23 : Représentation schématique pour le calcul de l'UTCI (pour une condition réelle) où est définie la température de l'air de la condition de référence, en le couplant avec les propriétés physiologiques et thermiques (Bröde 2010)	81
Figure 1.24 : UTCI : Echelle des niveaux de stress thermique (source : www.utci.org).....	81
Figure 1.25 : Schéma représentant les modèles de bilan d'énergie et hydrique de SM2-U avec huit types de surface (pav, cova, bare, nat, roof, vega, vegn, wat) et 3 couches de sols (Mestayer <i>et al.</i> , 2004). Le cercle en pointillés correspond à la prise en compte des effets de la canopée urbaine	86
Figure 1.26 : Les différentes étapes nécessaires pour structurer le modèle NARP-LUMPS (d'après Grimmond et Oke, 2002).....	87
Figure 1.27 : Structure de base et assemblage des cellules rectangulaires du modèle TUF-3D (Krayenhoff et Voogt 2007a).....	88
Figure 1.28 : Exemple d'une sortie du modèle TUF-3D (Krayenhoff et Voogt 2007a).....	89
Figure 1.29 : Représentation schématique du modèle TEB (Masson, 2000)	90
Figure 1.30 : Modèle 3D d'un îlot et des rues alentour (à gauche) et maillage du modèle avec Solène (à droite) (Groleau <i>et al.</i> , 2003).....	93
Figure 1.31 : Exemple de photo aérienne (orthophotos), images scannées et représentation dans le logiciel ENVI-net. Source : Youssef, 2010	95
Figure 1.32 : Exemple de visualisation des résultats du modèle ENVI-net avec le logiciel Leonardo (Bruse, 2004)	95
Figure 1.33 : Principaux couverts et schémas numériques adaptés du modèle SURFEX.....	97
Figure 1.34 : Représentation schématique de la discrétisation de la surface en quatre tuiles dans SURFEX (d'après Masson <i>et al.</i> , 2013).....	99
Figure 1.35 : Schématisation du canyon urbain dans TEB (Lemonsu, 2003).....	99
Figure 1.36 : Schématisation du modèle TEB (source : Masson, 2000)	100
Figure 1.37 : Schéma représentant le concept de rue canyon de TEB et les principaux processus pris en compte par BEM, d'après Bueno <i>et al.</i> , 2012.....	103
Figure 1.38 : Méthodologie utilisée pour l'évaluation de TEB-BEM (source Pigeon <i>et al.</i> , 2014)	104
Figure 1.39 : Schéma représentant le couplage TEB avec l'atmosphère, sans Canopy (à gauche) et avec CANOPY (à droite), d'après Masson <i>et al.</i> , 2003.....	104
Figure 1.40 : Description des trois environnements considérés dans TEB pour le calcul de l'UTCI : a = un individu à l'extérieur exposé au soleil, b = un individu à l'extérieur exposé à l'ombre, c = un individu à l'intérieur d'un bâtiment (Pigeon 2011)	105
Figure 2.1 : Localisation des deux stations météorologiques (point rouge) gérées par Météo-France, en activité en 2016 dans Paris (carte créée à partir du portail Publithèque)	114
Figure 2.2 : Multidisciplinarité de la thèse – Analyse et représentation des épisodes caniculaires en zones urbaines denses	115
Figure 2.3 : Schéma décrivant les différentes étapes, outils et méthodologies utilisés pour la recherche de la thèse - De TEB à la représentation cartographique du phénomène caniculaire	118
Figure 2.4 : Organisation de la partie B de la thèse – Analyse et représentation des épisodes caniculaires en zones urbaines denses	122
Figure 2.5 : Schéma représentant les différentes tâches et logiciels utilisés pour le projet RepExtrem	123

TABLE DES FIGURES

Figure 2.6 : Schéma de données de la thèse amenant à la représentation de la durée et du suivi du risque caniculaire	128
Figure 3.1 : Carte du réseau hydrographique de Paris (source : cartograf.fr)	135
Figure 3.2 : Répartition des espaces verts et des aires d'influence dans Paris (Source : atelier parisien d'urbanisme : http://www.apur.org)	137
Figure 3.3 : Normales de températures à Paris-Montsouris sur la période 1981-2010 (source : Météo-France).....	138
Figure 3.4 : Superposition des deux supports (vecteur, à gauche et raster, au centre) sur la zone d'étude (650000/6865000 – 655000/6560000 ; 5*5km).....	141
Figure 3.5 : Principaux systèmes de prévision numérique et de simulation utilisés dans notre recherche sur l'analyse et la représentation des épisodes caniculaires.....	142
Figure 3.6 : Comparaison de la température à 2m du sol du modèle AROME à 2,5km (à gauche) et AROME HD 1,3km (à droite) sur la France le 19 août 2016 à 17h	143
Figure 3.7 : Zoom de la figure 3.6 des températures à 2m du sol du modèle AROME (résolution 1,3km) sur l'Ile-de-France le 19 août 2016 à 17h.....	143
Figure 3.8 : Domaine de calcul d'AROME-France 1.3km (source Météo-France, 2015) représentant le relief (en m)	144
Figure 3.9 : Représentation de la température (en Kelvin) des sorties AROME à 1,4km (à gauche) et 250m (à droite, après interpolation) entre 48° et 49°N et 2 et 3°E	145
Figure 3.10 : Extraction de la zone d'étude issue de l'interpolation avec comme coordonnées : 650 000 et 655 000 km pour X, 6 860 000 et 6 865 000km pour Y (Lambert 2 étendu).....	146
Figure 3.11 : Les différentes étapes et processus à paramétrer pour réaliser une simulation SURFEX	147
Figure 3.12 : Cartographie des différents types d'îlots sur notre zone d'étude provenant du projet MUSCADE	149
Figure 3.13 : Les sept quartiers des types d'îlots (source : Bonhomme M. 2013)	150
Figure 3.14 : Cartographie des différents types d'usages sur notre zone d'étude provenant du projet MUSCADE	151
Figure 3.15 : Schéma conceptuel du modèle SURFEX et du modèle TEB (encadré orange).....	153
Figure 3.16 : Exemple de la structuration des fichiers textes en sortie du modèle SURFEX-TEB	155
Figure 3.17 : Exemple de décalage entre les sorties SURFEX-TEB et les données issues de la BD TOPO® de l'IGN.....	156
Figure 3.18 : Ecart constatés entre les différentes coordonnées issues du modèle SURFEX-TEB et des données topographiques de l'IGN.....	157
Figure 3.19 : Exemple d'erreur dans la valeur hydrologique, dans différentes mailles issues des sorties SURFEX-TEB	159
Figure 3.20 : Capture d'écran des sorties SURFEX-TEB en WGS84	160
Figure 3.21 : Exemple des valeurs de températures issues de SURFEX-TEB dans Paris (250m).....	161
Figure 3.22 : Schéma représentant l'extrapolation des données	161
Figure 3.23 : Etapes nécessaires à la contextualisation et à la projection des données TEB dans l'espace en 2D et 3D (données 250m ²). Représentation des températures intérieures des bâtiments et de la rue à 2m.....	162
Figure 3.24 : Projeter les données TEB dans l'espace en 2D et 3D (données 250m ²) avec la couche végétation.....	163

TABLE DES FIGURES

Figure 3.25 : Représentation des températures extérieures de la scène en 3D dans la nuit du 7 juillet 2010.....	164
Figure 3.26 : Zoom de la figure 3.25 sur le quartier de l’Opéra avec le même code couleur.....	164
Figure 3.27 : Vue d’ensemble du canevas avec le quartier de l’Opéra et du Palais Royal.....	165
Figure 3.28 : Représentation de la simulation SURFEX-TEB pour la température de la rue à 2m du sol, au 1 ^{er} janvier 2004 en IDF (maille de 1km ²)	166
Figure 3.29 : Différence entre une maille de 1km ² (à gauche) et d’une maille de 100*100m (à droite) (extrait Orthophotographies RGE®IGN)	167
Figure 3.30 : Représentation de la simulation SURFEX-TEB pour la température à 2m, le 5 juillet 2010 à 3h, sur Paris (maille 250*250m ²).....	168
Figure 3.31 : Schéma représentant l’agrégation temporelle pour une durée de 7h sur les températures à 2m, le 5 juillet 2010	170
Figure 3.32 : Cartographie des données environnementales et météorologiques (températures de nuit (gauche) et de jour (droite), à 2m, le 5 juillet 2010, simulées par SURFEX-TEB) sur une période de 7 heures sur la zone de Paris (maille 250x250m).....	171
Figure 3.33 : Localisation des mailles les plus extrêmes sur toute la période d’étude.....	172
Figure 3.34 : Graphique représentant les températures intérieures et extérieures (minimales et maximales) de jour et de nuit des sorties SURFEX-TEB (sur les mailles 162 et 377) sur la période du 1 ^{er} au 31 juillet 2015.....	173
Figure 3.35 : Représentation des sorties du modèle SURFEX-TEB sur les températures intérieures et extérieures de jour (moyennées 15-22h) du 1 ^{er} au 7 juillet 2015.....	175
Figure 3.36 : Représentation des sorties du modèle SURFEX-TEB sur les températures intérieures et extérieures de nuit (moyennées 03-10h) du 1 ^{er} au 7 juillet 2015.....	176
Figure 3.37 : Proposition du schéma de données représentant la durée pour les données issues du modèle SURFEX-TEB	177
Figure 4.1 : Caractéristiques des capteurs Tinytag Talk 2 utilisés (source : Gemini ®)	185
Figure 4.2 : Capteurs pour la campagne de mesures sur Paris juillet 2014	187
Figure 4.3 : Localisation de l’immeuble mesuré pour la campagne 2014.....	187
Figure 4.4 : Photographies des appartements de la campagne 2014.....	188
Figure 4.5 : schéma de la localisation des capteurs.....	188
Figure 4.6 : Localisation des appartements mesurés pour la campagne 2015	189
Figure 4.7 : Localisation des capteurs et présentation des lieux	191
Figure 4.8 : Graphique des températures extérieures pour les appartements A, B et C pour la campagne de mesure 2014	194
Figure 4.9 : Chronique horaire de la moyenne des températures extérieures.....	196
Figure 4.10 : Graphique des écarts à la moyenne des températures extérieures	197
Figure 4.11 : Dendrogramme pour les températures extérieures	198
Figure 4.12 : Graphique des températures intérieures pour les appartements A, B et C d’un même immeuble pour la campagne de mesure 2014.....	199
Figure 4.13 : Chronique horaire de la moyenne des températures intérieures	202
Figure 4.14 : Graphique des écarts à la moyenne des températures intérieures.....	203
Figure 4.15 : Dendrogramme des températures intérieures	204
Figure 4.16 : Graphique de la moyenne des températures par étage et selon l’orientation pour la période du 3 au 14 août 2014	206

TABLE DES FIGURES

Figure 4.17 : Graphique représentant les températures intérieures et extérieures sur la période du 3 au 14 août 2014.....	208
Figure 4.18 : Températures extérieures-intérieures pour l'appartement A, campagne 2014	210
Figure 4.19 : Températures extérieures-intérieures pour l'appartement B, campagne 2014.....	211
Figure 4.20 : Températures extérieures-intérieures pour l'appartement C, campagne 2014.....	211
Figure 4.21 : Etalonnage des capteurs Tinytag	213
Figure 4.22 : Graphique des températures intérieures, juillet 2015.....	214
Figure 4.23 : Chronique horaire de la moyenne des températures intérieures, juillet 2015	216
Figure 4.24 : Graphiques des températures intérieures côté Nord (haut) et côté Sud (bas), juillet 2015	217
Figure 4.25 : Ecart à la moyenne des températures intérieures, juillet 2015	218
Figure 4.26 : Graphique des températures intérieures de nuit (03-10h), juillet 2015.....	220
Figure 4.27 : Graphique des températures intérieures de jour (15-22h), juillet 2015.....	221
Figure 4.28 : CAH des capteurs intérieurs.....	224
Figure 4.29 : Graphique des températures intérieures, appartement A	225
Figure 4.30 : Graphique des températures intérieures, appartement B	227
Figure 4.31 : Graphique des températures intérieures, appartement C	229
Figure 4.32 : Graphique des températures intérieures, appartement D	231
Figure 4.33 : Graphique des températures intérieures, appartement E.....	232
Figure 4.34 : Contexte des appartements A et B	235
Figure 4.35 : Contexte de l'appartement C	235
Figure 4.36 : Contexte de l'appartement D.....	236
Figure 4.37 : Graphique des températures intérieures, juillet 2015.....	237
Figure 4.38 : Chronique horaire de la moyenne des températures extérieures, juillet 2015.....	239
Figure 4.39 : Localisation de la station Paris Montsouris par rapport à notre site de mesure.....	240
Figure 4.40 : Graphique des comparaisons des températures extérieures mesurées avec celles de la station Montsouris, juillet 2015.	241
Figure 4.41 : Graphiques des températures extérieures côté Nord (haut) et côté Sud (bas), juillet 2015	242
Figure 4.42 : CAH des capteurs extérieurs	247
Figure 4.43 : Températures intérieures-extérieures, appartement A.....	250
Figure 4.44 : Chronique horaire des températures intérieures (à gauche) et extérieures (à droite) pour l'appartement A, pour une même échelle en juillet 2015.....	252
Figure 4.45 : Chronique horaire des températures intérieures (à gauche) et extérieures (à droite), appartement A, juillet 2015	252
Figure 4.46 : Températures intérieures-extérieures en fonction de l'orientation de nuit et de jour, appartement A, juillet 2015	253
Figure 4.47 : Graphique des températures intérieures et extérieures durant les périodes de fortes chaleurs, juillet 2015	255
Figure 4.48 : Graphique des températures intérieures et extérieures durant la première période de rafraîchissement, juillet 2015.....	256
Figure 4.49 : Graphique des températures intérieures et extérieures durant la première période de rafraîchissement, juillet 2015.....	257
Figure 4.50 : Températures intérieures-extérieures, appartement B.....	260

TABLE DES FIGURES

Figure 4.51 : Température intérieures-extérieures en fonction de l'orientation de jour (graphique haut) et de nuit (graphique bas), appartement B, juillet 2015	261
Figure 4.52 : Températures intérieures-extérieures, appartement C.....	263
Figure 4.53 : Température intérieures-extérieures en fonction de l'orientation de jour (graphique haut) et de nuit (graphique bas), appartement C, juillet 2015	265
Figure 4.54 : Températures intérieures-extérieures, appartement D	267
Figure 4.55 : Température intérieures-extérieures en fonction de l'orientation de Jour (graphique haut) et de nuit (graphique bas), appartement D, juillet 2015.....	269
Figure 4.56 : Implémentation du schéma de données initial.....	272
Figure 4.57 : Classes des Appart-type et leurs attributs	272
Figure 4.58 : Les différentes étapes nécessaires à la visualisation de la donnée sous une cartographie	274
Figure 4.59: Méthode utilisée pour la fusion de données	275
Figure 4.60 : Différenciation spatiales des températures intérieures, de jour, pour les types d'appartements, pour le 1 ^{er} juillet 2015.....	276
Figure 4.61 : Cartographie des températures intérieures de jour par type d'appartements du 1 ^{er} au 5 juillet 2015.....	277
Figure 4.62 : Cartographie des températures intérieures de jour par type d'appartements, juillet 2015	278
Figure 4.63 : Cartographie des températures intérieures de nuit par type d'appartements, juillet 2015	280
Figure 4.64 : Cartographie de l'UTCI intérieur par type d'appartements du 1 ^{er} au 5 juillet 2015(période caniculaire)	281
Figure 4.65 : Différenciation spatiales des températures extérieures pour les différentes configurations, 1 ^{er} juillet 2015.....	282
Figure 4.66 : Cartographies des températures intérieures et extérieures de jour (moyennées 15-22h) pour les types d'appartements, du 1 ^{er} au 7 juillet 2015	283
Figure 4.67 : Cartographies des températures intérieures et extérieures de nuit (moyennées 03-10h) pour les types d'appartements, du 1 ^{er} au 7 juillet 2015	284
Figure 5.1 : Excès de décès observés quotidiennement pendant le mois d'août 2003 comparé au relevé des températures extérieures (Source : INSERM).....	292
Figure 5.2 : Relation entre changement climatique et santé (Source : OMS).....	294
Figure 5.3 : Moyenne des températures estivales observées et simulées en France au cours du XX ^{ème} et XXI ^{ème} siècle. Les triangles bleus représentent les observations entre 1900 et 2003, les carrés roses s les températures simulées à partir de 1960 par le modèle avec un scénario A2 du GIEC (d'après Météo-France).....	294
Figure 5.4 : Nombre de jours de vagues de chaleur en été pour la période de référence 1976-2005 et l'écart à cette référence pour le scénario RCP4.5 et RCP8.5 aux horizons 2012-2050 et 2071-2100 (source : Rapport Direction générale de l'Energie et du Climat : Le climat de la France au XXI ^{ème} siècle)	295
Figure 5.5 : Implémentation du schéma de donnée initiale en intégrant la notion de durée.....	300
Figure 5.6 : les relations spatiales topologiques de la théorie RCC8.....	301
Figure 5.7 : Matrice spatio-temporelle utilisée pour représenter le phénomène caniculaire sur la zone d'étude	303
Figure 5.8 : le modèle snapshot (Armstrong, 1988).....	304

TABLE DES FIGURES

Figure 5.9 : Graphique des températures entre le 1 ^{er} et le 3 juillet sur les 400 mailles de l'étude, en période nocturne (à gauche) et en période diurne (à droite).....	305
Figure 5.10 : Graphique des mailles enregistrant les températures maximales (54, 106 et 416) entre le 1 ^{er} et le 31 juillet 2015.....	307
Figure 5.11 : Cartographie de la canicule intérieure (seuil 24°C-28°C) pour les types de 1 à 6, juillet 2015.....	309
Figure 5.12 : Graphique des températures de la maille 109 entre le 1 ^{er} et le 31 juillet 2015 pour les six types de bâtiments.....	310
Figure 5.13 : Structure de l'indice de dangerosité	312
Figure 5.14 : Correspondance entre la localisation des appartements et les mailles géographiques	315
Figure 5.15 : Graphique de l'indice de dangerosité intérieur pour les seuils 21°C et 31°C avec un pas de récupération de -1, pour les 5 types d'appartements entre le 1 ^{er} et le 31 juillet 2015.....	316
Figure 5.16 : Graphique de l'indice de dangerosité intérieur pour les seuils 21°C et 31°C avec un pas de récupération de -0,5, pour les 5 types d'appartements entre le 1 ^{er} et le 31 juillet 2015.....	316
Figure 5.17 : Graphique de l'indice de dangerosité intérieur pour les seuils 24°C et 31°C avec un pas de récupération de -1, pour les 5 types d'appartements entre le 1 ^{er} et le 31 juillet 2015.....	317
Figure 5.18 : Graphique de l'indice de dangerosité intérieure pour les seuils 24°C et 31°C avec un pas de récupération de -1, pour les 5 types d'appartements entre le 1 ^{er} et le 31 juillet 2015.....	317
Figure 5.19 : Graphique de l'indice de dangerosité intérieur pour les seuils 24°C et 28°C avec un pas de récupération de -1, pour les 5 types d'appartements entre le 1 ^{er} et le 31 juillet 2015.....	318
Figure 5.20 : Graphique de l'indice de dangerosité intérieur pour les seuils 24°C et 28°C avec un pas de récupération de -0,5, pour les 5 types d'appartements entre le 1 ^{er} et le 31 juillet 2015.....	319
Figure 5.21 : Graphique de l'indice de dangerosité intérieur pour les seuils 24°C et 28°C avec un pas de récupération de -1 (graphique haut) et de -0,5 (graphique bas), pour les 6 types d'appartements, à la maille 87, entre le 1 ^{er} et le 31 juillet 2015.....	320
Figure 5.22 : Echelle logarithmique des six types de bâtiments	322
Figure 5.23 : Représentations cartographiques de l'indice de dangerosité avec les seuils 24/28°C et une récupération de 1 pour les 6 types d'appartements.....	326
Figure 5.24 : Représentations cartographiques de l'indice de dangerosité avec les seuils 24/28°C et une récupération de 0,5 pour les 6 types d'appartements.....	327
Figure 5.25 : Graphique de l'indice de dangerosité extérieur pour les seuils 21°C et 31°C avec un pas de récupération de -0,5, pour la maille numéro 87 (maille max) pour le type 6 entre le 1 ^{er} et le 31 juillet 2015.....	328
Figure 5.26 : Evolution du nombre de passages journaliers aux urgences, de consultations et parts d'hospitalisation, en lien avec la chaleur, entre le 1 ^{er} juin et le 31 août 2015	330
Figure 5.27 : implémentation du schéma de donnée initial en intégrant l'objet <i>Zone canicule</i>	331
Figure 5.28 : Création des hot-spots par requête spatiale.....	333
Figure 5.29 : Cartographies des hot-spots pour le 10 juillet 2015 sur les 6 types de bâtiments	334
Figure 5.30 : Fractions de bâtiments climatisés pour le cas climatisé REEL.....	334
Figure 5.31 : Anomalies de températures à 2m pour le cas climatisé réel en journée (à gauche), la nuit (à droite).....	335
Figure 6.1 : Proposition de trois cartographies	340
Figure 6.2 : Localisations des appartements pour la campagne 2016 (réalisé à partir du site web Mappy)	345
Figure 6.3 : Températures intérieures de la campagne d'été 2016.....	345

TABLE DES FIGURES

Figure 6.4 : Zoom de la figure 6.3 sur la période du 20 août au 1 ^{er} septembre 2016.....	346
Figure 6.5 : Services web de visualisation du projet RepExtrem.....	347

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Tableau des correspondances entre la carte de vigilance et les niveaux du PNC (4 niveaux)	54
Tableau 1.2 : Récapitulatif des normes internationales existantes relatives au confort thermique (d'après le site Santé Sécurité au travail dans les fonctions publiques : http://www.intefp-sstfp.travail.gouv.fr/).....	59
Tableau 1.3 : Facteurs intervenant dans le confort thermique (d'après Auliciems et Szokolay, 1997)	60
Tableau 1.4 : Ordre de grandeur de l'indice WBGT dans des situations de bureau (source : www.deparisnet.be).....	70
Tableau 1.5 : Tableau de lecture des effets et du risque du refroidissement éolien : température en °C / vitesse du vent en km/h	75
Tableau 1.6 : Exemple de PET pour différents scénarii (avec : T_{air} = température de l'air, T_{mrt} = température radiante moyenne, U = vitesse du vent, P = pression atmosphérique) (Hoppe 1999)	77
Tableau 1.7 : Caractéristiques de modélisation d'une sélection de modèles utilisant l'équation énergétique d'une surface urbaine (adapté de Grimmond <i>et al.</i> , 2009).....	84
Tableau 3.1 : Observations des normales de températures (colonnes de gauche) en comparaison aux températures moyennes mensuelles sous abri, pour l'année 2015 (colonne de droite) à Paris-Montsouris	139
Tableau 3.2 : Comparaison des normales de température sur la période 1981-2010 avec l'année 2015 en France (année de référence pour notre étude)	139
Tableau 3.3 : Nombres de variables présentes dans le modèle TEB (à gauche) et les spécificités de ces variables (à droite)	148
Tableau 3.4 : Températures (en Kelvin) intérieures et extérieures (moyennes, minimales et maximales) des mailles les plus chaudes et fraîches (maille moyennée sur toute la période d'étude) pour juillet 2015	173
Tableau 4.1 : Localisation des capteurs intérieurs et extérieurs campagne 2014	188
Tableau 4.2 : Localisation des capteurs intérieurs et extérieurs campagne 2015	190
Tableau 4.3 : Comparaison des températures extérieures moyennes, minimales et maximales entre le 3 et 14 août 2014	195
Tableau 4.4 : Comparaison des températures intérieures moyennes, minimales et maximales entre le 3 et 14 août 2014	201
Tableau 4.5 : Description des températures sud	207
Tableau 4.6 : Description des températures nord	207
Tableau 4.7 : Comparaison des températures entre capteurs.....	209
Tableau 4.8 : Températures moyennes côté nord et sud, juillet 2015	218
Tableau 4.9 : Moyenne des températures de nuit entre les capteurs côté Nord et Sud, juillet 2015	221
Tableau 4.10 : Moyenne des températures de jour entre les capteurs côté Nord et Sud, juillet 2015	222
Tableau 4.11 : Températures intérieures entre le 30 juin et le 7 juillet 2015	223
Tableau 4.12 : Températures moyennes intérieures, de jour et de nuit, appartement A.....	226
Tableau 4.13 : Températures moyennes intérieures, de jour et de nuit, de l'appartement B.....	228
Tableau 4.14 : Températures moyennes intérieures, de jour et de nuit, appartement C.....	230
Tableau 4.15 : Températures moyennes intérieures, de jour et de nuit, appartement D.....	231
Tableau 4.16 : Températures moyennes intérieures, de jour et de nuit, appartement E	232

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 4.17 : Création de type d'appartements en fonction des caractéristiques des capteurs pour la campagne de mesures 2015.....	234
Tableau 4.18 : Températures extérieures moyennes, de jour et de nuit	243
Tableau 4.19 : Températures extérieures entre le 30 juin et le 7 juillet 2015	244
Tableau 4.20 : Températures extérieures entre le 15 et le 19 juillet 2015.....	246
Tableau 4.21 : Corrélation de l'appartement A.....	251
Tableau 4.22 : Corrélation de l'appartement B.....	260
Tableau 4.23 : Corrélation de l'appartement C.....	264
Tableau 4.24 : Corrélation de l'appartement D	267
Tableau 4.25 : Concordance entre les températures intérieures et extérieures, appartement D	267

TABLE DES FIGURES

Publications

Pinson L. & Ruas A. (octobre 2014). Apport de la géomatique pour l'analyse et la représentation du risque caniculaire. *Conférence SAGEO*, poster, 2014, Grenoble

Pinson L., Ruas A., Masson V. et Chancibault K. (juillet 2015). Une meilleure connaissance et estimation du risque caniculaire en zone urbaine dense. *28^{ème} conférence Association Internationale de Climatologie*, Liège

Pinson L., Ruas A., Masson V. et Chancibault K. (2015). Reconstruction de l'objet canicule : modélisation et représentation graphique. *Conférence SAGEO*, 2015, Tunis

Pinson L., Ruas A., Masson V. et Chancibault K. (mars 2016). Acteurs et mesures préventives à différentes échelles territoriales pour la création d'indices de dangerosité sur le risque caniculaire. CIST, Grenoble

Pinson L. & Ruas A. (juillet 2016). Différentiation de températures intérieures et extérieures par type d'appartements pendant une canicule à Paris. *29^{ème} conférence Association Internationale de Climatologie*, Besançon-Lausanne

Pinson L. & Masson V. (sept 2016). Heat stress in urban area: data fusion of observations, modeling and geospatial information. *FICUP Conference on Urban Physics*, Quito (Equateur)

Soumis :

Pinson L., Pham H. & Ruas A. (décembre 2016). Un indice pour caractériser et représenter la dangerosité des canicules en zone urbaine dense. *Conférence SAGEO*, 2016, Nice

Bibliographie

- Akbari H., Davis S., Dorsano S., Huang J. & Winett S. (1992). *Cooling our communities – A guidebook on Tree Planting and Light-Colored Surfacing*. US Environment Protection Agency, Office of Policy Analysis, Climate Change Division
- Alexander L.-V., Zhang X., Peterson T.C., Caesar J., Gleason B., Klein Tank A.-M.-G., Haylock M., Collins D., Trewin B., Rahimzadeh F., Tagipour A., Kumar Kolli R., Revadekar J.-V., Griffiths G., Vincent L., Stephenson D.-B., Burn J., Aguilar E., Brunet M., Taylor M., New M., Zhai P., Rusticucci M. & Vazquez Aguirre J.-L. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation, *J. Geophys. Res*, 111p.
- Allen J.-F. (1984). Towards a general theory of action and time. *Artificial Intelligence*, vol.23, n°2, p. 123-154.
- Alwang J., Siegel P.B. & Jorgensen S.L. (2001). Vulnerability : a view from different disciplines. Social protection discussion paper series.
- Analitis A., Michelozzi P., D'Ippoliti D., De'donato F., Menne B., Matthies F., Atkinson R.-W., Iñiguez C., Basagaña X., Schneider A., Lefranc A., Paldy A., Bisanti L. & Katsouyanni K. (2014). Effects of heat waves on mortality : *effect modification and confounding by air pollutants*. *International Journal of Epidemiology*, vol.25, p.15-22.
- Andrade H. (2005). O clima urbano - *natureza, escalas de análises e aplicabilidade*. *Finisterra - Revista Portuguesa de Geografia*, Lisboa, v.XL, n° 80, p.67-91.
- Armstrong B. (2006). Models for the relationship between ambient temperature and daily mortality. *International Journal of Epidemiology*, vol.17, p.624-31.
- Armstrong B., Hajat S., Kovats S., Lloyd S., Scovronick N. & Wilkinson P. (2012). Commentary: climate change: how can epidemiology best inform policy? *International Journal of Epidemiology*, vol.23, 780-784. p.780-4.
- Armstrong M. (1988). Temporality in spatial databases. *In Proceedings of GIS/LIS 88*, Bethesda, Maryland, vol.2, p. 880-889.
- Arnfield A. (2003). Two decades of urban climate research : *a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island*. *International Journal of Epidemiology*, vol.23, p.1-26.
- Asaeda T., Ca V.-T. & Wake A. (1996). Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. *Atmospheric Environment*, vol. 30, n° 3, p. 413-427.
- Atelier Parisien d'Urbanisme. Développer le végétal à Paris, les nouvelles règles du Plan local d'urbanisme de Paris. Notes de 4 pages [en ligne]. octobre 2004, n°13, 4p. Disponible sur : <http://www.apur.org/>

- Baccini M., Biggeri A., Accetta G., Kosatsky T., Katsouyanni K., Analitis, A. & Forsberg, B. (2008). Heat effects on mortality in 15 European cities. *International Journal of Epidemiology*, vol.19, p.711-9.
- Balandraux M. (2007). Confort thermique, température et humidité [Web page]. Disponible sous le lien : <http://www.medecine-preventive.ch/fra/humidite.php>
- Balletti C. (2006). Georeference in the analysis of the geometry content of early maps, *E-Perimetron*, vol.1-1, p.32-42
- Basu R. & Samet J.-M. (2002). Relation between elevated ambient temperature and mortality : A review of the epidemiologic evidence. *Epidemiologic Reviews*, vol.24.
- Basu R. (2009). High ambient temperature and mortality : a review of epidemiologic studies from 2001 to 2008. *Environmental Health*, vol.8, 40p.
- Belakehal A. (2012). Les ambiances patrimoniales. Problèmes et méthodes. *Actes du 2^{ème} congrès International sur les Ambiances*, 19-22/09/2012, Montréal, Canada, p. 505-510.
- Beltrando G. & Chemery L. (1995). *Dictionnaire du climat*, Larousse, Paris, 344 p. *Encyclopedia Universalis*, 2002, version 6, CD-ROM.
- Beniston M. & Stephenson D. (2004). Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions. *Global and Planetary Change*, vol. 44, p. 1-9.
- Bernatzky A. (1982). The contribution of trees and green spaces to a town climate. *Energy and Buildings*, vol. 5, p. 1-10.
- Berry B.-J.-L. (1964). Approaches to regional analysis : a Synthesis *Annals of the Association of American Geographers*, vol.54, p. 2-11.
- Besancenot J.-P. (2002). Vagues de chaleur et mortalité dans les grandes agglomérations urbaines. *Environnement, Risques et Santé*, vol.11, N° 4, p.229-240.
- Bhaskaran K., Gasparrini A., Hajat S., Smeeth L. & Armstrong B. (2013). Time series regression studies in environmental epidemiology. *International Journal of Epidemiology*, vol.42, p.10.13
- Błażejczyk K., Broede P., Fiala D., Havenith G., Holmér I., Jendritzky G. & Kunert, A. (2010). Principles of the new Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its application to bioclimatic research in European scale. *Miscelanea Geographica*, vol. 14, p. 91-102.
- Błażejczyk K., Epstein Y., Jendritzky G., Staiger H. & Tinz B. (2012). Comparison of UTCI to selected thermal indices, *International Journal of Epidemiology*, vol. 56, p. 515-535.
- Blocken B., Carmeliet J. & Stathopoulos T. (2007). CFD Evaluation of Wind Speed Conditions in Passages between Parallel Buildings, Effect of Wall-Function Roughness Modifications on the Atmospheric Boundary Layer Flow, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol.95, n° 9-11, p. 941-962.
- Bloomfiel J., Royle A., Steinberg L.-J. & Yang Q. (1996). Accounting for meteorological effects in measuring ozone urban levels and trends. *Atmospheric Environment*, vol.30, n°17, p. 3067-3077.

Bibliographie

- Bonhomme M. (2013). *Contribution à la génération de bases de données multi-scalaires et évolutives pour une approche pluridisciplinaire de l'énergétique urbaine*. Thèse en Génie civil. Université de Toulouse.
- Bouchama A., Dehbi M., Mohamed G., Matthies F., Shoukri M. & Menne B. (2007). «Prognostic factors in heat waves» related deaths : a meta-analysis. *Archives of Internal Medicine*, vol.167, p.2170-6.
- Bozonnet E., Allard F., Musy M., Chazelas M. & Guarracino G. (2006). URBAT : Approche méthodologique de la construction durable en milieu urbain : le microclimat urbain et son impact environnemental sur les constructions. *Plan Urbanisme Construction Architecture*.
- Bröde P., Fiala D., Błażejczyk K., Holmér I., Jendritzky G., Kampmann B. & Havenith G. (2012). Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International journal of biometeorology*, vol. 56, n°3, p. 481-494.
- Bruse M. & Skinner C.-J. (2000). Rooftop greening and local climate : a case study in Melbourne. *Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millennium*, WMO/TD No. 1026, World Meteorological Organisation : 6 p.
- Bruse M. (1999). Simulating microscale climate interactions in complex terrain with a high-resolution numerical model : A case study for the Sydney CBD Area (Model Description). In : *Proceedings International Conference on Urban Climatology and International Congress of Biometeorology*, Sydney, Australia, 8-1, 6 p.
- Buckley J.-P., Samet J.-M. & Richardson D.-B. (2014). Commentary : does air pollution confound studies of temperature ? *International Journal of Epidemiology*, vol. 25, p.242-5.
- Bueno B., Norford L., Pigeon G. & Britter R. (2011). Combining a detailed building energy model with a physically-based urban canopy model. *Boundary-layer meteorology*, vol. 140, n° 3, p. 471-489.
- Camalier L., Cox W. & Dolwick P. (2007). The effects of meteorology on ozone in urban areas and their use in assessing ozone trends. *Atmospheric Environment*, vol.41, p.7127-7137.
- Cantat O. (2004). *L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps*, Edt.Norois, 191, p.75-102.
- Chan E.-Y., Goggins W.-B., Kim J.-J. & Griffiths S.-M. (2012). A study of intracity variation of temperature-related mortality and socioeconomic status among the Chinese population in Hong Kong. *Journal of Epidemiology and Community Health*, vol. 66, p.322-7.
- Choisnel E., Jacq V. (1987). Une méthodologie d'étude des topoclimats. *Presse ther clim*, Paris, 124, vol.4, p. 188-96.
- Colombert M. (2008). *Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les villes sur la ville*. Thèse de doctorat en Génie urbain. École Doctorale Université Paris-Est.
- Couclelis H. (1992). People manipulate objects (but cultivate fields) : beyond the raster-vector debate in GIS. *Theories and methods of spatio-temporal reasoning in geographic space*. I. C. A. U. Frank and Formentini U., Berlin, Springer Verlag.

- Crawley D.-B., Lawrie L.-K., Winkelmann F.-C., Buhl W.-F., Huang Y.-J., Pedersen C.-O., Strand R.-K., Liesen R.-J., Fisher D.-E. & Witte M.-J. (2001). Energy plus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, vol. 33, n° 4, p. 319-331.
- Curriero F.-C., Heiner K.-S., Samet J.-M., Zeger S.-L., Strug L. & Patz J.-A. (2002). Temperature and mortality in 11 cities of the eastern United States. *American Journal of Epidemiology*, vol. 155, p.80-7.
- De Bono A., Peduzzi P., Giuliani G. & Kluser S. (2004). Impact of summer 2003 heat wave in Europe.
- De Freitas C., Grigorieva E. (2014). A comprehensive catalogue and classification of human thermal climate indices. *International journal of biometeorology*, New Zealand, Russia. 12 p.
- De Munick C. (2013). *Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique*. Doctorat de l'université de Toulouse.
- De Oliveira F., Moreau S. (2007). Confort thermique ressenti, analyse des campagnes expérimentales 2005-2006, Département de Climatologie - Aérodynamique - Pollution - Epuration, 43 p. [Consulté le 01/03/2016], disponible sur internet :
- Denègre J., Salgé F. (2001). *Les systèmes d'information géographique*. Paris, 1996 1^{ère} éd., 2^{ème} éd. (Que-sais-je ?, 3122).
- Depecker P., Izard J.-L., Traisnel J.-P. (1989) *Qualité thermique des ambiances*. AFME, Collection cahiers pédagogiques Thermique et Architecture, Paris ; 67 p.
- Douguedroit A. (2005). La révolution scientifique : de la climatologie pendant la seconde moitié du XX^{ème} siècle : le paradigme de l'état du système climatique. *Annales de l'AIC*, vol 2.
- Dousset B., Gourmelon G., Giraudet E., Laaidi K., Zegh-noun A., et al. (2011). Evolution climatique et canicule en milieu urbain : apport de la télédétection à l'anticipation et à la gestion de l'impact sanitaire. Rapport final, pp.77.
- Dupont S. (2001). *Modélisation dynamique et thermodynamique de la canopée urbaine : réalisation du modèle de sol pour SUBMESO*. Thèse de doctorat, Université de Nantes.
- Dupont S. (2001a). *Proposition d'une nouvelle méthode de détermination de la température de surface de la végétation dans le modèle SM2-U*, Note interne, ECN, France.
- Dupont S. (2001b). *Validation de la nouvelle partie rurale de SM2-U sur les campagnes HAPEX-MOBILHY et EFEDA*, Note interne, ECN, France.
- Dupont S., Ching J., & Burian S. J. (2004). Introduction of urban canopy parameterization into MM5 to simulate urban meteorology at neighborhood scale. *Bulletin of the American Meteorological Society*, pp.423-427 <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/74072.pdf>.
- Fan H., Sailor D.-J. (2005). Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia : A comparison of implementations in two PBL schemes. *Atmospheric Environment*, vol. 39, n° 1, p. 73-84.
- Fanger P.-O. (1970). Thermal comfort analysis and applications in environment engineering.

Bibliographie

- Fanger P.-O. (1973). Assessment of man's thermal comfort in practice. *British Journal of Industrial Medicine*, vol.30, p.313-324.
- Faroux S., Kaptué Tchuenté A.T., Roujean J.-L., Martin E., Masson V. & Le Moigne P. (2013). ECOCLIMAP-II/Europe : a twofold database of ecosystems and surface parameters at 1-km resolution based on satellite information for use in land surface, meteorological and climate models, *Geoscientific Model Development*.
- Fiala D., Havenith G., Bröde P., Kampmann B. & Jendritzky, G. (2012). UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *International Journal of Biometeorology*, vol. 56, n° 3, p. 429-441.
- Fiala D., Lomas K.-J. & Stohrer M. (1999). A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions : The passive system. *Journal of Applied Physiology*, vol.87, p. 1957-1972.
- Foissard Xavier. L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique : application à l'agglomération rennaise. Thèse en géographie. Université Rennes 2, 2015.
- Fonseca S.-C., Oliveira F.-A.-R. & Brecht J.-K. (2002). Modelling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages: a review. *Journal of Food Engineering*, vol. 52, p. 99-119.
- Frank A.-U. (1996). Qualitative spatial reasoning : Cardinal directions as an example. *International Journal of Geographical Information Science*, vol.10, n° 3, p.269-290.
- Fremont A. 1974. Les profondeurs des paysages géographiques. Autour d'Écouves, dans le Parc régional Normandie-Maine, *L'espace géographique*, n° 2, p. 127-136.
- Frich P., Alexander L., Della-Marta P., Gleason B., Haylock M., Klein Tank A., et Peterson T. (2002). Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the 20th century. *Climate Research*, vol.19 :193.212.
- Giguère M. (2009). *Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains*, Institut National de Santé publique du Québec. 77 p. Disponible à l'adresse suivante :
- Grimmond C.-S.-B. & Oke T.-R. (2002). Turbulent heat fluxes in urban areas : Observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS). *Journal of Applied Meteorology*, vol.41, p. 792-810.
- Grimmond C.-S.-B., Best M., Barlow J., Arnfield A. J., Baik J. J., Baklanov A., & Clark P. (2009). Urban surface energy balance models: model characteristics and methodology for a comparison study. In *Meteorological and Air Quality Models for Urban Areas*, Springer Berlin Heidelberg, p 97-123.
- Grimmond C.-S.-B., Blackett M., Best M. J., Barlow J., Baik J.-J., Belcher S. E. & Fortuniak K. (2010). The international urban energy balance models comparison project: first results from phase 1. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 49, n° 6, p. 1268-1292.
- Grimmond C.-S.-B., Blackett M., Best M.-J., Baik J.-J. & al. (2011). Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison, *International Journal of Climatology*, Vol. 31, n° 2, p. 244-272.

- Grimmond C.-S.-B., Cleugh H.-A. & Oke T.-R. (1991). An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, vol.25, p. 311-326.
- Groleau D. (1987). *Modélisation des interactions entre formes urbaines et les facteurs physiques de l'environnement* in : European Conference on architecture. Munich 6-10 avril.
- Groleau D., Fragnaud F. & Rosant J.-M. (2003). Simulation of the radiative behavior of an urban quarter of Marseille with SOLENE model. In : *Fifth International Conference on urban climate*, Lodz, Pologne, 1-5.
- Guilloteau E. (1998). Optimized computation of transfer coefficients in surface layer with different momentum and heat roughness lengths, *Boundary-Layer Meteorol*, vol.87, p.147-160.
- Guilloteau E. (1999). *Modélisation des sols urbains pour les simulations de l'atmosphère aux échelles sub-meso (Modeling urban soils for atmospheric simulation at submeso scales)*. Thèse, Université de Nantes.
- Guyot G. (1999). *Climatologie de l'environnement : Cours et exercices corrigés*. Dunod, Paris, 2^{ème} édition.
- Hajat S., Sheridan S.-C., Allen M.-J., Pascal M., Laaidi K., Yagouti A. & Kosatsky T. (2010). Heat-health warning systems : a comparison of the predictive capacity of different approaches to identifying dangerously hot days. *American Journal Public Health*, vol.100, n°6, p.1137-1144.
- Haldane J.-S. (1905). The influence of high air temperatures : N° 1. *J Hyg (Lond)*, vol.5 (4), p. 494-513.
- Hamdi R. & Masson V. (2008). Inclusion of a drag approach in the town energy balance (teb) scheme : Offline 1d evaluation in a street canyon. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 47, n° 10, p. 2627-2644.
- Hann J. von. (1882). *Handbuch der Klimatologie*, Wien, 764 p.
- Höppe P. (2002). Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and Buildings*, vol. 34, p. 661-665.
- Höppe P.-R. (1999). The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Epidemiology*, vol. 43, p.71-75.
- Hornsby K. & Egenhofer M.-J. (1997). Qualitative representation of change. In *Spatial Information Theory*, LNCS, Springer-Verlag, vol. 1257, p. 15-33.
- Houghton F.-C., Yaglou C.-P. (1923). Determining lines of equal comfort. *AHSVE Transaction*, Vol 29, p 163.
- Houghton F.-C. & Yaglou C.-P. (1923). Determining equal comfort lines. *J Am Soc Heat Vent Engrs*29, 165-76.
- Howard L. (1820). *The climate of London*, op, cit, vol. 2.

Bibliographie

http://dial.academielouvain.be/vital/access/services/Download/boreal:115270/PDF_01

<http://www.cstb.fr/fileadmin/documents/publicationsscientifiques/doc00006279.pdf>

http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/988_MesureslotsChaleur.pdf

http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/988_MesureslotsChaleur.pdf

http://www.utci.org/isb/documents/perceived_temperature.pdf

Huntington E. (1924). *Civilisation and Climate*. New Haven, 3rd ed.

Ichinose T., Shimodozono K. & Hanaki K. (1999). Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmospheric Environment*, vol.33, p. 3897-3909.

Jendritzky G., Maarouf A., Fiala D. & Staiger H. (2002). An update on the development of a Universal Thermal Climate Index. *15th Conference on Biometeorology and Aerobiology*, 2002.

Jendritzky G., Staiger H., Bucher K., Graetz A. & Laschewski G. (2011). The perceived temperature. The method of the Deutscher Wetterdienst for the assessment of cold stress and heat load for the human body, Deutscher Wetterdienst Available.

Jensen C.-S. (2000). *Temporal Database Management*. PhD thesis, <http://www.cs.aau.dk/~csj/Thesis/>

Jentsch M.-F., Bahaj A.-S., James P.-A.-B., 2008 : Climate change future proofing of buildings – Generation and assessment of building simulation weather files. *Energy and Buildings*, vol.40, 2148-2168.

Jones P.D., New M., Parker D.-E., Martin S. & Rigor I.-G. (1999). Surface air temperature and its changes over the past 150 years. *Reviews of Geophysics*, vol. 37, p. 173-199.

Kalkstein L.-S., Jamason P.-F., Greene J.-S., Libby J. & Robinson L. (1996). The Philadelphia Hot Weather-Health Watch/Warning System : Development and Application, Summer 1995. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol.77, n° 7, p. 1519-1528.

Kent S.-T., Mc Clure L.-A., Zaitchik B.-F., Smith T.-T. & Gohlke J.-M. (2014). Heat Waves and Health Outcomes in Alabama (USA) : The Importance of Heat Wave Definition. *Environ Health Perspect.* Vol.122, p. 151-158.

Kiktev D., Sexton D., Alexander L., and Folland, C. (2003). Comparison of modeled and observed trends in indices of daily climate extremes. *Journal of Climate*, vol.16 :3560. 3571.

Knol M.-J. & VanderWeele T.-J. (2012). Recommendations for presenting analyses of effect modification and interaction. *International Journal of Epidemiology*, vol. 41, p. 514-20.

Kounkou-Arnaud R., Desplat J., Lemonsu A., Salagnac J.-L. & Lauffenburger M. (2012). Méthodologie pour la quantification de l'impact d'aménagements urbains sur un climat urbain modifié. *La Climatologie*, Numéro spécial Climats et changement climatique dans les villes.

Kovats R.-S. & Hajat S. (2008). Heat stress and public health : a critical review. *American Journal Public Health*, vol.29, p. 41-55.

- Krayenhoff E.-S. & Voogt J.-A. (2007). A microscale three-dimensional urban energy balance model for studying surface temperatures. *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 123, p. 433-461.
- Krayenhoff E.-S. & Voogt J.-A. (2007a). Combining sub-facet scale urban energy balance and sensor view models to investigate the dependence of effective their mal anisotropy on city structure. *7th AMS Symp. On the Urban Environment*, San Diego, 4 p.
- Krayenhoff E.-S. & Voogt J.-A. (2007b). A micro-scale 3-D urban energy balance model for studying surface temperatures. *Boundary Layer Meteorology*, vol. 123, p. 433-461.
- Kuh D., Ben-Shlomo Y., Lynch J., Hallqvist J. & Power C. (2003). Life course epidemiology. *Journal of Epidemiology and Community Health*, vol.57, p. 778.
- Kunz M. et Hurni L. (2011). Interactive functionality of cartographic information systems for natural hazards data. *In International Conference of Cratography*, 2011.
- Laaidi K. (1997). Les éléments du climat et leurs possibles implications sur la santé. *Presse Thermale et Climatique*, vol.134, p. 213-223.
- Laaidi K., Ung A., Wagner V., Beaudreau P. & Pascal M. (2012). *Système d'alerte canicule et santé : principes, fondements et évaluation*. Saint-Maurice : Institut de veille sanitaire, 19 p.
- Laaidi K., Ung A., Pascal M. & Beaudreau P. (2015). Vulnérabilité à la chaleur : actualisation des connaissances sur les facteurs de risque. *Bulletin Epidémiologique Hebdomadaire*, vol.5, p. 76-82.
- Lambert D. (2009). *Meso-micro-météorologie*. Première Partie : micro-météorologie. Université du Québec, Eva Monteiro.
- Langran G. & Chrisman N.-R. (1988). A framework for temporal geographic information. *Cartographica*, vol. 25, n° 3, p. 1-14.
- Lemonsu A. (2003). *Modélisation des processus de surface et de la couche limite en milieu urbain*. Thèse : météorologie urbaine, Toulouse III, 242 p.
- Lemonsu A., Kounkou-Arnaud R., Desplat J., Salagnac J.-L. & Masson V. (2013). Evolution of the parisian urban climate under a global changing climate, *Climatic change*, vol. 116, n°3-4, p. 679–692.
- Lemonsu A., Masson V., Shashua-Bar L., Erell E. & Pearlmutter D. (2012). Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas, *Geosci. Model Dev.*, vol. 5, p. 1377-1393.
- Liebard A. & De Herde A. (2005). *Traité d'architecture et d'urbanisme climatiques* - Le Moniteur.
- Ligozat G. (1998). Reasoning about cardinal directions. *Journal of Visual Languages and Computing*, vol9, p. 315-324.
- Lindberg F., Holmer B. & Thorsson S. (2008). SOLWEIG 1.0 - Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *International Journal of Biometeorology*, vol 52, 697-713.

Bibliographie

- Maclure M. (1991). The Case-Crossover Design : A Method for Studying Transient Effects on the Risk of Acute Events. *American Journal of Epidemiology*, vol 133, p. 144-53.
- Mahfouf J.-F. & Noilhan J. (June 1996). Inclusion of Gravitational Drainage in a Land Surface Scheme Based on the Force-Restore Method, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. Vol 35, p. 987-992.
- Markham S.-F. (1947). *Climate and energy of nations*. Oxford university Press, London.
- Masson V. & Seity Y. (2009). Including atmospheric layers in vegetation and urban offline surface schemes. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 48, n° 7, p. 1377-1397.
- Masson V. (2000). A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, n° 94, p. 357-397.
- Masson V. (2006). Urban surface modeling and the mesoscale impact of cities. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 24, p. 35-45.
- Masson V., Bonhomme M., Salagnac J.-L., Briottet X. & Lemonsu A. (2014). Solar panels reduce both global warming and Urban Heat Island. *Front. Environ. Sci.* **2** (14).
- Masson V., Grimmond C.-S.-B. & Oke T.-R. (2002). Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) Scheme with Direct Measurements from Dry Districts in Two Cities. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 41, n° 10, p. 1011-1026.
- Masson V., Moigne P. L., Martin E., Faroux S., Alias A., Alkama R., Belamari S., Barbu A., Boone A., Bouysse F. & al. (2013). The surfexv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes , *Geoscientific Model Development*, vol. 6, n° 4, p. 929-960.
- Masterson J. & Richardson F.-A. (1979). Humidex, A Method of Quantifying Human Discomfort Due to Excessive Heat and Humidity. Downsview, Ontario : *Environnement Canada*. 45 p.
- Matzarakis A. (2010). Climate Change : Temporal and spatial dimension of adaptation possibilities at regional and local scale. In Schott, C. Tourism and the implications of Climate Change : Issues and Actions, Emerald Group Publishing. *Bridging Tourism Theory and Practice*, vol. 3, p.237-259.
- Medina-Ramon M., Zanobetti A., Cavanagh D.P. & Schwartz J. (2006). Extreme temperatures and mortality : assessing effect modification by personal characteristics and specific cause of death in a multi-city case-only analysis. *Environmental Health Perspectives*, vol.114, p. 1331-1336.
- Mestayer P.-G. & Anquetin S. (1994). *Climatology of cities*. In : Diffusion and Transport of Polluants in Atmosphéric Mesoscale Flow Fields. Atmospheric Sciences Library, Kluwer Academic Publishers, p. 165-189.
- Mestayer P.-G. & Guilloteau E. (1998). Extension du modèle de sol SM2 pour SUBMESO aux sols urbains, Communication personnelle, ECN, France.
- Mestayer P.-G., Durand P., Augustin P. & al. (2005). The urban boundary-layer field campaign in Marseille (ubl/clu-escompte) : set-up and first results. *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 114, n°2, p. 315-365.

- Mestayer P.G., Durand P., Augustin P., Bastin S., Bonnefond J. M., Bénech B. & Drobinski P. (2004). The Urban Boundary Layer Field Campaign in Marseille (UBL/CLU-ESCOMPTE) : Set-up and first results. *Boundary Layer Meteorology*, vol. 114, n°2, p.315-365.
- Michelozzi P., de'Donato F., Accetta G., Forastiere F., D'Ovidio M., Perucci C.-A. & Kalkstein L. (2004). May. Impact of heat waves on mortality - Rome, Italy, June-August 2003. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep.* 7 ; vol.53, n°17, p. 369-71.
- Mills G.-M. (1993). Simulation of the Energy Budget of an Urban Canyon-I. Model Structure and Sensitivity Test, *Atmos. Environ*, vol. 27, p. 157-170.
- Missenard F.-A. (1933). *Température effective d'une atmosphère Généralisation température résultante d'un milieu*. In: Encyclopédie Industrielle et Commerciale, Etude physiologique et technique de la ventilation. Librairie de l'Enseignement Technique, Paris, p. 131-185.
- Mittelstras J. (2001). *On the philosophy of time*. *European Review*, Vol. 9, n°1, p. 19-29.
- Monteiro C.-A.-F et MENDOÇA F., *Clima urbano*, São Paulo, Contexto, 192 p., 2003.
- Munich R. (2006). Topics-Geo - annual review natural catastrophes 2005. Technical report, Munich Reinsurance Group.
- Musy M., Ramos F., Siret D., Moreau G. & Marenne C. (2006). Développement d'un SIG 3D dédié au diagnostic des potentialités environnementales des bâtiments. *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 16, n° 1, p. 71-91.
- Nadi S. et Delavar M.R. (2003). Spatio-temporal modeling of dynamic phenomena in GIS. *In Scan GIS*, p 215-225.
- Noilhan J., Planton S. (1989). A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Monthly Weather Review*, vol. 117, n°3, p. 536-549.
- Oke T.-R. (1978). *Boundary Layer Climates*. London : Methuen & Co Ltd, 372 p.
- Oke T.-R. (1979). Advectively-assisted evapotranspiration from irrigated urban vegetation. *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 17, n° 2, p. 167-173.
- Oke T.-R. (1987). *Boundary layer climates*. Londres, 2^{ème} édition.
- Oke T.-R., Zeuner G. et Jauregui E. (1992). The surface energy balance in Mexico City. *Atmospheric Environment*, vol. 26, p. 433-444.
- Olivier E. & Fairbridge R.-W. (1987). *Encyclopaedia of Climatology*. In *Encyclopaedia of Earth Sciences Series*, XI, Van Norstrand Reinhold, New-York, 980 p.
- Parmentier A. (2010). *Elaboration d'un outil d'aide à la décision pour atténuer le phénomène d'îlots de chaleur en milieu urbain*. Mémoire présenté à l'École de Technologie Supérieure, Maîtrise en Génie de l'Environnement, Université du Québec, Montréal.
- Peguy Ch. (1970). *Précis de climatologie*, Masson, Paris, 468 p.

Bibliographie

- Penicaud H. (1978). Microclimats urbains étudiés sous l'angle du confort à l'extérieur des bâtiments. Paris : Plan construction, RAUC.
- Peuquet D. (2002). *Representations of Space and Time*. Guilford Press, NewYork.
- Pigeon G. (2011). Computation of a thermal comfort index in the TEB urban canopy model, Technical Report for the VURCA Project, ANR-08-VULN-013-0x/VURCA.
- Pigeon G., Zibouche K., Bueno B., Le Bras J. & Masson V. (2014). Evaluation of building energy simulations with the TEB model against Energy Plus for a set of representative buildings in Paris. *Energy and Buildings*, vol.76, p.1-14.
- Plewe B. (2002). The Nature of Uncertainty in Historical Geographic Information, *Transactions in GIS*, vol.6, n°4, p. 431-456.
- Pomerantz M., Pon B., Akbari H. & Chang S.-C. (2000). *The Effect of Pavements' Temperatures On Air Temperatures in Large Cities* [en ligne], 22 p.
- Pumain D., Saint-Julien T. (1997). *Analyse spatiale* (1), collection CURSUS, Armand Colin, Paris.
- Quénol H. (2011). *Observation et modélisation spatiale du climat aux échelles nées dans un contexte de changement climatique*. Thèse en Géographie. Université Rennes 2.
- Randell S.-H., Mercer R.-R. & Young S.-L. (1989). Postnatal growth of pulmonary acini and alveoli in normal and oxygen-exposed rats studied by serial section reconstructions. *Am J Anat*, p. 55-68.
- Rapport GIEC : Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y., Farahani E., Kadner S., Seyboth K., Adler A., Baum I., Brunner S., Eickemeier P., Kriemann B., Schlömer J.-S., von Stechow C., Zwickel T. & Minx J.C. editors. (2014). IPCC. Summary for Policymakers. Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. : Cambridge University Press.
- Reid C.-E., Snowden J.-M., Kontgis C. & Tager I.-B. (2012). The role of ambient ozone in epidemiologic studies of heat-related mortality. *Environmental Health Perspectives*, vol.120, 1627p.
- Renou E. (1862). Différences de température entre Paris et choisy-le-roi, *Société Météorologique de France, Annuaire*, vol.10, 105–109.
- Richards K. & Oke T.-R. (1998). Dew in Urban Environments, *Proceedings of 2nd AMS Urban Environment Symposium*.
- Ringenbach N. (2004). *Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine : mesures, modélisation et validation sur Strasbourg*. Thèse : climatologie et temps, Strasbourg I.
- Rizwan A.-M., Denis Y.-C. & Liu C. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. Département de génie mécanique, University of Hong Kong, (Chine). *Journal of Environmental Sciences*, vol.20, p.120-128.

- Roberts S.-M., Oke T.-R., Voogt J.-A., Grimmond C.-S.-B. & Lemonsu A. (2003). Energy storage in a European city center. In : Fifth International Conference on urban climate, Lodz, Pologne.
- Roberts S.-M., Oke T.-R., Lemonsu A., Grimmond C.-S.-B. & Jackson P. (janvier 2004). Sensitivity of surface - atmosphere energy exchanges within urban areas derived from simulations. In: 84th AMS Annual Meeting : *Symposium on planning, now casting, and forecasting in the urban zone*, Seattle, Etat-Unis.
- Robine J.-M., Cheung S.-L.-K., Le Roy S., Van Oyen H., Griffiths C., Michel J.-P. & Herrmann, F.-R. (2008). Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Les Comptes Rendus/Série Biologies*, vol.331, p. 171-78.
- Rooney C., McMichael A.-J., Kovats R.-S. & Coleman M.-P. (1998). Excess mortality in England and Wales, and in Greater London, during the 1995 heatwave. *Journal of Epidemiology and Community Health*, vol. 52, p. 482-6.
- Russo S., Dosio A., Graversen R.-G., Sillmann J., Carrao H., Dunbar M.-B., Singleton A., Montagna P., Barbola P., & Vogt J.-V. (2014). *Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world*, *Journal Geophys. Res. Atmos*, 119.
- Sakhy Ariane. Îlots de chaleur et morphologie urbaine de l'agglomération parisienne. Conséquences sur la mortalité durant la canicule de 2003. Sciences de l'Homme et Société. Université Paris Diderot (Paris 7) Sorbonne Paris Cité, 2016.
- Seity Y., Brousseau P., Malardel S., Hello G., Bénard P., Bouttier F., Lac C. & Masson V. (2011). The AROME-France convective scale operational model, *Monthly Weather Review*, vol.139, n°3, p. 976-991.
- Shashua-Bar L., Pearlmutter D. & Erel E. (2009). The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate, *Landscape and Urban Planning*, vol. 92, n° 3, p. 179-186.
- Sinton D. (1978). The inherent structure of information as a constraint to analysis: mapped thematic data as a case study. *Geographic Information Systems*, vol 6.
- Slater K. (1985). Human Comfort. Springfield : Charles C Thomas.
- Smargiassi A., Goldberg M.-S., PlanteC., Fournier M., Baudouin Y. & Kosatsky T. (2009). Variation of daily warm season mortality as a function of micro-urban heat islands. *Journal of Epidemiology and Community Health*, vol.63, p.659-664.
- Soubeyroux J.-M., Schneider M., Ouzeau G. (2015). Recensement des vagues de chaleur en France à différentes échelles spatiales et évolution en contexte de changement climatique. *Actes du 28^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC)*, 1-4 juillet 2015 Liège, Belgique, p. 615-620.
- Spangenberg J.-H. (2004). Sustainability Science: Which Science and Technology for Sustainable Development? Presented at the meeting of the IRDF Forum on Sustainable Development, Johannesburg. <http://www.istas.coo.es/escorial04/material/dc10.pdf>

Bibliographie

- Staiger H., Bucher K., Jendritzky G. (1997). Gefühlte Temperatur. Die physiologisch gerechte Bewertung von Wärmebelastung und Kältestress beim Aufenthalt im Freien in der Maßzahl Grad Celsius. *Annalen der Meteorologie*, Deutscher Wetterdienst, Offenbach, vol.33, p. 100-107.
- 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 and Climatology*, vol.18, p. 861-873.
- Sthüpnagel A. (1987). Klimatische Veränderungen in Ballungsgebieten unter besonderer Berücksichtigung der Ausgleichswirkung von Grünflächen, dargestellt am Beispiel von Berlin (West). Diss. am Fachbereich 14 der Technischen Universität Berlin.
- Taha H. (1996). Modeling the impacts of increased urban vegetation on the ozone air quality in the South Coast Air Basin. *Atmospheric Environment*, vol.30, n° 20, p. 3423-3430.
- Taha H. (1997). Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*. vol. 25, n° 2, p. 99-103.
- Taha H., Akbari H., Sailor D., Ritschard R. (1992). *Causes and effects of heat islands: sensitivity to surface parameters and anthropogenic heating*, Lawrence Berkeley Laboratory Report.
- Tan J., Zheng Y., Tang X., Guo C., Li L., Song G. & al. (2010). The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. *International Journal of Biometeorology*, vol.54, p. 75-84.
- Thom E.-C. (1959). The discomfort index, *Weatherwise*, vol.12, n°2, p. 57-60.
- Toudert A. & Mayer H. (2005). Thermal comfort in urban streets with trees under hot summer conditions. Proc. 22th Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA), Beirut, Lebanon. 13-16 Nov. 2005, vol. 2. p. 699-704.
- Tressol M. (2008). Thèse : *Etude de la canicule européenne avec les données aéroportées MOZAIC : pollution et transport*. Université Toulouse III - Paul Sabatier.
- Trigo R.-M., Garcia-Herrera R., Diaz J. & Trigo F. (2005). How exceptional was the early august 2003 heatwave in france ? *Geophysical Research Letters*, 32 (L10701).
- Van Moeseke G. (2002). Solar and Internal Gains in Low-Energy and Passive Houses. Présenté à PLEA 2012, Lima. Consulté à l'adresse
- Vandentorren S., Suzan F., Medina S., Pascal M., Maulpoix A., Cohen J.-C. & Ledrans M. (2004). Mortality in 13 French cities during the August 2003 heat wave, *American Journal Public Health*, vol.94, p.1518-1520.
- Vinet F. (2000). *Le risque grêle en agriculture*. Editions Lavoisier Tec & Doc, 237 p.
- Voyeykov A.-I. (1884). Climates of the Earth and especially in Russia. Selected Works, *Academy Science of the USSR (1948)*, vol. 1, Moscow-Leningrad (in Russian).
- Wahl L., Patrice P., Pichard C., Mory N., Drogue G. & Pfister L. (2005). Les canicules de l'été 2003 : un événement météorologique exceptionnel dans le quart nord-est de la France, *Revue*

TABLE DES FIGURES

gne], vol. 45 / 2, mis en ligne le 10 juin 2009, consulté le 18 juillet
-----org/362

WHO Regional Office for Europe. (2009). Improving public health responses to extreme weather /heat-waves-Euro HEAT. Copenhagen, Danemark: World Health Organization. 70 p. Disponible à partir de l'URL : http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0010/95914/E92474.pdf

Worboys M.-F. (1990). Reasoning about gis using temporal and dynamic logics. Rapport technique 90-4, NCGIA

Worboys M.-F. (2001). *Modelling changes and events in dynamic spatial systems with reference to socio-economic units*. In Frank, Raper and Cheylan (Eds.), *Life and Motion of Socio-Economic Units*, London.

Xu Y., Dadvand P., Barrera-Gómez J., Sartini C., Mari-Dell'Olmo M., Borrell C. & Basagaña X. (2013). Differences on the effect of heat waves on mortality by socio demographic and urban landscape characteristics. *Journal of Epidemiology and Community Health* vol. 67, p. 519-25.

Yaglou C.-P. (1927). The comfort zone for men at rest and stripped to the waist. *Transactions of the American Society of Heating and Ventilating Engineers*, vol. 33 : 165-179.

Yaglou C.-P., Minard D. (1957). Control of heat casualties at military training centers. *Am Med Assoc Arch Ind Health*, vol.16, p.302-316.

Yuan L. (2009). Knowledge toward discovery about geographic dynamics in spatiotemporal databases. *In Geographic Data Mining and Knowledge Discovery*. Second Edition, Edited by Harvey J Miller and Jiawei Han? p. 347-365.

Yuan M. (1999). Use of a Three-domain Representation to Enhance GIS Support For Complex Spatiotemporal Queries. *Transaction in GIS*, vol.3, n°2, p.137-159.

Zhang L., Gao C. & Zhang A. (2005). Numerical Simulation of the Wind Field Around Different Buildings Arrangements, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 93, n° 12, p. 891-904.