



Proposition d'indicateurs de confort thermique et estimation de la température radiante moyenne en milieu urbain tropical. Contribution à la méthode nationale d'évaluation des ÉcoQuartiers

Virginie Grosdemouge

► To cite this version:

Virginie Grosdemouge. Proposition d'indicateurs de confort thermique et estimation de la température radiante moyenne en milieu urbain tropical. Contribution à la méthode nationale d'évaluation des ÉcoQuartiers. Thermique [physics.class-ph]. Université de la Réunion, 2020. Français. NNT : 2020LARE0033 . tel-03123710

HAL Id: tel-03123710

<https://theses.hal.science/tel-03123710>

Submitted on 28 Jan 2021

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

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



Université de La Réunion

Laboratoire de Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Energie, l'Environnement et le Bâtiment

THESE

Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de La Réunion,

Spécialité **Physique du Bâtiment et Génie Urbain**

PROPOSITION D'INDICATEURS DE CONFORT THERMIQUE ET ESTIMATION DE LA TEMPERATURE RADIANTE MOYENNE EN MILIEU URBAIN TROPICAL. Contribution à la méthode nationale d'évaluation des EcoQuartiers.

Présentée et soutenue le **9 Décembre 2020** par

Virginie GROSDÉMOUGE

Préparée au sein du laboratoire PIMENT EA 4518

En convention CIFRE avec la Mairie de Saint-Pierre

JURY

Christian INARD	Pr., Université de La Rochelle, LaSIE	Rapporteur
Valéry MASSON	Ingénieur en chef des Ponts, des Eaux et des Forêts, CNRM	Rapporteur
Marjorie MUSY	Directrice de Recherche, CEREMA Ouest	Examineur
Jean-Philippe PRAENE	MCF, Université de La Réunion, PIMENT	Examineur
Mathieu David	MCF HDR, Université de La Réunion, PIMENT	Co-Directeur
François GARDE	Pr., Université de La Réunion, PIMENT	Directeur

Résumé

Le Projet de Renouvellement Urbain du quartier de la Ravine Blanche porté par la Ville de Saint-Pierre fait partie des premiers lauréats du Label national EcoQuartier (EQ) lancé en 2012 par l'Etat et surtout le premier EQ situé en climat tropical. Une « campagne test d'évaluation » des EQ a, par la suite, été proposée par le Ministère aux collectivités dont les EQ ont été labellisés, afin d'évaluer l'atteinte des objectifs fixés et de suivre les performances réelles de leurs opérations d'aménagement.

Cependant, notre retour d'expérience montre que les indicateurs développés dans la méthode nationale d'évaluation ne sont pas tous adaptés à notre contexte en milieu tropical. Ceci est notamment le cas pour la thématique de l'énergie, dans laquelle les indicateurs sont principalement basés sur le calcul de ratios énergétiques. Or, il existe des spécificités liées à notre contexte, en termes de climatologie urbaine, de réglementation thermique ou encore de pratiques constructives, qui justifient une approche portée sur l'évaluation du confort thermique, complémentaire à l'approche énergie. Ainsi, un indicateur de performance des bâtiments basé sur un niveau de confort thermique semble plus adapté en milieu tropical que le strict indicateur énergétique.

A l'échelle du quartier, une double approche doit être envisagée pour l'évaluation du confort thermique: une étude à l'intérieur des bâtiments et en extérieur dans les espaces urbains. En effet, dans un contexte local favorisant la conception de bâtiments passifs de plus en plus ouverts sur l'extérieur, lier l'intérieur et l'extérieur est devenu un enjeu primordial.

Contrairement aux études de confort thermique en intérieur qui sont déjà nombreuses et où des normes existent, les études de confort thermique en milieu urbain tropical sont récentes et nécessitent un travail de recherche approfondi.

Le travail mené dans le cadre de cette thèse se propose de répondre aux questions suivantes :

- Comment évaluer le confort thermique en extérieur, à l'échelle du quartier, en climat tropical ? Quel(s) indicateur(s) choisir ?
- Comment rendre la méthodologie développée reproductible et opérationnelle afin de permettre aux collectivités d'évaluer leurs opérations d'aménagement ?

Pour répondre à ces questions, une revue de littérature portant sur les différents indices développés afin de quantifier le confort thermique en extérieur, a été réalisée. Celle-ci nous a permis de porter notre choix sur deux indices pertinents : la PET et l'UTCI.

Il a également été mis en évidence qu'aucune méthode standardisée n'existe pour l'évaluation du confort thermique en milieu urbain, que ce soit en termes d'instrumentation ou de traitement de données. De plus, le confort thermique en milieu urbain tropical est fortement affecté par deux paramètres physiques difficilement caractérisables, aussi bien en termes de mesures que de modélisation, à savoir la vitesse d'air au niveau des piétons et la température radiante moyenne

extérieure (T_{mrt}). Les travaux de recherche menés dans cette thèse s'attachent à caractériser la notion complexe de T_{mrt} , qui est essentielle au calcul des indices de confort PET et UTCI.

Aussi, afin de lever les différents verrous scientifiques identifiés, cette thèse propose :

- Une nouvelle mise en œuvre d'une méthode de mesure existante permettant d'estimer T_{mrt} et de localiser les sources éventuelles d'inconfort thermique ;
- Une méthodologie reproductible se basant sur des mesures microclimatiques combinées à des enquêtes de terrain, appliquée au cas d'étude de l'EQ de la Ravine Blanche ;
- Une évaluation de la perception du confort thermique des usagers dans un espace urbain de l'EQ situé sur la zone littorale, avec la problématique du confort d'été, en utilisant les indices PET et UTCI ;
- Une comparaison entre les résultats obtenus pour la T_{mrt} en fonction des méthodes de mesure (globe noir / globe gris) et l'étude de leur influence sur les indices de confort choisis ;
- Une calibration des indices PET et UTCI afin de refléter au mieux la sensibilité thermique de la population locale, ainsi que la définition de leur zone de confort respective pour un climat similaire à celui de Saint-Pierre ;
- Et enfin, la définition d'un indicateur permettant aux collectivités d'évaluer le niveau de confort thermique de leurs espaces urbains, dans un climat similaire à celui de Saint-Pierre.

En conclusion, ces travaux de recherche permettront de nous engager sur une route encore longue, mais inéluctable, dans un contexte de réchauffement climatique, menant à terme à l'aménagement de quartiers plus confortables en zone tropicale.

Mots-clés : Confort thermique en milieu urbain, température radiante moyenne extérieure, PET, UTCI, retour d'expérience, méthode d'évaluation, calibration, indicateur de confort thermique, aménagement urbain, écoquartier, climat tropical.

Abstract

The urban renewal project of Ravine Blanche, carried out by the City of Saint-Pierre, in Reunion Island, is the only overseas neighbourhood that was awarded the French sustainable neighbourhood certification in the tropics among 32 other French projects in 2013. A scientific campaign of environmental evaluation related to water, energy and waste management, has been launched in order to assess the real performance of the district and the efficiency of the policies set up by the local authorities.

However, feedback from post-occupancy evaluation shows that some indicators proposed by the national evaluation methodology are not suitable for specific application in our local context in the tropics. Indeed, the thematic area linked to Energy is mainly composed of indicators based on the calculation of energy ratios. Nevertheless, there are specificities linked to our context, in terms of urban climatology, thermal regulations or construction practices, which justify an approach focused on the evaluation of thermal comfort, in addition to the energy approach. Thus, a building performance indicator based on a level of thermal comfort seems more appropriate in a tropical urban environment.

At the neighbourhood scale, the assessment of thermal comfort involves a two-pronged approach: indoor thermal comfort in buildings as well as thermal comfort in outdoor urban spaces. Indeed, in a local context promoting the design of passive buildings, linking the inside and the outside has become a key issue.

Outdoor thermal comfort, as opposed to indoor comfort, is a relatively new field of research and requires in-depth research studies. Moreover, several standards and guidelines exist but they are all intended for indoor conditions only.

This thesis will therefore address the following research questions:

- How to assess outdoor thermal comfort at the neighbourhood scale in the tropics? Which indicators to use?
- How to propose a reproducible and operational methodology for local authorities in order to assess their urban development operations?

A literature review of the main existing outdoor thermal comfort indices has been carried out. Two relevant indices for application in a tropical climate have been chosen: the PET and the UTCI indices.

There is a real need for standardized guidelines related to measurements of micrometeorological variables, questionnaire design and the calculation of thermal comfort indices in outdoor environments.

The mean radiant temperature (T_{mrt}) and the wind speed at pedestrian level are the two most important factors that influence human thermal comfort in outdoor spaces, especially in tropical climate conditions. However, these two parameters are particularly difficult to determine, whether in terms of

in-situ measurements or numerical modelling. This research study mainly focuses on the definition and estimation of T_{mrt} , which plays a pivotal role in the calculation of the PET and UTCI indices.

To address these major scientific challenges, this thesis aims to:

- Set up an experimentation based on an existing methodology that allows us to estimate the value of T_{mrt} at the point of interest but also the share of each radiant object;
- Propose a methodology relating to how to conduct field surveys in outdoor environments with micrometeorological measurements and its application in the eco-neighbourhood of Ravine Blanche;
- Investigate people's subjective thermal perception in a coastal outdoor urban environment during summer, by applying the PET and UTCI indices;
- Analyse the difference between two popular radiation measurement techniques in determining T_{mrt} (black globe Vs grey globe) and their impact on the thermal comfort indices;
- Calibrate the scale of human thermal sensation of the PET and UTCI indices and their respective comfort zones, for the climate of Saint-Pierre and similar climates;
- Define an outdoor thermal comfort assessment indicator enabling planners or local authorities to evaluate the outdoor thermal comfort levels in their urban spaces, in the climate of Saint-Pierre or similar climates.

In conclusion, this research study is a step towards addressing the climate change issue by creating more comfortable neighbourhoods in a tropical climate.

Keywords: Outdoor thermal comfort, outdoor mean radiant temperature, PET, UTCI, feedbacks, POE, sustainability assessment tool, calibration, thermal comfort indices, urban planning, sustainable neighbourhood, tropical climate.

Remerciements

La thèse est une expérience personnelle et professionnelle à la fois très enrichissante et éprouvante, dont l'achèvement marque une étape importante dans notre vie. Le chemin emprunté peut parfois nous paraître bien long et semé d'embûches mais il nous permet aussi de faire de belles découvertes humaines et scientifiques, de se découvrir soi-même, d'apprendre à se surpasser et de voler vers de nouveaux horizons pleins de promesses.

Cette belle aventure a débuté grâce à l'implication de mon directeur de thèse, François GARDE, et je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude pour la confiance qu'il m'a accordée et pour son soutien indéfectible. Cette immersion réussie dans le monde de la recherche n'aurait pu se faire sans lui et ses précieux conseils.

Je remercie sincèrement mon co-directeur de thèse, Mathieu DAVID, pour les échanges scientifiques constructifs que nous avons eus tout au long de ce beau parcours ainsi que pour l'aide précieuse qu'il m'a apportée dans la rédaction de ce manuscrit. Son dévouement et sa bienveillance m'ont permis de garder le cap, même en pleine tempête.

Mes remerciements s'adressent également aux rapporteurs et aux autres membres du jury qui ont accepté de participer à mon jury de thèse et d'évaluer mon travail.

Les différents comités de suivi de thèse qui ont jalonné mon parcours ont été une source d'échanges riches, qui m'ont aidée dans les moments de doute à avancer dans la bonne direction et à mieux cerner ma problématique. Pour cela, je tiens à remercier chaleureusement Sophie MOREAU, Marjorie MUSY, Fabrice RODRIGUEZ et Jean-Philippe PRAENE pour leur implication.

Cette thèse CIFRE a également été une très belle opportunité pour moi de pouvoir évoluer au sein du Service Aménagement de la Mairie de Saint-Pierre. Je tiens à exprimer ma reconnaissance à tous ceux qui se sont battus pour que ce projet de thèse puisse voir le jour, à savoir Mr Michel FONTAINE, Maire de Saint-Pierre, Mr David LORION et Mr Olivier NARIA, élus à la Ville, ainsi que la CIVIS.

J'adresse mes plus sincères remerciements à Thierry PAYET, DGA du service Aménagement, ainsi qu'à l'ensemble de mes anciens collègues pour leur accueil chaleureux, leur sollicitude et leur écoute. Un grand merci également à Roberto DEBOISVILLIERS, qui a accepté de m'encadrer et qui a fait en sorte que toutes les conditions soient réunies pour que je réussisse à atteindre la ligne d'arrivée. Merci à toi, Patrice MARCEL, pour ton soutien, ta disponibilité et ton aide plus que précieuse dans ce périple de longue haleine. Ta grande maîtrise du projet de rénovation urbaine de Ravine Blanche m'a vraiment facilité la tâche. Aslam, Josian, Jean-pierre, je n'oublierai jamais les moments d'échanges ou les fous rires que nous avons partagés ensemble. J'ai une pensée particulière pour Reine, qui a été plus d'une fois d'un grand réconfort.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude aux différents services de la Mairie de Saint-Pierre, ainsi qu'à l'ensemble des acteurs qui ont été sollicités dans le cadre de mes travaux de recherches, pour toute l'aide et le temps précieux qu'ils m'ont accordés, à savoir: la CIVIS, HCe, la SEMRRE, TîTang Recup, EDF et Véolia, sans oublier les directeurs et instituteurs des écoles élémentaires Jean Jaurès, Louis Aragon et Raphaël Barquisseau.

Je remercie vivement les différents bailleurs sociaux, la SEMADER, la SHLMR et la SIDR, pour leur implication tout au long des études menées et particulièrement Marie JAUNEAU, Éric ROUCOU et Sébastien GUYONVARCH qui ont été mes interlocuteurs privilégiés. Merci pour la patience dont vous avez fait preuve à mon égard face à mes nombreuses sollicitations.

Un grand remerciement à toute l'équipe de Réuniwatt pour cette belle collaboration dans le cadre de la thèse.

Une grande partie de ma thèse s'est déroulée sur le terrain, au cœur du quartier de la Ravine Blanche. J'aimerais ainsi exprimer ma profonde reconnaissance aux différentes personnes qui m'ont accueillie chez elles et qui ont accepté de participer à l'étude de confort thermique. Merci également à tous ceux dont j'ai croisé la route au cours de mes différentes sessions d'enquête et qui ont pris le temps de répondre à mes questions avec le sourire.

Je remercie tous les membres du Laboratoire PIMENT, du département SBE et de l'IUT de Saint-Pierre pour le cadre de travail convivial et dynamique qu'ils ont su mettre en place, avec une attention toute particulière pour Angélique SERY et Vanessa DIJOUX.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude envers Jérôme VIGNERON qui a su faire preuve d'originalité dans la réalisation de la station météorologique mobile et qui est venu à mon secours plus d'une fois au cours de mes nombreuses expérimentations.

Mille mercis à tous les doctorants qui ont partagé mon quotidien durant ces nombreuses années et qui sont pour moi comme une deuxième famille, avec une mention spéciale pour Delphine, Jennifer et Vanessa. Les moments passés avec vous dans la bonne humeur ont su alléger les moments difficiles. Je n'oublierai jamais nos concours de pâtisserie, nos longues discussions à la pause déjeuner à refaire le monde ou encore nos folles parties de « loups-garous ». J'ai vraiment été heureuse de vivre cette grande aventure à vos côtés. Merci aussi à ceux qui ont sacrifié leur grasse matinée le samedi pour venir m'aider dans mes enquêtes.

Je n'oublie pas tous les étudiants que j'ai eu la chance d'encadrer durant leur stage ou leur projet de fin d'études et qui ont participé à mes travaux de recherches : Alexandre, Aratti, Clara, Fabien, Fayyaz, Joël, Kévin F., Kévin L., Malaurie, Marc-André, Mathilde, Patrice, Pierre-Loïc, Ségolène. Je leur exprime mes plus vifs remerciements.

Enfin, je ne peux manquer d'exprimer avec tendresse toute la reconnaissance que j'éprouve à l'égard de ma famille et de mes amis pour tout l'amour et le réconfort qu'ils m'ont apportés, ainsi que leurs encouragements constants durant cette belle et longue épopée. Je remercie du fond du cœur mes

parents, mes héros, sans qui je ne serais pas là aujourd'hui. Ils sont pour moi une source intarissable de motivation et d'inspiration. Merci aussi, papa, d'avoir participé à la relecture de ce manuscrit.

Les mots ne suffisent pas à exprimer toute la gratitude que j'ai pour mon époux, Karim, qui me donne du courage et me pousse à me surpasser chaque jour un peu plus. Merci d'avoir traversé avec moi les moments de doutes et de bonheur durant toutes ces années, avec un optimisme inébranlable. Merci de m'avoir soutenu et de m'avoir redonné le sourire plus d'une fois.

Merci à tous de m'avoir aidée à naviguer sur cet océan d'incertitudes toutes voiles déployées.

Table des matières

RESUME.....	I
ABSTRACT	III
REMERCIEMENTS.....	V
NOMENCLATURE	5
INTRODUCTION GENERALE.....	13
CHAPITRE 1. CONTEXTUALISATION DE LA METHODE NATIONALE D’EVALUATION DES ECOQUARTIERS ET RETOUR D’EXPERIENCE DE L’ECOQUARTIER DE LA RAVINE BLANCHE.	17
1.1. INTRODUCTION.....	18
1.1.1. Un contexte favorable à l’émergence de la démarche EcoQuartier en France	18
1.1.2. Les approches méthodologiques, référentiels et outils existants pour l’évaluation des écoquartiers	21
1.2. PRESENTATION DU LABEL ECOQUARTIER.....	35
1.2.1. Du lancement de la démarche ÉcoQuartier au Label national.....	35
1.2.2. Le processus général de la campagne de labellisation	35
1.3. CAMPAGNE TEST D’EVALUATION DES ECOQUARTIERS APPLIQUEE AUX ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX.....	38
1.3.1. Objectif et méthodologie de la méthode nationale d’évaluation.....	38
1.3.2. Contextualisation de la méthode dans différents EcoQuartiers engagés dans la démarche	41
1.4. APPLICATION DE LA METHODE D’EVALUATION AU CAS D’ETUDE DE L’ECOQUARTIER DE LA RAVINE BLANCHE	43
1.4.1. Contexte climatique	43
1.4.2. Un contexte réglementaire différent à La Réunion	44
1.4.3. Présentation du programme de rénovation urbaine de la Ravine Blanche.....	46
1.5. RESULTATS DE LA CAMPAGNE D’EVALUATION	55
1.5.1. Composition de l’EcoQuartier à l’instant « t » de l’évaluation.....	55

1.5.2.	Résultats obtenus pour l'Engagement 17 relatif à l'énergie	56
1.6.	DISCUSSION	64
1.6.1.	Retours critiques sur la CEQ et la méthode d'évaluation nationale des EcoQuartiers.	64
1.6.2.	Méthode contextualisée : Vers une approche confort thermique plutôt qu'énergétique..	65
1.6.3.	Méthodologie d'évaluation de l'engagement 16 du Label ÉcoQuartier	69
1.6.4.	Proposition contextualisée d'indicateurs sur l'approche confort thermique	71
1.7.	CONCLUSION	75
CHAPITRE 2. ETAT DE L'ART SUR LES MODELES DE CONFORT THERMIQUE URBAIN APPLICABLES EN CLIMAT TROPICAL		77
2.1.	INTRODUCTION.....	78
2.2.	EFFETS DE L'ENVIRONNEMENT THERMIQUE SUR LE CORPS HUMAIN.....	79
2.2.1.	Bilan thermique du corps humain.....	79
2.3.	FACTEURS INFLUENÇANT LE CONFORT THERMIQUE EN CLIMAT TROPICAL.....	81
2.3.1.	Température d'air	82
2.3.2.	Température radiante moyenne (T_{mrt})	82
2.3.3.	Humidité relative	83
2.3.4.	Vitesse d'air	83
2.3.5.	Activité et métabolisme	84
2.3.6.	Habillement.....	85
2.3.7.	Les autres facteurs impactant le confort.....	87
2.3.8.	Adaptation à l'environnement thermique.....	87
2.4.	NORMES RELATIVES AU CONFORT THERMIQUE URBAIN.....	91
2.5.	INDICES DE CONFORT THERMIQUE EN MILIEU URBAIN.....	91
2.5.1.	Indices « rationnels ».....	92
2.5.2.	Indices « simples » ou « empiriques »	104
2.6.	SYNTHESE : COMPARAISON DES DIFFERENTS INDICES THERMIQUES.....	113
2.7.	CONCLUSION	122

CHAPITRE 3. MESURE DE LA TEMPERATURE RADIANTE MOYENNE EN EXTERIEUR : ENTRE NECESSITES ET DIFFICULTES.125

3.1. INTRODUCTION ET DEFINITION DE LA TEMPERATURE RADIANTE MOYENNE EXTERIEURE ...	126
3.2. ETAT DE L'ART SUR LES METHODES EXISTANTES PERMETTANT D'ESTIMER T_{MRT} EN EXTERIEUR	130
3.2.1. Modélisation numérique de T_{mrt}	130
3.2.2. Mesures in situ de T_{mrt}	138
3.3. PROPOSITION D'UNE NOUVELLE MISE EN ŒUVRE DE LA METHODE RAI AFIN D'ESTIMER T_{MRT} EN MILIEU URBAIN TROPICAL	159
3.3.1. Intérêts de la méthode	159
3.3.2. Protocole expérimental.....	160
3.3.3. Principe de la méthode	168
3.3.4. Procédure envisagée pour le traitement des données	170
3.3.5. Principales limites de la méthode mise en œuvre	174
3.4. CONCLUSION	176

CHAPITRE 4. EVALUATION DU CONFORT THERMIQUE ET CALIBRATION DES INDICES PET ET UTCI EN CLIMAT TROPICAL. APPLICATION DANS L'ECOQUARTIER DE LA RAVINE BLANCHE SITUE EN ZONE LITTORALE.177

4.1. INTRODUCTION ET REVUE DE LITTERATURE SUR LA CALIBRATION DES INDICES DE CONFORT URBAIN PET ET UTCI.....	178
4.2. CONTEXTE CLIMATIQUE DU CAS D'ETUDE DE LA RAVINE BLANCHE, SAINT-PIERRE, LA REUNION	183
4.3. MATERIEL ET METHODE.....	186
4.3.1. Localisation des enquêtes.....	186
4.3.2. Mesure des variables microclimatiques et instrumentation.....	190
4.3.3. Questionnaire utilisé	191
4.3.4. Choix des indices de confort thermique en milieu urbain	194
4.3.5. Méthode de traitement des données et calcul des indices PET et UTCI.....	196
4.3.6. Méthodologie suivie pour l'analyse des résultats	199
4.4. RESULTATS.....	203

4.4.1.	Statistiques générales des enquêtes	203
4.4.2.	Conditions climatiques générales et microclimatiques des jours d'enquête.....	205
4.4.3.	Influence du choix de la méthode de mesure et de calcul de T_{mrt} sur les indices de confort PET et UTCI.....	208
4.4.4.	Analyse du confort thermique	211
4.4.5.	Benchmark et calibration de l'indice PET'	218
4.4.6.	Benchmark et calibration de l'indice l'UTCI.....	227
4.5.	CONCLUSION	237
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES		239
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		245
ANNEXES.....		263

Nomenclature

Lettres latines

<i>Symbole</i>	<i>Nom</i>	<i>Unité</i>
A	Rayonnement atmosphérique	[W/m ²]
ASV	Actual Sensation Vote	[-]
C	Perte (gains) de chaleur par convection	[W/m ²]
CN	Compte numérique des images infrarouges	[-]
C _{res}	Pertes thermiques par convection liée à la respiration	[W/m ²]
C _{sk}	Pertes (gains) thermiques de la peau par convection	[W/m ²]
D	Diamètre	[m]
E	Rayonnement de grande longueur d'onde provenant de l'environnement	[W/m ²]
E _D	Flux de chaleur latent pour évaporer l'eau en vapeur d'eau se diffusant à travers la peau	[W/m ²]
E _R	Flux de chaleur pour chauffer et humidifier l'air inspiré	[W/m ²]
E _{res}	Pertes thermiques par évaporation liée à la respiration	[W/m ²]
E _{sk}	Pertes thermiques de la peau par évaporation	[W/m ²]
E _{SW}	Flux de chaleur de l'évaporation de la sueur	[W/m ²]
ET*	Effective Temperature	[°C]
F _i	Facteurs de forme	[-]
f _p	Facteur de projection	[-]
h	Hauteur moyenne des bâtiments	[m]
H	Hauteur	[m]
HD	Humidex	[-]

HI	Heat Index	[°C]
HR	Humidité relative	[%]
hs	Hauteur solaire	[°]
I	Rayonnement solaire direct	[W/m ²]
I*	Flux radiatif reçu par une surface perpendiculaire au rayonnement incident	[W/m ²]
I _{cl}	Isolation vestimentaire	[clo] ou [m ² K/W]
IMC	Indice de masse corporelle	[kg/m ²]
K _i	Flux de courte longueur d'onde	[W/m ²]
l	Longueur de la rue	[m]
L _i	Flux de grande longueur d'onde	[W/m ²]
M	Métabolisme / Niveau d'activité métabolique	[met] ou [W/m ²]
Me	Emittance énergétique d'un objet	[W/m ²]
Me ₀	Emittance énergétique d'un corps noir	[W/m ²]
Mskdot	Flux lié à la transpiration	[W/m ²]
MTSV	Mean Thermal Sensation Vote	[-]
NET	Normal Effective Temperature	[°C]
OUT_SET*	Outdoor Effective Temperature	[°C]
PET	Physiologically Equivalent Temperature	[°C]
PMV	Predicted mean vote	[-]
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied	[%]
PST	Physiological Subjective Temperature	[°C]
PT	Perceived Temperature	[°C]
p _v	Pression partielle de vapeur d'eau	[Pa]
p _{vs}	Pression en vapeur d'eau saturante	[Pa]
Q	Production de chaleur	[W/m ²]

Q^*	Bilan radiatif	$[W/m^2]$
Q_{net}	Production de chaleur nette du corps humain	$[W/m^2]$
Q_H	Flux turbulents de chaleur sensible	$[W/m^2]$
Q_L	Flux turbulents de chaleur latente par diffusion de la vapeur d'eau à travers la peau	$[W/m^2]$
Q_M	Production de chaleur métabolique	$[W/m^2]$
Q_R	Flux de chaleur sensible et latente liés à la respiration	$[W/m^2]$
Q_{res}	Chaleur perdue par la respiration	$[W/m^2]$
Q_{sk}	Chaleur perdue par la peau	$[W/m^2]$
Q_{stock}	Chaleur stockée	$[W/m^2]$
Q_{stock*}	Chaleur stockée au niveau de la peau et de la partie interne du corps humain	$[W/m^2]$
Q_{sw}	Flux turbulents de chaleur latente par évaporation de la sueur	$[W/m^2]$
r	Humidité absolue	$[kg_{d'eau} / kg_{d'air\ sec}]$
R	Pertes (gains) thermiques par rayonnement	$[W/m^2]$
R_{dif}	Rayonnement diffus	$[W/m^2]$
R_{glo}	Rayonnement solaire global	$[W/m^2]$
R_r	Rayonnement réfléchi	$[W/m^2]$
R_{sk}	Pertes (gains) thermiques de la peau par rayonnement	$[W/m^2]$
R_{th}	Résistance thermique	$[m^2K/W]$
S	Surface	$[m^2]$
SET^*	Standard Effective Temperature	$[^{\circ}C]$
$Shiv$	Flux lié aux frissons	$[W/m^2]$
SRI	Solar Reflectance Index	$[-]$
S_{str}	Densité de flux radiatifs absorbée par le corps humain	$[W/m^2]$

STI	Subjective Temperature Index	[°C]
SVF	Sky View Factor	[-]
T	Température	[°C]
T _a	Température d'air sec sous abri	[°C]
T _{a,ext}	Température d'air moyenne extérieure mensuelle	[°C]
T _{conf,int}	Température de confort intérieur	[°C]
TEP	Temperature of Equivalent Perception	[°C]
T _g	Température de globe	[°C]
T _{g_gris}	Température de globe gris	[°C]
T _{g_noir}	Température de globe noir	[°C]
THI	Temperature-Humidity Index	[-]
T _{mrt}	Température radiante moyenne extérieure	[°C]
T _{mrt_GLO}	Température radiante moyenne extérieure calculée à partir des flux de grande longueur d'onde	[°C]
T _{mrt_gris_ISO}	Température radiante moyenne extérieure calculée avec la formule de la norme (ISO 7726 1998) pour le globe gris	[°C]
T _{mrt_gris_Tan}	Température radiante moyenne extérieure calculée avec la formule calibrée par (Tan et al., 2013) pour le globe gris	[°C]
T _{mrt_noir_ISO}	Température radiante moyenne extérieure calculée avec la formule de la norme (ISO 7726 1998) pour le globe noir	[°C]
T _{re}	Température rectale	[°C]
TS	Thermal Sensation	[-]
T _{skm}	Température moyenne de la peau	[°C]
TSV	Thermal Sensation Vote	[-]
T _w	Température de bulbe humide en ventilation naturelle	[°C]
UTCI	Universal Thermal Climate Index	[°C]
V _a	Vitesse d'air	[m/s]

$V_{a,x}$	Vitesse d'air à une hauteur x	[m/s]
W	Travail externe	[W/m ²]
WBGT	Wet Bulb Globe Temperature	[°C]

Lettres grecques

<i>Symbole</i>	<i>Nom</i>	<i>Unité</i>
ε	Émissivité	[-]
ε_p	Emissivité du corps humain	[-]
σ	Constante de Stephan-Boltzmann	[W/m ² K ⁴]
α_l	Coefficients d'absorption des flux de grande longueur d'onde	[-]
α_k	Coefficients d'absorption des flux de courte longueur d'onde	[-]

Indices

EP	Energie Primaire
EF	Energie Finale
éq.hab	Equivalent habitant
SU	Surface Utile
veg	Végétal
n	Neutre
ref	Référence

Abréviations

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AEU	Approche Environnementale de l'Urbanisme
ALUR	Accès au Logement et à un Urbanisme Rénové
ANRU	Agence Nationale pour la Rénovation Urbaine
BA	Brasseur d'air
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Method
CCD	Charge-Coupled Device
CDC	Caisse des Dépôts et Consignations
CEQ	Campagne d'évaluation des EcoQuartiers
Cerema	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CIVIS	Communauté Intercommunale des Villes Solidaires
CLO	Courte longueur d'onde
COP	Conférence des Parties
COPIL	Comité de pilotage stratégique
COS	Coefficient d'occupation des sols
COTECH	Comité technique
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
DEAL	Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de La Réunion
DOE	Dossier des Ouvrages Exécutés
DOM	Départements d'Outre-Mer
DRIEA	Direction Régionale et Interdépartementale de l'Équipement et de l'Aménagement
DROM	Départements et Régions d'Outre-Mer
DTA	Directives Territoriales d'Aménagement

ECS	Eau Chaude Solaire
ENR	ENergies Renouvelables
EP	Eau Pluviale
EQ	EcoQuartier
FEDER	Fonds Européen de Développement Régional
FPA	Focal Plan Array
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GLO	Grande longueur d'onde
HDR	High Dynamic Range
HQE	Haute Qualité Environnementale
HQE ² R	Haute Qualité Environnementale et Économique dans la Réhabilitation des bâtiments et le Renouvellement des quartiers
ICU	Îlot de Chaleur Urbain
Insee	Institut national de la statistique et des études économiques
IR	Infrarouge
LTECV	Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte
MEDDTL	Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement
MIR	Infrarouge moyen
NEST	Neighborhood Evaluation for Sustainable Territories
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NSF	Neighborhood Sustainability Framework
NV	Numerous Vector
OER	Observatoire Energie Réunion
PADD	Projet d'Aménagement et de Développement Durable
PCAET	Plan Climat-Air-Energie Territorial

PERENE	PERformances ENErgétiques des bâtiments à La Réunion
PIR	Proche infrarouge
PLU	Plan local d'urbanisme
POS	Plan d'Occupation des Sols
PRU	Programme de Rénovation Urbaine
PV	Photovoltaïque
RAI	Radiant Ambience Imaging
RMI	Revenu Minimum d'Insertion
RT2012	Réglementation Thermique de 2012
RTAA DOM	Réglementation Thermique, Acoustique et Aération pour les bâtiments neufs en Guadeloupe, Martinique, Guyane et à La Réunion
RVB	Rouge, Vert, Bleu
SCOT	Schéma de COhérence Territoriale
SCR	Sustainable Community Rating
SHLMR	Société d'Habitations à Loyer Modéré de La Réunion
SHON	Surface Hors Œuvre Nette
SIDR	Société Immobilière du Département de La Réunion
SRA	Simplified Radiosity Method
SRU	Solidarité et Renouvellement Urbain
STAR	Sustainability Tools for Assessing and Rating Communities
SVF	Sky View Factor
TCSP	Transport Commun en Site Propre
TEB	Town Energy Balance
TSI	Total Sky Imager
ZUP	Zone à Urbaniser en Priorité
ZUS	Zone Urbaine Sensible

Introduction générale

D'ici 2050, il est attendu que plus de la moitié de la population mondiale vivra au niveau de la ceinture tropicale et les principaux pays concernés sont pour la plupart en voie de développement. De plus, la grande majorité de la population réside de nos jours en ville. En raison d'une démographie croissante, ces pays devront en parallèle faire face à une urbanisation rapide afin d'accueillir les nouveaux habitants.

Le modèle d'urbanisation et de développement des villes, qui a remplacé les surfaces naturelles boisées par des surfaces fortement minérales (bâtiments, parkings, routes, etc.), et le dégagement de chaleur issu des activités humaines qui s'y concentrent ont entraîné une augmentation locale de la température par rapport aux zones rurales. Ce phénomène est connu sous le nom d'îlot de chaleur urbain (ICU). Combiné à l'augmentation de la population et à la densification urbaine, le changement climatique va rendre plus prégnant le phénomène d'ICU et les populations vont devoir faire face à des conditions climatiques encore plus défavorables, notamment en termes de fortes chaleurs.

Le rapport spécial établi par le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) (GIEC, 2019) sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C souligne que la plus forte augmentation du nombre de jours exceptionnellement chauds serait observée dans les zones tropicales et que les vagues de chaleur extrême apparaîtraient donc en premier dans ces régions. Les régions tropicales et subtropicales connaissent donc une avance de phase face au réchauffement climatique.

Concevoir des villes confortables et résilientes qui s'inscrivent dans une démarche de développement durable est donc un enjeu primordial, afin de répondre aux besoins des populations et de leur assurer une qualité de vie adéquate tout en luttant contre le réchauffement climatique.

En climat tropical humide, les constructions vernaculaires s'appuient généralement sur des principes bioclimatiques, en privilégiant la ventilation naturelle, en se protégeant du soleil et en végétalisant les espaces extérieurs. Avec la mondialisation et la nécessité de construire des logements rapidement et à moindre coût, de nombreux bâtiments inadaptés au climat tropical ont été érigés ces dernières années en se calquant sur des modèles conçus pour des climats plus froids.

Afin d'assurer des conditions de confort thermique acceptables dans ce type de bâtiment, le recours à la climatisation est devenu inévitable, entraînant une augmentation non négligeable de leur consommation énergétique. Cependant, pour les populations les plus pauvres, le recours à la climatisation n'est souvent pas une option. Bien que leur consommation énergétique soit plus faible, elles se retrouvent contraintes à vivre dans des conditions intérieures intolérables d'un point de vue thermique.

Ces différents constats soulèvent l'importance de concevoir des bâtiments durables et confortables adaptés à leur contexte climatique, en privilégiant des méthodes de construction passives. De plus, au-delà du principe d'efficacité énergétique, on constate que la notion de confort thermique est primordiale en climat tropical, autant en intérieur qu'en extérieur. En effet, au-delà de rendre les espaces extérieurs plus agréables pour les usagers, les bâtiments étant fortement ouverts sur leur environnement pour assurer la ventilation naturelle, il est impératif d'assurer des conditions de confort en extérieur acceptables.

L'objectif visant à assurer un niveau de confort thermique satisfaisant ne se limite donc pas au périmètre du bâtiment et doit au contraire être intégré à des échelles plus larges, comme celle du quartier. Mieux concevoir les quartiers, que ce soit en termes de matériaux, de formes urbaines ou de végétalisation des espaces urbains extérieurs, a un impact direct sur les conditions intérieures, notamment pour les bâtiments bioclimatiques, où le lien avec l'extérieur est fort.

L'échelle du quartier a d'ailleurs été reconnue comme étant une échelle pertinente pour l'étude du concept de durabilité des villes (Berg, 2004) (Choguill, 2008). Les notions d'écoquartier ou de quartiers durables ont fait leur apparition et présentent aujourd'hui un intérêt grandissant à travers le monde (Boutaud, 2009) (Gil and Duarte, 2013). En France, des politiques incitatives ont été mises en place afin de favoriser l'émergence de projets d'aménagement intégrant les enjeux et principes du développement durable. La démarche EcoQuartier et la création d'un label national, portées par le Ministère de la Transition écologique, en sont un exemple concret.

Aussi, après une phase d'expérimentation et de dissémination, l'heure est à présent à l'évaluation de ces nouveaux quartiers afin d'en retenir les bonnes pratiques et d'entrer dans une démarche d'amélioration continue (Marique and Teller, 2014). Un référentiel national a été créé en ce sens, afin de permettre aux porteurs de projets d'auto-évaluer leurs EcoQuartiers et de vérifier que les objectifs fixés soient atteints.

Cependant, les indicateurs développés dans la méthode nationale d'évaluation ne sont pas tous adaptés à des EQ situés en milieu tropical, notamment en ce qui concerne la thématique de l'énergie, où l'accent est mis sur le calcul de ratios énergétiques. Or, il existe des spécificités en climat tropical, en termes de climatologie urbaine ou encore de pratiques constructives, qui justifient une approche portée sur l'évaluation du confort thermique, complémentaire à l'approche énergie. Ainsi, un indicateur de performance des bâtiments et des quartiers basé sur un niveau de confort thermique semble plus adapté en milieu tropical car, d'une manière générale, les bâtiments résidentiels sociaux sont dépourvus évidemment de chauffage et a fortiori de climatisation.

Pour l'évaluation du confort thermique à l'intérieur des bâtiments, des normes existent et de nombreux indices ont été éprouvés (Taleghani et al., 2013) (Rupp et al., 2015), alors que les études de confort thermique en extérieur sont quant à elles plus récentes et nécessitent un travail de recherche approfondi (Honjo, 2009).

Aucune méthodologie standardisée n'existe pour l'évaluation du confort thermique en milieu urbain, que ce soit en termes d'instrumentation, du choix des sites à étudier, du montage de questionnaires ou encore de méthode de traitement de données (Johansson et al., 2014). De plus, le confort thermique en milieu urbain tropical est fortement affecté par deux paramètres physiques difficilement caractérisables, aussi bien en termes de mesures sur site que de modélisation numérique, à savoir la vitesse d'air au niveau des piétons et la température radiante moyenne extérieure (T_{mrt}) (Kántor and Unger, 2011).

La T_{mrt} permet de refléter l'impact de l'ensemble du rayonnement de courte et de grande longueur d'onde provenant de l'environnement sur le corps humain (Guo et al., 2019). En milieu urbain, la caractérisation des différents échanges radiatifs est complexe, en raison de la morphologie urbaine très hétérogène, de la présence d'obstacles créant des zones exposées et/ou ombragées, des caractéristiques des matériaux des objets urbains, de la végétation, etc. Des méthodes expérimentales permettant d'estimer la valeur de T_{mrt} ont été développées ces dernières années mais aucun consensus scientifique n'existe sur le choix de la méthode à adopter et sur leur précision réelle (Johansson et al., 2014) (Guo et al., 2019). De plus, la T_{mrt} entre dans le calcul de certains indices de confort thermique extérieur tels que la PET (Höppe, 1999) et l'UTCI (Jendritzky et al., 2012).

En effet, de nombreux indices permettant de quantifier les effets combinés des variables physiques et physiologiques sur la perception du confort thermique en extérieur existent (Coccolo et al., 2016). Ces derniers diffèrent en termes de complexité de modèles, de variables d'entrée ou encore d'échelles d'application. Enfin, les échelles de sensation thermique définies pour certains indices nécessitent d'être calibrées afin de refléter au mieux la sensibilité thermique de la population locale (Krüger et al., 2017).

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse se proposent donc de répondre aux questions suivantes :

- Pourquoi et comment intégrer un critère confort thermique, complémentaire au critère de sobriété énergétique, dans la méthode nationale d'évaluation des EQ?
- Comment évaluer le confort thermique en extérieur, à l'échelle du quartier, en climat tropical ? Quels sont les indicateurs adaptés ?
- Que représente la notion complexe de T_{mrt} et comment la caractériser en milieu urbain ?
- Comment rendre la méthodologie développée reproductible et opérationnelle afin de permettre aux collectivités d'évaluer leurs opérations d'aménagement ?

Le premier chapitre de ce manuscrit pose le contexte général dans lequel s'inscrit ces travaux de recherche et justifie la proposition d'indicateurs de performance basés sur la notion de confort thermique en milieu tropical. Un état de l'art sur les méthodes et outils d'évaluation des projets d'aménagement durable existant dans le monde a permis d'identifier une sélection d'outils applicables

en climat tropical. Une analyse approfondie des indicateurs proposés par ces outils pour les aspects environnementaux liés aux thématiques de l'énergie et du confort thermique a été réalisée et conforte le parti pris. Une contextualisation de la méthode nationale d'évaluation des EcoQuartiers, basée sur la proposition d'indicateurs de confort thermique pertinents en climat tropical est proposée, à partir du retour d'expérience de l'EQ de la Ravine Blanche, à La Réunion. Ce chapitre met en exergue la nécessité de choisir des indices de confort thermique extérieur applicables en climat tropical à l'échelle du quartier.

Le deuxième chapitre propose alors un état de l'art sur les indices de confort thermique applicables en milieu urbain tropical. Les principaux facteurs influençant le confort thermique en extérieur et entrant pour la plupart dans le calcul de ces indices de confort sont identifiés. Les modèles sur lesquels se basent les différents indices sont décrits, ainsi qu'une analyse des avantages et limites de chacun de ces indices. Les indices PET et UTCI ont finalement été retenus comme pertinents afin de permettre aux collectivités et/ou aménageurs d'évaluer le niveau de confort thermique atteint dans les quartiers en climat tropical.

Le troisième chapitre s'attache à caractériser la notion complexe de température radiante moyenne (T_{mrt}), qui est essentielle au calcul des indices de confort PET et UTCI. En effet, le confort thermique en milieu urbain tropical est fortement affecté par deux paramètres physiques difficilement caractérisables, aussi bien en termes de mesures que de modélisation, à savoir la vitesse d'air au niveau des piétons et la température radiante moyenne extérieure (T_{mrt}). L'estimation de la T_{mrt} est donc un verrou à lever afin de pouvoir quantifier le confort thermique en extérieur. Un état de l'art sur l'estimation de la T_{mrt} , autant du point de vue des outils de simulation numérique que de la mesure sur site, est effectué. Une nouvelle mise en œuvre d'une méthode de mesure existante, permettant à terme d'estimer la valeur de T_{mrt} et de localiser les sources éventuelles d'inconfort thermique, est proposée.

Enfin, le quatrième chapitre traite de l'évaluation du confort thermique et de la calibration des indices PET et UTCI en climat tropical, appliquée au cas d'étude de l'EQ de la Ravine Blanche. Pour cela, une méthodologie reproductible se basant sur des mesures microclimatiques combinées à des enquêtes de terrain est proposée. Une comparaison entre les résultats obtenus pour la T_{mrt} en fonction des méthodes de mesure (globe noir / globe gris) et l'étude de leur influence sur les indices de confort choisis est également présentée dans ce chapitre. Cette étude a permis de définir la zone de confort des indices PET et UTCI pour un climat similaire à celui de Saint-Pierre, permettant ainsi aux collectivités d'évaluer le niveau de confort thermique de leurs espaces urbains.

CHAPITRE 1. Contextualisation de la méthode nationale d'évaluation des EcoQuartiers et retour d'expérience de l'EcoQuartier de la Ravine Blanche.

Le chapitre 1 introduit le contexte général dans lequel s'inscrit ce travail de thèse. Une contextualisation de la méthode nationale d'évaluation des EcoQuartiers, basée sur la proposition d'indicateurs de confort thermique pertinents en climat tropical est proposée, à partir du retour d'expérience de l'EQ de la Ravine Blanche, à La Réunion.

1.1. Introduction

Ce chapitre propose le retour d'expérience de l'évaluation d'un quartier ayant fait l'objet d'un programme de rénovation urbaine (PRU) et ayant été labellisé EcoQuartier : le quartier de La Ravine Blanche, à Saint-Pierre de La Réunion. En effet, suite au processus de labellisation lancé par l'Etat français dès 2012, une campagne test d'évaluation a été proposée aux différentes collectivités ayant un ou plusieurs EcoQuartiers labellisés. Cette campagne s'est concentrée sur l'évaluation des aspects environnementaux puisque cette partie nécessitait un appui technique et scientifique plus important que les autres dimensions de l'EcoQuartier, apporté par le CSTB et le Cerema en collaboration avec le Ministère du logement, de l'égalité des territoires et de la ruralité¹. L'objectif principal étant de pouvoir contextualiser la méthode nationale d'évaluation des écoquartiers aux différents contextes rencontrés, de proposer un guide à destination des collectivités et de tirer les premiers enseignements des initiatives françaises en faveur du développement durable.

1.1.1. Un contexte favorable à l'émergence de la démarche EcoQuartier en France

Le terme de développement durable a fait son apparition en 1980 dans un rapport publié par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature. Mais ce n'est qu'en 1987 que le concept de développement durable est clairement défini dans un rapport connu sous le nom de « Rapport Brundtland ». Depuis lors, la France s'est inscrite dans un mouvement mondial visant à concilier équité sociale, développement économique et préservation de l'environnement, et s'attache à respecter des engagements tant au niveau international que national.

1.1.1.1. La France engagée au niveau international et européen

En 1992, lors du Sommet de la Terre à Rio, la France s'est engagée aux côtés de plus de 150 Etats dans une politique globale de développement durable. Ces engagements ont été concrétisés par l'adoption d'un programme d'action connu sous le nom de « l'Agenda 21 », qui est considéré comme un guide du développement durable. C'est aussi à ce moment que la « Convention-cadre des Nations unies sur le changement climatique » a été adoptée. Dix ans plus tard, le sommet du Développement Durable de

¹ Portée par le Ministère de la Transition écologique en 2020

Johannesburg en 2002 a permis de faire le point sur sa mise en œuvre. En 2012, la conférence des Nations unies pour le développement durable nommée « Rio+20 », s'est tenue 20 ans après afin de faire le bilan et renouveler les engagements internationaux sur la question du développement durable grâce à l'élaboration d'un ensemble d'objectifs pour le développement durable.

Dès 1997, à la suite du protocole de Kyoto, représentant le premier accord en faveur du climat, la France s'est engagée à réduire de 5% ses émissions de gaz à effet de serre (GES) par rapport aux niveaux de 1990 au cours de la période quinquennale 2008-2012. Ce protocole, adopté en 2005, a également contribué à la refonte de la Réglementation Thermique en France.

Suite au protocole de Nagoya, adopté en 2010, la France s'engage dans une politique en faveur de la biodiversité avec le Plan Biodiversité 2010 -2020. Promouvoir la biodiversité implique de réduire les pressions humaines afin de la préserver, de développer des villes plus vertes et ainsi ramener la nature en ville.

Avec la signature de l'Accord de Paris sur le Climat en décembre 2015 lors de la COP 21 (Conférence des Parties), la France renforce son engagement dans la lutte contre le changement climatique et dans une démarche de développement durable avec la mise en place d'actions concrètes. Un des principaux objectifs vise à contenir l'élévation de la température moyenne de la planète en dessous de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels et à tout mettre en œuvre pour que l'augmentation de la température ne dépasse pas 1,5°C par rapport aux niveaux préindustriels.

Enfin, suite à la Conférence des Nations Unies sur le Logement et le Développement Urbain Durable (Habitat III) qui s'est déroulée à Quito, en Équateur, en Octobre 2016, le nouveau programme pour les villes a été adopté, visant à faire de nos villes « des lieux sûrs, ouverts à tous, durables et résilients ».

D'autres textes et accords font office de référence à l'échelle européenne, notamment concernant la notion de ville durable. Ainsi, la Charte d'Aalborg, adoptée le 27 mai 1994, définit le cadre Européen de la ville durable. Elle illustre la prise de conscience des villes européennes sur le rôle actif et essentiel qu'elles ont à jouer en faveur du développement durable. La ville est alors désignée comme l'échelle pertinente d'action.

En parallèle de la ville durable, la notion de quartier durable fait alors son apparition. L'Accord de Bristol, adopté le 7 décembre 2005, a posé les fondamentaux du quartier durable et instauré l'échange européen de bonnes pratiques. Les quartiers durables sont alors proposés comme site d'expérimentation pour la ville durable.

La Charte de Leipzig, signée le 24 mai 2007, prône quant à elle l'importance d'une ville durable et solidaire européenne.

Enfin, avec le paquet climat-énergie adopté en décembre 2008, l'Union Européenne s'est fixée une politique énergétique globale et durable, avec la réalisation de la directive des « 3×20 » visant à :

- Atteindre 20 % d'énergie renouvelable ;
- Réduire de 20 % les émissions de GES ;
- Accroître de 20 % l'efficacité énergétique.

1.1.1.2. Le positionnement de l'Etat français à l'échelle nationale

Afin de tenir ses engagements internationaux, débutés en 1992 lors du Sommet de Rio et réaffirmés en 2002 lors de celui de Johannesburg, l'Etat français a instauré différents plans d'action.

Aussi, en 2005, l'environnement est directement intégré dans le droit français avec l'adoption de la Charte de l'environnement, élaborée en 2004, et adossée à la Constitution en 2005. Elle introduit notamment quatre grands principes issus du Sommet de Rio : le principe de prévention, celui de précaution, le principe du pollueur-payeur et enfin celui de participation-information.

Le Grenelle Environnement, qui s'est tenu en 2007, a permis de redéfinir les orientations nationales pour atteindre l'objectif du « facteur 4 » (diviser par un facteur 4 les émissions nationales de GES du niveau de 1990 d'ici 2050) et a donné lieu à des projets de lois, avec la loi Grenelle I du 3 août 2009 et la loi Grenelle II du 12 juillet 2010, qui constituent une feuille de route en faveur du développement durable.

Dans le prolongement de la stratégie nationale de l'Etat français, les principes du développement durable ont également été intégrés dans les textes de lois et codes d'urbanisme, affirmant une volonté de transition écologique en milieu urbain et d'égalité des territoires. Ainsi avec la loi n° 2000-1208 du 13 décembre 2000 relative à la solidarité et au renouvellement urbain, couramment appelée loi « SRU », l'Etat français vise à « améliorer la cohérence entre planification urbaine et territoriale, à promouvoir un développement durable et solidaire des territoires, à encourager la mixité sociale dans l'habitat, ainsi qu'à mettre en place une politique des déplacements au service du développement durable ».

L'article 121-1 du code de l'urbanisme définit les principes généraux que doivent respecter les documents d'urbanisme, tels que les schémas de cohérence territoriale (SCOT), les Plans Locaux d'Urbanisme (PLU) ou encore les cartes communales et les directives territoriales d'aménagement (DTA), et notamment les objectifs en faveur du développement durable auxquels ces derniers doivent répondre.

La loi ALUR (Accès au Logement et à un Urbanisme Rénové), publiée le 26 Mars 2014, modifie certaines règles d'urbanisme et propose de nouveaux outils fonciers afin de promouvoir la construction de logements tout en luttant contre l'étalement urbain, tels que la suppression du COS (coefficient d'occupation des sols), le remplacement des Plans d'Occupation des Sols (POS) par les Plans Locaux d'Urbanisme (PLU) initiés par la loi SRU, ou encore la mise en place de PLUi (Plans locaux d'urbanisme intercommunaux). Le coefficient de biotope par surface (CBS), défini comme « la part de

surface éco-aménagée (végétalisée ou favorable à l'écosystème) sur la surface totale d'une parcelle considérée », fait également son apparition en tant qu'indicateur d'aménagement durable.

Enfin, la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) publiée au Journal Officiel du 18 août 2015, donne des mesures de réduction de GES, de diminution de consommation énergétique (finale et fossile), de développement des énergies renouvelables et des transports propres ou encore de renforcement des performances énergétiques des bâtiments neufs et de rénovation du parc existant. Le rôle des collectivités y est renforcé notamment avec le Plan Climat-Air-Energie Territorial (PCAET), qui est un outil transversal de planification stratégique et opérationnelle qui doit permettre aux collectivités de répondre aux objectifs chiffrés de la LTECV.

1.1.2. Les approches méthodologiques, référentiels et outils existants pour l'évaluation des écoquartiers

1.1.2.1. Définitions

1.1.2.1.1. Ecoquartier ou quartier durable ?

De plus en plus de projets urbains sont désignés par des appellations telles que « écoquartier » ou encore « quartier durable », reprises de manière indifférenciée que ce soit par les acteurs du milieu de l'aménagement, les politiques, les médias ou encore le grand public. Le but principal étant de valoriser et de « démarquer » leurs projets basés sur la notion de développement durable.

Si, pour certains, ces deux notions sont des synonymes et sont utilisées sans aucune distinction, pour d'autres, il existe une différence notable, à savoir que la notion du quartier durable engloberait l'ensemble des facettes du développement durable contrairement à celle d'écoquartier qui, à l'origine, désignerait un quartier performant sur les aspects écologiques (contraction des termes « écologique » et « quartier ») (Boutaud, 2009).

Boutaud propose en 2009 un article sur la définition de ces notions en tenant compte du contexte sémantique, théorique et temporel dans lequel elles sont apparues. Il met en avant le fait qu'à l'origine la notion d'écoquartier est apparue dans un contexte d'expérimentation avec des spécificités spatiales, telles qu'une taille réduite, à caractère résidentiel, dans des zones plutôt de type rural. De plus, les personnes à l'initiative de ces projets d'expérimentation étaient des citoyens engagés dans une approche écologique : « Mieux vivre en réduisant leur impact sur l'environnement ». Ces quartiers seraient donc plus tournés sur la technique et moins difficiles à développer. Boutaud parle notamment des premiers

écoquartiers qui sont sortis de terre à la fin du 20^{ème} siècle comme des vitrines expérimentales et environnementales, notamment dans les pays nordiques et du centre de l'Europe tels que Fribourg, Malmö, etc. La notion d'écoquartier a cependant évolué dans le temps et si, au départ, elle n'était apparentée qu'à l'aspect écologique, elle repose maintenant sur des objectifs environnementaux, économiques, sociaux et de gouvernance. Cette nouvelle définition est maintenant acceptée par tous et soutenue par l'Etat. Les nouveaux écoquartiers sont donc des espaces expérimentaux des principes de l'urbanisme du 21^{ème} siècle basé sur le développement durable.

A l'inverse, la notion de quartier durable serait intrinsèquement liée aux trois piliers du développement durable à savoir, l'économie, l'environnement et le social, dès l'apparition du terme. De plus, un quartier durable reprend la notion de « durabilité » et intègre donc une dimension temporelle. Ce serait donc un quartier qui aurait maintenu tous ses objectifs sur un temps suffisamment long. Pour qualifier un quartier de durable, il faut donc « avoir constaté de sa durabilité dans le temps ou se projeter sur sa capacité à durer » (Boutaud, 2009). Un écoquartier serait donc qualifié dans l'espace alors qu'un quartier durable serait défini dans le temps. Un écoquartier d'aujourd'hui pourra donc être le quartier durable de demain.

Au final, ce qui est réellement source de controverse n'est pas tellement l'utilisation d'un terme ou de l'autre mais plutôt l'utilisation abusive de la notion d'écoquartier pour tout type de projet urbain, déclarés comme exemplaires alors que certains d'entre eux ne correspondent pas à ce qui est réellement attendu et ne respectent pas les principes du développement durable. Il s'agit dans, certains cas, d'une « promotion » immobilière, d'un outil de communication pour « vendre » un projet qui ne reposerait que sur quelques éléments écologiques et qui ne fonctionnerait pas dans l'usage.

Néanmoins, le terme écoquartier est maintenant ancré dans le langage commun comme un terme fédérateur liant le milieu de l'urbanisme au grand public, d'autant plus qu'au niveau institutionnel, le terme labellisé EcoQuartier a fait son apparition en 2008 lors du lancement de la démarche EcoQuartier par le Ministère.

1.1.2.1.2. EcoQuartier : un terme labellisé et une définition propre

Le terme labellisé EcoQuartier a été défini de manière institutionnelle en 2008 par le Ministère dans le cadre de la campagne pour la promotion des pratiques d'urbanisme durable en France.

Un ÉcoQuartier est ici défini comme « un projet d'aménagement multifacettes qui intègre tous les enjeux et principes de la ville et des territoires durables » (Source : <http://www.ecoquartiers.logement.gouv.fr/>). Un EcoQuartier labellisé s'articule donc autour de considérations diverses, telles que les déplacements, la densité et les formes urbaines, l'écoconstruction,

la mixité sociale fonctionnelle et la participation citoyenne. Il doit s'adapter au contexte et aux caractéristiques du territoire, en s'appuyant sur les ressources et savoir-faire locaux.

C'est cette définition qui sera utilisée tout au long de cette étude.

1.1.2.2. Revue de littérature

1.1.2.2.1. Liste des outils et méthodes d'évaluation applicables à l'échelle du quartier au niveau mondial

La nécessité de prendre en compte la notion de durabilité urbaine au niveau local a été défendue depuis bien longtemps par les Nations Unies au travers du programme "Agenda 21". L'échelle du quartier a récemment été reconnue comme étant adaptée pour un examen approfondi du concept de développement durable. Les quartiers sont même considérés comme la première ligne dans la bataille de la durabilité (Choguill, 2008). En effet, ces derniers présentent une taille optimale pour le transfert de connaissance, d'expériences et de compétences. Des études ont démontré que l'application des principes de développement durable à l'échelle du quartier joue un rôle crucial puisqu'une grande partie des problèmes rencontrés au niveau de la ville sont des conséquences d'une mauvaise planification appliquée au niveau du quartier (Berg and Nycander, 1997) (Berg, 2004). C'est ainsi que de nombreux projets de quartiers durables ont fait leur apparition.

En parallèle, un besoin urgent de développer des méthodes et démarches d'évaluation de ces quartiers s'est fait sentir. Après une phase d'expérimentation et de maturation, l'application des principes de durabilité aux projets de nouveaux quartiers est aujourd'hui entrée dans une phase de généralisation et de normalisation. Parmi ces référentiels de conception et d'évaluation des écoquartiers, on compte notamment le « STAR Community Rating System » (Sustainability Tools for Assessing and Rating Communities) et le « US Green Building Council's LEED-ND » (Leadership in Energy and Environmental Design—Neighbourhood Development) aux Etats-Unis; « BREEAM Communities » (BRE Environmental Assessment Method) au Royaume-Uni; « CASBEE-UD » (Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency—Urban environment) au Japon ; la démarche HQE²R (Haute Qualité Environnementale et Économique dans la Réhabilitation des bâtiments et le Renouvellement des quartiers) en Europe ; « SCR » (Sustainable Community Rating), en Australie; « Green Mark for Districts », à Singapour; « NSF » (Neighborhood Sustainability Framework), en Nouvelle Zélande ou encore « BEAM Plus Neighborhood », à Hong Kong.

Le Tableau 1.1, ci-après, liste certains référentiels et outils, français et internationaux, existant sur les projets urbains durables et quartiers durables. Leur pays d'application, le climat concerné ainsi que les publications et études proposant leur analyse y sont précisés.

Tableau 1.1 : Principaux référentiels et méthodes de conception et d'évaluation des quartiers durables existants dans le monde

Référentiels / Méthodes	Pays	Climat d'application	Références
Aqua for Neighborhoods	Brésil	(Sub)Tropical	NA
BEAM Plus Neighborhood	Hong-Kong	Subtropical humide	NA
BERDE for Clustered Residential Development	Philippine	Tropical humide	NA
BREEAM Communities	Europe	Majoritairement Tempéré (Continental, Méditerranéen, Océanique, montagnard)	(Kyrkou and Karthaus, 2011), (Haapio, 2012), (Säynäjoki et al., 2012), (Berardi, 2013), (Sharifi and Murayama, 2013), (Sharifi and Murayama, 2014), (Abdel Sabour, 2015), (Komeily and Srinivasan, 2015), (Reith and Orova, 2015), (Sharifi and Murayama, 2015)
CASBEE - UD	Japon	Tempéré (type continental), (sub)tropical humide	(Haapio, 2012), (Sharifi and Murayama, 2012), (Säynäjoki et al., 2012), (Berardi, 2013), (Sharifi and Murayama, 2013), (Sharifi and Murayama, 2014), (Abdel Sabour, 2015), (Komeily and Srinivasan, 2015), (Reith and Orova, 2015), (Sharifi and Murayama, 2015)
DGNB-NSQ	Allemagne	Tempéré continental	(Jensen, 2014), (Komeily and Srinivasan, 2015), (Reith and Orova, 2015)
ECC	Etats-Unis	Tempéré (continental, méditerranéen, océanique), Subtropical, aride	(Sharifi and Murayama, 2013)
Ecocity	Europe	Majoritairement Tempéré (Continental, Méditerranéen, Océanique, montagnard)	(Sharifi and Murayama, 2013)
GBI for Township	Malaisie	Equatorial humide	NA

Global Sustainability Assessment System for Districts	Qatar	Aride	(Abdel Sabour, 2015), (Al Nasa'a, 2015)
Green Mark for Districts	Singapour	Tropical humide	NA
Green Star Communities	Australie	Tempéré, Aride, (sub)tropical	NA
Green Townships	Inde	(Sub)Tropical, semi-aride, montagnard	NA
HQE aménagement	France	Tempéré (Semi-Continental, Méditerranéen, Océanique, montagnard)	NA
HQE²R	Europe	Majoritairement Tempéré (Continental, Méditerranéen, Océanique, montagnard)	(Blum and Grant, 2006), (Charlot-Valdieu and Outrequin, 2007), (Sharifi and Murayama, 2013)
Label EcoQuartier	France (Métropole et Outre-Mer)	Tempéré (Semi-Continental, Méditerranéen, Océanique, montagnard), Tropical	(Chastenet et al., 2016)
LEED - ND	Etats-Unis	Tempéré (continental, méditerranéen, océanique), Subtropical, aride	(Karol and Brunner, 2009), (Kyrkou and Karthaus, 2011), (Haapio, 2012), (Säynäjoki et al., 2012), (Berardi, 2013), (Sharifi and Murayama, 2013), (Sharifi and Murayama, 2014), (Abdel Sabour, 2015), (Al Nasa'a, 2015), (Komeily and Srinivasan, 2015), (Reith and Orova, 2015), (Sharifi and Murayama, 2015)
NSF	Nouvelle-Zélande	Subtropical (Nord), tempéré océanique (reste du pays)	(Bijoux et al., 2007) (Saville-Smith, 2015)
Pearl Community for Estidama	Emirats Arabes Unis	Subtropical, aride	(Abdel Sabour, 2015), (Komeily and Srinivasan, 2015)
"quartiers durables"	Belgique	Tempéré	(Marique and Teller, 2014)
SCR	Australie	Tempéré, Aride, (sub)tropical	(Sharifi and Murayama, 2013)

Ainsi, bien que des référentiels ont été développés pour les pays en zone tropicale ces dernières années, encore très peu d'études ont été réalisées. Les référentiels de conception et d'évaluation des écoquartiers nord-américains, anglais et japonais ont été conçus et éprouvés il y a quelques années déjà, et donnent lieu à une certification.

1.1.2.2.2. Méthodes et référentiels d'évaluation des écoquartiers développés en France

Le développement de référentiels et méthodologies nationaux et régionaux sur les écoquartiers a été lui plus tardif. Cependant, de nombreux acteurs ont déjà engagé des démarches similaires ou apparentées, au niveau national et régional, et travaillent à l'élaboration d'outils ou de méthodes d'évaluation et d'aide à la conception des projets d'aménagement, tels que le label national EcoQuartier, la certification HQE Aménagement par l'association HQE, la démarche AEU de l'ADEME, la méthode ADEQUA (Cherqui, 2005), l'outil @d aménagement durable de la région Île de France, mais aussi les référentiels élaborés par les villes elles-mêmes (ADDOU de Rennes, Un Aménagement Durable pour Paris (Jégou et al., 2012), AURA de Montpellier, etc.). D'autres outils ont été créés, tels que NEST (Neighborhood Evaluation for Sustainable Territories), un outil d'évaluation quantitative des impacts environnementaux d'un projet (Yepez-Salmon, 2011). Une enquête sur les outils et pratique de l'aménagement durable est d'ailleurs réalisée par la DRIEA (Direction Régionale et Interdépartementale de l'Équipement et de l'Aménagement, Île-de-France) (DRIEA, 2015).

1.1.2.2.3. Limites des méthodes d'évaluation développées

Des études récentes ont été menées sur la comparaison de ces outils en se basant sur leurs caractéristiques générales, sur leur méthodologie d'application, sur les cibles et critères évalués (Blum and Grant, 2006) (Haapio, 2012) (Sharifi and Murayama, 2013) (Gil and Duarte, 2013) (Komeily and Srinivasan, 2015) (Reith and Orova, 2015) ou encore leur efficacité grâce à des études de cas (Karol and Brunner, 2009) (Kyrkou and Karthaus, 2011) (Sharifi and Murayama, 2012) (Sharifi and Murayama, 2014). Alors que la majorité des études réalisées se basait sur une analyse qualitative (Haapio, 2012) (Gil and Duarte, 2013), la première étude quantitative a été effectuée par (Luederitz et al., 2013). Ils ont évalué les principes nécessaires au développement d'un aménagement urbain durable en se basant sur la littérature existante. D'autres publications se concentrent sur l'étude et l'évaluation d'études de cas de rénovation de quartiers existants en quartiers durables (Turcu, 2012) (Riera Pérez and Rey, 2013) (Chen et al., 2015). Une étude de benchmarking basée sur une comparaison qualitative de la gestion du développement durable urbain a été réalisée en collaboration avec huit villes du Nord-Ouest de l'Europe, et ce dans une démarche d'amélioration continue des quartiers durables (Aberg and Sillen, 2002).

En outre, différentes méthodes d'évaluation existent mais peu d'entre elles permettent d'intégrer l'ensemble des objectifs du développement durable à l'échelle des quartiers (i.e. les aspects économiques, sociaux, environnementaux et institutionnels) (Berardi, 2013). Elles sont, au contraire, souvent limitées aux préoccupations environnementales (Charlot-Valdieu and Outrequin, 2007) (Marique and Teller, 2014). Sharifi et Murayama ont soulevé le fait que la plupart de ces outils présentent des ambiguïtés quant aux systèmes de notation, aux seuils et à la pondération des critères d'évaluation, et ont mis en avant le manque de flexibilité et d'adaptabilité au contexte local (Sharifi and Murayama, 2013). De plus, ces outils varient considérablement selon le choix des indicateurs à mesurer, la manière de les mesurer ou encore sur la présentation des résultats et leur interprétation.

Les enjeux du développement durable sont différents d'une région voire d'un pays à l'autre, soulevant la question de leur adaptabilité et de leur reproductibilité, notamment sur le choix des critères d'évaluation de durabilité (Haapio, 2012). La reproductibilité de différents outils tels que LEED-ND, BREEAM for Communities et CASBEE-UD, a été évaluée dans le contexte de la construction de nouveaux quartiers en Finlande par (Säynäjoki et al., 2012). Les auteurs ont mis en évidence que certains des critères requis ne sont ni réalisables ni pertinents dans le contexte local étudié.

Marique et Teller ont récemment développé un référentiel « quartiers durables » en Wallonie (Marique and Teller, 2014). Bien que traitant uniquement de la construction de nouveaux quartiers, ce dernier présente un potentiel plus important qu'une simple grille d'évaluation et offre plus de transparence et de flexibilité, afin de pouvoir s'adapter aux particularités et spécificités de différentes régions. Il faut pour cela réévaluer et adapter les valeurs seuils de chaque critère en fonction des enjeux et spécificités à l'échelle locale. Ainsi, une méthode d'évaluation réaliste et fiable se doit de prendre en compte les spécificités du contexte local où elle est appliquée, ainsi que les besoins variables des différents acteurs impliqués (Karatas and El-Rayes, 2015).

En conclusion, les défis émergents posés en termes de durabilité urbaine à l'échelle du quartier sont plus complexes et plus vastes que ceux posés à l'échelle du bâtiment. Le champ de recherches relatif à l'évaluation des projets, à l'échelle spécifique du quartier, reste encore à un stade précoce de son développement et doit continuer à évoluer et à être renforcé (Jégou et al., 2012) (Sharifi and Murayama, 2013). Cela est notamment le cas pour l'évaluation des écoquartiers en milieu tropical, pour lesquels peu d'études ont été réalisées et peu de retour d'expérience sont proposés, alors que ces derniers sont soumis à des contraintes environnementales fortes. De plus, il est important de pouvoir adapter la méthode d'évaluation en fonction du contexte local et des objectifs du projet.

1.1.2.2.4. Indicateurs environnementaux utilisés dans les méthodes d'évaluation en climat tropical

L'évaluation environnementale dans les référentiels et méthodes d'évaluation des écoquartiers tels que LEED-ND, BREEAM Plus Neighborhood and CASBEE-UD se concentre principalement sur les thématiques de l'énergie, de l'eau, des déchets et de la végétation (Sharifi and Murayama, 2014). Sur les cibles eau et déchets, les indicateurs développés sont souvent proches d'un référentiel à l'autre notamment en termes de maîtrise de l'eau pluviale (perméabilité des matériaux de revêtement, bassin de rétention, noues, etc.), d'utilisation de sources alternatives à l'eau potable, de réemploi sur site pour les matériaux de construction ou encore de systèmes permettant le tri, le recyclage et la réduction des déchets. En ce qui concerne la partie énergie, on constate que de nombreux outils d'évaluation développés en climat tropical prennent en compte la conception bioclimatique du bâtiment (passive design) directement dans la cible « Énergie », en plus des indicateurs de consommation énergétique ou de production d'énergie à partir de sources renouvelables. L'intégration de la conception passive du bâtiment est alors justifiée par le fait que les mesures mises en place permettent de réduire la consommation énergétique du bâtiment, notamment la part liée à la climatisation.

Tableau 1.2 : Outils intégrant la conception passive du bâtiment dans leur cible énergie

Outils / référentiels d'évaluation	Critère évalué	Description des exigences formulées
BEAM Plus Neighborhood (HKGBC, 2016)	Conception Passive (Passive Design)	66% de la surface totale des façades sont orientées Nord/Sud - La normale des façades orientées N/S doit être comprise dans un angle de 22,5° par rapport au Nord géographique Deux niveaux d'exigence : Au moins 25% des bâtiments du périmètre étudié respectent les exigences formulées ou au moins 50% des bâtiments répondent aux exigences
BERDE for Clustered Residential Development (PHILGBC, 2013)	Ventilation Naturelle	- Des mesures favorisant la ventilation naturelle doivent être mises en place dans 50% des pièces occupées (en se référant au document officiel « the Chartered Institute of Building Services Engineers (CIBSE) Applications Manual 10 : Natural Ventilation in Non-Domestic Buildings ») - Des études CFD doivent être menées dans les zones ventilées naturellement afin de vérifier qu'une vitesse de 0,6 m/s est atteinte
	Enveloppe de bâtiments éco-énergétiques	Le coefficient de transmission thermique surfacique des murs extérieurs et de la toiture ne doit pas dépasser 45 W/m²

L'orientation du bâtiment, le potentiel éolien ou encore l'enveloppe du bâtiment sont alors pris en compte dans la cible énergie comme le montre le Tableau 1.2 ci-dessus.

Le référentiel BERDE for Clustered Residential Development dispose également d'un critère d'évaluation de la qualité intérieure des bâtiments où l'atteinte du niveau de confort thermique intérieure doit être vérifiée et correspondre au niveau d'exigence mentionné dans la norme (ASHRAE 55, 2004). Le confort hygrothermique intérieur est également évalué dans l'outil Aqua For Neighborhoods développé au Brésil.

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) est également pris en compte dans de nombreux référentiels développés en climat tropical puisque celui-ci impacte la qualité de vie des espaces extérieurs. Celui-ci étant exacerbé par les matériaux dont le coefficient d'absorption est élevé, par le manque de végétation ou encore par un faible facteur de vue du ciel (portion de ciel observable à partir de la surface considérée, Sky View Factor en anglais), c'est sur ces aspects que portent principalement les indicateurs développés dans les outils d'évaluation. Le Tableau 1.3 suivant liste les principaux indicateurs et niveaux d'exigence développés pour l'évaluation du critère ICU dans une sélection d'outils et référentiels applicables en zone tropicale.

La majeure partie des référentiels existants ne prend pas en considération la qualité environnementale des espaces urbains extérieurs alors que ces derniers sont fréquemment utilisés en climat tropical par la population. L'aménagement extérieur a également un impact direct sur les conditions de confort en intérieur dans le cas de bâtiments bioclimatiques favorisant la ventilation naturelle, et donc ouverts sur l'extérieur. L'outil GBI township intègre la qualité environnementale dans sa cible aménagement avec un indicateur sur le taux d'espaces verts puisque la végétalisation contribue à améliorer le microclimat urbain. Le taux d'espaces verts doit ainsi être supérieur au niveau requis par l'autorité locale d'au moins 25%.

Tableau 1.3: Indicateurs et exigences développés dans différents outils applicables en milieu tropical afin de lutter contre les effets de l'ICU et d'améliorer le confort thermique urbain

Outils d'évaluation	Description des exigences formulées
BEAM Plus Neighborhood (HKGBC, 2016)	▪ Au moins 15 à 25% de la surface totale de la zone étudiée disposent d'une couverture végétale permettant de créer de l'ombre ▪ La température intra-urbaine maximale ne doit pas dépasser de plus de 3°C la température moyenne observée en milieu rural en été
BERDE for Clustered Residential Development (PHILGBC, 2013)	▪ Minimiser l'absorption de chaleur de 50% de la surface du site aménagé (rues, trottoirs, parcs, parkings, etc.) en créant des espaces ombragés naturels (arbres, végétation) ou en installant un système de pavage alvéolé ▪ Au moins 50% des surfaces de parking doivent être couvertes ▪ Minimiser l'absorption de chaleur de 50% de la surface de toiture de tous les logements et espaces communs couverts en installant des toitures végétalisées
GBI for Township (GSB, 2011)	▪ 50% de la totalité des espaces publics et rues du projet doivent être ombragés ▪ Au moins 10% des espaces publics doivent être équipés avec des jeux d'eau ou plan d'eau ▪ Au moins 50% des espaces publics aménagés doivent avoir des revêtements dont l'indice de réflectance solaire (Solar Reflectance Index - SRI) est égal à 29 ou plus
Green Mark (BCA, 2009)	▪ Au moins 50% des structures ouvertes doivent être ombragées (ex : pergolas) ▪ Au moins 40% des rues piétonnes doivent être ombragées ▪ Utiliser des matériaux de revêtement dont le SRI est supérieur à 29 ▪ Taux de parkings couverts > 50% ▪ Taux de revêtements perméables > 40% ▪ Eviter les rejets de chaleur au niveau des piétons
Green Townships (IGBC, 2010)	▪ Ombrage grâce aux arbres pour les cheminements, rues, parking, parcs, etc. ▪ Privilégier des matériaux de couleur clair / albédo élevé (réflectance d'au moins 0,3) ou des systèmes de pavage alvéolé.

Le référentiel « Pearl Community for Estidama » évalue la stratégie de confort thermique extérieur des projets. Les projets doivent améliorer le confort thermique durant l'intersaison dans les espaces publics, lieux de loisirs et rues et aussi diminuer la sensation d'inconfort thermique durant la période estivale. Pour cela, un indicateur mesurant la part de zone ombragée des espaces extérieurs a été développé. Les mesures mises en place pour créer de l'ombre peuvent être naturelles (arbres) ou structurelles, mais, dans ce cas, la surface extérieure des éléments architecturaux doit avoir un indice de réflectance

solaire (Solar Reflectance Index - SRI) d'au moins 29. Le Tableau 1.4 ci-dessous présente le taux d'ombrage requis par type d'espace urbain et par stade du projet.

Tableau 1.4: Taux de surfaces ombragées minimum requis par type d'espaces urbains et par stade du projet mis en place dans l'outil « Pearl Community for Estidama » pour l'évaluation du critère confort thermique extérieur (Abu Dhabi Urban Planning Council, 2016)

Public Realm Space	Minimum % shading	
	Interim Shade Provision Shade measured at 5 years growth after planting (applies only to natural shading)	Final Shade Provision Shade measured at maturity (applies to both natural and structural shading)
Exterior Surface Car Parking with more than 10 spaces (including parking on roof surfaces)	40%	
Bicycle Parking Spaces	90%	
Seating areas	30%	70%
Playgrounds	90%	
Primary Pedestrian Walkways (based on 1.8m width within the through zone)	35%	75%
Secondary Pedestrian Walkways (based on 1.8m width) within the through zone)	25%	60%
Tertiary Pedestrian Walkways	0%	
Cycle Tracks (non-recreational)	50%	

Dans l'outil BEAM Plus Neighborhood, un des critères clés évalués est la qualité environnementale extérieure, où sont traitées les problématiques liées au confort thermique en milieu urbain, au phénomène d'îlot de chaleur urbain en plus du confort visuel et de la qualité d'air des espaces urbains (voir Tableau 1.5).

Tableau 1.5: Critère d'évaluation de la qualité environnementale extérieure de l'outil BEAM Plus Neighbourhood prenant en compte le confort thermique extérieur et le phénomène d'îlot de chaleur urbain (HKGBC, 2016)

OUTDOOR ENVIRONMENTAL QUALITY (OEQ)

CREDIT	CREDITS REQUIREMENTS	EXCLUSIONS	NO. OF CREDIT POINTS
OEQ 1 OUTDOOR THERMAL COMFORT	1 credit point is awarded where there is at least one shaded or covered route connecting the Site to the nearby amenities or transport hub, with the provision of a shaded or covered sitting area along the same route.		1
	1 credit point is awarded where it can be demonstrated that 50% or more of the passive Open Spaces and pedestrian zones achieving thermal comfort on a typical summer day at 9:00 am in Hong Kong.	None	2
	AND 1 credit point is awarded where it can be demonstrated that 50% or more of the passive Open Spaces and pedestrian zones achieving thermal comfort on a typical summer day at 3:00 pm in Hong Kong.		
OEQ 2 INTRA-URBAN TEMPERATURE AND URBAN HEAT ISLAND EFFECT	1 credit point is awarded where at least 15% of the total Site Area is provided with tree coverage in plan view.		2
	OR 2 credit points are awarded where at least 25% of the total Site Area is provided with tree coverage in plan view	None	
	2 credit points are awarded where an Intra Urban Heat Island Study is conducted demonstrating that a maximum Intra- Urban Heat Index (difference between T _{urban} and T _{met}) in summer is less than 3.0 °C.		1

Ce critère représente d'ailleurs 20% de la note finale et a un poids plus important que le critère énergie comme le montre le Tableau 1.6 ci-dessous.

Tableau 1.6: Critères de performance et poids associé dans la notation utilisés dans l'outil d'évaluation BEAM Plus Neighborhood, à Hong-Kong (HKGBC, 2016)

Performance Aspects	Weighting
Community Aspects	20 %
Site Aspects	25%
Materials and Waste Aspects	10%
Energy Aspects	16%
Water Aspects	9%
Outdoor Environmental Quality	20%
	100%

A la différence des deux précédents outils et référentiels, BEAM Plus Neighborhood va plus loin dans l'évaluation du confort thermique extérieur. En effet, pour étudier le confort thermique en milieu urbain, des indicateurs ont été proposés en se basant sur des études lancées par le gouvernement de Hong-Kong ainsi que sur des études scientifiques menées dans des zones climatiques similaires (Lin and Matzarakis, 2008) (Ng and Cheng, 2012). Ces études ont notamment porté sur l'amélioration du potentiel éolien dans les zones urbaines denses, la réalisation de cartes bioclimatiques pour le service Aménagement de la Ville en 2006 (voir Figure 1.1) ou encore l'utilisation d'indices de confort thermique extérieur.

Les deux indices préconisés pour l'étude du confort thermique extérieur sont la température physiologique équivalente (Physiological Equivalent Temperature -PET) définie par (Höppe, 1999) et l'indice de sensation thermique (Thermal Sensation Index – TSI). La PET permet d'appréhender l'impact de la morphologie urbaine sur le microclimat puisque le confort thermique en extérieur impacte directement l'usage des espaces urbains (de loisir ou autres) mais aussi la santé et le bien-être des habitants. Ainsi, des points sont attribués au projet dans le cas où 50% des espaces urbains extérieurs présentent des conditions de confort à 9h et à 15h pour un jour d'été typique à Hong-Kong (cf Tableau 1.5). Ces conditions doivent être vérifiées sur la base de questionnaires et de mesures.

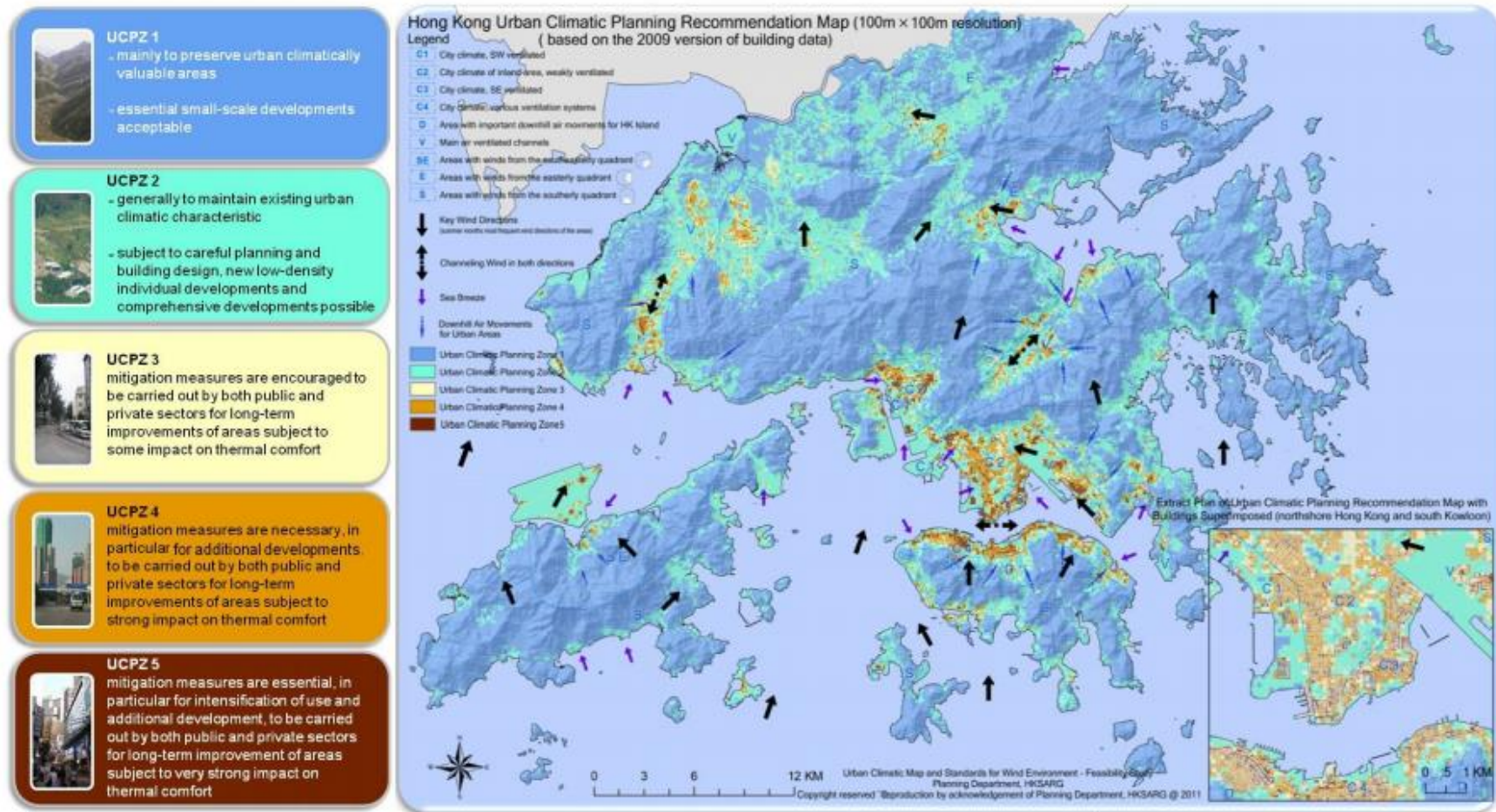


Figure 1.1: Carte bioclimatique réalisé pour la ville de Hong-Kong avec recommandations pour l'aménagement urbain en fonction du zonage (Ng and Ren, 2015)

1.2. Présentation du Label EcoQuartier

1.2.1. Du lancement de la démarche ÉcoQuartier au Label national

La démarche EcoQuartier, a été lancée dès 2008 par l'Etat français à destination des collectivités, dans le but de promouvoir les principes du développement durable et de rendre concrets et tangibles les engagements pris par la France au niveau national et international en matière de transition énergétique, de production de logements, etc. Elle est actuellement portée par le Ministère de la Transition écologique. Elle distingue l'exemplarité de projets d'aménagement durable, c'est-à-dire d'« opérations qui proposent de construire une ville mixte, basée sur de nouveaux modes de vie et sur un processus de concertation entre les acteurs de l'aménagement et les habitants, dans un cadre de vie de qualité et de dynamique économique, tout en réduisant son empreinte écologique ».

Après quatre années d'expériences partagées, c'est dans une volonté de concrétisation et de large diffusion de la démarche qu'est créé en 2012 le label national EcoQuartier, à portée nationale et portage étatique. Il permet d'encourager, d'accompagner et de valoriser les projets d'aménagement et d'urbanisme durables, sur la base d'une procédure transparente et lisible. Ce label ne se présente pas comme une norme mais comme un outil développé afin de contextualiser et d'adapter cette démarche à tous les territoires, à tous les contextes, à toutes les tailles de villes et à tous les stades d'avancement du projet. Afin d'attester de la qualité des projets, ces derniers sont suivis et évalués sur des résultats.

1.2.2. Le processus général de la campagne de labellisation

La campagne de labellisation se divise actuellement en 4 étapes, qui correspondent à différentes étapes d'un projet (voir Figure 1.2). La première étape du Label se concrétise avec la signature de la charte ÉcoQuartier par les porteurs de projet, représentant l'engagement de la collectivité dans une politique d'aménagement durable. Elle coïncide avec le début de la phase d'étude du projet et la collectivité peut bénéficier d'un accompagnement technique et méthodologique (services de l'Etat, experts). La charte EcoQuartier comprend 20 engagements répartis dans 4 dimensions, à savoir « démarche et processus », « cadre de vie et usages », « développement territorial » et « environnement et climat » (voir Figure 1.3). Les engagements de cette charte ont été développés afin de guider la collectivité dans les projets d'EcoQuartier et d'être un levier dans le changement des pratiques d'aménagement. Ce sont des

engagements concrets, qui seront par la suite évalués à l'aide de questions évaluatives et/ou d'indicateurs chiffrés afin d'obtenir les étapes suivantes du Label.

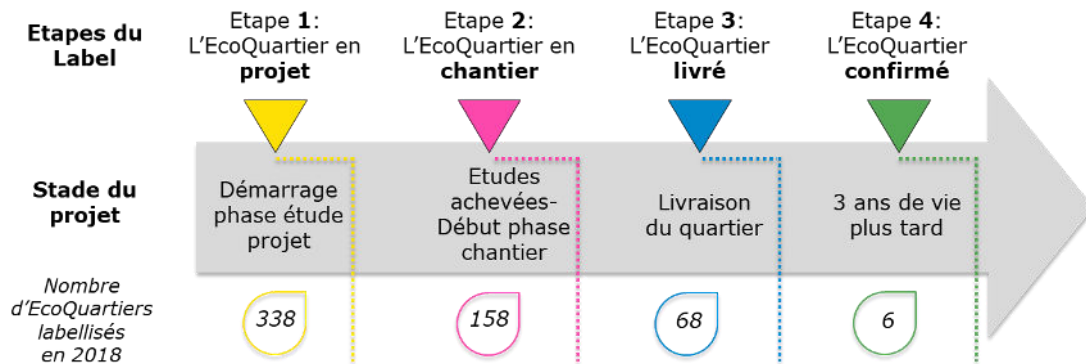


Figure 1.2: Les différentes phases du processus de labellisation des EcoQuartiers.

Lorsque les études sont terminées et que le projet entre en phase chantier, celui-ci peut alors accéder au Label étape 2 après une double expertise du projet. Cette étape permet de vérifier que le projet respecte les éléments de la charte EcoQuartier et de récompenser l'engagement de la collectivité au regard de l'évaluation de ses objectifs. Par la suite, lorsque le quartier est livré (ou sur le point de l'être), le Label étape 3 peut être délivré sur la base d'une nouvelle expertise. Enfin, le Label étape 4 peut être demandée par les porteurs de projet pour leur EcoQuartier après trois ans de vie. Cette dernière étape vise à mesurer la tenue des engagements pris au lancement du projet au moment de la signature de la charte EcoQuartier et vérifier que les objectifs fixés ont été atteints. Il s'agit, ici, pour la collectivité de s'engager dans une démarche d'amélioration continue en concertation avec les usagers. Le degré d'appropriation du quartier par ses habitants et l'évolution des usages sont évalués. Au-delà du quartier, c'est également l'effet levier sur le changement des pratiques internes en termes d'aménagement et d'auto-évaluation qui sont étudiées.

Au départ, la démarche de labellisation ne comptait que 3 étapes (Signature de la charte Écoquartier, Diplôme "Engagé dans la labellisation", Label national ÉcoQuartier). Le processus de labellisation a été complété avec la 4ème étape correspondant à l'évaluation des projets, suite aux résultats et retours d'expérience reçus lors de la capitalisation de la Campagne Test d'Evaluation des EcoQuartiers (CEQ). L'idée étant que les collectivités et les différents experts se revoient quelques années après la livraison de leur EcoQuartier afin de mesurer l'atteinte réelle des objectifs techniques, économiques et sociétaux qu'elles s'étaient fixées.

Depuis la création du Label EcoQuartier, de nombreux projets sont engagés dans la démarche aux différentes étapes. Ces opérations sont diverses en termes de localisation (France métropolitaine,

Outre-Mer), de contextes (grandes agglomérations, milieux ruraux, péri-urbains, etc.), de tailles, de type de projet (neuf, rénovation, renouvellement urbain, extension, etc.).

Ainsi, entre 2013 et 2018, 570 projets ont reçu le Label EcoQuartier à travers toute la France et à différentes étapes, dont 338 projets à l'étape 1 (en cours d'étude), 158 projets à l'étape 2 (en cours de réalisation), 68 projets à l'étape 3 (projets achevés) et 6 projets à l'étape 4 (habités depuis plus de 3 ans).

En Outre-Mer, 22 projets ont été labellisés à différentes étapes soit approximativement 4% de l'ensemble des projets, dont 7 projets à La Réunion. Une carte localisant les différents projets en fonction de leur étape de labellisation est donnée en Annexe 1.

A La Réunion, la ville de Saint-Pierre et son Programme de Rénovation Urbaine (PRU) dans le quartier de la Ravine Blanche ont été récompensés par le prix EcoQuartier dans la catégorie Villes Moyennes en novembre 2011 par le « Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement » (MEDDTL), renommé « Ministère de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales ». Le programme, lauréat du prix au titre des villes moyennes, a répondu aux « 20 ambitions EcoQuartier » qui recensaient et présentaient les attentes du Ministère en termes d'aménagement durable en général et d'écoquartier en particulier. Le quartier de la Ravine Blanche avait déjà obtenu le prix « Quartier durable réunionnais » en 2010, décerné aux projets innovants locaux par la DEAL (Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de La Réunion). Suite à l'obtention du prix EcoQuartier, la ville de Saint-Pierre a voulu pérenniser sa démarche en se portant candidate à la première campagne de labellisation EcoQuartier, lancée par le Ministère. Le dossier de demande de labellisation est ainsi déposé en mars 2013. En septembre 2013, le quartier de la Ravine Blanche fait partie des premiers lauréats du label EcoQuartier, parmi les 13 premiers projets labellisés au plan national, et seul EcoQuartier dans l'Outre-Mer. En 2018, l'EcoQuartier de la Ravine Blanche est toujours le seul EcoQuartier de l'Outre-Mer à avoir obtenu le Label étape 3 et étape 4.

1.3. Campagne test d'évaluation des EcoQuartiers appliquée aux aspects environnementaux

1.3.1. Objectif et méthodologie de la méthode nationale d'évaluation

Une « Campagne d'évaluation des EcoQuartiers » (CEQ) a été lancée en 2014 par le Ministère à destination d'un panel volontaire de collectivités françaises dont les EcoQuartiers ont été labellisés en 2013 et 2014. En effet, dans le dossier de labellisation étaient exprimées des exigences de formulation d'objectifs de suivi et d'évaluation de leur atteinte. Avec cette initiative, le Ministère souhaitait ainsi offrir un accompagnement plus poussé pour l'évaluation des performances des EcoQuartiers labellisés en phase de vie. L'objectif était de suivre les performances réelles des projets, de prendre en compte le fonctionnement de l'EcoQuartier livré et son appropriation par les usagers et de vérifier l'atteinte des objectifs techniques, économiques et sociétaux que les collectivités s'étaient fixées. L'objectif de cette méthode d'évaluation est donc d'évaluer principalement « un résultat » et non pas les moyens mis en œuvre pour atteindre la performance. La méthode d'évaluation est un outil développé à destination des collectivités dans un but d'amélioration continue.

La première composante de la méthode nationale d'évaluation a été développée par le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), le Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement) et l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie), avec l'appui du Ministère. La campagne, lancée à l'automne 2014, s'est terminée fin 2016. La méthode développée reposait dans un premier temps sur l'élaboration d'indicateurs portant sur une sélection de trois Engagements de la Charte EcoQuartier, appartenant à la dimension « Préservation des ressources et adaptation au changement climatique », à savoir les Engagements 17, 18 et 19 relatifs aux thématiques de l'énergie, des déchets et de l'eau (voir Figure 1.3 ci-après).

Ces engagements nécessitaient une méthode particulière puisqu'il s'agissait ici d'évaluer des critères environnementaux techniques. A terme, une méthode d'évaluation transversale à l'ensemble des 20 Engagements de la charte a été développée et mise à disposition des collectivités.

La méthodologie utilisée pour l'évaluation des écoquartiers se base sur une « arborescence descendante », à savoir les Engagements de la Charte EQ, suivis des Critères d'évaluation et enfin les Indicateurs. A chaque Engagement est associé différents critères d'évaluation. Le critère d'évaluation permet d'exprimer « les caractéristiques attendues de l'EQ, les éléments sur lesquels s'appuyer pour

apprécier la valeur des résultats atteints par l'EQ » (MLETR and CSTB, 2016). Enfin, pour chaque critère ont été définis un ou plusieurs indicateurs. Les indicateurs « reflètent les mesures nécessaires afin de vérifier l'existence et le degré de présence du critère et fournissent une information significative, une preuve, un signe du critère recherché » (MLETR and CSTB, 2016).

DÉMARCHE ET PROCESSUS	CADRE DE VIE ET USAGES	DÉVELOPPEMENT TERRITORIAL	ENVIRONNEMENT ET CLIMAT
1 Réaliser les projets répondant aux besoins de tous en s'appuyant sur les ressources et contraintes du territoire.	6 Travailler en priorité sur la ville existante et proposer des formes urbaines adaptées pour lutter contre l'étalement urbain.	11 Contribuer à un développement économique local, équilibré et solidaire.	16 Produire un urbanisme permettant d'anticiper et de s'adapter aux risques et aux changements climatiques.
2 Formaliser et mettre en œuvre un processus participatif de pilotage et une gouvernance élargie créant les conditions d'une mobilisation citoyenne.	7 Mettre en œuvre les conditions du vivre-ensemble et de la solidarité.	12 Favoriser la diversité des fonctions et leur proximité.	17 Viser la sobriété énergétique et la diversification des ressources au profit des énergies renouvelables et de récupération.
3 Intégrer la dimension financière tout au long du projet dans une approche en coût global.	8 Assurer un cadre de vie sûr et qui intègre les grands enjeux de santé, notamment la qualité de l'air.	13 Optimiser l'utilisation des ressources et développer les filières locales et les circuits courts.	18 Limiter la production des déchets, développer et consolider des filières de valorisation et de recyclage dans une logique d'économie circulaire.
4 Prendre en compte les pratiques des usagers et les contraintes des gestionnaires tout au long du projet.	9 Mettre en œuvre une qualité urbaine, paysagère et architecturale.	14 Favoriser les modes actifs, les transports collectifs et les offres alternatives de déplacement.	19 Préserver la ressource en eau et en assurer une gestion qualitative et économe.
5 Mettre en œuvre, à toutes les étapes du projet et à l'usage, des démarches d'évaluation et d'amélioration continue.	10 Valoriser le patrimoine (naturel et bâti), l'histoire et l'identité du site.	15 Favoriser la transition numérique vers la ville intelligente.	20 Préserver et valoriser la biodiversité, les sols et les milieux naturels.

Figure 1.3 : Les 20 Engagements de la Charte EcoQuartier: La campagne d'évaluation (CEQ) portait sur les engagements 17, 18 et 19 relatifs aux thématiques liées à l'énergie, aux déchets et à l'eau (MLETR and CSTB, 2016)

La partie Energie se décompose en 3 critères d'évaluation, à savoir sobriété et efficacité énergétiques, développement des filières de production d'énergies renouvelables (ENR) et Gestion de l'énergie, et comprend 8 indicateurs (voir Tableau 1.9). La thématique des déchets est déclinée en 3 critères d'évaluation avec la prévention des déchets, la consolidation et le développement des filières de valorisation et aussi l'incidence de la gestion des déchets sur la qualité urbaine et le fonctionnement de l'EcoQuartier, évalués au travers de 10 indicateurs. Enfin, l'engagement liée à l'eau comprend 4 critères d'évaluation qui sont l'intégration de l'eau dans l'aménagement et le fonctionnement, la maîtrise des pollutions liées au ruissellement, la sobriété et valorisation de la ressource en eau ainsi que la maîtrise de l'imperméabilisation, des débits d'EP et du ruissellement. Un ensemble de 9 indicateurs permet de caractériser les différents critères d'évaluation. Cette campagne test se basait donc sur un total de 10 critères d'évaluation et de 27 indicateurs.

La méthode d'évaluation repose à la fois sur des données mesurées, des calculs techniques, des enquêtes et des questions évaluatives. La majorité des indicateurs s'appuie sur des données quantitatives et cherche à qualifier les résultats atteints et non les moyens mis en place afin de répondre au critère évalué. Seulement 5 d'entre eux se basent sur des informations qualitatives avec des questions évaluatives : 2 indicateurs de la partie déchets (18.9 et 18.10) et 3 indicateurs pour la thématique liée à l'eau (19.1, 19.2 et 19.3).

Afin de vraiment rendre compte des performances réelles de l'EcoQuartier, des données réelles acquises via des mesures ou des enquêtes sont fortement recommandées ou à défaut des données échantillonnées plutôt que le recours à des estimations. Les données obtenues par échantillonnage ou par estimation permettent de tenir compte de la difficulté à acquérir des données réelles auprès d'acteurs autres que la collectivité ou encore de l'intérêt à disposer de données réelles pour des secteurs sur lesquels la collectivité n'a pas la main mise. Le périmètre minimal pour l'acquisition des informations réelles est celui maîtrisé par la collectivité (espaces publics, bâtiments publics, etc.), l'échantillonnage est orienté vers le domaine des bailleurs sociaux alors que les estimations sont plutôt acceptées pour le domaine privé. Un niveau de fiabilité est associé à chacun de ces types de données, à savoir forte pour des données réelles, moyenne pour l'échantillonnage et faible pour l'estimation.

Les données doivent être calculées sur une année complète afin de tenir compte de facteurs pouvant influencer les résultats obtenus tels que les différences entre saison froide et saison chaude.

Deux types d'indicateur sont proposés par la méthode : les indicateurs recommandés et les indicateurs optionnels (voir Tableau 1.9). Les indicateurs recommandés n'ont pas de caractère obligatoire mais ils permettent de définir un cadre commun pour l'évaluation des performances des EcoQuartiers. Ceux considérés comme optionnels donnent une information souvent complémentaire. Ce sont des indicateurs qui relèvent parfois de caractéristiques particulières à un contexte ou qui sont plus difficilement applicables à l'échelle d'un quartier (sur un plan technique, financier ou humain).

Chaque indicateur est décrit selon une fiche-indicateur permettant de le décrire, de définir les modalités d'acquisition des données et des facteurs explicatifs permettant son interprétation. Le modèle type utilisé pour l'ensemble des indicateurs est fourni en Annexe 2.

Le résultat de l'évaluation s'appuie à la fois sur les résultats chiffrés issus du calcul des indicateurs et sur l'analyse des données obtenues. La confrontation des résultats obtenus aux valeurs de référence et aux valeurs cibles permet également d'identifier les points à corriger ou à améliorer et de proposer des recommandations.

Le processus général du déroulement de la campagne d'évaluation est présenté dans la Figure 1.4 ci-dessous. La phase préparatoire consistait notamment à donner une description détaillée de l'EcoQuartier concerné avec sa composition (typologie de bâtiments, domaine privé/public, systèmes ENR présents, espaces végétalisés, espaces liés à l'eau, filières de déchets, systèmes de gestion de l'eau

pluviale, etc.), de définir la pertinence des indicateurs en fonction du contexte et de mettre en place la méthodologie d'acquisition de données (matériels, instrumentation, enquêtes) après identification des acteurs concernés. Dans un second temps, suite à la phase d'acquisition des données, le calcul des indicateurs et l'analyse des résultats obtenus pouvaient être réalisés.

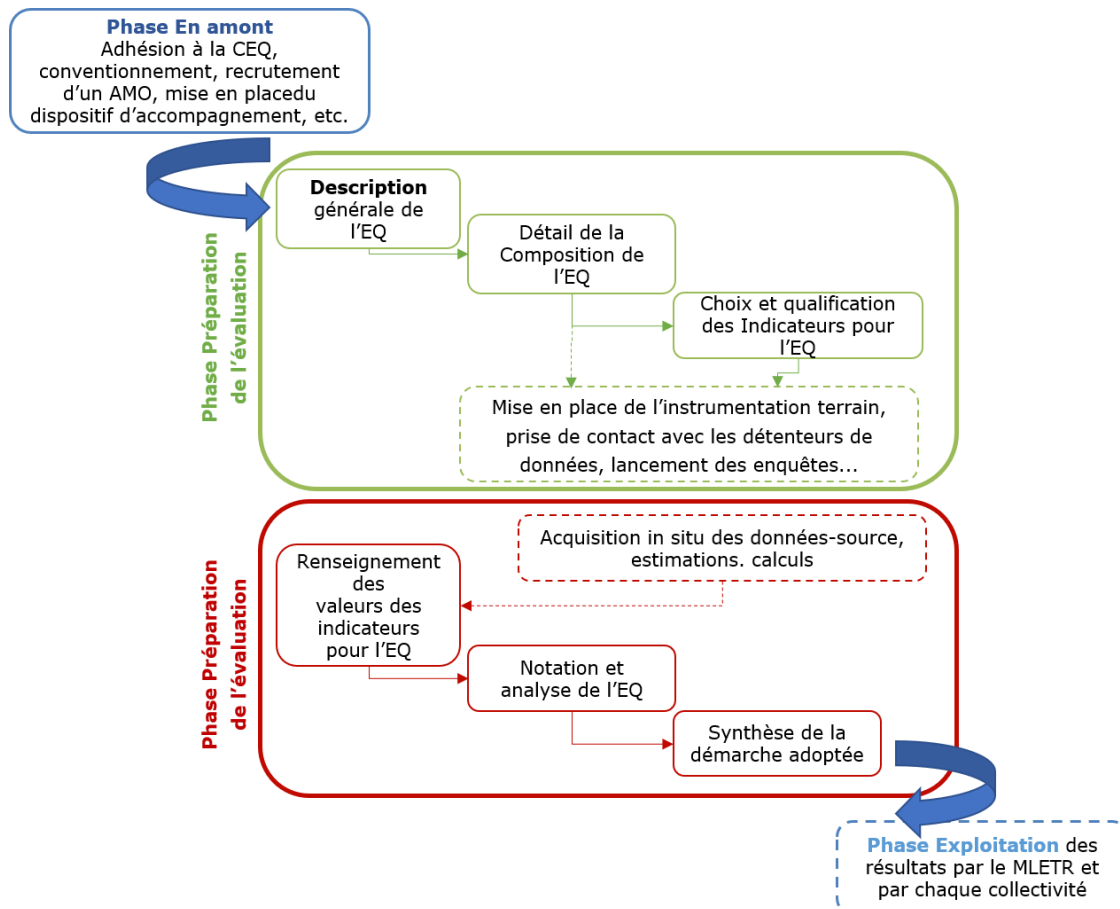


Figure 1.4: Processus global de mise en œuvre de la campagne test d'évaluation des EcoQuartiers. (MLETR and CSTB, 2016)

1.3.2. Contextualisation de la méthode dans différents EcoQuartiers engagés dans la démarche

Afin de contextualiser la méthode nationale d'évaluation et de la rendre flexible et adaptable aux particularités d'un territoire, une phase de campagne test a été lancée permettant de recueillir des

retours d'expérience dans différents contextes territoriaux et d'obtenir des résultats par types de projets d'EcoQuartier. Au total, ce sont 14 collectivités qui ont décidé de se lancer dans cette campagne test, représentant en tout 19 EcoQuartiers, à savoir Changé, Forcalquier, Graulhet, Grenoble (avec 3 EcoQuartiers), Hédé-Bazouges, La Rivière, Les Forges, Lyon, Morez, Mulhouse (avec 2 EcoQuartiers), Paris (avec 3 EcoQuartiers), Prades-le-Lez, Reims et Saint-Pierre. L'EcoQuartier de la Ravine Blanche à Saint-Pierre a été le seul quartier situé en Outre-Mer et en climat tropical à s'être engagé dans cette campagne.

De plus, la majorité des EcoQuartiers impliqués étaient des opérations de renouvellement alors que seulement 22% d'entre eux étaient des extensions urbaines (cf Figure 1.5). Les opérations étaient généralement situées en faubourg (40%) ou en centre-ville (40%) et s'étendent principalement sur une superficie inférieure à 20 ha, à l'exception de deux très grandes opérations ANRU, à savoir 57 ha en centre pour Ravine Blanche à Saint-Pierre et 120 ha en périphérie pour La Duchère à Lyon.

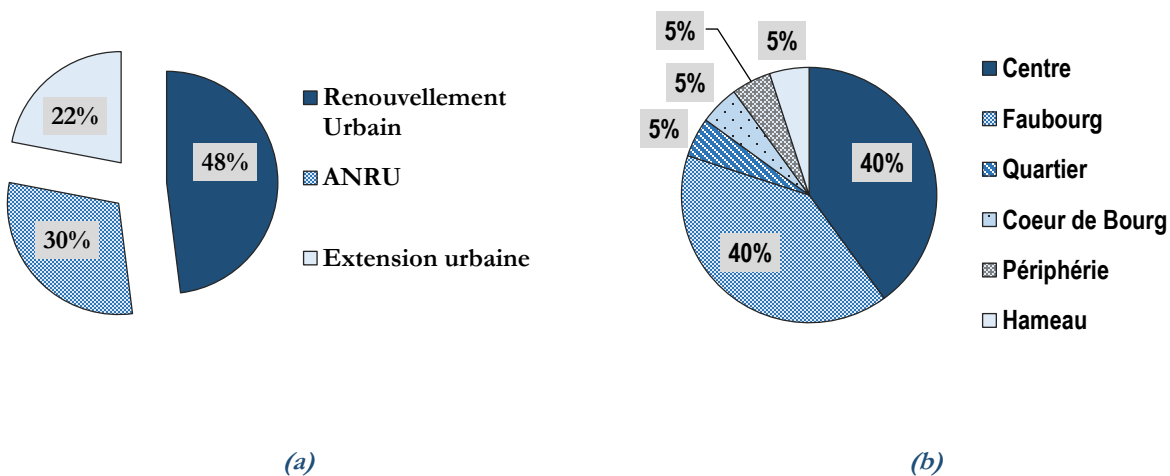


Figure 1.5: Répartition des EcoQuartiers participant à la CEQ selon le type d'opération : (a) selon le type de programme et (b) selon leur localisation. (Source : CSTB - Séminaire du 6 Oct. 2016)

L'analyse des dossiers de labellisation effectuée par le CSTB a permis de faire ressortir que les opérations ANRU ont généralement mis l'accent sur les thématiques sociales et de cadre de vie correspondant aux engagements des dimensions « cadre de vie et usages » et « démarche et processus » alors que les opérations d'extension ont mieux traité la partie densité et forme urbaine ainsi que les engagements liés à l'empreinte écologique tels que l'eau, l'énergie ou encore l'écoconstruction. Elle a également mis en évidence que la thématique de l'énergie a en moyenne été mieux prise en compte que les thématiques déchets et eau.

La contextualisation de la méthode pour notre cas d'étude de l'EcoQuartier de la Ravine Blanche à Saint-Pierre, présentée dans la section suivante, est donc importante puisqu'il s'agit du seul cas d'étude situé dans un contexte climatique bien différent avec la spécificité d'être situé sur une île. De plus, la taille de l'EcoQuartier étant plus importante que la moyenne, les défis à relever n'étaient pas négligeables en termes de collectes de données.

1.4. Application de la méthode d'évaluation au cas d'étude de l'EcoQuartier de la Ravine Blanche

1.4.1. Contexte climatique

La Réunion est un département français d'outre-mer situé dans l'hémisphère Sud ($21^{\circ}06' S / 55^{\circ}32' E$) qui s'étend sur une superficie de 2 512 km² avec une population estimée à 860 896 en 2018 selon les chiffres de l'Insee (cf Figure 1.6). L'île est située en zone tropicale, généralement délimitée par le tropique du Cancer au Nord et celui du Capricorne au Sud. Le climat est généralement de type chaud et humide sur les côtes et plutôt tempéré en altitude.

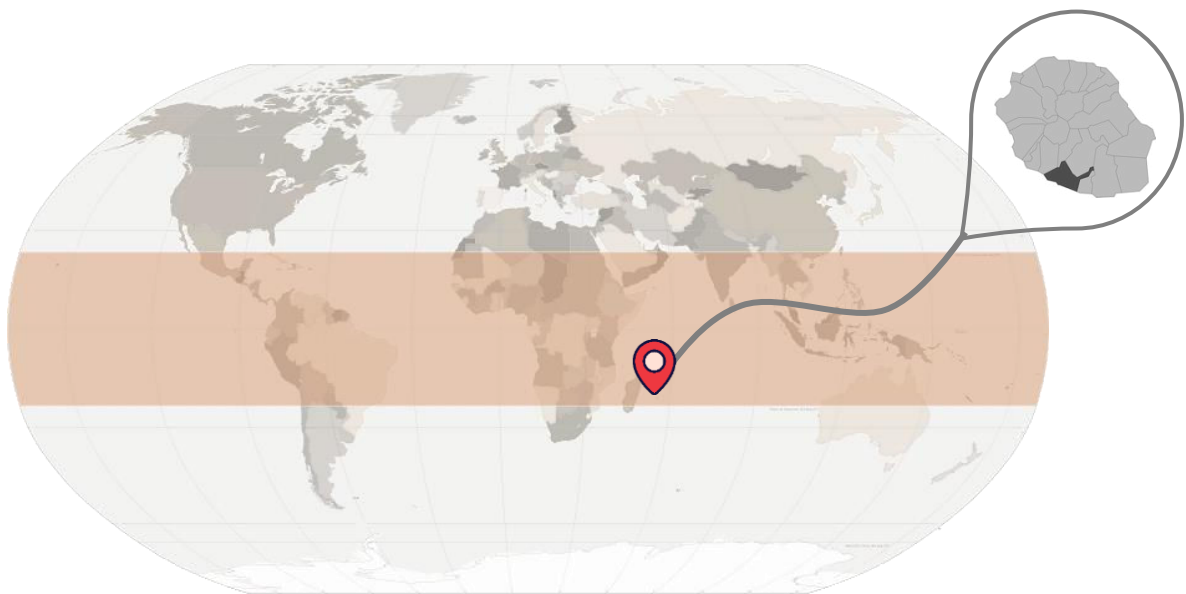


Figure 1.6: Localisation géographique de l'île de La Réunion et de la ville de Saint-Pierre, dans le Sud de l'île

Cependant, du fait de son relief particulier, plusieurs microclimats peuvent être observés. Différents travaux de recherche ont été réalisés afin d'identifier et de délimiter ces zones climatiques, qui sont maintenant inscrites dans la réglementation locale, la RTAA DOM 2016 (Réglementation thermique, acoustique et aération pour les bâtiments neufs en Guadeloupe, Martinique, Guyane et à La Réunion) ou encore dans l'outil PERENE 2009 (PERformances ENergétiques des bâtiments à La Réunion) (LPBS and Imageen, 2009), qui est un outil de conception de bâtiments performants développé à La Réunion dans le but de concevoir des bâtiments confortables thermiquement (été / hiver) en réduisant leur consommation énergétique (Garde et al., 2010).

L'île connaît également une saison cyclonique très marquée durant la période estivale, avec des épisodes de fortes pluies.

L'EcoQuartier de la Ravine Blanche fait partie de la ville de Saint-Pierre, située dans la partie Sud de l'île, au bord de la côte. Le climat est chaud en été et tempéré en hiver, avec un rayonnement solaire global important tout au long de l'année avec une moyenne journalière de 5,6 kWh/m². Le taux d'humidité est relativement élevé toute l'année. La saison hivernale est marquée par des alizés venant du Sud-Est, particulièrement forts.

1.4.2. Un contexte réglementaire différent à La Réunion

En raison d'un contexte climatique et énergétique différent de celui de la France métropolitaine, les constructions neuves de logements dans les départements et régions d'Outre-Mer (DROM), dont La Réunion, ne sont pas soumis à la réglementation thermique métropolitaine, connue sous le nom de RT2012.

Les textes réglementaires en matière de caractéristiques thermiques, acoustiques et d'aération ont été adaptés. A La Réunion, les nouveaux bâtiments d'habitation individuels et collectifs doivent être conformes à la RTAA DOM 2016. Cette réglementation est définie par les articles R162-1 à R162-4 du code de la construction et de l'habitation, le Décret n°2009-424 et les trois arrêtés d'application du 17 avril 2009 (thermique, acoustique et aération), modifiés en janvier 2016.

La RTAA DOM vise à améliorer le confort hygrothermique et acoustique des logements, assurer une bonne qualité d'air intérieure, diminuer la consommation énergétique des bâtiments notamment en limitant le recours à la climatisation et en ayant recours à l'énergie solaire pour répondre à 50% des besoins en eau chaude sanitaire.

Pour répondre aux objectifs d'économies d'énergies, de recours aux énergies renouvelables, de confort hygrothermique et de qualité d'air, la réglementation se base sur des moyens tels que favoriser la ventilation naturelle (de confort et d'hygiène) et le recours à l'énergie solaire, ainsi que mettre en place

des protections solaires efficaces afin de réduire les apports solaires au niveau des parois opaques et des baies. Enfin pour chaque moyen identifié, des mesures spécifiques sont proposées afin d'atteindre les objectifs fixés. La réglementation distingue différentes zones en fonction de l'altitude (<400m, entre 400 et 600 m et >600m) pour lesquelles différentes valeurs seuils et/ou exigences sont appliquées.

Le Tableau 1.7 ci-dessous liste quelques exemples d'exigences de la réglementation thermique pour les bâtiments neufs construits dans la ville de Saint-Pierre, à une altitude <400m (représentatif des logements neufs du quartier de Ravine Blanche).

Tableau 1.7 : Exigences requises pour la partie thermique de la RTAA DOM 2016 pour un bâtiment neuf construit à Saint-Pierre (altitude < 400m)

But	Eléments du bâtiment	Exigences
Réduire les apports solaires	Parois opaques horizontales	Facteur solaire $S_{max} \leq 0,03$
	Parois opaques verticales	Facteur solaire $S_{max} \leq 0,09$
	Baies	Facteur solaire ▪ $S_{max} \leq 0,6$ au Nord, à l'Est et à l'Ouest ▪ $S_{max} \leq 0,8$ au Sud
Favoriser la ventilation naturelle de confort	Baies	Ouvertures sur deux façades opposées ou latérales (de plus de 0,5 m ²)
		Taux d'ouverture >22% pour le séjour et >18% pour les chambres

Ainsi, dans la RTAA DOM 2016 sont formulés des objectifs et des obligations de moyens, mais aucune exigence de résultats comme cela est le cas dans la RT2012 qui vise à limiter la consommation d'énergie primaire des bâtiments neufs à un maximum de 50 kWh_{EP}/m²/an et qui repose sur 3 coefficients de résultats, à savoir le besoin bioclimatique (Bbiomax), la consommation d'énergie primaire (Cepmax) et le confort en été. La RTAA DOM est la seule réglementation qui fixait un cadre réglementaire pour le quartier de la Ravine Blanche en lien avec l'Engagement énergie dans la campagne test des EcoQuartiers. Il n'existait pas de cadre réglementaire pour les autres cibles (eau et déchets).

En ce qui concerne la thématique de l'énergie, Le PLU (Plan Local d'Urbanisme) de Saint-Pierre intègre comme préoccupation essentielle le recours aux énergies renouvelables (solaires, hydrauliques, éoliens,

etc.) dans son PADD (Projet d'aménagement et de développement durable). Cette orientation trouve sa traduction dans le règlement en termes d'intégration paysagère et architecturale des panneaux solaires et photovoltaïques en imposant une implantation parallèle à la pente du toit. Il n'y a aucune autre règle dans le PLU en lien avec les indicateurs de la cible énergie de la méthode d'évaluation des EcoQuartiers.

Pour les thématiques liées à l'eau et aux déchets, le PADD affiche clairement la nécessité de garantir une gestion efficace et durable des ressources, d'identifier et de réduire les risques naturels et aussi de mettre en place une gestion et un traitement durable des déchets. Néanmoins, aucune règle constructive en lien avec les indicateurs développés dans la méthode du CSTB n'est à mentionner. Pour la partie Déchets, des règles sont précisées en termes d'accessibilité pour la collecte des déchets par les prestataires. En ce qui concerne la maîtrise des eaux pluviales, il est uniquement spécifié que les aménagements réalisés doivent garantir l'écoulement des eaux pluviales vers l'exutoire ou le réseau les collectant conformément aux règles en vigueur.

1.4.3. Présentation du programme de rénovation urbaine de la Ravine Blanche

1.4.3.1. Situation initiale du quartier de la Ravine Blanche défini comme la « banlieue » de Saint-Pierre

Le quartier de la Ravine Blanche est l'un des quartiers les plus denses de la Commune de Saint-Pierre, qui était connu historiquement comme étant la « banlieue » de Saint-Pierre. Quartier ancien datant des années 1960-1970, il est l'un des premiers quartiers d'habitat social et a suivi le modèle des ZUP (zone à urbaniser en priorité). Situé à l'Ouest du centre ancien, le quartier tournait le dos à la ville et était à l'époque totalement déconnecté du centre-ville pourtant situé à proximité, se retrouvant ainsi dans une situation critique d'isolement et de négligence. La démarcation entre ce quartier et le centre-ville est telle qu'il y a même une discontinuité qui s'exprime dans le changement des noms de rues à l'entrée du quartier avec notamment la rue principale du centre-ville appelée « rue des Bons Enfants » qui devient la « rue du Père Favron ».

Le quartier de la Ravine Blanche a également été classé comme quartier « sensible » de la Politique de la Ville, car repéré comme concentrant des problèmes urbains et des maux sociaux pouvant porter atteinte à la cohésion sociale. En effet, dans les années 2000, le quartier est confronté à des problèmes socio-économiques importants. Celui-ci était composé de 75% de logements locatifs sociaux ou très sociaux et marqué par un taux de chômage chez les jeunes de moins de 20 ans de 89% et de 51,4%

pour la tranche d'âge 20-39 ans. Sur 2 000 ménages comptés, près de 500 d'entre eux étaient des familles monoparentales. Sur les 6 000 personnes estimées comme habitant dans le quartier, uniquement 1000 d'entre elles disposaient d'un emploi et près de 1 800 de ces personnes touchaient le RMI. De plus, bien que disposant de 6 écoles pour près de 1 700 élèves, le quartier présentait un fort taux d'échec scolaire.

Un sentiment d'insécurité grandissait au sein du quartier et aux alentours. Enfin, le quartier était de type monofonctionnel, composé en grande partie de logements sociaux et ne comptant que peu d'activités ou de services, qu'ils soient publics ou privés (environ une dizaine recensée). Le taux d'équipement du quartier est faible et le quartier présente de nombreux espaces libres en majorité délaissés.

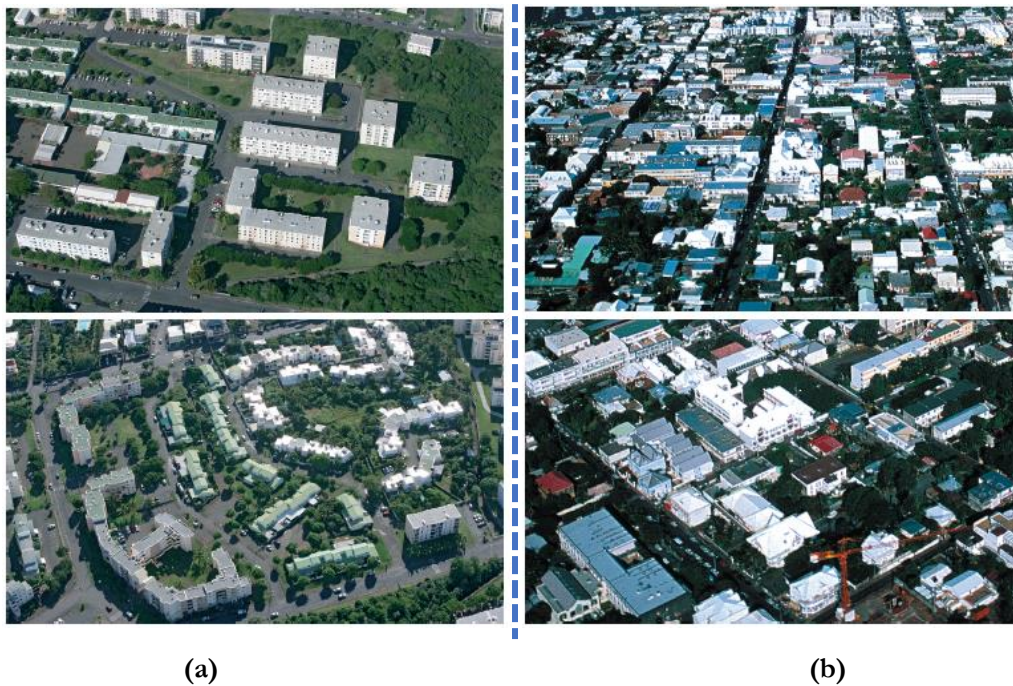


Figure 1.7: Comparaison entre les tissus urbains du quartier de la Ravine Blanche (a) et du centre-ville historique de Saint-Pierre (b) au début du projet. Source : Etude urbaine du projet de rénovation urbain de Ravine Blanche - 2006, Mairie de Saint-Pierre.

Le quartier de la Ravine Blanche était au départ composé de différents types d'habitat se côtoyant et s'alternant d'une rue à l'autre, allant de la paillote à la « case » (maison) en tôle ou encore à la maison en dur avec une amélioration notable qui est apparue dans la qualité de l'habitat. Cependant, au fil du temps, un bidonville va faire son apparition entre les années 1958 et 1966, où seront reléguées les personnes les plus démunies. Les premiers bailleurs sociaux font leur arrivée dans ce quartier dans les années 1960. Un des principaux bailleurs, la SIDR (Société Immobilière du Département de La Réunion) va d'ailleurs proposer à la population des cases en dur de type logement social individuel en

bande avec eau et électricité courante. Suite à la politique de l'époque des grands ensembles et le besoin urgent de loger une population grandissante, le quartier va subir une verticalisation importante et les premiers immeubles d'habitats sociaux collectifs de type « tours et barres » font leur apparition, contribuant alors à faire de ce quartier l'un des plus denses de la commune.

En conclusion, le bilan du quartier de la Ravine Blanche fait ressortir un quartier social avec une image négative et un fort sentiment d'insécurité, composé d'une trame viaire et d'un tissu urbain en rupture avec ceux du centre-ville (voir Figure 1.7), habité par une population dans une situation sociale préoccupante et un contexte économique défavorable.

1.4.3.2. Les ambitions et réalisations du programme de rénovation urbaine

C'est dans ce contexte de relégation urbaine et sociale que le quartier de la Ravine Blanche va bénéficier d'un programme de rénovation urbaine à partir d'octobre 2007 avec la signature d'une convention ANRU. Institué le 1er août 2003 par la loi Borloo, le PNRU (Programme National pour la Rénovation Urbaine) a pour objectif de transformer les quartiers classés en ZUS (Zone Urbaine Sensible) par des interventions portant notamment sur les logements, les équipements publics ou encore les aménagements urbains. Un périmètre opérationnel d'intervention, s'étalant sur une superficie de 60ha pour près de 6 000 habitants, a été défini dans le cadre de ce programme (voir Figure 1.8).



Figure 1.8 : Définition et localisation du périmètre opérationnel de l'ANRU du quartier de la Ravine Blanche par rapport au centre-ville et à la zone industrielle n°1 (ZI 1) de la ville de Saint-Pierre.

Les objectifs majeurs de ce projet de rénovation urbaine étaient les suivants :

- Reconnecter le quartier au centre-ville et à la mer (cf Annexe 3 et Annexe 4),
- Clarifier le parcellaire et les domanialités (passer d'une taille d'opération à l'ilot et à la parcelle) (cf Annexe 5),
- Créer une mixité sociale et urbaine en diversifiant l'habitat et les fonctions,
- Améliorer les équipements publics et l'offre de services,
- Transformer un quartier défavorisé et changer son image.

Le projet de rénovation urbaine a donc eu comme principe fondateur de réintégrer le quartier à la trame urbaine du centre-ville et de le rattacher à sa façade maritime, et ce en réinsérant le quartier à la ville par un processus de requalification des espaces. Ceci a notamment été possible avec un travail effectué au niveau de la trame viaire et la mise en place d'une ligne de TCSP (Transports collectifs en site propre) traversant le quartier et le reliant au centre-ville (cf Annexe 3 et Annexe 6).



(a)



(b)



(c)

Figure 1.9 : Exemple d'une opération de logements sociaux (Bons Enfants -SHLMR) avant (a) et après réhabilitation (b) et résidentialisation, avec création de parking et d'espaces privés en pied d'immeuble (c).

Le programme de rénovation urbaine comprenait la réhabilitation de 842 logements sociaux, la construction de 558 nouveaux logements et la résidentialisation de la quasi-totalité du parc social présent dans le périmètre d'intervention, soit près de 1 340 logements (avec cours, placettes, aires de jeux, halls et parkings sécurisés) (voir Figure 1.9). Ces opérations de résidentialisation ont aussi permis de clarifier les statuts fonciers entre espaces privés et espaces publics, tout en permettant aux résidents de disposer d'espaces communs de qualité et de plus de sécurité en pied d'immeuble. Seulement six logements ont dû être démolis afin de créer une nouvelle voie.

Le projet a également permis la construction de près de 6 000 m² de commerces et de bureaux ainsi que de 2 nouveaux groupes scolaires et la réhabilitation de 3 groupes scolaires.

Enfin, le projet a également reposé sur un programme d'aménagements urbains conséquent (rues, voies piétonnes et vélo, placettes, espaces verts, mobilier urbain et éclairage public) avec notamment la création d'un parc urbain de 2 ha aménagé, servant de zone d'infiltration pour les eaux pluviales, ainsi que la mise en place d'une ligne de TCSP et de voies cyclables.

Le phasage du programme de rénovation urbaine de Ravine Blanche correspondant aux réalisations décrites précédemment est présenté dans la Figure 1.10 ci-après.

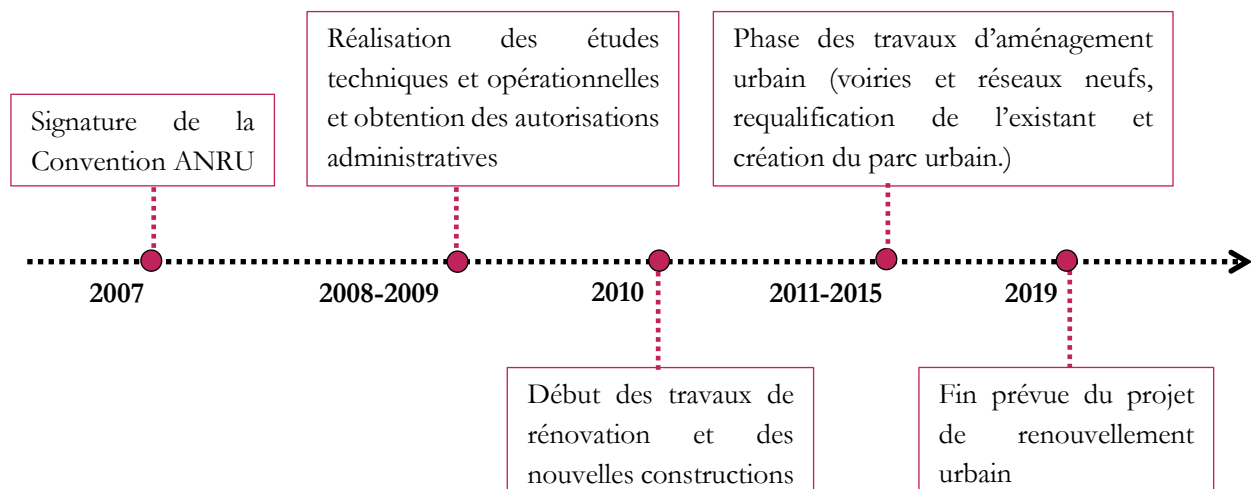


Figure 1.10: Les grandes étapes du projet de renouvellement urbain de la Ravine Blanche dans le temps.

Ce projet de rénovation de Ravine Blanche a obtenu le prix EcoQuartier dans la catégorie Villes Moyennes en Novembre 2011 par le Ministère de l'écologie, du développement durable et du logement (MEDDL) et a obtenu le Label National EcoQuartier en Septembre 2013 parmi les 13 premiers projets labellisés au plan national.

1.4.3.3. Principaux facteurs de réussite du projet de rénovation urbaine

1.4.3.3.1. Un montage financier ficelé et un budget contrôlé

L'enveloppe globale pour le projet de renouvellement urbain du quartier s'élève à 154,4 M€ HT, entièrement financée par des organismes publics. La majeure partie des investissements a été portée par les bailleurs sociaux à hauteur de 50,5%, suivie de l'Etat avec 19,8% des investissements. La Ville de Saint-Pierre a investi à hauteur de 14,9% dans le projet et les fonds donnés par l'ANRU représentaient 7,8% de l'enveloppe finale. D'autres organismes ont également participé tels que la communauté d'agglomération (CIVIS), la Région, l'Europe (au travers de fonds FEDER) ou encore la Chambre des dépôts et la Caisse des Dépôts et Consignations (CDC).

La Figure 1.11 ci-dessous présente la répartition des investissements selon les grandes étapes du projet, en fonction de la participation de chacun des organismes publics concernés.

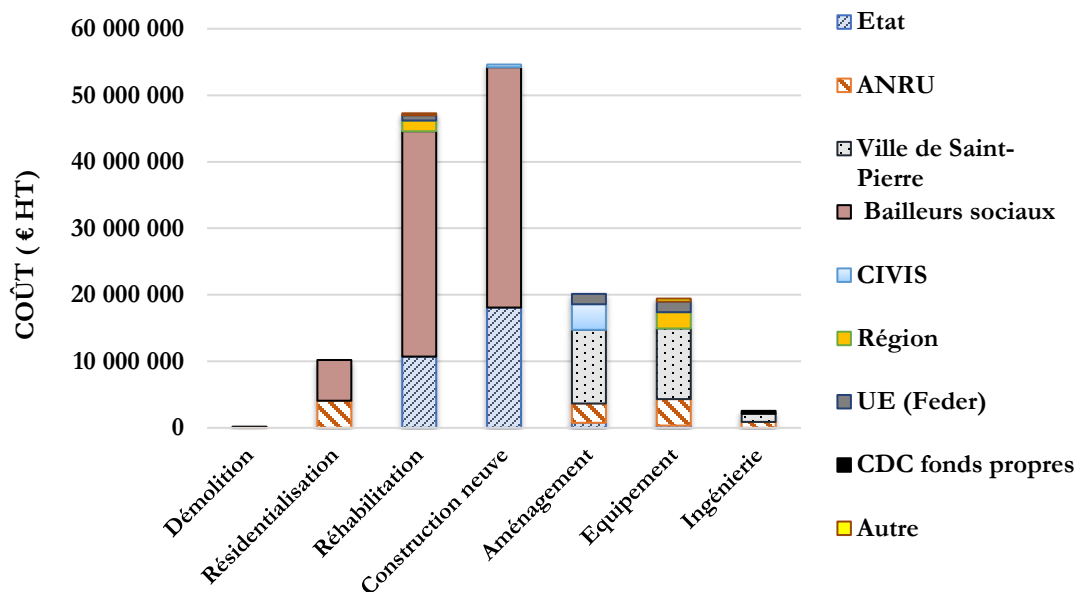


Figure 1.11: Répartition des investissements (en € HT) liés au projet de renouvellement urbain par poste et par organisme public.

La plus grande partie des investissements a été allouée au programme de logements comprenant la réhabilitation de 842 logements sociaux existants et la construction de 364 nouveaux logements, financés en majeure partie par les bailleurs sociaux et l'Etat. De plus, très peu de bâtiments existants ont été démolis dans le cadre du projet. Enfin, le projet de renouvellement urbain a également mis

l'accent sur la création et l'amélioration des infrastructures urbaines et des équipements publics, comprenant notamment le nouveau parc urbain et les écoles, avec un investissement principalement porté par la Ville et par l'ANRU. La CIVIS a elle participé dans l'aménagement de la nouvelle ligne de bus du TCSP (Transport Commun en Site Propre).

1.4.3.3.2. Une gouvernance robuste du projet

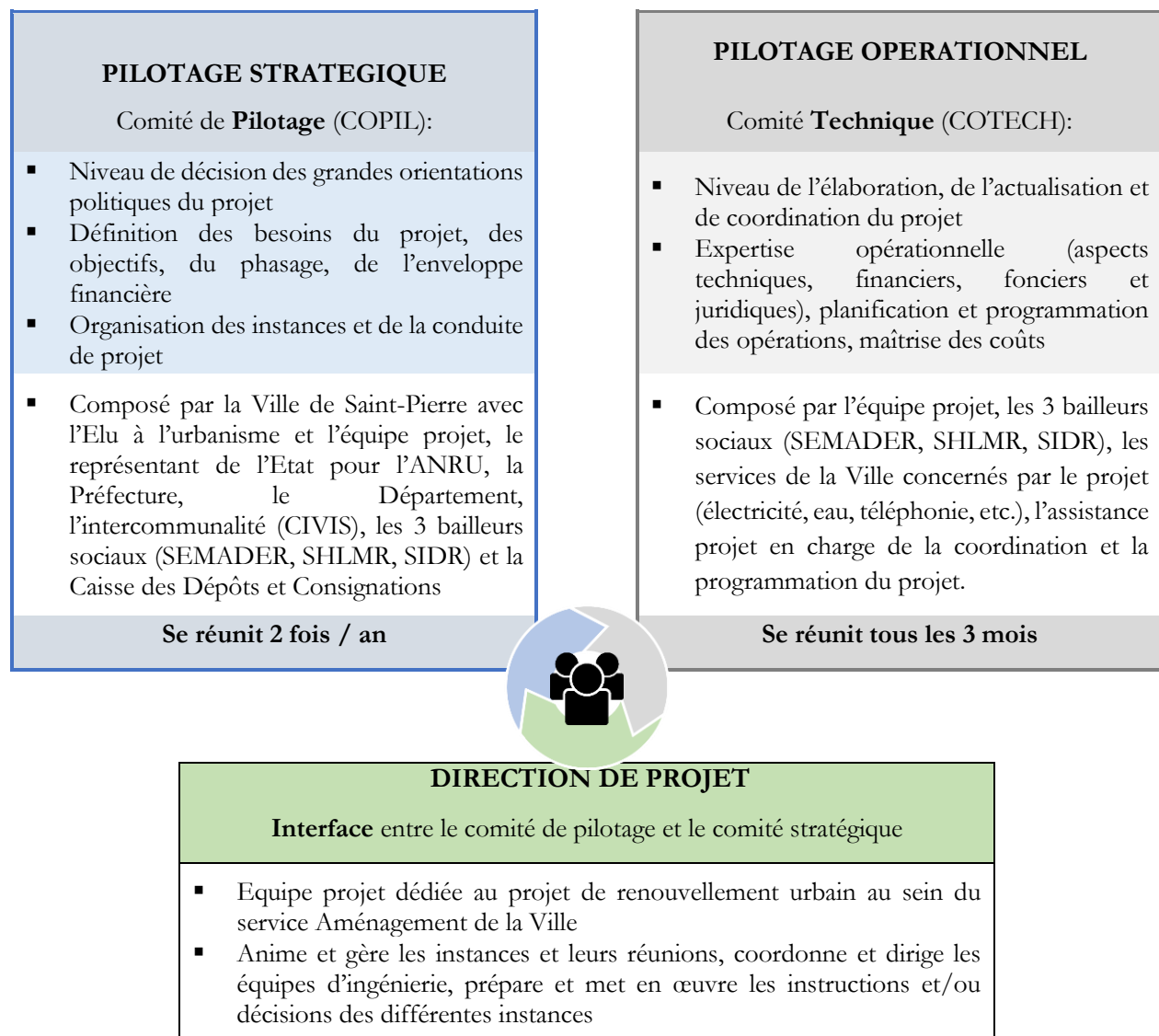


Figure 1.12: Les grandes instances du système de gouvernance mis en place

Le succès global de ce projet de renouvellement urbain réside principalement dans l'implication des différentes parties prenantes tout au long du projet, une volonté politique forte et la mise en place d'une gouvernance solide comprenant un pilotage stratégique, un pilotage opérationnel et une direction de projet. Le projet a été porté depuis ses débuts par l'Elu à l'Urbanisme qui faisait à la fois partie du comité de pilotage stratégique (COPIL) et du comité technique (COTECH) et en lien direct avec l'équipe projet. Les différents comités mis en place ont permis un travail collaboratif entre les différentes parties prenantes concernées, qui se réunissaient régulièrement. Enfin, une équipe projet a été spécialement créée dans le cadre du projet de renouvellement urbain et a été mobilisée à la fois par le comité de pilotage et le comité technique, afin d'animer les différentes instances et de préparer et mettre en œuvre les décisions prises (voir Figure 1.12 ci-dessus).

1.4.3.4. Les objectifs de la Ville de Saint-Pierre en termes de développement durable dans le cadre du programme ANRU

La ville de Saint-Pierre avait exprimé des objectifs en termes de développement durable dans la convention de rénovation urbaine du quartier de la Ravine Blanche (donnés en annexe de la convention ANRU). Leur but était d'ancrer le projet de rénovation urbaine dans une démarche d'approche environnementale de l'urbanisme et de réaliser des aménagements conformes aux objectifs de qualité environnementale. Une grande majorité des objectifs concernait notamment les trois Engagements étudiés dans la CEQ, à savoir les économies d'énergie et les énergies renouvelables, la gestion des déchets de chantier et ménagers, ainsi que la gestion de l'eau et de l'assainissement. L'ensemble des objectifs fixés par la collectivité pour ces trois cibles est donné en Annexe 6.

Pour l'axe Energie, des objectifs chiffrés ont été fixés sur le recours aux énergies renouvelables pour la production d'eau chaude solaire et la production d'énergie photovoltaïque (PV). La construction et l'habitat ont également été pris en compte avec des objectifs fixés selon des référentiels locaux. Dans cet axe, des objectifs quantitatifs ont été fixés (voir Tableau 1.8).

Pour la partie déchets, la compétence est partagée avec l'intercommunalité (CIVIS). Les objectifs principaux suivis par la collectivité portaient sur la gestion des déchets de chantier, non pris en compte dans les indicateurs de la CEQ à ce stade de l'évaluation. Les objectifs fixés qui coïncident avec la phase de vie du quartier portaient plutôt sur la partie tri des déchets et sur le compostage sans aucun indicateur de suivi ou d'évaluation fixé.

Tableau 1.8 : Exemple d'objectifs chiffrés à atteindre fixés par la Mairie de Saint-Pierre pour l'axe énergie

Objectifs	Logements collectifs			Maisons individuelles		Bâtiments publics		
	Neuf	Réhab	Existant	Neuf	Existant	Neuf	Réhab	Existant
Part de l'eau chaude provenant du solaire	80 %	-	75 %	80 %	50 %	-	-	-
Part des bâtiments ayant une installation PV (minimum 1 kW _c pour 10 m ²)	-	-	-	-	-	100%	-	-
Part des bâtiments construits selon un référentiel local	100% PERENE	-	-	10% CASA DD	-	100% PERENE	-	-

La partie gestion de l'eau et assainissement a été fortement traitée au vu de la proximité du quartier au lagon et de la ravine qui traverse le quartier. Afin de réduire la consommation en eau des bâtiments, des recommandations ont été faites en termes d'installation de systèmes économes en eau (mitigeur, chasses d'eau double commande). En termes de gestion de l'eau pluviale, les objectifs consistaient à limiter les surfaces imperméabilisées et le ruissellement des eaux de pluie en favorisant leur infiltration (chaussées drainantes, fossés d'infiltration, etc.).

Il est important de souligner que les objectifs fixés ne demandent aucune obligation de résultats. De plus, très peu d'indicateurs de suivi se basant sur des données quantitatives ont été choisis, données qui auraient pu servir de valeur cible à atteindre par l'écoquartier dans son évaluation. Le Tableau 1.8 montre également que ces objectifs n'ont souvent été fixés que pour certaines catégories de bâtiments. Les fiches actions proposées dans la convention de rénovation urbaine du quartier de la Ravine Blanche se présentent finalement comme une liste de préconisations et de recommandations mais n'avaient aucun caractère prescriptif pour les constructions publiques (bailleurs sociaux) ou privées.

1.5. Résultats de la campagne d'évaluation

Dans cette section ne seront présentés que les résultats et les retours d'expérience de la CEQ obtenus pour l'Engagement 17 sur la thématique de l'Energie. C'est l'approche « purement énergie » des indicateurs développés dans la méthode d'évaluation qui est au centre de la problématique de la thèse et qui est ici critiquée pour une application en climat tropical. Les Engagements 18 et 19 portant respectivement sur la thématique des Déchets et de l'Eau ont été évalués en suivant la même méthodologie. Leurs résultats et retours d'expérience respectifs sont présentés en Annexe 7 et Annexe 8.

1.5.1. Composition de l'EcoQuartier à l'instant « t » de l'évaluation

1.5.1.1. Avancement opérationnel (Fin 2015-Début 2016)

Le projet de rénovation urbaine de la Ravine Blanche a débuté en 2007 et est maintenant terminé. L'ensemble des opérations prévues dans la convention ANRU ont été livrées en cette année 2020. L'avancée globale de l'opération au moment de l'évaluation se situait approximativement à 75% (début 2016) et le calendrier initial était jusque-là respecté. Ainsi, sur 65 opérations recensées, 49 étaient terminées et réceptionnées, 5 étaient encore en phase de travaux et 11 en phase d'études. De plus, les opérations d'aménagement urbain étaient quant à elles terminées et réceptionnées.

Les trois quarts du projet étaient donc finalisés à l'année « t » de la CEQ. Le quartier ne se trouvait plus dans une phase intensive de travaux, l'heure était principalement aux finalisations bien que l'EQ de la Ravine Blanche allait encore connaître quelques chantiers dans les années suivantes, jusqu'en 2020.

1.5.1.2. Chiffres clés de la situation de l'EQ au moment de la CEQ

Au moment de l'évaluation, faite en fin 2015 - début 2016, les principaux chiffres clés sont les suivants :

- **Emprise de l'EcoQuartier** : 57,5 ha
- **Surface d'espace public totale** : 13,4 ha dont 8,7 ha d'espace minéral
- **Nombre d'occupants total du quartier** : 8 200 occupants (6 000 résidents + 626 employés + 1 371 élèves + 153 détenus et personnels + 50 gendarmes avec famille)
- **Surface construite totale** : 225 000 m^2_{SU}

- **Densité de logements** : 42 logements/ha
- **Bilan des logements** : 2 438 logements pris en compte pour l'étude sur 2 621 logements prévus sur l'avenant de sortie dont une grande majorité sont des logements sociaux (66%).

1.5.2. Résultats obtenus pour l'Engagement 17 relatif à l'énergie

1.5.2.1. Critères d'évaluation et indicateurs

L'engagement 17 relatif à la sobriété énergétique et aux ENR est décomposé en 3 critères d'évaluation et 8 indicateurs comme le montre le Tableau 1.9 ci-dessous.

La majorité des indicateurs sont recommandés et seulement trois d'entre eux sont optionnels. La totalité des indicateurs nécessitent des informations dites quantitatives.

Tableau 1.9: Liste des critères d'évaluation et des indicateurs de l'Engagement 17 relatif à l'Energie.

Engagement 17 : Viser la sobriété énergétique et la diversification des ressources au profit des énergies renouvelables et de récupération		
Critère d'évaluation	Indicateurs	Recommandé (R)/ Optionnel (O)
Sobriété et efficacité énergétique	17.1 Consommation énergétique des bâtiments	R
	17.2 Consommation énergétique de l'éclairage public	R
	17.3 Consommation énergétique liée aux espaces publics	O
	17.4 Consommation énergétique liée aux services urbains	O
Développement des filières de production ENR	17.5 Production de chaleur renouvelable sur l'EQ	R
	17.6 Production d'électricité renouvelable sur l'EQ	R
Gestion de l'énergie	17.7 Part de chaleur d'origine renouvelable consommée provenant de l'EQ	O
	17.8 Bilan énergétique de l'EQ	R

1.5.2.2. Application à l'EQ de la Ravine Blanche

1.5.2.2.1. Critère « Sobriété et efficacité énergétique »

Le premier critère est composé de 4 indicateurs qui nécessitent le calcul des consommations énergétiques.

L'indicateur 17.1 donne la consommation énergétique annuelle moyenne des bâtiments de l'EQ, pondérée par les surfaces. Différentes valeurs sont demandées comme la consommation totale de l'ensemble des bâtiments et les valeurs détaillées par typologie de bâtiments (Résidentiel privé/ social, Tertiaire privé/public, Commercial, Equipements publics, Etablissements scolaires, etc.). De plus, dans le cas d'un projet de renouvellement urbain, le taux de réduction des consommations énergétiques des surfaces concernées est également requis.

Cet indicateur présente un intérêt afin de mesurer l'impact des actions de réhabilitation/ rénovation énergétique des anciens logements et des écoles, notamment la pose d'eau chaude solaire. Cependant, dans le cas des logements sociaux, représentant une grande partie des bâtiments de l'EQ, cet indicateur est à mettre en corrélation avec l'évaluation du confort thermique, puisque pour la majeure partie des bâtiments sociaux, il n'y a pas de climatisation ou de brasseur d'air intégrés, donc peut-être pas d'impact important visible en termes de consommations énergétiques des ménages. Cela reste un indicateur à suivre pour les bâtiments publics de type bureaux et écoles qui sont eux équipés en climatisation et brasseurs d'air et ainsi prévoir des améliorations et/ou action de sensibilisation en cas de consommation trop élevée.

La consommation énergétique totale des bâtiments après rénovation est de 13 112 057 kWh_{EF}/an pour l'année 2015 soit approximativement 58 kWh_{EF}/m²_{SU}/an. La consommation énergétique calculée correspond à la consommation en énergie finale tous usages (non détaillée par poste de consommation).

Les différents ratios de consommation énergétique obtenus sont présentés dans le Tableau 1.10 ci-après.

Tableau 1.10 : Ratio de consommation énergétique tous usages par secteur / acteur calculé sur l'année 2015.

Destination	Ratio de consommation (kWh_{EF}/m²_{SU}/an)
Tous secteurs - EcoQuartier	58
Secteur résidentiel (social et privé)	31
Secteur tertiaire privé (tertiaires, industries, commerces et grands comptes tels que définis par EDF)	220
Acheteur public – Bureaux (6 locaux)	51
Acheteur public – Ecoles (5 écoles, 2 réfectoires et la cuisine centrale)	47

Les données fournies par EDF ont permis de calculer le ratio moyen des surfaces résidentielles (sociales et privées) et des surfaces tertiaires privées. En ce qui concerne les bâtiments publics appartenant à la Mairie, les données de consommation ont pu être obtenues auprès des services techniques.

La différence de consommation énergétique avant et après rénovation n'a pas pu être calculée puisque les données avant-projet n'ont pu être récoltées.

Le secteur résidentiel, composé en grande majorité de logements sociaux, présente un ratio moyen de consommation en énergie égal à $31 \text{ kWh}_{\text{EF}}/\text{m}_{\text{SU}}^2/\text{an}$. Ce ratio est inférieur à la consommation moyenne d'électricité pour un foyer réunionnais qui est de $41 \text{ kWh}_{\text{EF}}/\text{m}_{\text{SU}}^2/\text{an}$, sur la base d'une étude menée sur un échantillon de 500 ménages par l'OER (OER, 2010). Il est également inférieur aux ratios de consommation donnés dans l'outil PERENE 2009 pour des logements confinés (appartements) ou des logements aérés (type villas), qui sont respectivement de $44 \text{ kWh}_{\text{EF}}/\text{m}_{\text{SU}}^2/\text{an}$ et $36 \text{ kWh}_{\text{EF}}/\text{m}_{\text{SU}}^2/\text{an}$ (Garde et al., 2010).

Ce faible ratio de consommation est à interpréter avec précaution et n'est pas forcément lié au fait qu'il s'agisse d'un écoquartier. Il peut s'expliquer, d'une part, par le fait que le parc de logements est majoritairement composé de logements sociaux, présentant un faible taux d'équipements en termes de climatisation et où aucun système de chauffage n'est installé. D'autre part, l'ensemble du parc social (ancien et neuf) est équipé en systèmes d'eau chaude solaire depuis la rénovation urbaine.

Un autre facteur explicatif est la fiabilité des données. Les données de consommation ont été directement extraites par EDF et transmises de manière groupée par secteur, avec peu de détails. Il est donc difficile de savoir ce qu'inclut réellement la consommation globale obtenue. Une décomposition plus fine par opération et par poste de consommation serait nécessaire afin de mieux appréhender le ratio observé. Enfin, les surfaces utiles des maisons individuelles et des anciens bâtiments collectifs, pour lesquels nous ne disposons pas de plans, ont été approximées.

Il est important de souligner le fait que la rénovation des logements n'a pas porté sur l'aspect énergétique. Il s'agissait dans la majorité des cas de remise aux normes électriques, réfection des sols, peinture et changement de menuiserie ainsi que de la pose de chauffe-eau solaire (non pris en compte dans cet indicateur). Certains des bâtiments sociaux ont bénéficié d'une étude « BatiPéi », permettant de proposer des solutions afin d'éviter les risques de surchauffe au sein des logements avec isolation de la toiture, augmentation des surfaces d'ouvrants, etc. L'impact de ces mesures est alors plus « observable » en termes de niveau de confort thermique atteint et ne devrait pas uniquement se baser sur une analyse de la réduction de consommation en énergie, qui ne reflète pas la réalité vécue au sein des logements.

L'indicateur 17.2, qualifiant la consommation énergétique de l'éclairage public, est pertinent dans le contexte étudié puisqu'il permet de mesurer l'impact des actions mises en œuvre dans le cadre du projet de rénovation urbaine qui a porté sur la rénovation de l'éclairage extérieur.

Le calcul prend en compte tous les points lumineux du périmètre de l'EQ à savoir l'éclairage existant qui a été conservé et les nouveaux points lumineux installés dans le cadre de l'ANRU. Des factures (données réelles) sont disponibles par compteur pour l'éclairage public et un suivi est réalisé par le service Fluides des Services Techniques. Cependant certains compteurs prennent en compte des points lumineux qui sont situés en dehors du périmètre de l'EQ. Pour les compteurs où tous les points lumineux étaient situés dans le périmètre, les consommations issues des factures EDF de la commune ont été utilisées. Pour les compteurs où des points lumineux pouvaient se trouver en dehors du périmètre, un calcul a été réalisé en fonction de la puissance des lampes et du temps de fonctionnement moyen sur l'année (4 201,25 heures). Les nouveaux points lumineux ont été renseignés grâce aux DOE des entreprises précisant le nombre de lampadaires installés, leur puissance et leur type d'horloge. Ces données estimées ont été comparées aux données réelles des factures.

Les points lumineux avant ANRU avaient été répertoriés lors du diagnostic de l'existant en 2010, permettant un calcul estimatif de la consommation avant rénovation.

Les différentes valeurs de consommation énergétique obtenues et leurs ratios respectifs sont présentés dans le Tableau 1.11 ci-après.

Tableau 1.11 : Consommation énergétique totale et ratios de consommation de l'EP avant et après rénovation

	Nombre de foyers lumineux	Consommation énergétique totale (kWh _{EF} /an)	Ratio par point lumineux (kWh _{EF} /pt lumineux)	Ratio de consommation par habitant (kWh _{EF} /éq.hab/an)	Ratio de consommation par surface d'espace public (kWh _{EF} /ha /an)
Après rénovation (en 2015)	500	170 610	347	20,8	12 710
Avant rénovation (en 2010)	340	233 914	634	-	-

La rénovation de l'éclairage public a permis une réduction de 27% de la consommation énergétique par rapport à 2010 alors que le nombre de point lumineux est plus important. La puissance et le type des luminaires ont été modifiés afin de réduire la consommation énergétique globale de l'EP.

Les indicateurs 17.3 et 17.4, optionnels, n'ont pas été calculés car non pertinents dans le contexte de l'EQ de la Ravine Blanche. Pour la consommation en énergie liée aux espaces publics, le plus gros de l'entretien concerne le parc urbain. La majorité de l'entretien est réalisée par une association et son périmètre géographique inclut des espaces publics verts et quelques surfaces minérales, à savoir le parc urbain, la placette aménagée en partie basse du quartier (S-E) et les venelles en terre à proximité. Les comptes de gestion de l'association donnent une moyenne de 12 litres d'essence par semaine pour l'entretien (debroussailluse, souffleuse, etc.).

1.5.2.2.2. Critère « Développement des filières de production ENR »

Pour le calcul de l'indicateur 17.5 relatif à la production de chaleur renouvelable, seule la production d'eau chaude solaire a été identifiée comme source dans l'EQ avec 3 composants : ECS des bâtiments gérés par commune, ECS du parc collectif social et ECS des bâtiments privés.

Afin d'acquérir les données nécessaires, deux méthodes ont été utilisées :

- Les données des rapports techniques réalisés par les BET eau chaude solaire fournis à l'ADEME pour les réhabilitations et les nouvelles constructions du parc social et des bâtiments publics ;
- Des estimations (surface /production) pour les autres bâtiments à partir d'une photographie aérienne permettant d'identifier les panneaux ECS sur les toitures des bâtiments.

La quantité de chaleur produite sur l'EcoQuartier après rénovation est estimée à 2 629 760 kWh_{EF}/an soit environ 11,7 kWh_{EF}/m_{SU}²/an . On obtient un ratio de 438,3 kWh/éq.hab/an, soit une production plus élevée que la moyenne locale qui est de 270 kWh/hab/an (OER, 2014). Un indicateur intéressant à mettre en perspective est le taux d'équipement moyen de l'EQ en système de production ECS (individuel / collectif), celui-ci étant par exemple de 100% pour les logements sociaux collectifs (neufs et réhabilités).

L'indicateur 17.6 qualifie la production d'énergie à partir des ENR. Pour le périmètre étudié, il y a deux installations PV confirmées au niveau de l'école Marie Curie et d'une crèche. Pour la première, elle est gérée par la commune (Services Fluides/ Services Techniques) et toutes les données liées au matériel lui-même et à sa production sont très facilement accessibles. Pour la seconde, aucune donnée technique n'a été fournie (sur la puissance installée etc.) puisque l'installation n'est pas gérée par la crèche elle-même, qui ne fait que louer son toit à une société privée. Des données de production sur les années précédentes 2012-2014 nous ont été fournies afin d'estimer la production pour l'année 2015. La quantité totale d'électricité produite est de 57 884 en kWh_{EF}/an soit un ratio de 0,26 kWh_{EF}/m_{SU}²/an. L'énergie produite est réinjectée sur le réseau EDF, il n'y a pas de montage en autoconsommation sur le quartier étudié.

1.5.2.2.3. Critère « Gestion de l'énergie »

L'indicateur 17.7 qualifie la consommation de chaleur d'origine renouvelable de l'EQ. La seule part de chaleur renouvelable consommée sur l'EQ correspond à l'ECS. En estimant que toute la production ECS est consommée sur place dans l'EQ, la consommation est ici égale à la production. On obtient donc une consommation de 11,7 en $\text{kWh}_{\text{EF}}/m_{\text{SH}}^2/\text{an}$.

L'indicateur 17.8 qualifie le bilan énergétique de l'EQ sous l'angle des énergies renouvelables. Il est déduit des indicateurs précédents. Ainsi, en termes de chaleur renouvelable, le bilan de l'EQ est nul si l'on considère que toute la chaleur produite (ECS) est consommée. Pour le bilan en termes d'énergie, la production PV étant faible par rapport à la consommation énergétique de tout l'EQ, celui-ci est quasiment égal à la consommation.

1.5.2.3. Synthèse

Les principaux retours d'expérience sur les indicateurs relatifs à la thématique de l'énergie sont listés dans le Tableau 1.12.

L'évaluation de cet engagement a été difficile à mener notamment en termes d'accès aux données de consommation, de surfaces lorsque celles-ci ne dépendaient pas de la Mairie de Saint-Pierre. Le travail de récolte des données pour un EQ d'une superficie de 60 ha a demandé beaucoup de temps et sollicité de nombreuses ressources humaines. Des conventions devraient être réalisées en amont avec EDF afin de faciliter l'étude des consommations énergétiques.

La thématique de gestion de l'énergie n'a pas vraiment été traitée dans le programme de rénovation urbaine de l'EQ de la Ravine Blanche, si ce n'est en termes d'installation d'ECS. Lorsque les bâtiments ont été rénovés, cela était plus dans l'optique d'améliorer le confort thermique au sein des logements ou des écoles.

Tableau 1.12: Points forts et points faibles identifiés lors de l'application de la méthode d'évaluation dans le contexte de l'EQ de la Ravine Blanche pour l'Engagement 19 relatif à l'énergie.

 Points forts / Avantages	 Points faibles / Inconvénients
▪ Etude de faisabilité et identification des acteurs et des composants de l'EQ relativement simple et rapide.	▪ Ressources humaines mobilisées importantes : 1 doctorante, le chef de projet ANRU, les services techniques, EDF, etc. ▪ Difficulté d'accès aux données de consommations énergétiques pour les bâtiments ne dépendant pas de la mairie. ▪ L'organisation des fichiers EDF ne correspond pas aux fichiers des adresses du service foncier et les consommations extraites sont difficilement recoupées avec le périmètre de l'EQ comme défini. ▪ Les données fournies par EDF sont regroupées par souci de confidentialité et la distinction n'est pas faite entre les bureaux et les logements pour un même bâtiment. Il y aussi un manque de transparence dans les données ne permettant pas d'étudier les consommations par typologie de surfaces. ▪ Calcul des surfaces (SU/SHON) très consommateurs en temps. Les données sont parfois difficiles à récupérer, notamment dans le cas de bâtiments anciens pour lesquels les plans sont introuvables ou des bâtiments classés confidentiels (prison). ▪ Nombre d'occupants total difficile à obtenir entre les locataires, les personnes des maisons individuelles, les employés des commerces, le personnel de gendarmerie et prison, etc. ▪ Les ratios sont ramenés aux surfaces et aux nombres d'occupants. Or, ceux-ci sont souvent approximatifs.

1.6. Discussion

1.6.1. Retours critiques sur la CEQ et la méthode d'évaluation nationale des EcoQuartiers

Plusieurs postulats sont ressortis de la capitalisation des remontées de données et des retours d'expériences des différentes collectivités, dont celle de l'EQ de la Ravine Blanche, à savoir :

- La nécessité de définir des objectifs en amont du projet afin de faciliter le choix des indicateurs à suivre et des valeurs cibles à fixer,
- La difficulté technique liée notamment à l'accès à la donnée ou encore au périmètre de l'EQ qui n'est pas adapté pour le calcul de certains indicateurs,
- Les avantages d'une forte collaboration entre acteurs facilitant l'accès à la donnée lorsque celle-ci n'appartient pas à la collectivité,
- La possibilité d'instrumenter les bâtiments et de réaliser des collectes de données ad hoc,
- L'aspect chronophage et les ressources humaines importantes à mobiliser notamment lorsque le périmètre de l'EQ est important,
- Le rôle à jouer et la place importante qu'occupent les habitants dans l'évaluation,
- Des ratios de consommation imprécis puisque ramenés à des surfaces estimées ou à un nombre d'occupants estimés.

Une des difficultés principales qui a été identifiée dans de nombreux cas, dont celui de l'EQ de la Ravine Blanche, est la « **non anticipation** » de l'évaluation. En effet, la majorité des EQ impliqués dans la campagne-test n'avait pas prévu d'évaluer leur projet d'aménagement et les stratégies choisies en amont du projet. Les collectivités n'ont donc pas forcément fixé de valeurs cibles à atteindre ou à ne pas dépasser et elles n'ont pas instrumenté le quartier et leurs opérations d'habitation afin de suivre des indicateurs de performance. Seules les collectivités pour lesquelles leurs EQ ont fait l'objet de financement spécifique et non négligeable dans le cadre de projet Européen disposent des données échantillonnées et monitorées issues d'une instrumentation de leurs bâtiments, prévue dans le cadre du projet Européen. Par exemple, ces dernières ont été en mesure de fournir des données de consommation énergétique détaillées dans un délai plus court que pour les autres EQ n'ayant pas bénéficié de ce support technique et financier.

Les points positifs de cette méthode sont la possibilité de choisir des indicateurs en fonction de ce qui a été entrepris dans l'EQ avec l'existence d'indicateurs optionnels ainsi que la possibilité de définir des valeurs cibles (objectif explicite ou implicite du projet défini en amont de la livraison, ayant un caractère plutôt ambitieux) et/ou de valeurs de référence (état initial dans le cas de projets de renouvellement

urbain, valeur réglementaire, valeurs moyennes locales ou nationales) permettant ainsi à chaque EQ de pouvoir contextualiser les différents indicateurs et mieux apprécier les performances atteintes. Par exemple, les valeurs de référence de l'ADEME sur la consommation énergétique des bâtiments ou sur la production ENR en France métropolitaine sont différentes de celles de La Réunion. De plus, dans le cas d'une rénovation urbaine, comme cela fut le cas pour Ravine Blanche, un état des lieux avant-projet sur les indicateurs à suivre aurait permis de mesurer l'impact effectif des mesures mises en place. Cela permet à chaque EQ d'avoir une notation finale en rapport avec son contexte spécifique (énergétique, sociale, économique, etc.).

Une des principales difficultés identifiées a été l'accès à la donnée. Cette problématique est d'autant plus importante dans le cas d'EQ dont le périmètre d'étude est large comme dans le cas du quartier de la Ravine Blanche avec un périmètre de 57,5 ha, où cela représente beaucoup d'informations à répertorier. De plus, l'évaluation performancielle et quantitative sur les critères situés en dehors de la compétence des collectivités ou lorsque celles-ci ont peu de leviers d'actions possibles est difficile à mener. Cela a notamment été le cas des indicateurs de production et tri des déchets, où la compétence revient à l'intercommunalité, et où la collecte et la valorisation sont assurées par des prestataires extérieurs. L'action est parfois possible uniquement sur le domaine public (bâti ou non-bâti) et reste très compliqué sur le domaine privé (surfaces résidentielles privées, commerces, etc.).

Le choix du périmètre géographique de l'EQ étant celui défini dans la convention ANRU, celui-ci ne correspond pas forcément au périmètre de gestion ou même de recueil des informations. Il est également à noter que les valeurs de référence n'existent pas à l'échelle du quartier.

Un tableau synthétique présentant la pertinence et la faisabilité technique (notamment en termes d'accès à la donnée) de l'ensemble des indicateurs des Engagements Energie, Déchets et Eau est donné en Annexe 9.

1.6.2. Méthode contextualisée : Vers une approche confort thermique plutôt qu'énergétique

Si les indicateurs développés pour les Engagements Déchets et Eau ont en grande partie permis d'apprécier la qualité et l'efficacité des actions entreprises dans l'EQ de la Ravine Blanche, cela n'a pas été le cas pour l'Engagement sur l'Energie.

Les indicateurs liés à la consommation énergétique des bâtiments et des espaces urbains de la cible énergie n'ont pas apporté de réponse claire quant à l'efficacité des mesures mises en place pour faire face aux enjeux environnementaux rencontrés dans le contexte de l'EQ de la Ravine Blanche.

En climat tropical, les modes de construction vernaculaires permettent d'atteindre des conditions intérieures de confort thermique sans passer par des systèmes actifs de conditionnement d'air. Une attention particulière doit donc être portée sur l'efficacité de ces moyens passifs mis en œuvre dans le bâtiment bioclimatique pour atteindre les conditions optimales de confort thermique. Il en va de même pour le contexte réglementaire à La Réunion et plus largement dans les DROM où, depuis 2009, sont rendus obligatoires les moyens passifs dans les constructions afin de limiter le recours à la climatisation dans les logements.

De plus, en climat tropical, le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU), qui est défini comme une élévation de température localisée en milieu urbain par rapport aux zones rurales voisines, est exacerbé.

D'autres facteurs d'échauffement jouent un rôle important dans la ville tropicale comme le fort ensoleillement présent tout au long de l'année et l'absorption accrue de ce rayonnement solaire par les surfaces urbaines ainsi que le ralentissement du vent dans les zones bâties denses.

En milieu tropical, le principe consiste donc à réduire les apports solaires en créant de l'ombre, à privilégier la ventilation naturelle et à végétaliser les espaces (plantation d'arbres, toitures végétalisées) afin de limiter l'impact de l'ICU et d'améliorer le confort thermique en zone urbaine (Emmanuel et al., 2016) (Thani et al., 2012) (Obi, 2014).

Le confort thermique extérieur est également une notion importante à prendre en compte dans l'aménagement d'un quartier que ce soit au niveau des rues piétonnes, des parcs, des placettes, des espaces de loisirs ou des abords de bâtiments. Ces espaces urbains peuvent être des lieux de passage, de rencontres, de loisirs et participent activement à la vie sociale, économique et environnementale du quartier et de la ville. Les conditions microclimatiques de ces espaces ont donc un impact sur la qualité de vie des usagers et influencent l'usage (fréquence, temps passé, etc.) qu'en font les habitants.

Enfin, dans le cas de bâtiments bioclimatiques favorisant la ventilation naturelle traversante et donc ouverts sur l'extérieur, les conditions intérieures et extérieures sont étroitement liées. Le traitement des surfaces aux abords du bâtiment aura donc un effet positif (dans le cas d'espaces végétalisés et ombragés) ou négatif (cas des surfaces minérales exposées au rayonnement solaire) sur les conditions de confort thermique en intérieur. Les situations d'inconfort thermique générées par une mauvaise conception du bâtiment ou des espaces proches risquent alors de créer un besoin de recours à la climatisation et d'augmenter la consommation énergétique finale du bâtiment.

Il est donc important de limiter les phénomènes de surchauffe, que ce soit à l'intérieur des bâtiments ou dans les espaces urbains en milieu tropical, d'autant plus que l'amélioration du confort thermique a un impact direct sur la consommation en énergie en climat tropical.

La majorité des actions menées dans le cadre de la rénovation urbaine avaient pour objectif l'amélioration du confort au sein des logements et des écoles (isolation des toitures, végétalisation des abords du bâtiment, toiture végétale, étude BatiPéi, etc.). Les nouveaux bâtiments ont été conçus de

manière passive (isolation, ventilation naturelle, réduction des apports solaires, etc.) afin de limiter le recours à la climatisation conformément à la RTAA DOM.

De plus, une étude combinant un logiciel de mécanique des fluides numériques et l'outil BATIPEI² avait été réalisée dans le cadre de la rénovation d'un groupe de bâtiments du parc social afin de proposer des stratégies de conception permettant de limiter la surchauffe intérieure (valeur maximale de 2°C) et d'améliorer les conditions de confort à l'intérieur des logements (Grosdemouge and Garde, 2016).

Enfin, le parc de logements du quartier de la Ravine Blanche est composé à 66% de logements sociaux et les surfaces résidentielles sociales représentent près de 48% de l'ensemble des surfaces bâties du périmètre étudié. Or, le taux d'équipement en système énergivore de ces logements est faible. En effet, lors d'une enquête de terrain réalisée dans le quartier après rénovation sur un échantillon de logements sociaux représentatif (108 ménages interrogés), établi par la méthode des quotas, il a été constaté que très peu de logements étaient équipés d'un système de climatisation (seulement 4%), qu'une partie d'entre eux était équipée de brasseurs d'air (BA) au plafond (15%) correspondant aux nouvelles constructions (règles RTAA DOM) et que la majeure partie des logements disposaient d'un ventilateur sur pied (80%) (voir Figure 1.13).

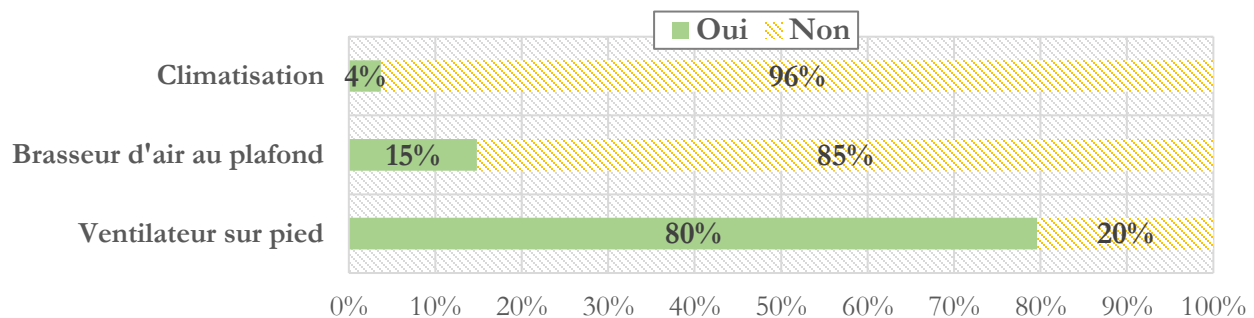


Figure 1.13 : Part des différents équipements électriques présents ou non chez les ménages interrogés. Résultats issus d'une enquête de terrain réalisée dans le quartier de Ravine Blanche après rénovation sur un échantillon de logements sociaux représentatif. Source : Kévin Fimourdin, rapport de stage M2 VEU, 2017.

De plus, la grande majorité des personnes interrogées trouve qu'il fait assez chaud à très chaud dans leurs pièces à vivre en été (voir Figure 1.14.a), et jugent ces conditions assez inconfortables (19%) voire très inconfortables (41%). En hiver, il n'y a pas de problématique de confort thermique intérieur relevée par les usagers, puisque plus de 70% d'entre eux trouvent qu'il ne fait ni trop chaud ni trop froid (voir Figure 1.14.b) et que les conditions sont assez voire très confortables.

² Logiciel d'audit thermique pour bâtiments existants ou neufs en pays chauds créé par Solener

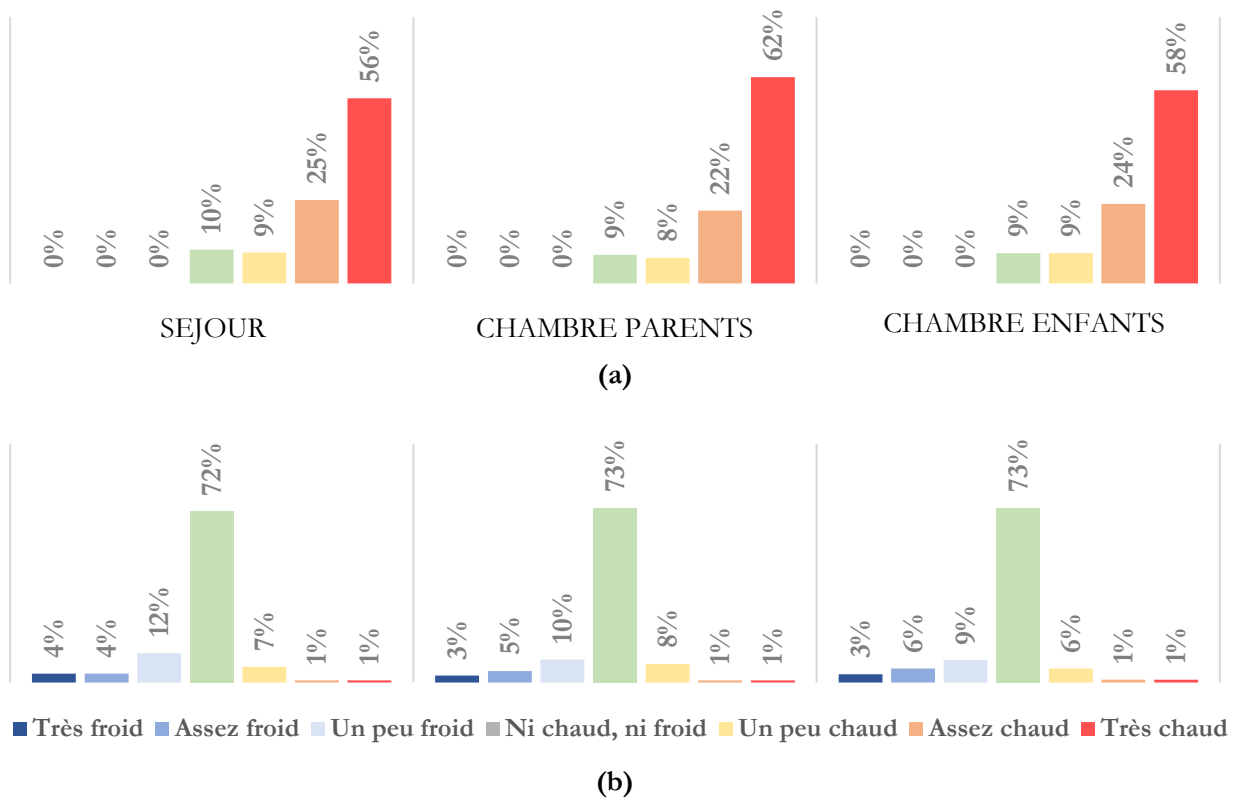


Figure 1.14 : Sensation thermique des ménages interrogés, exprimée selon l'échelle ASHRAE à 7 niveaux, dans leurs principales pièces à vivre, (a) en été et (b) en hiver. Résultats issus d'une enquête de terrain réalisée dans le quartier de Ravine Blanche après rénovation sur un échantillon de logements sociaux représentatif. Source : Kévin Fimourdin, rapport de stage M2 VEU, 2017).

Selon une étude menée par l'OER sur les consommations énergétiques de 500 ménages réunionnais en 2010, le taux d'équipement en climatisation était de 14,6% et celui en chauffage était égal à 2% (OER, 2010). Ces chiffres montrent un taux d'équipement faible en appareils électriques énergivores pour assurer le confort d'été ou d'hiver. De plus, l'étude a fait ressortir que seulement 32% des ménages considéraient que leur niveau de confort dans leur logement en été était bon, contre 39% qui le jugeaient moyen et 29% insuffisant.

Les chiffres issus de l'étude menée dans l'EQ de la Ravine Blanche montrent donc une tendance générale des logements à La Réunion, avec un faible taux en équipements de climatisation (ou de chauffage) mais avec des conditions intérieures perçues majoritairement comme inconfortables.

Ce constat est le même dans les différentes écoles primaires situées dans l'EQ de la Ravine Blanche. Les rénovations réalisées dans les écoles comprenaient la pose d'une isolation sous toiture et le remplacement des ouvrants existants par des jalousies. Les salles de cours sont équipées de ventilateurs et seuls les bureaux de la direction ont une climatisation. La nouvelle école a été construite sur des

principes bioclimatiques et est équipée en BA que ce soit dans les salles de cours ou le réfectoire. Seuls certains bureaux et la salle informatique disposent de systèmes de climatisation.

Toutes les raisons évoquées justifient de mettre l'accent sur une approche d'évaluation se centrant sur l'étude du confort thermique (intérieur / extérieur) en complément d'une approche énergie, qui ne serait basée que sur des ratios de consommation uniquement. La méthode d'évaluation nationale des EcoQuartiers aborde quant-à-elle la thématique de « chaleur urbaine » au sein de l'Engagement 16.

1.6.3. Méthodologie d'évaluation de l'engagement 16 du Label EcoQuartier

L'Engagement 16 du Label EcoQuartier visant à “Produire un urbanisme permettant d'anticiper et de s'adapter aux changements climatiques et aux risques” porte sur trois risques évolutifs majeurs : les inondations, la réduction de l'accès à l'eau et les épisodes de chaleur extrême (chaleur urbaine).

Pour la partie chaleur urbaine qui nous concerne, l'intérêt est de savoir comment les contraintes liées au changement climatique ont été intégrées dans la conception du quartier, des bâtiments et des espaces publics (principes bioclimatiques, adaptabilité, confort d'été, îlot de chaleur, espaces verts, etc.).

Trois indicateurs quantitatifs principaux ont été choisis à savoir :

- Le bilan radiatif de l'EQ avec le calcul de l'albédo³ moyen du quartier ($0 < \text{valeur} < 1$).
- La fraction de végétation haute (arbres, parcs, etc.) ($m_{veg}^2 / m_{surface\ totale\ EQ}^2$).
- Bâtiments témoins instrumentés avec des capteurs d'ambiance thermique interne pour en assurer le suivi (Oui/Non).

Un travail plus approfondi a également été réalisé en matière d'aménagement urbain permettant de lutter contre ce phénomène de chaleur urbaine (Cerema, 2015). Les indicateurs proposés sont listés dans le Tableau 1.13 ci-dessous.

³ Rapport entre la quantité de lumière que reçoit un corps et celle qu'il réfléchit ou diffuse.

Tableau 1.13: Indicateurs proposés pour l'Engagement 16 en matière d'aménagement urbain et de chaleur urbaine

Critère	Indicateur	Type d'indicateur	Unité	Commentaires
Développement d'un urbanisme favorisant le rafraîchissement des espaces	Superficie des espaces d'eau et de nature en ville ayant une fonction de zones de fraîcheur	Quantitatif	ha ou km ² (m ² pour les petits projets urbains)	
	Existence de prescriptions sur le volet Nature en ville	Qualitatif	-	Oui/Non
	Perception et appréciation de la multifonctionnalité des espaces par les habitants	Qualitatif	-	Questionnaire
	Bâtiments équipés de dispositifs innovant de ventilation naturelle (nocturne) : puits canadien, free cooling, etc.	Quantitatif	% = nb. bâtiments équipés / nb. bâtiments total	
	Orientation des rues par rapport aux vents dominants, ou phénomènes de brises.	Qualitatif	-	
Ombrages, Espaces de transition	Surface de circulation, passages, espaces publics ombragés ou équipés de brise-soleil, pergolas.	Quantitatif	ha ou km ²	
Ouvrages et mobilier urbain en eau	Nombre de fontaines, sprays, brumisateurs (été)	Quantitatif		
	Nombre ou surface d'aménagements innovants	Quantitatif	ha (m ² pour les petits projets)	
Maîtrise des sources d'impact de l'îlot de chaleur urbain	Albédo du quartier	Quantitatif		0<valeur<1
Favoriser l'évaporation et l'évapotranspiration	Part de végétation haute (arbres, parcs, etc.)	Quantitatif	m ² veg / m ² surface totale EQ	
	Part de végétation basse (arbres, parcs, etc.)	Quantitatif	m ² veg / m ² surface totale EQ	

1.6.4. Proposition contextualisée d'indicateurs sur l'approche confort thermique

Cette proposition repose à la fois sur le retour d'expérience de l'évaluation de l'EQ de la Ravine Blanche ainsi que sur la revue de littérature réalisée sur les indicateurs environnementaux développés dans la méthode nationale d'évaluation des EQ et dans les outils et référentiels à l'international.

1.6.4.1. Conception passive des bâtiments

Comme explicité dans la section 1.1.2.2.4. , la partie conception passive des bâtiments est prise en compte dans la cible énergie dans de nombreux outils d'évaluation internationaux. Dans la méthode d'évaluation nationale cet aspect est abordé dans l'Engagement 16 du Label EcoQuartier comme vu dans la section précédente au travers d'un seul indicateur à savoir le nombre de bâtiments équipés de dispositifs innovants de ventilation naturelle.

Cet aspect étant crucial en climat tropical et particulièrement dans les DROM et en lien avec la réduction de la consommation énergétique liée à la climatisation, ces indicateurs devraient apparaître dans la cible énergie et contenir plusieurs indicateurs en lien avec les prescriptions de la RTAA DOM à savoir :

- Nombre (%) de façades de bâtiments dont l'orientation est optimale en fonction du microclimat existant (exemple : orientation Nord/Sud à La Réunion permettant une conception été / hiver efficace) ;
- Nombre (%) de bâtiments ou surfaces bâties ayant recours à des méthodes passives favorisant la ventilation naturelle traversante (avec un niveau de détails par typologie de bâtiment) et porosité (%) des façades principales ;
- Nombre (%) de bâtiments ou surfaces bâties dont la toiture est isolée ;
- Nombre (%) de bâtiments ou surfaces bâties bénéficiant d'un traitement végétal (arbustes/arbres) aux abords du bâtiment ;
- Nombre (%) de bâtiments ou surfaces bâties construits selon la RTAA DOM / en se basant sur l'outil PERENE (ou autres outils).

Ces indicateurs simples de conception bioclimatique sont à mettre en lien avec l'évaluation du confort thermique intérieur présenté dans la section suivante.

1.6.4.2. Confort thermique intérieur

Dans la méthode nationale, cet aspect est abordé au travers d'un indicateur qualitatif où il est uniquement demandé si une instrumentation a été réalisée ou non.

Dans notre cas, une double évaluation (qualitative/quantitative) basée sur des enquêtes de terrain combinant des questionnaires usagers et une instrumentation in situ avec mesures hygrothermiques a été réalisée dans l'EQ. Cette méthodologie a été mise en place afin de juger de l'efficacité des principes constructifs de conception passive mis en place et des rénovations réalisées dans les logements du parc social ainsi que dans les écoles.

Pour les enquêtes de terrain avec questionnaires, un échantillon respectant la représentativité des logements sociaux collectifs selon 2 critères (la part des logements selon le bailleur et la part des logements selon le type d'opération) a été constitué. Le questionnaire utilisé pour l'étude de confort dans les logements est donné en Annexe 10.

Les indicateurs pouvant alors être calculés et suivis sur la base de cette méthodologie sont les suivants :

- % de pièces (logements, salles de cours, bureaux) équipées de brasseur d'air au plafond ;
- % de personnes jugeant la ventilation naturelle de leur logement (salle de cours, bureaux) comme efficace en été ;
- % de personnes trouvant leur logement confortable en été / en hiver (échelle de confort : un peu confortable, assez confortable, très confortable) ;
- Note moyenne (sur 7) attribuée au logement en lien avec la température ressentie par typologie de bâtiments.

Les données physiques mesurées comprenaient des données de température d'air et d'humidité relative, relevées à l'aide de mini-enregistreurs de données autonomes. Cette solution a été choisie afin de pouvoir instrumenter des lieux en mode occupé sur une longue période. Le temps d'instrumentation est idéalement d'un an afin de couvrir l'ensemble des saisons mais peut être réduits à 4 mois durant la saison estivale pour les microclimats où le confort d'été est la principale problématique.

Un échantillonnage des lieux à instrumenter est ensuite réalisé afin de représenter les différents types de bâtiments présents dans l'écoquartier, en fonction notamment de la typologie de bâtiments à étudier (logements, bureaux, salles de cours des écoles, etc.), de leur état (neuf, rénové, en l'état), etc. Les capteurs doivent être installés à différents étages (RDC, niveau intermédiaire et sous-toiture).

Les données ainsi mesurées peuvent, par la suite, être traitées grâce à des outils adaptés pour les climats tropicaux, tels que le diagramme de Givoni permettant d'étudier grâce à des zones de confort l'impact du couple température – humidité, le calcul des degrés de surchauffe (nombre de degrés de différence entre la température d'air de la pièce étudiée et la température d'air extérieure sous abri) ou encore par des méthodes statistiques comme les « boxplot » (boîtes à moustache).

Les indicateurs pouvant alors être calculés et suivis sur la base de cette méthodologie sont les suivants :

- Part des surfaces bâties (pièces à vivre des logements, salles de cours, bureaux, etc.), exprimée en %, dont les couples température d'air / humidité relative sont compris dans la zone de confort en ventilation naturelle définie par (Lenoir, 2013) durant 95%* du temps en été (de Novembre à Mars) à Saint-Pierre. *Ce pourcentage de temps a été déterminé en utilisant le fichier météorologique horaire de Saint-Pierre et en calculant le pourcentage de temps où les couples température d'air sec et humidité relative extérieurs, pour les mois allant de début Novembre à fin Mars, sont compris dans la zone de confort en ventilation naturelle définie par (Lenoir, 2013). On fait ici l'hypothèse que les conditions intérieures peuvent être équivalentes aux conditions extérieures en termes de couples de température d'air et d'humidité relative lorsque le bâtiment est bien conçu (vis-à-vis de la protection solaire et de la ventilation naturelle). Cette méthodologie peut ainsi être adaptée facilement aux différentes zones climatiques.
- Part des bâtiments, exprimée en %, dont le degré de surchauffe moyen calculé dans les pièces à vivre (séjour/chambres) ne dépasse pas 2°C en été (limite de surchauffe de l'outil BatiPéi). Le degré de surchauffe moyen est calculé à partir des valeurs supérieures ou égales à 0°C.

1.6.4.3. Confort thermique extérieur et ICU

Un des indicateurs principaux identifiés dans la méthode nationale pour l'évaluation de l'Engagement 16 est le calcul de l'albédo moyen, où l'on cherche à favoriser les surfaces de haut albédo, c'est-à-dire qui réfléchissent une grande partie du rayonnement solaire au lieu de l'absorber.

En climat tropical, il a été démontré que l'influence de la végétation sur le climat urbain est plus importante que l'influence de l'albédo des surfaces construites (Roseinsweg et al 2009). De plus, il est important de créer de l'ombre en climat tropical afin de réduire les apports solaires directs et améliorer le confort thermique dans les espaces urbains.

Les indicateurs simples proposés par la méthode nationale dans l'Engagement 16 en lien avec les dispositifs apportant de l'ombre et la végétation sont adaptés à savoir :

- % de surfaces couvertes par des arbres de haute tige ;
- % d'espaces urbains, rues, parcs, cheminements ombragés ou couverts par des systèmes tels que des toiles tendues, débords, pergolas, brise-soleil, etc.

On peut y rajouter les indicateurs simplifiés suivants :

- % des surfaces de parkings couverts ou souterrains ;

- % de la surface de toiture de tous les logements et espaces communs couverts en installant des toitures végétalisées.

L'évaluation du confort thermique en milieu urbain est essentielle afin d'assurer la qualité de vie des habitants et de répondre aux enjeux climatiques et environnementaux des villes tropicales. Celle-ci ne peut pas être simplement appréciée à partir d'indicateurs simples et le choix d'indicateurs plus complexes comme proposé dans l'outil d'évaluation BEAM Plus Neighborhood avec un indice de confort thermique extérieur est plus pertinent (HKGBC, 2016).

De nombreuses études ont déjà été menées sur l'évaluation du confort thermique intérieur en milieu tropical, des normes précisant le matériel à utiliser et la méthodologie à appliquer ont été développées (ASHRAE, 2001) et des indicateurs éprouvés (Givoni, 1998) (Taleghani et al., 2013) (Lenoir, 2013) . Les notions de climatologie urbaine et de confort thermique en milieu urbain sont quant-à-elles plus récentes. Aucune méthodologie d'évaluation « standardisée » n'existe encore en termes d'instrumentation ou d'indices de confort thermique extérieur (Johansson et al., 2014).

Le choix de l'indicateur et la méthodologie d'évaluation nécessaire à la création de cet indicateur d'évaluation nécessite donc un travail de recherche approfondi qui est présenté dans les chapitres suivants.

1.7. Conclusion

La campagne test sur l'évaluation des engagements 17, 18 et 19, lancée par le Ministère, a permis de valoriser et de diffuser les résultats atteints par les EcoQuartiers au niveau national. La démarche d'évaluation en elle-même et les résultats obtenus n'ont pas pour but d'être utilisés pour comparer les EcoQuartiers entre eux puisque chaque quartier possède ses propres problématiques, objectifs et caractéristiques. Elle permet de disposer d'un recueil d'informations sur les pratiques développées en termes d'évaluation (moyens d'acquisition, valeurs de référence, etc.) mais aussi sur la faisabilité technique et l'accessibilité à la donnée pour le calcul des indicateurs. Le but est de pouvoir reproduire les bonnes pratiques et s'inspirer des différents retours d'expériences des collectivités en matière d'obtention des performances de leur EcoQuartier et d'atteinte des objectifs fixés (moyens mis en œuvre, mode de gestions, gouvernance, etc.).

Les collectivités expriment de plus en plus la nécessité de pouvoir évaluer leurs opérations d'aménagement et pouvoir vérifier que les objectifs fixés ont bien été atteints. L'enjeu principal pour elles réside dans la nécessité de disposer d'un outil permettant de garantir la qualité des projets et des opérations d'aménagement, et ainsi diffuser les bonnes pratiques. L'idée de l'évaluation reste néanmoins une idée émergente et nécessite un travail d'acculturation et d'appropriation afin de pouvoir être diffusée et acceptée à grande échelle.

En ce qui concerne la commune de Saint-Pierre, cette campagne d'évaluation a permis de dresser un premier bilan des actions qui ont été pertinentes ou non et de s'acculturer avec la méthodologie de l'évaluation de leurs pratiques. Ce premier retour d'expérience servira de feuille de route dans les prochains projets afin notamment d'anticiper en amont des projets, la définition d'objectifs clairs et de valeurs seuils, ainsi que sur les moyens à mettre en place (ligne budgétaire, expertise interne ou externe, matériel, convention, etc.) afin de vérifier leur atteinte aux différents stades du projet. Il est également important de pouvoir prévoir des évaluations à différents stades du projet en plus du stade initial afin de pouvoir avoir une marge de manœuvre en cours de projet mais aussi d'étudier l'évolution de la perception et de la satisfaction des usagers du quartier au cours du temps.

En outre, bien que la mise en œuvre de la méthode d'évaluation ait été appliquée de manière différente en fonction des collectivités, celle-ci a majoritairement été externalisée, avec des collectivités qui se sont associées à des universitaires (Paris, Reims, Saint-Pierre, Morez) ou qui ont fait appel à des professionnels extérieurs comme des bureaux d'études (Graulhet, La Rivière) ou encore des associations et agences locales (Forcalquier, Hédé-Bazouges). Seulement, 6 collectivités ont réalisé l'évaluation en régie (Changé, Mulhouse, Les Forges, Lyon, Prades-le-Lez, Grenoble) montrant la difficulté de mise en œuvre de la méthode. Il est donc ressorti de cette évaluation l'importance d'avoir recours à une expertise sur les aspects techniques et scientifiques liés à l'évaluation, que celle-ci soit apportée par un bureau d'études, une assistance à maîtrise d'ouvrage ou encore un laboratoire de

recherches. Cela a notamment été le cas avec la ville de Saint-Pierre dans le cadre de l'étude du confort thermique en milieu urbain développée dans les sections suivantes.

Lors de l'évaluation menée sur les différentes thématiques environnementales, il est clairement ressorti que les indicateurs de la cible énergie développés dans cette première méthode ne sont pas tous adaptés au contexte d'un écoquartier situé en zone tropicale. Les aspects liés à la consommation énergétique des bâtiments et des espaces urbains extérieurs n'intègrent pas la notion de confort thermique, qui est pourtant essentielle en climat tropical. Améliorer le confort thermique en milieu urbain dans les villes tropicales, c'est assurer une qualité de vie aux habitants du quartier, favoriser la fréquentation et l'utilisation des espaces urbains, encourager les modes de transports doux (vélos, marche) et améliorer l'ambiance intérieure des bâtiments.

L'aspect confort thermique et lutte contre la chaleur urbaine a été abordé au sein de l'Engagement 16 de la méthode d'évaluation nationale et des indicateurs simplifiés ont été proposés. Cependant, ces indicateurs ne permettent pas d'évaluer de manière quantitative et effective le niveau de confort atteint en extérieur.

Des indices de confort thermique permettant d'apprécier et de quantifier les effets du microclimat sur la perception thermique des usagers existent. Bien que récents, ces derniers sont de plus en plus utilisés afin d'évaluer les orientations prises en termes d'aménagement urbain en climat tropical (Ng and Ren, 2015). Une analyse approfondie de ces différents indices, notamment leurs avantages et inconvénients, nous permettra d'orienter notre choix sur les indices les plus pertinents pour l'évaluation des projets d'aménagement dans un contexte intertropical.

CHAPITRE 2. Etat de l'art sur les modèles de confort thermique urbain applicables en climat tropical

Dans ce chapitre, nous proposons une analyse de la littérature qui permettra de soulever les différentes problématiques liées à l'étude du confort thermique extérieur et de présenter les différents indices de confort thermique existants et applicables en milieu urbain tropical, à l'échelle du quartier. Les avantages et inconvénients de chaque indice y sont exposés, ainsi que les modèles sur lesquels ces derniers reposent.

2.1. Introduction

Les villes du monde présentent des températures de plus en plus élevées, entraînant des effets néfastes sur la santé et le bien-être des habitants. La situation est d'autant plus alarmante en climat tropical où les conditions climatiques et les phénomènes d'ICU, correspondant à une élévation de température localisée en milieu urbain par rapport aux zones rurales voisines, sont exacerbés.

En effet, des différences conceptuelles peuvent émerger entre des projets urbains développés au niveau européen (en climat tempéré ou froid) et les expériences tropicales (climat chaud et humide), en termes de climatologie urbaine notamment (Sad de Assis and Barros Frota, 1999) (Roth, 2007) (Grimmond et al., 2010). Ainsi, dans les pays en zones tempérées, le phénomène d'îlot de chaleur urbain peut s'avérer bénéfique thermiquement durant l'hiver alors que pour les régions tropicales chaudes et humides, celui-ci est toujours défavorable (Corbella and Magalhães, 2008). En milieu tropical, il faut réduire les apports solaires et privilégier la ventilation naturelle (Emmanuel et al., 2016). De même, une végétalisation adéquate des espaces a un impact sur l'amélioration du confort en zone urbaine (Thani et al., 2012) (Obi, 2014).

De nos jours, la climatologie urbaine représente un domaine de recherche investi par de nombreux acteurs (climatologues, architectes, urbanistes, etc.) à différentes échelles (du bâtiment, au quartier et à la ville). Les études menées à ce niveau montrent un intérêt grandissant pour la prise en compte du climat urbain et de l'impact des conditions climatiques et environnementales au sein des projets d'aménagement urbain, ainsi que le développement d'outils adaptés (Niu et al., 2015) (Steenefeld et al., 2016) (Emmanuel et al., 2016).

Les collectivités sont elles aussi en demande croissante de connaissances sur les impacts du changement climatique mais aussi sur les solutions à appliquer dans leurs projets afin d'y remédier. De plus, elles ont également besoin que des moyens soient mis à leur disposition afin de pouvoir juger de l'efficacité des principes et des actions mis en œuvre et de vérifier que les objectifs qu'elles se sont fixés ont bien été atteints. Le chapitre 1 a permis de mettre en évidence la nécessité pour les collectivités de disposer d'une méthodologie et d'un indicateur leur permettant de pouvoir évaluer le niveau de confort thermique atteint dans les espaces urbains extérieurs.

Les études de confort thermique en milieu urbain se sont multipliées au cours des dernières années et de nombreux indices de confort thermique ont été développés (Johansson et al., 2014). L'étude du confort thermique se traduit comme l'étude des échanges thermiques se produisant entre le corps humain et son environnement. La différence avec l'étude du confort thermique en milieu intérieur est que l'environnement extérieur est plus complexe, ouvert et soumis à de grandes variations spatiales et temporelles. De plus, de nombreuses études ont permis de mettre en évidence que les individus, moins captifs, sont capables de supporter des conditions plus extrêmes qu'en intérieur et que l'intervalle dans

lequel un individu se sent confortable est donc plus important (Spagnolo and De Dear, 2003). Par ailleurs, le phénomène d'adaptation thermique, incluant des facteurs physiologiques, psychologiques et comportementaux, entre en jeu et joue un rôle crucial dans l'évaluation subjective du confort thermique (Lin, 2009) (Chen and Ng, 2012).

Ce chapitre présente les différentes problématiques liées à l'étude du confort thermique en milieu urbain tropical. Une première partie traite de la relation entre l'environnement thermique et le corps humain, notamment en milieu chaud et humide. Les principaux facteurs influençant le confort thermique sont ensuite présentés. De nombreux indices et modèles permettant de prédire les conditions de confort thermiques en milieu urbain existent. Les principaux indices adaptés en climat tropical ont été identifiés et sont décrits dans une troisième section.

2.2. Effets de l'environnement thermique sur le corps humain

La sensation de confort thermique résulte du bilan thermique du corps d'une personne, soit l'équilibre qui existe entre la chaleur générée dans le corps et chaleur dissipée. Le système de régulation interne du corps humain cherche continuellement à maintenir une température interne proche de 37°C, qui représente la température interne du corps pour un individu au repos dans un environnement confortable. D'une manière générale, une personne est en situation de confort si le bilan thermique des échanges avec son environnement est nul, tout en maintenant sa température interne.

Ainsi, le corps humain produit de la chaleur, résultante des activités métaboliques (digestion et activité physique). Cette chaleur produite doit être continuellement évacuée afin d'éviter une accumulation de chaleur trop importante et une élévation locale ou générale de la température du corps au-dessus de la valeur normale, créant ce qu'on appelle l'hyperthermie. En revanche, si les pertes thermiques sont plus importantes que la chaleur produite par le corps humain alors celui-ci est en hypothermie, qui est définie comme la baisse de la température centrale du corps.

Il est donc primordial de maintenir la température interne du corps constante afin d'éviter des problèmes de santé.

2.2.1. Bilan thermique du corps humain

Une méthode couramment utilisée pour décrire l'état thermique du corps humain consiste à étudier son bilan thermique. De nombreux indices développés dans le but d'évaluer le confort thermique et le stress thermique en milieu urbain sont basés sur le bilan thermique du corps humain. Le principe

repose sur le fait que la chaleur générée à l'intérieur doit être égale à la chaleur totale perdue. Les transferts thermiques se font à la fois par la peau et la respiration.

Le bilan thermique du corps humain peut être exprimé par l'équation suivante :

$$Q_{net} = Q_M - W = Q_{sk} + Q_{res} + Q_{stock} = (C_{sk} + R_{sk} + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res}) + Q_{stock*}$$

Équation 2-1 : Bilan thermique du corps humain (Emmanuel et al., 2016)

où

Q_{net} = production de chaleur nette du corps humain

Q_M = production de chaleur métabolique

W = travail utile

Q_{sk} = chaleur perdue par la peau

Q_{res} = chaleur perdue par la respiration

Q_{stock} = chaleur stockée

C_{sk} = pertes (gains) thermiques de la peau par convection

R_{sk} = pertes (gains) thermiques de la peau par rayonnement

E_{sk} = pertes thermiques de la peau par évaporation

C_{res} = pertes thermiques par convection liée à la respiration

E_{res} = pertes thermiques par évaporation liée à la respiration

Q_{stock*} = chaleur stockée au niveau de la peau et de la partie interne du corps humain

Toutes les unités de l'Équation 2-1 peuvent être exprimées en W ou en W/m² de surface effective d'une personne.

Les différents échanges thermiques énoncés ci-dessus sont fortement influencés par les paramètres climatiques relatifs à l'environnement. Le taux de production de chaleur métabolique Q_M dépend du niveau d'activité physique. C'est cette source de chaleur (l'activité métabolique) que le corps cherche à évacuer et il est donc important de pouvoir la quantifier. L'activité métabolique est une quantité toujours positive et varie entre 40W/m² quand nous dormons et aux alentours de 225 W/ m² quand nous pratiquons une activité physique intense (ASHRAE, 2001). Pour un être humain « moyen », la surface effective (appelée également aire de Dubois) est égale à 1,82 m², cela représente donc une puissance totale de 70 W et 400W.

Pour certaines activités, le travail est réalisé par les muscles et correspond au taux de travail utile externe (W) qui est soustrait de l'énergie métabolique. Ce travail est égal à zéro pour des activités de peu d'intensité (s'asseoir, s'allonger, se tenir debout et marcher) et peut atteindre 10 à 20 % du taux de production métabolique pour des activités de fortes intensités (sport, etc.).

Les pertes de chaleurs sensibles de la peau par convection (C_{sk}) et par rayonnement (R_{sk}) se produisent si la température de la peau est supérieure à la température ambiante extérieure (T_a) et à la température radiante moyenne (T_{mrt}). Si, dans le cas contraire, T_a et T_{mrt} sont supérieures à la température de la peau, alors le corps humain va recevoir de la chaleur. Les pertes de chaleur latentes de la peau (E_{sk}) correspondent à l'évaporation de la sueur et de l'humidité de la peau. Ces termes représentent toujours des pertes.

La chaleur est également évacuée des poumons durant la respiration sous forme de chaleur latente (C_{res}) et de chaleur sensible (E_{res}).

Si la production nette interne du corps humain est supérieure aux pertes thermiques (Q_{stock}), cela mène au stockage de la chaleur et va par conséquent entraîner une augmentation de la température interne du corps. A l'inverse, une production de chaleur inférieure aux pertes entraîne un stockage de froid.

2.3. Facteurs influençant le confort thermique en climat tropical

Une des définitions du confort est celle de la norme (ISO 7730, 2005) relative à l'évaluation du confort thermique, pour laquelle le confort thermique se définit comme étant la condition physiologique et psychologique exprimant la satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique. Le confort est subjectif et ne peut pas être atteint par toutes les personnes dans un même environnement. Une des problématiques du milieu tropical est qu'il est nécessaire d'utiliser les caractéristiques du climat pour atteindre les conditions de confort thermique. En effet il existe plusieurs saisons en milieu tropical : l'hiver (sec et venteux), l'été (humide avec peu de vent), et les périodes de mi-saison. Ces saisons impactent le confort car celles-ci influent sur les variables affectant le confort.

De nombreux facteurs influencent le confort thermique. Ceux-ci sont généralement scindés en deux grandes catégories, à savoir les facteurs individuels et les facteurs de l'environnement (cf. Figure 2.1).

En extérieur, les principales variables environnementales impactant le confort sont : la température d'air, la température radiante moyenne (représentatives du flux solaire et des températures des surfaces), la vitesse d'air, ainsi que l'humidité de l'air. Ces différents points seront développés dans les paragraphes suivants.

Les facteurs individuels qui influencent le confort thermique des usagers, que ce soit en intérieur ou en milieu urbain, comprennent principalement le niveau d'activité métabolique, l'habillement et les phénomènes d'adaptation à son environnement thermique, à savoir l'adaptation physiologique, comportementale et/ou les aspects psychologiques.

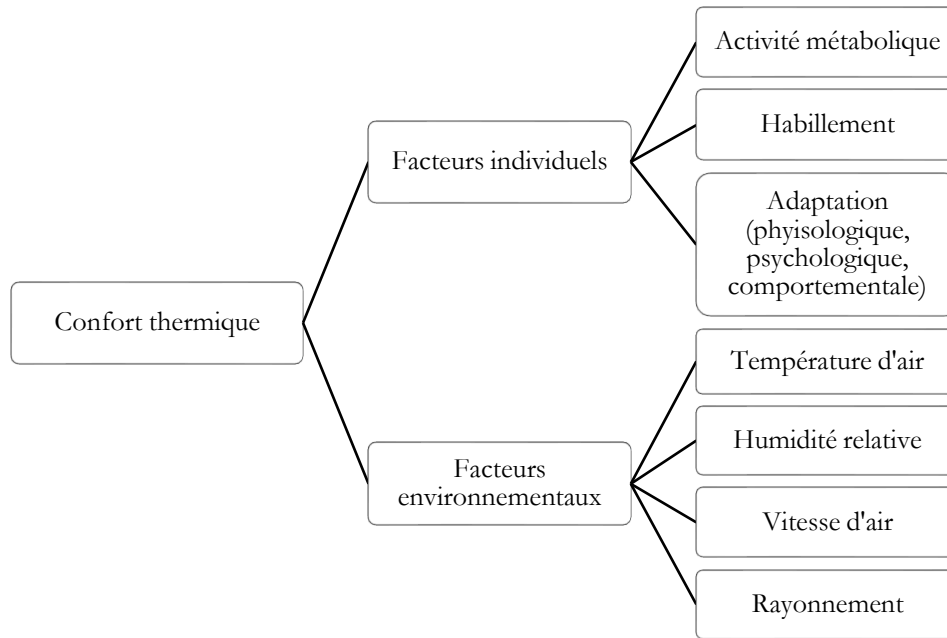


Figure 2.1: Facteurs qui influencent le confort thermique des usagers

2.3.1. Température d'air

Les climats tropicaux humides sont généralement caractérisés par des températures modérément élevées. La réunion à une particularité puisqu'une multitude de microclimats existe. De ce fait, il en découle des profils de température d'air spécifiques à chaque micro zone climatique (LPBS and Imageen, 2009). En milieu urbain, il faut ajouter à ces microclimats géographiques, l'effet local des constructions sur la température de l'air avec le phénomène d'ICU.

2.3.2. Température radiante moyenne (T_{mrt})

Étant donné que le rayonnement solaire est très important en zone tropicale, les températures de parois (mur, sol) soumises au rayonnement direct sont, la plupart du temps, supérieures à la température d'air en milieu urbain. La température radiante moyenne est une température qui permet de globaliser les échanges thermiques par rayonnement entre un individu et son environnement. Elle représente la température moyenne d'un environnement fictif qui produirait les mêmes échanges radiatifs. Elle résulte de deux phénomènes physiques : le rayonnement en courte longueur d'onde (rayonnement solaire direct et diffus) ainsi que le rayonnement en grande longueur (rayonnement des différentes

surfaces). Ces deux types de rayonnement ont un rôle important dans le calcul de la température radiante moyenne (Thorsson et al., 2007).

Si la température de l'environnement est supérieure à la température de surface du corps, alors le corps aura un gain de chaleur par rayonnement de grandes longueurs d'onde. Dans le cas contraire, le corps se rafraîchit. Du point de vue du rayonnement de courte longueur d'onde, en présence de soleil, le bilan des apports thermiques est toujours positif (gain de chaleur), même quand le corps n'est pas directement exposé au soleil (rayonnement diffus, inter-réflexions). L'amplitude de variation de la température radiante moyenne en milieu tropical est fortement liée au rayonnement solaire. En ciel clair, T_{mrt} peut alors doubler sa valeur par rapport à un ciel couvert (Emmanuel et al., 2016).

La T_{mrt} est une variable physique difficilement caractérisable en extérieur, aussi bien en termes de mesure que de modélisation, alors qu'elle joue un rôle prépondérant dans la perception du confort thermique d'un individu en climat tropical. Elle est d'ailleurs indispensable au calcul de nombreux indices de confort thermique extérieur, comme le montre la section 2.5.

2.3.3. Humidité relative

En milieu tropical humide (cas de La Réunion), l'humidité relative est un élément prépondérant dans le confort thermique. En effet, le potentiel de variation de température due à l'évaporation sur le corps est réduit du fait de l'humidité relative élevée. La combinaison des deux facteurs, température et humidité, peut ainsi être néfaste pour le confort. Cette combinaison varie en fonction des zones climatiques et des périodes de l'année, rendant la mesure du confort complexe et variable dans le temps et l'espace.

2.3.4. Vitesse d'air

En milieu ouvert ou en extérieur, la vitesse d'air participe majoritairement à l'amélioration du confort thermique. Elle favorise alors l'échange convectif sur le corps humain et augmente les échanges thermiques entre l'air et le corps.

À La Réunion, par exemple, les vents principaux sont les alizées, très présents en hiver austral et très intenses, ainsi que les brises thermiques présentes durant toute l'année causées par le relief de l'île et les gradients de température entre la terre et la mer (brises de terre et brises de mer). Ces vents sont donc d'orientation et de vitesses différentes. L'objectif sera donc ici de se protéger des alizées et de profiter des brises thermiques.

Plusieurs relations ont été développées afin de déterminer l'effet rafraîchissant du vent en milieu tropical (Ng, 2009) (Ng et al., 2011) (Cheng et al., 2012) (Ng and Cheng, 2012) (Ng, 2012) (Emmanuel

et al., 2016). Cet effet du vent dépend principalement de sa vitesse et de l'humidité de l'air (voir Figure 2.2). Il a notamment été observé que plus l'humidité relative est élevée, plus l'effet rafraichissant du vent est réduit (Emmanuel et al., 2016). De plus, l'effet de rafraîchissement est plus élevé à des vitesses basses de vent.

Selon (Penwarden, 1973), pour un taux d'humidité relative de 80%, au-dessus d'une vitesse de vent de 1,5 m/s, il est difficile de ressentir un effet rafraichissant supplémentaire. Ce seuil est augmenté avec la baisse du taux d'humidité. De plus, quelle que soit l'hygrométrie, au-dessus de 3 m/s, il est difficile de ressentir un effet rafraichissant supplémentaire. Ce qui est donc une problématique en climat tropical humide.

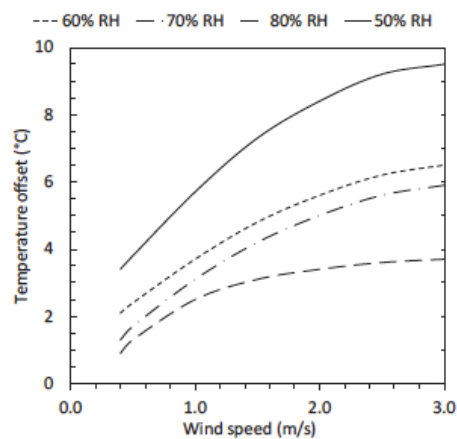


Figure 2.2 : L'effet rafraichissant du vent en fonction de différents taux d'humidité (Source: (Emmanuel et al., 2016), après modification de la version originale de (Khedari et al., 2000))

Enfin, le vent peut même être perçu et vécu comme étant gênant pour des activités de plein air (difficulté à lire un livre, poussière dans les yeux, gêne pour les cheveux, etc.) lorsque la vitesse devient trop importante.

2.3.5. Activité et métabolisme

La chaleur générée par une personne dépend de plusieurs facteurs personnels dont son niveau d'activité, sa taille, son âge, son poids et le sexe.

Le métabolisme contrôle la quantité de chaleur produite en interne par conversion d'énergie chimique par l'organisme. Cette chaleur est par la suite transportée vers les poumons et vers la peau grâce aux vaisseaux sanguins. Finalement, la chaleur est évacuée sous forme de différents transferts thermiques.

L'air inspiré réchauffé et humidifié ressort par évaporation et convection par la bouche. La chaleur est également évacuée par la peau par convection et rayonnement. La transpiration joue un rôle également important en ajoutant un transfert de masse au transfert de chaleur.

Le corps humain est une machine thermique produisant de la chaleur. Cette production d'énergie va de pair avec l'activité pratiquée par une personne. L'unité de caractérisation de l'activité est le « met » qui correspond à une puissance de $58,1 \text{ W/m}^2$ soit 105 W . Les taux en W sont obtenus en multipliant ceux en W/m^2 par la surface de la peau d'un individu moyen adulte de $1,8 \text{ m}^2$. Le taux d'activité métabolique est donné par (ASHRAE, 2001) pour différents types d'activité (cf Tableau 2.1).

Par exemple, une personne assise produit 1 met tandis qu'une personne qui marche à $3,2 \text{ km/h}$ produira 2 met.

Tableau 2.1 : Taux métabolique pour différents niveaux d'activité relatifs à des pratiques en extérieur, exprimé en W/m^2 , en W et en met selon (ASHRAE, 2001). (Source: modifiée à partir de (Emmanuel et al., 2016))

Activité physique	M (W/m^2)	M (W)	M (met)
Sieste	45	80	0,8
Assis – Regarder la télévision	60	105	1,0
Se tenir debout	70	125	1,2
Marche lente	100	180	1,7
Marche à $3,2 \text{ km/h}$ ($0,9 \text{ m/s}$)	115	205	2,0
Marche à $4,3 \text{ km/h}$ ($1,2 \text{ m/s}$)	150	270	2,6
Marche à $6,4 \text{ km/h}$ ($1,8 \text{ m/s}$)	220	400	3,8
Porter une charge de 50kg	235	420	4,0
Bricolage / Jardinage	235 - 280	420 - 500	4,0 – 4,8
Jouer au basketball	290 - 440	520 - 790	5,0 – 7,6

2.3.6. Habillement

L'habillement constitue une protection pour le corps humain face à l'environnement extérieure. Celui-ci est donc différent selon les zones climatiques. Les vêtements présentent une résistance thermique pour le corps qui va isoler la peau, et les pertes par convection et rayonnement se feront à partir d'une surface à une température différente de la température de la peau. On définit l'indice de résistance thermique de l'habillement I_{cl} comme le rapport de cette résistance thermique à une valeur standard de $0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$ et il s'exprime en clo (on a donc défini l'unité du clo : $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$). Le

Tableau 2.2 donne la valeur de I_{cl} pour différents ensembles rencontrés en pratique en extérieur selon la norme (ASHRAE, 2001).

Tableau 2.2 : Valeur de l'indice de résistance thermique de l'habillement pour différents ensembles selon (ASHRAE, 2001), exprimées en clo et en résistance thermique (R_{th}). Source: modifié à partir de (Emmanuel et al., 2016).

Ensemble vestimentaire	I_{cl} (clo)	R_{th} (m^2K/W)
Short + chemise manche courte	0,4	0,06
Pantalon + chemise manche courte	0,6	0,09
Pantalon + chemise manches courtes + veste costume	1,0	0,15
Pantalon + chemise manches longues + pull manches longues	1,0	0,16
Jupe mi-longue + chemisier manches courtes + collants	0,5	0,08
Jupe mi-longue + chemisier manches longues + collants	0,7	0,10
Jupe longue + chemisier manches longues + veste + collants	1,1	0,17

Dans les climats chauds, on portera peu de vêtements contrairement au pays froid. Un autre facteur influençant l'habillement est la culture. Même si deux régions connaissent les mêmes climats, ils n'auront pas forcément le même type d'habillement. Une autre spécificité des zones tropicales est de se protéger du rayonnement solaire. Ainsi, le recours aux chapeaux, casquettes ou parasols y est fréquent.

Dans certains pays, même si les conditions extérieures peuvent être extrêmes, l'indice d'isolation peut s'avérer très élevé en raison d'un code vestimentaire traditionnel très conservateur où des vêtements longs sont portés. D'autres raisons peuvent expliquer le choix de porter des vêtements longs. Ainsi, dans l'étude réalisée par (Johansson and Yahia, 2011), certaines des personnes interrogées ont répondu porter des vêtements longs pour se protéger du soleil. De plus, un code vestimentaire existe pour des lieux tels que les écoles, certaines entreprises, etc.

Le Tableau 2.3 ci-dessous donne différents indices d'isolation observés lors d'études de terrain réalisées en été dans des pays avec un climat chaud et humide, montrant bien les différences pouvant exister en fonction du contexte culturel et social local.

Tableau 2.3: Valeurs observées de l'isolation par l'habillement dans certaines études réalisées en climat chaud et humide. Source modifiée depuis (Emmanuel et al., 2016)

Ville, Pays	I _{cl} (clo)	Climat	Référence
Taichung, Taïwan	0,6	Chaud et humide	(Lin, 2009)
Singapour	0,3	Chaud et humide	(Yang et al., 2013)
Guayaquil, Equateur	0,5	Chaud et humide	(Johansson and Yahia, 2011)
Hong-Kong	0,45	Chaud et humide	(Cheng et al., 2012)

2.3.7. Les autres facteurs impactant le confort

D'autres facteurs tels que les environnements non uniformes, les stimuli visuels, l'âge, le sexe et la durée d'exposition peuvent influencer le confort thermique. En milieu urbain, où les conditions varient très fortement suivant des distances très courtes, un plus grand nombre de personnes peut être en état d'inconfort comparé au milieu intérieur.

À titre d'exemples, en milieu urbain les zones exposées au soleil sont plus chaudes que les zones à l'ombre, la vitesse du vent peut varier rapidement en quelques mètres, etc., ce qui a pour effet d'exposer les personnes à un milieu non uniforme en termes de température jouant sur la sensation de confort.

2.3.8. Adaptation à l'environnement thermique

La notion d'adaptation ou d'adaptabilité est quant à elle de plus en plus explorée. L'adaptation peut être définie comme « une diminution progressive de la réponse d'un organisme à une exposition répétée à un stimulus ». Une personne exposée à des ambiances extérieures très chaudes sur une longue période sera moins affectée par la chaleur qu'une personne vivant en milieu tempéré.

(Nasir et al., 2012) ont mis en évidence qu'en milieu tropical, les personnes étaient en mesure de supporter des conditions extérieures plus chaudes, plus humides et avec moins de mouvement d'air que celles vivant en climat tempéré. Les résultats montrent que les personnes interrogées sont confortables pour un indice PET (Physiological Equivalent Temperature, indice de confort urbain défini à la section V.1) variant entre 21,1 et 39,4°C contre un PET entre 18,0 et 23,0°C en Europe. D'autres études soutiennent et confirment cette conclusion (Ahmed, 2003)(Lin, 2009)(Johansson and Yahia, 2011)(Makaremi et al., 2012) (Zhao et al., 2016) (Li et al., 2016).

Différents auteurs ont démontré qu'une approche purement quantitative est inadéquate pour caractériser les conditions de confort en milieu extérieur (Lin, 2009) (Nasir et al., 2012). (Honjo, 2009) a étudié l'applicabilité de différents indices de confort en milieu urbain, tels que PET, PMV (Predicted Mean Vote, voir section V.1) et SET* (Standard Effective Temperature, voir section V.1). En 2009, il n'y avait encore que très peu d'articles et de recherches traitant de la notion de confort thermique en extérieur. Il est l'un des premiers à introduire le fait que les aspects psychologiques auraient un impact plus important sur le confort thermique en milieu urbain qu'en intérieur. Il souligne que les phénomènes d'acclimation et de différences régionales nécessiteraient d'être étudiés de manière plus approfondie.

En effet, en dehors des conditions microclimatiques, qui peuvent être relevées grâce à une instrumentation adaptée, des facteurs physiologiques et comportementaux mais aussi psychologiques entrent en jeu et jouent un rôle prépondérant dans le confort en milieu urbain (Chen and Ng, 2012). La notion d'adaptation est donc abordée selon ces trois différents aspects, bien que différents types d'adaptation peuvent intervenir simultanément (Nikolopoulou et al., 2001).

Cette notion d'adaptation a d'ailleurs conduit au développement de modèles de confort adaptatif pour les études de confort en intérieur (Taleghani et al., 2013). L'approche adaptative a été énoncée pour la première fois par Nicol et Humphreys (Nicol and Humphreys, 2002). Elle vise à intégrer dans les modèles de confort thermique l'adaptation physiologique et comportementale des individus. L'utilisateur est alors considéré comme actif et non passif, c'est-à-dire qu'il est en capacité d'adapter son comportement en fonction des ambiances thermiques.

Cette approche va chercher à établir une relation linéaire (modèles de régression linéaire) entre la température intérieure souhaitée par les usagers dite « neutre » (température de confort) et la température extérieure.

La formulation générale est la suivante :

$$T_{conf,int} = A \times T_{a,ext} + B$$

Équation 2-2 : Relation générale du modèle de confort adaptatif

Avec $T_{conf,int}$ la température de confort [en °C], $T_{a,ext}$ la température d'air moyenne extérieure mensuelle [en °C] et A, B des constantes déterminées par analyse de régression linéaire.

En se basant sur les observations expérimentales in situ réalisés dans des bâtiments ventilés naturellement plusieurs résultats ont été obtenus (de Dear and Brager, 2001) (Humphreys et al., 2013), (Taleghani et al., 2013). De par leur nature empirique et subjective, ces formulations sont dépendantes des conditions dans lesquelles les mesures de référence ont été acquises.

Les modèles de confort adaptatif ont été intégrés dans les normes (ASHRAE 55, 2004) et (NF EN 15251, 2007) (cf Tableau 2.4 ci-après).

Tableau 2.4 : Comparaison des modèles adaptatifs d'été intégrés dans les normes (Taleghani et al., 2013)

Normes	Référence	Observations (obs.)	Pays	Application	Critères d'acceptabilité	Température de référence	Equation
(ASHRAE 55, 2004)	(de Dear and Brager, 2001)	21 000 obs. / 160 bâtiments	9 pays (Australie, Canada, Grèce, Indonésie, Pakistan, Singapour, Thaïlande, Angleterre, Etats-Unis)	Bureaux	$\pm 3,5^{\circ}\text{C}$	Température d'air extérieure moyennée (7 à 30 jrs)	$0,31 \cdot T_{\text{ref}} + 17,8$
(NF EN 15251, 2007)	SCATs Project (Nicol and Humphreys, 2010)	4 500 obs. / 26 bâtiments	5 pays européens (France, Grèce, Portugal, Suède, Angleterre)	Bureaux et bâtiments avec activités similaires	$\pm 3,0^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{rm7}} = (T-1 + 0,8 \cdot T-2 + 0,6 \cdot T-3 + 0,5 \cdot T-4 + 0,4 \cdot T-5 + 0,3 \cdot T-6 + 0,2 \cdot T-7) / 3,8$	$0,33 \cdot T_{\text{rm7}} + 18,8$

2.3.8.1. Adaptation physiologique

L'adaptation physiologique ou encore acclimatation correspond à la thermorégulation du corps pour se rafraîchir ou se réchauffer. L'acclimatation à la chaleur, qui se passe habituellement entre une et deux semaines d'expositions, est caractérisée par un plus fort taux de transpiration, une température de corps moins élevée et un plus faible pouls (McIntyre, 1980).

2.3.8.2. Adaptation comportementale

L'adaptation du comportement se réfère à la capacité d'un individu à s'ajuster à son environnement. Le fait de changer de vêtements, de s'hydrater, de changer le niveau d'activité, de posture ou encore de position dans l'espace (au soleil, à l'ombre, à l'abri du vent ou exposé au vent), ainsi que la durée de

leur exposition (Nikolopoulou et al., 2001) (Nikolopoulou and Steemers, 2003) (Lin, 2009) (Johansson and Yahia, 2011) constituent ainsi des actions d'adaptation comportementale. Une stratégie importante en milieu tropical est de réduire les gains par rayonnement thermique pour le corps. Ce but peut être atteint en se déplaçant d'une zone exposée au soleil vers une zone ombragée, en utilisant une ombrelle, etc. Un autre moyen d'augmenter son confort en adaptant son comportement est de se déplacer d'une zone où le potentiel de ventilation est faible vers une zone à fort potentiel.

2.3.8.3. Influence psychologique

Les facteurs psychologiques influencent également la perception thermique de l'environnement et ces derniers sont peut-être la principale cause des différences et écarts observés entre la prédiction (le calcul) du confort thermique et les sensations subjectives du confort (Nikolopoulou and Steemers, 2003) (Emmanuel et al., 2016). L'adaptation psychologique peut notamment être liée aux conditions thermiques du milieu naturel (par opposition à des milieux contrôlés), aux attentes et exigences des personnes, à leur expérience et leur histoire face à leur contexte climatique, au temps d'exposition ou encore aux stimuli extérieurs (Nikolopoulou et al., 2001)(Chen and Ng, 2012)(Coccolo et al., 2016).

Un exemple de l'impact de l'expérience, de la « mémoire » à long-terme d'un individu, est que des personnes vivant dans un contexte climatique durant une période assez longue savent à quoi s'attendre en termes d'environnement thermique, ils ne sont pas seulement physiologiquement adaptés mais aussi préparés mentalement (Emmanuel et al., 2016). Une « mémoire à court-terme » existe également : une personne sortant tout juste d'un milieu climatisé va percevoir et ressentir l'environnement extérieur de manière différente par rapport à une personne ayant déjà passé plusieurs heures en extérieur (Yahia and Johansson, 2013).

De plus, il a été démontré que les personnes, acceptant qu'en extérieur l'ambiance thermique ne peut être contrôlée comme elle le serait dans une enceinte close climatisée, sont capables de supporter des conditions environnementales plus défavorables et de les définir comme étant confortables. Un autre phénomène d'adaptation est la sensation de « contrôle » ou d'« ajustement » : si un individu choisit d'être en extérieur (pour une activité / loisir) volontairement et non de manière forcée, ou bien s'il a la possibilité de « contrôler » ses sensations dans son environnement (en s'abritant dans un endroit à l'ombre), alors celui-ci est également capable de tolérer des conditions thermiques plus défavorables (Lin, 2009).

Enfin, (Rutty and Scott, 2015) ont montré que, dans les Caraïbes, les préférences thermiques des touristes à la plage peuvent atteindre 18°C de plus, comparés à des personnes restant dans un parc urbain.

2.4. Normes relatives au confort thermique urbain

Il n'existe pas de normes ou de standards officiels pour l'étude du confort thermique en milieu urbain. Les principales normes traitant de la notion de confort thermique ont été développées pour l'étude du confort thermique en intérieur et sont énoncées ci-après :

- Norme EN ISO 7730 (ISO 7730, 2005)
- Norme CR 1752 (PD CR 1752, 1999)
- Norme ASHRAE standard 55 (ASHRAE 55, 2017)

Les différentes études en milieu urbain s'inspirent de ces normes en ce qui concerne l'instrumentation à mettre en place, l'élaboration des questionnaires et les méthodologies d'évaluation. Elles tentent par la suite d'adapter certains aspects en environnement extérieur.

Les études se basent également sur la revue de littérature proposée par (Johansson et al., 2014).

2.5. Indices de confort thermique en milieu urbain

Au cours des dernières décennies, des centaines d'indices thermiques différents ont été développées (Blazejczyk et al., 2012), montrant l'importance de l'environnement thermique au sein de la communauté scientifique et des aménageurs, avec un fort désir d'être en mesure de le quantifier. Ces indices comprennent notamment l'indice PMV de (Fanger, 1970), la température effective (ET^*) et la température standard équivalente (SET^*) (Gagge et al., 1986), la température standard effective extérieure (OUT_SET^*) (Pickup and De Dear, 2000), la PET (Höppe, 1999) et l'UTCI (Universal Thermal Climate Index) (Jendritzky et al., 2012). Néanmoins, certains indices, tels que PMV, ET^* et SET^* sont principalement employés et adaptés pour l'étude du confort dans les espaces intérieurs (Spagnolo and De Dear, 2003).

(Coccolo et al., 2016) proposent une revue de littérature récente et exhaustive des modèles de confort en milieu urbain existants et des équations sur lesquelles ces derniers sont basés. Leur applicabilité en fonction du climat est examinée selon les études publiées ces dernières années. Un inventaire des différents outils de simulation permettant de modéliser le confort thermique en milieu urbain est également présenté.

Il existe en principe deux grands types d'indices thermiques : les indices du confort thermique et les indices de stress thermique. Le premier type d'indice est principalement utilisé dans des environnements où les conditions climatiques sont « modérées » alors que le second type est

généralement utilisé pour des conditions extrêmes. Néanmoins, beaucoup d'indices incluent à la fois la partie confort et la partie stress thermique. Nous nous intéresserons ici aux indices de confort thermique.

Un indice de confort thermique est basé sur au moins deux paramètres environnementaux qui influencent le confort thermique. Des indices plus complexes incluent également des paramètres personnels tels que l'activité et le niveau d'isolation par les vêtements.

On différenciera ici deux types d'indices :

- Les indices « simples » ou « empiriques » ,
- Les indices « rationnels », considérant en plus des quatre paramètres climatiques influençant le confort thermique, des variables physiologiques et d'habillement (McIntyre, 1980).

Les indices empiriques établissent à travers des expérimentations (dans les chambres climatiques ou in situ), une régression statistique via une analyse de régression en combinant les effets de deux ou plusieurs variables physiques et/ou physiologiques en une seule variable. L'un des meilleurs exemples est la recherche de corrélations entre les votes de perception thermique et les mesures des paramètres environnementaux via des analyses de régression multiples. Il faut néanmoins préciser que de telles prédictions de perception thermique sont généralement restreintes et représentatives d'une région géographique ou d'un climat bien précis, là où les mesures in situ ont été menées.

Les indices rationnels sont quant à eux basés sur les différentes formes d'échanges de chaleur entre le corps humain et les ambiances thermiques et sur le principe du bilan thermique du corps humain. Ces indices sont calculés grâce à des équations complexes.

La perception thermique d'un individu peut donc être prédite en fonction des mesures et de l'évaluation de ces variables environnementales et personnelles.

En milieu urbain, certains paramètres climatiques comme le vent et le rayonnement solaire sont plus difficiles à appréhender alors que ces derniers ont une grande influence sur la sensation de confort d'un individu. En environnement extérieur, les personnes sont directement soumises aux conditions microclimatiques locales du rayonnement solaire, de l'ombre et des changements de température, de force et de direction du vent. (Spagnolo and De Dear, 2003) recommandent à ce titre l'utilisation d'indices spécifiques tels que l'indice OUT_SET* ou encore la PET.

2.5.1. Indices « rationnels »

La majorité des indices « rationnels » sont exprimés comme « une température d'air équivalente d'un environnement de référence pour lequel la réponse physiologique d'un individu de référence est la même que dans les conditions extérieures », donnée en °C (Blazejczyk et al., 2012).

L'avantage de ces indices est qu'ils prennent en compte tous les facteurs environnementaux qui ont un impact sur le confort thermique, définis dans la section précédente, ainsi que des facteurs personnels tels que l'habillement et le métabolisme.

Cet avantage peut néanmoins être perçu comme un inconvénient dans le cas où le matériel de mesure ne serait pas adapté. En effet, la température radiante moyenne est une variable qui n'est pas toujours disponible et qui est difficile à mesurer (Thorsson et al., 2007). La vitesse de vent requiert une attention toute particulière également. Dans certains cas, on peut disposer de la mesure du vent à hauteur d'homme (1,1 m) pour des mesures in situ alors que par exemple pour l'UTCI la mesure du vent doit être réalisée à 10m (Jendritzky et al., 2012). Dans d'autres cas, nous avons la mesure du vent à une hauteur de 10 m environ pour des stations météorologiques proches du lieu d'étude et il faut ramener cette vitesse à 1,1m du sol.

Enfin, une dernière contrainte est que le corps peut ne pas avoir atteint l'équilibre avec son environnement extérieur si la personne n'a passé que très peu de temps dehors et donc entraîner un biais dans les résultats obtenus (Höppe, 2002).

2.5.1.1. Indice de vote moyen prévisible - « Predicted mean vote » (PMV)

L'indice PMV est un indice rationnel basé sur l'équation d'équilibre thermique de Fanger (Fanger, 1970). Il est l'un des indices le plus utilisé dans le monde et a été développé empiriquement par P.O. Fanger à la suite d'études de sujets soumis à différents environnements thermiques. C'est d'ailleurs un indice de confort thermique recommandé dans les normes (ISO 7730, 2005) et (ASHRAE, 2001).

Le PMV est parfois appelé « échelle de perception thermique ASHRAE » (en anglais, ASHRAE thermal sensation scale). Cette échelle indique la perception moyenne d'un groupe de personnes avec des facteurs individuels uniformes (habillement et métabolisme) dans un environnement thermique défini par la température sèche de l'air, la température radiante moyenne, l'humidité de l'air et la vitesse d'air). Cette échelle à 7 niveaux va de -3 à +3, correspondant respectivement à une perception de très froid à très chaud. La valeur 0 indique une sensation dite neutre.

Fanger introduit à la base deux indices intimement liés, le PMV et le PPD (Predicted Percent Dissatisfied). Le PMV exprime le vote moyen de sensation thermique prédit pour un groupe d'individus soumis à un environnement donné et à qui on demande s'il fait trop chaud ou trop froid. Le PPD exprime quant à lui le pourcentage de personnes se déclarant insatisfaites du confort thermique. Il correspond au pourcentage de personnes ne votant pas -1, 0 ou +1 sur l'échelle de perception thermique (ASHRAE, 2001).

Cet indice, qui a été développé pour des applications en environnement intérieur, prend en compte les quatre variables climatiques principales, le niveau d'isolation par l'habillement et l'activité métabolique. Cependant, dans sa forme originale définie par Fanger en 1970, l'hypothèse que toute la transpiration

est évaporée est avancée. Cette hypothèse n'est pas correcte en climat tropical chaud et humide. De plus, la perméabilité à l'eau des habits n'est pas prise en compte, ce qui n'est valable que pour un habillement et un niveau d'activité défini en intérieur (Emmanuel et al., 2016).

Les autres limites du PMV et PPD sont que ces derniers ont été développés sur la base de considérations physiques et physiologiques, mais également empiriques. Ces indices ne sont valables que dans des limites bien précises, notamment une température d'air comprise entre 10 et 30°C et une vitesse d'air comprise entre 0 et 1 m/s. Ces conditions d'utilisation ne sont pas représentatives des conditions rencontrées en climat chaud et humide. De plus, même dans ces conditions limites, l'analyse se base sur deux hypothèses restrictives, à savoir un régime permanent (pas de stockage de chaleur) et des conditions environnementales uniformes. Ce qui est souvent irréalisable en extérieur, notamment lorsque le temps passé dehors est court ou si les conditions climatiques changent rapidement (Höppe, 2002).

Bien que développé pour des études en intérieur, avec des conditions climatiques modérées, cet indice a été utilisé dans certaines études en extérieur (Johansson et al., 2014). Il a néanmoins été démontré par différents auteurs (Nikolopoulou et al., 2001) (Höppe, 2002) (Cheng et al., 2012) que la corrélation entre le PMV et les votes de confort subjectifs était très faible et que, durant les périodes de chaleur, l'indicateur de confort tend à surestimer la perception thermique.

L'indice PMV a par la suite été adapté pour une application en extérieur, en se basant sur le modèle appelé « Klima-Michel model », utilisant des données météorologiques comme entrées et en y ajoutant les flux radiatifs de courte et de longue longueur d'onde, et en fixant un niveau d'isolation par l'habillement et un niveau d'activité « moyen ». Ce modèle a été amélioré par l'indice « Perceived Temperature » (PT), développé ci-après.

2.5.1.2. « Perceived temperature » (PT)

L'indice PT est une adaptation du PMV aux conditions extérieures, basé sur le modèle « Klima-Michel ». Le modèle « Klima-Michel » est un modèle d'équilibre thermique développé par (Gagge et al., 1986), qui inclut un modèle amélioré afin de calculer les flux de chaleur latente. Cette modification a permis d'augmenter de manière non négligeable la sensibilité de l'indice à l'humidité en climat chaud. Il n'en reste pas moins un modèle en régime permanent. Le modèle « Klima-Michel » adapte le PMV aux applications extérieures en utilisant des données météorologiques mesurées ou des prévisions météorologiques afin de calculer les flux radiatifs et d'en déduire la température radiante moyenne extérieure. Ce modèle se base un individu type de référence : un homme de 35 ans, mesurant 1,75 m pour 75 kg. L'indice PT est défini comme la température d'air d'un environnement de référence isotherme, où la perception thermique (chaleur et froid) serait la même que dans les conditions actuelles. C'est une déviation de la température d'air qui permet d'obtenir une température ressentie. L'environnement de référence présente une température d'air égale à la température radiante moyenne,

une humidité de 50% et une vitesse d'air correspondant à une légère brise. L'isolation par l'habillement I_{cl} de PT dépend des conditions extérieures. Il est calculé en faisant des itérations sur les niveaux d'habillement entre 0,5 (vêtements d'été) et 1,75 clo (vêtements d'hiver), jusqu'à ce que le PMV soit proche de zéro et qu'un confort optimal soit atteint. Le niveau d'activité métabolique est une valeur constante de 135 W/m² (2,3 met), correspond à un piéton en train de marcher à 4 km/h sur un terrain plat.

La relation entre PMV et PT a été établie au travers d'itérations du modèle Klima-Michel représentant plus de 400 000 données synthétiques pour les villes de Freiburg, Feldberg et Rostock-Warnemünde entre 1965 et 1995. Elle est définie au travers de trois équations données ci-dessous (Staiger et al., 2012):

$$PT = \begin{cases} 5,805 + 12,6784 PMV, & PMV < 0 \text{ et } I_{cl} = 1,75 \text{ clo} \text{ (stress thermique lié au froid)} \\ 21,258 - 9,558 I_{cl}, & PMV = 0 \text{ et } 1,75 \text{ clo} > I_{cl} > 0,50 \text{ clo} \text{ (aucun stress thermique)} \\ 16,826 + 6,183 PMV, & PMV > 0 \text{ et } I_{cl} = 0,50 \text{ clo} \text{ (stress thermique lié à la chaleur)} \end{cases}$$

Équation 2-3 : Equations de régression donnant le lien entre l'indice PT et l'indice PMV ou la valeur de l' I_{cl} .

L'échelle de perception thermique associée à l'indice PT est donnée dans le Tableau 2.7. L'indice est exprimé en °C, ce qui facilite son interprétation.

L'indice PT est applicable à différentes échelles (micro à globale) et peut être utilisé dans les études climatologiques et de prévisions météorologiques. Il est d'ailleurs utilisé comme indicateur de base dans le référentiel allemand VDI (VDI, 1998), ainsi que par le service de météorologie Allemand. Cet indice est un outil intéressant pour la réalisation de cartes bioclimatiques, à une échelle régionale ou des échelles plus larges, permettant de visualiser l'impact du changement climatique sur la santé et la perception thermique (Burton et al., 2009).

PT n'a été utilisé que dans très peu d'études scientifiques en milieu tropical (Spagnolo and De Dear, 2003), mais l'étude comparative réalisée par (Blazejczyk et al., 2012) montre que cet indice présente des résultats similaires à des indices plus complexes tels que PET et SET*.

2.5.1.3. « Standard effective temperature » (SET*) et OUT_SET*

Tout comme les deux précédents indices, l'indice appelé température effective standard est un indice rationnel qui prend en compte les quatre variables environnementales affectant le confort thermique, de même que l'activité et l'habillement. SET* est une amélioration de l'indice « Effective Temperature » (ET*) (Gagge et al., 1971).

Cet indice est basé sur un modèle à deux nœuds de physiologie humaine, divisant le corps humain en deux cylindres : un cylindre central entouré d'un cylindre représentant la peau. Ce modèle à deux nœuds peut être utilisé en régime transitoire afin de prédire les réponses thermiques pour des niveaux d'activité métabolique modérés, que ce soit pour des climats froids ou des climats arides. SET* est donc tout-à-fait applicable en climat tropical.

SET* se base sur la température de la peau et sur la transpiration de la peau afin de définir l'état de confort thermique. Il représente la température d'un environnement de référence défini avec une humidité relative de 50%, une vitesse d'air inférieure à 1,5 m/s, une température d'air égale à la température radiante moyenne et avec un niveau d'isolation de l'habillement standardisé correspondant au niveau d'activité pratiqué dans les conditions réelles. Dans cet environnement de référence, la température de la peau et la transpiration correspondent à celles en conditions réelles. Cet indice est exprimé comme une température ressentie dont l'unité est le °C. L'échelle de perception thermique (confort thermique) associé à l'indice SET* est donnée dans le Tableau 2.7.

L'indice appelé « Outdoor Effective Temperature » (OUT_SET*), introduit par (Pickup and De Dear, 2000), est une adaptation de l'indice SET* pour des études en milieu urbain, intégrant une méthodologie de calcul de la température radiante moyenne T_{mrt} en extérieur. La première étude de confort en extérieur avec l'indice OUT_SET* a été réalisée par (Spagnolo and De Dear, 2003).

2.5.1.4. « Physiologically Equivalent Temperature » (PET)

L'indice PET est l'un des indices le plus utilisé pour l'évaluation du confort dans les espaces extérieurs et notamment au sein des tissus urbains. Il est notamment fréquemment utilisé pour les études se focalisant sur des climats chauds et humides (Lin and Matzarakis, 2008) (Hwang et al., 2011) (Makaremi et al., 2012) (Ng and Cheng, 2012) (Cheng et al., 2012) (Niu et al., 2015) (Li et al., 2016).

L'indice PET prend en compte les quatre paramètres environnementaux qui influencent le confort thermique (T_a , T_{mrt} , V_a et HR).

Il est basé sur le modèle MEMI (Munich Energy-Balance Model for Individuals) (Höppe, 1999) qui définit le principe d'équilibre thermique du corps humain comme :

$$M + W + R + C + E_D + E_R + E_{SW} + Q_{stock} = 0$$

Équation 2-4 : Principe d'équilibre thermique du corps humain

Où M est le niveau d'activité métabolique, W représente le travail utile, R est le rayonnement du corps humain, C est le flux convectif, E_D est le flux de chaleur latent pour évaporer l'eau en vapeur d'eau se diffusant à travers la peau, E_R est la somme des flux de chaleur pour chauffer et humidifier l'air inspiré, E_{SW} est le flux de chaleur de l'évaporation de la sueur et Q_{stock} représente les flux de chaleur stockés

pour le réchauffement ou le refroidissement du corps. Toutes les valeurs sont en Watts et prennent un signe négatif lorsque ce sont des pertes.

La PET est définie comme "la température de l'air à laquelle, dans un local typique intérieur avec $V_a=0,1\text{m/s}$, $p_v=1\,200\text{ Pa}$ et $T_{\text{mrt}}=T_a=20^\circ\text{C}$, le bilan énergétique du corps humain est équilibré avec les mêmes températures internes de la peau et le même taux de sueur que ceux calculés pour les conditions extérieures" (Höppe, 1999).

Dans le calcul de l'indice PET, les flux solaires de courtes et de grandes longueurs d'ondes en provenance des parois environnantes sont pris en compte dans le calcul du bilan thermique d'un individu. De plus, on considère un niveau d'isolation par l'habillement de 0,9 clo et une activité de 80W (conditions standards en intérieur).

Enfin, bien que cet indice soit basé sur un niveau d'activité et un habillement pour des conditions intérieures, l'indice PET reste approprié pour prédire les conditions de confort thermique en milieu chaud et humide lorsque le niveau d'activité reste modéré (Emmanuel et al., 2016).

(Walther and Goestchel, 2018) ont pu identifier trois erreurs majeures ainsi qu'un modèle de diffusion de vapeur d'eau incohérent dans la routine du code de calcul du PET. Ils ont ainsi mis en évidence que la résistance à la diffusion de vapeur est définie dans l'ancien code comme une constante sans justification ou référence appuyant ce choix.

De plus, afin de réduire la complexité du calcul aux outils numériques disponibles à cette époque, une hypothèse d'indépendance des équations a été posée permettant une résolution approchée d'un système d'équations non linéaires grâce à des polynômes du second degré. Enfin la température de vêtue n'est pas dépendante des conditions ambiantes et constitue une simplification importante.

Ils proposent une version corrigée du modèle en y intégrant un modèle de diffusion de vapeur basé sur l'état de l'art ainsi qu'une méthode de calcul plus récente pour la résolution du système non linéaire complet (bilans thermiques sur le noyau, sur la peau nue et à la surface de vêtue).

Un écart compris entre -0,5 et 2,4 K sur le PET est observé entre les deux méthodes de résolution en fonction des conditions extérieures étudiées. La mise à jour du modèle de diffusion de vapeur montre quant à elle un biais important par rapport au PET initial, pouvant varier entre -7,0 et +2,6 K suivant les conditions extérieures (vent fort, rayonnement important, etc.). Il n'y avait en fait que dans certaines conditions bien particulières que la méthode de résolution simplifiée donnait une approximation correcte de l'indice PET.

L'intervalle pour lequel l'indice PET est défini comme neutre (zone de confort) a été adapté en fonction du climat dans différentes études (cf Tableau 2.5).

Tableau 2.5 : Zone de confort du PET pour différents types de climat. (Source : (Coccolo et al., 2016))

Climat	Zone PET neutre	Référence
Europe Centrale	18-23°C	(Matzarakis et al., 1999)
Climat chaud et humide (Taiwan)	26-30°C	(Lin and Matzarakis, 2008)
Climat méditerranéen	20-25°C	(Cohen et al., 2013)

L'échelle thermique du PET peut varier en fonction du climat et donc être adaptée à un contexte local, notamment en climat chaud et humide, comme le montre l'étude de (Lin and Matzarakis, 2008) qui propose une classification thermique différente pour le climat de Taïwan ou celle de (Ng and Cheng, 2012), qui ont adapté la zone de confort de PET pour la ville de Hong-Kong. Il faut alors procéder à une validation des simulations par des études de terrain avec mesures des conditions extérieures et des questionnaires. L'échelle d'origine de PET est quant à elle présentée dans le Tableau 2.7.

L'indice PET a été éprouvé au travers de nombreuses études pour différents types de climat et les résultats obtenus lors des simulations sont comparables à ceux calculés grâce aux données enregistrées sur site. Il est même recommandé par le référentiel allemand VDI (VDI, 1998). Cet indice peut être calculé grâce à différents logiciels tels que RayMan, Envi-Met, SOLWEIG ou encore dans l'outil GrassHopper/LadyBug.

La PET peut également être utilisée en tant qu'outil d'aide à la décision à l'échelle du quartier afin d'évaluer l'environnement urbain d'un point de vue thermique et ainsi identifier les zones vulnérables, comme le montre l'étude réalisée par (Yang and Chen, 2016). Ces derniers ont créé un « atlas thermique » à partir d'un système d'information géographique en calculant l'indice PET pour le quartier de Lujiazui, à Shanghai. La carte générée permet alors d'analyser rapidement les variations spatiales du microclimat urbain et d'évaluer le niveau de confort thermique extérieur. Un zonage est alors réalisé en fonction des catégories de sensation de l'échelle PET et des recommandations différenciées en termes d'aménagement peuvent alors être proposées (voir Figure 2.3).

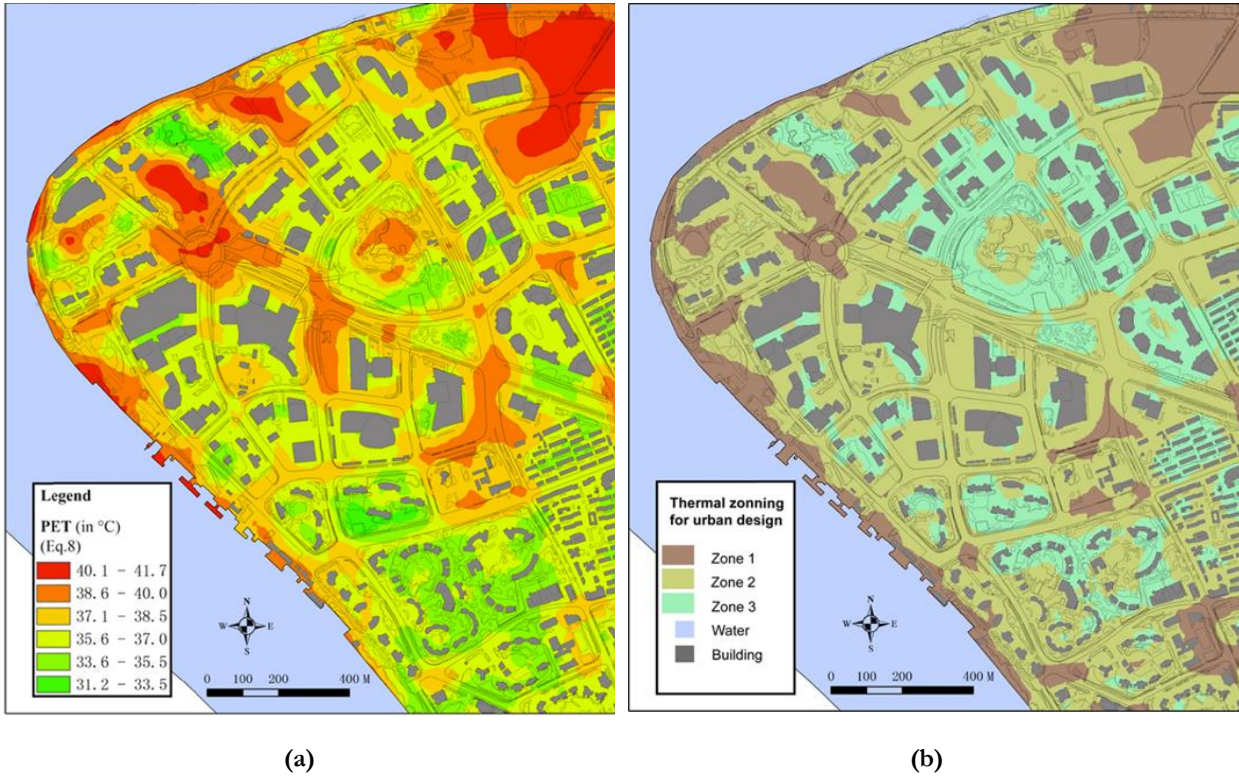


Figure 2.3: (a) “Atlas thermique” selon la PET et (b) carte de zonage thermique (Z1 = zone vulnérable et à haut risque thermique ; Z2= zone dense avec grands espaces mais peu de végétation ; Z3= zone confortable avec espaces boisés) réalisées pour le quartier de Lujiazui à Shanghai, pour un jour d’été type.

2.5.1.5. « Universal Thermal Climate Index » (UTCI)

Dernièrement, l’introduction du nouvel indice de confort urbain UTCI (Indice universel du climat thermique) a orienté les nouvelles études vers une utilisation plus prononcée de ce dernier et son intégration dans des outils de modélisation. Il est l’indice thermique le plus récent basé sur l’équation d’équilibre thermique du corps humain (Équation 2-1), et est exprimé comme une température ressentie en °C (cf Équation 2-5).

L’UTCI (Universal Thermal Climate Index) a été développé par une équipe internationale multidisciplinaire (www.utci.org) comme un indicateur extérieur universel pouvant être utilisé dans tout type de climat, pour toute saison de l’année et tout type d’application (Jendritzky et al., 2012).

$$M - W - [Q_H(T_a, V_a) + Q^*(T_{mrt}) - [Q_L(p_v, V_a) + Q_{SW}(p_v, V_a) - Q_R(T_a, p_v) \pm Q_{stock} = 0$$

Équation 2-5 : Equation d’équilibre thermique du corps humain régissant l’UTCI

Avec M est le niveau d'activité métabolique, W le travail utile, Q_{stock} la chaleur stockée, Q_H les flux turbulents de chaleur sensibles, Q^* le bilan radiatif, Q_L les flux turbulents de chaleur latente par diffusion de la vapeur d'eau à travers la peau, Q_{sw} les flux turbulents de chaleur latente par évaporation de la sueur, Q_R les flux de chaleur sensible et latente liés à la respiration, T_a la température de l'air, T_{mrt} la température radiante moyenne, V_a la vitesse de l'air, p_v la pression partielle de vapeur.

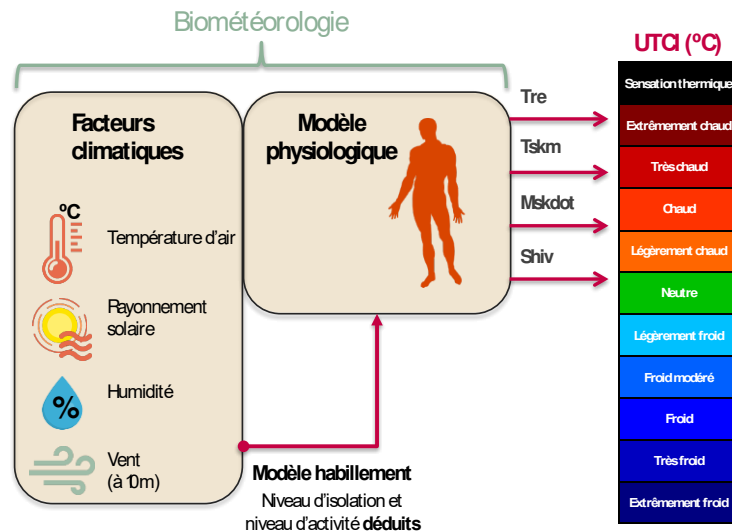


Figure 2.4: Le modèle UTCI- dérivé du modèle dynamique thermo-physiologique « Fiala model » (Fiala et al., 2012), qui a été couplé avec un modèle d'habillement (Havenith et al., 2012). T_{re} température rectale, T_{skm} température moyenne de la peau, $Mskdot$ flux lié à la transpiration, $Shiv$ flux lié aux frissons.

Pour une combinaison donnée de l'humidité de l'air, de la vitesse du vent et de la température radiative, cet indice corrige la température de l'air pour estimer une température ressentie qui, selon le modèle établi, produit une réponse physiologique dynamique équivalente (Bröde et al., 2011)(cf Figure 2.4). L'environnement de référence (celui pour lequel l'UTCI est égal à la température de l'air) est défini par une humidité relative de 50 %, une vitesse de vent de 0,5m/s à 10m et une température de rayonnement égale à la température de l'air. Il tient compte de l'habillement et du métabolisme de la personne. De plus, contrairement aux autres indices thermiques présentés ici qui utilisent une vitesse de vent à hauteur d'homme, l'UTCI utilise la donnée de vitesse de vent prise à 10m.

La vitesse de vent prise à une hauteur x doit donc être calculée pour une hauteur de 10m, en utilisant la formule suivante (Bröde et al., 2011):

$$V_{a,10m} = V_{a,x} \times \frac{\log(\frac{10}{0,01})}{\log(\frac{x}{0,01})}$$

Équation 2-6 : Formule logarithmique pour le calcul de la vitesse du vent à 10m pour l'UTCI (Bröde et al., 2011)

Dans cette équation, la valeur 0,01 correspond à une longueur de rugosité représentant un terrain environnant peu accidenté et sans obstacle de type champ (en anglais, open field).

L'UTCI a d'abord été calculé à partir d'un modèle dynamique thermo-physiologique nodale (Fiala et al., 2012). On parle ici de modèle multi-nœuds afin de décrire la capacité du modèle à prédire une réponse locale des différents segments du corps humain. Le corps humain est en effet divisé en douze cylindres représentant les différentes parties du corps humain (tête, visage, cou, épaules, etc.) représentant un total de 187 nœuds. Un modèle statistique basé sur une régression polynomiale a par la suite été développé de manière à permettre des calculs plus rapides (Bröde et al., 2011) :

$$UTCI(T_a, T_{mrt}, V_a, p_v) = T_a + \text{offset}(T_a, T_{mrt}, V_a, p_v)$$

Équation 2-7 : Modèle statistique basé sur une régression polynomiale pour le calcul de l'UTCI (Bröde et al., 2011)

Le Tableau 2.6 ci-dessous liste les différentes entrées nécessaires pour le modèle simplifié ainsi que les conditions limites pour chaque variable.

Tableau 2.6: Liste des variables environnementales prises en compte dans le calcul de l'UTCI et de leurs conditions limites respectives. (Source : (Bröde et al., 2011))

Entrées	Conditions limites
Température d'air (T_a)	$-50\text{ }^{\circ}\text{C} < T_a < +50\text{ }^{\circ}\text{C}$
Température radiante moyenne (T_{mrt})	Jusque $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ en dessous de T_a et $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ au dessus de T_a
Vitesse d'air à 10m	$0,5 < V_a < 17\text{ m/s}$
Pression de vapeur d'eau (p_v) / Humidité relative (HR)	$p_v \leq 50\text{ hPa}$ / $\text{HR} \leq 100\%$

Un modèle d'habillement γ est également inclus et permet de déduire le niveau d'isolation I_{cl} en fonction de la température d'air ambiante T_a , en se basant sur des observations faites en conditions

réelles (Havenith et al., 2012). Cette solution a été choisie afin que le modèle puisse couvrir le maximum de conditions climatiques mais en restant le plus proche possible des valeurs observées sur le terrain. Ainsi, plus la température de l'air est basse, plus le niveau d'isolation est élevé et inversement. De plus, les propriétés d'isolation et de résistance à la vapeur du modèle d'habillement dépendent également de la vitesse du vent et le mouvement d'air induit en marchant est pris en compte.

Néanmoins, la relation établie entre la température d'air et le niveau d'isolation est considérée comme représentative des conditions d'habillement d'une personne vivant en Europe et au Nord de l'Amérique (Havenith et al., 2012). Par conséquent, des habitudes vestimentaires différentes pouvant exister dans d'autres contextes culturels et climatiques ne semblent pas pris en compte. De plus, le niveau d'isolation est indépendant des autres variables environnementales que sont l'humidité, le rayonnement solaire et le vent. Cela signifie qu'on prend comme hypothèse qu'une personne vivant dans un climat chaud et sec aura le même niveau de vêtement qu'une autre personne vivant en climat chaud et humide à la même température (Emmanuel et al., 2016). Malgré ces limitations, quelques auteurs ont validé l'applicabilité de cet indice dans des environnements urbains situés sur d'autres continents, notamment en climat chaud et humide et que le modèle d'habillement prédit correctement le niveau moyen d'isolation par les vêtements rencontré dans d'autres contextes (Bröde et al., 2012) (Kruger et al., 2012).

Le niveau d'activité métabolique utilisé dans l'UTCI est le même que pour l'indice PT , soit une valeur constante de 135 W/m^2 (2,3 met), correspondant à une personne marchant à une vitesse de 4km/h. Le fait d'avoir une activité métabolique bloquée entraîne que des attitudes adaptatives telles que marcher plus vite pour essayer de se réchauffer dans des climats froids ou au contraire ralentir son rythme dans un environnement chaud ne sont pas pris en compte dans le modèle. Ceci peut conduire à un UTCI plus élevé que la réalité dans les climats chauds (Emmanuel et al., 2016).

Un calculateur gratuit permettant de calculer une valeur de l'UTCI (basé sur le code source de F90 UTCI, version a 0.002, Oct. 2009) pour des conditions extérieures données peut être trouvé en ligne sur le site www.utci.org. L'échelle d'origine est présentée dans le Tableau 2.7.

Cet indice, relativement récent, n'a pas pu donner lieu à un grand nombre de publications. Il montre cependant une forte corrélation avec d'autres indices rationnels tels que PET , PMV et SET^* (Blazejczyk et al., 2012). En effet, les auteurs ont réalisé une étude comparative entre l'indice récemment développé, l'UTCI, et les principaux indices thermiques existants, dont des indices simples (Heat index (HI), Humidex, Wet Bulb Globe Temperature (WBGT), ET , etc.) et des indices rationnels (SET^* , PET , PT) pour différents types de climat. Ils ont montré que les indices rationnels, qui ont une approche semblable à celle de l'UTCI dans la prise en compte des variables, sont beaucoup mieux corrélés à celui-ci que les indices simples (excepté l'indice ET), avec un coefficient de corrélation R^2 supérieur à 93,1. Ils ont également fait ressortir que l'UTCI est très sensible aux variations, même très faibles, des stimuli de l'ambiance extérieure en termes de température, de rayonnement solaire, de vent ou d'humidité. Enfin, ces derniers avancent le fait que l'UTCI prend mieux en compte la variabilité

temporelle des conditions thermiques que les autres indices. Quelques années plus tard, (Farajzadeh et al., 2015) ont à leur tour choisi de comparer l'UTCI avec des indices simples tels que Humidex, WBGT, ET, et des indices rationnels comme PET, SET*, Subjective Temperature Index (STI), Physiological Subjective Temperature (PST), en appliquant leur étude dans le Nord de l'Iran. Il ressort de cette étude que les indices rationnels sont plus appropriés pour l'évaluation du confort thermique en milieu urbain. De plus, ils ont démontré l'applicabilité de l'UTCI dans la description des conditions de confort du corps humain durant les saisons chaudes et les jours très ensoleillés.

D'autres études se sont centrées sur la validation et l'applicabilité de l'indice UTCI dans différents contextes climatiques. On peut ainsi citer l'étude de (Bröde et al., 2012) qui a permis de valider l'utilisation de l'UTCI en climat sub-tropical, en montrant une bonne prédiction des votes de sensations thermiques. Ils ont également démontré que l'UTCI est indépendant du genre, de l'âge ainsi qu'une influence limitée des saisons et des caractéristiques du corps humain, telle que la masse corporelle. Il en ressort que l'UTCI est un outil d'aménagement approprié pour le confort thermique en milieu urbain en climat subtropical. (Kruger et al., 2012) ont quant à eux étudié l'applicabilité de l'UTCI dans deux climats différents : Curitiba au Brésil et Glasgow en Angleterre. Ils ont observé qu'il existe une bonne corrélation entre la sensation thermique issue du calcul de l'UTCI et la sensation thermique résultante des votes observés par des mesures in situ (mesures des conditions extérieures et questionnaires corrélés aux mesures), bien qu'il y ait des écarts observés entre la prédiction et les observations. En effet, lors du calcul de l'UTCI, une légère surestimation des votes de sensation thermique a été observée pour Curitiba et une légère sous-estimation des votes de sensation thermique observée pour Glasgow. Enfin, ils ont montré que le niveau d'habillement moyen est prédit correctement par le modèle inclus dans le calcul de l'UTCI, et ce malgré une légère surestimation pour Glasgow durant l'été.

2.5.1.6. Synthèse des échelles de perception thermique pour les différents indices

Les différentes échelles de perception thermique pour les indices définis précédemment, PET, PT, SET* et UTCI sont présentées dans le Tableau 2.7 ci-après.

Il est à noter qu'il n'existe pas de sensation définie comme « légèrement chaude » pour l'indice UTCI. De plus, (Bröde et al., 2011) définissent la zone de confort thermique de l'UTCI comme étant 18-26°C.

Tableau 2.7 : Echelle de perception thermique pour les indices rationnels PET, PT, SET* et UTCI (Emmanuel et al., 2016)

PET (°C)	PT (°C)	SET (°C)	UTCI (°C)	Perception thermique
-	-	-	<-40	Froid glacial
≤4	≤-39	-	-40 à -27	Extrêmement froid
4 - 8	-39 à -26	10,0 - 14,5	-27 à -13	Très froid
8 - 13	-26 à -13	14,5 - 17,5	-13 à 0	Froid
13 - 18	13 à 0	17,5 - 22,2	0 à 9	Légèrement froid
18 - 23	0 à 20	22,2 - 25,6	9 à 26	Neutre
23 - 29	20 à 26	25,6 - 30,0	-	Légèrement chaud
29 - 35	26 à 32	30,0 - 34,5	26 à 32	chaud
35 - 41	32 à 38	34,5 - 37,5	32 à 38	Très chaud
>41	≥38	>37,5	38 à 46	Extrêmement chaud
-	-	-	>46	Chaleur étouffante

2.5.2. Indices « simples » ou « empiriques »

Les indices « simples » permettent de définir le confort thermique de l'homme en se basant sur des études empiriques où une relation est établie entre différentes variables de manière statistique.

2.5.2.1. Indices basés sur des équations de régression linéaire via des études de terrain

D'autres indices existent afin de prédire la perception thermique des individus. On distingue notamment les indices de confort qui sont basés sur des études de terrain et où des régressions multiples sont établies entre les votes subjectifs de perception thermique et les mesures des facteurs environnementaux influençant le confort thermique (température d'air, vitesse d'air, rayonnement et humidité) (Coccolo et al., 2016) (Emmanuel et al., 2016). Ils s'expriment sous forme d'équations de régression linéaire.

Ces indices « empiriques » permettent de définir le confort thermique de l'homme pour un climat spécifique et ne sont valides que pour le contexte local dans lequel ils ont été définis et validés. Ce ne sont pas des indices universels comme se veut l'UTCI.

Ce type d'indice a été développé par différents auteurs pour leur zone climatique et s'exprime souvent sous la forme connue d'échelle de perception thermique (avec différents niveaux).

2.5.2.1.1. Vote de sensation effective «Actual Sensation Vote» (ASV)

Ainsi, dans le cadre du projet européen RUROS de 2009, les conditions de confort thermique extérieur ont été évaluées à partir d'une campagne de mesures sur le terrain dans quatorze sites différents répartis en Europe (Nikolopoulou and Lykoudis, 2006) (Coccolo et al., 2016). La sensation thermique exprimée par les individus a été évaluée sur une échelle comptant 5 niveaux allant de « très froid » à « très chaud ». Celle-ci a alors été définie comme étant le vote de sensation effective (en anglais, ASV : Actual Sensation Vote). L'analyse des données collectées a permis de mettre en évidence l'existence de corrélations entre les paramètres microclimatiques mesurés et l'ASV. Les facteurs environnementaux sont multipliés par un coefficient qui varie en fonction du climat et du site étudié. Un modèle permettant le calcul de l'ASV a donc été défini pour chacune des différentes villes sur ce principe. Puis, une valeur moyenne de l'ASV a été établie selon un modèle combiné pour l'Europe, dont l'expression est :

$$ASV = 0,049 T_a + 0,001 R_{glo} - 0,051 V_a + 0,014 HR - 2,079$$

(coefficient de corrélation $R = 0,78$)

Équation 2-8 : Equation du modèle ASV combiné pour toute l'Europe

Une série de paramètres météorologiques sélectionnés ont été utilisés, typiquement représentatifs de zones climatiques différentes dans les villes européennes à l'étude, soit la température de l'air (T_a , en °C), la radiation solaire globale (R_{glo} , en W/m^2), la vitesse du vent (V_a , en m/s) et l'humidité relative (HR, en %), basés sur des données météorologiques horaires.

Dans leur étude, le vote dépendait principalement de la température de l'air et de la vitesse du vent car l'effet du rayonnement solaire est masqué par celui de la température de l'air à cause de la forte corrélation entre ces paramètres.

2.5.2.1.2. Température de perception équivalente « Temperature of Equivalent Perception » (TEP)

Pour le climat subtropical de la ville de Sao Paulo, caractérisée par des périodes estivales chaudes et humides, (Monteiro, 2013) propose un indice de confort empirique basé sur des études de terrain avec 72 conditions microclimatiques différentes et 1 750 questionnaires réalisés sur deux années consécutives en hiver et en été. Ces études reposent sur les données des conditions microclimatiques, des facteurs personnels (activité et habillement) et des réponses subjectives aux questions sur la perception thermique et le confort thermique. Il propose alors un indice appelé « Temperature of Equivalent Perception » (TEP) qui se base sur le principe de température équivalente, exprimé en °C, qui est plus facilement interprétable et dont l'échelle de sensation thermique est donnée dans le Tableau 2.8.

L'environnement de référence est défini par une température d'air égale à la température radiante moyenne, une humidité relative de 50% et une vitesse d'air nulle. L'expression de TEP est la suivante :

$$TEP = -3,777 + 0,4828 T_a + 0,5172 T_{mrt} + 0,0802 HR + 2,322 V_a$$

Équation 2-9 : Equation du modèle TEP développée pour la ville de Sao Paulo (Monteiro, 2013)

Avec T_a température d'air (en °C), HR humidité relative (en %), V_a vitesse d'air (en m/s) et T_{mrt} température radiante moyenne (en °C).

Tableau 2.8: Echelle de sensation thermique associée à l'indice TEP. (Monteiro, 2013)

TEP (°C)	Sensation thermique
> 42,5	Très chaud
34,9 – 42,4	Chaud
27,3 – 34,8	Assez chaud
19,6 – 27,2	Neutre
12,0 – 19,5	Assez froid
4,4 – 11,9	Froid
< 4,3	Très froid

2.5.2.1.3. Sensation thermique « Thermal Sensation » (TS)

(Cheng et al., 2012) ont mené une étude sur le confort thermique urbain en utilisant des enquêtes longitudinales dans la ville subtropicale de Hong-Kong. Le principe étant d'interviewer un nombre limité d'individus mais suivis sur une période prolongée et dans différentes ambiances thermiques. Le but est d'analyser les effets induits par des changements dans les facteurs environnementaux (température d'air, vitesse d'air, rayonnement) sur les sensations de confort. Les mesures se sont déroulées sur un campus universitaire pour les deux saisons hiver et été. Le protocole expérimental consistait à mettre en place quatre ambiances extérieures différentes : la première en plaçant les individus sous une protection solaire, la deuxième en les protégeant du vent par un coupe-vent vertical, la troisième en combinant les deux premières situations et enfin la dernière avec une exposition directe au rayonnement et au vent (cf Figure 2.5 ci-dessous).



Figure 2.5: Les différentes situations expérimentales mises en œuvre dans l'étude longitudinale réalisée en milieu urbain à Hong-Kong (Cheng et al., 2012)

Les auteurs ont ainsi conforté l'hypothèse émise, à savoir que la neutralité thermique correspond au confort thermique. Ils proposent trois équations différentes afin de prédire la sensation thermique en extérieur grâce à une analyse de régression linéaire mettant en jeu quatre variables indépendantes. Celle définie pour les conditions été et hiver avec prise en compte de l'humidité est exprimée ci-dessous :

$$TS = 0,1185 T_a - 0,6019 V_a + 0,0025 R_{glo} + 0,1155 r - 4,77$$

(Coefficient de corrélation $R = 0,91$)

Équation 2-10 : Equation du modèle TS développée pour les conditions hiver et été avec prise en compte de HR (Cheng et al., 2012)

Avec T_a température d'air sec (en °C), V_a vitesse d'air (en m/s), R_{glo} rayonnement solaire global (en W/m^2) et r humidité absolue (en g/kg_{air}). TS est le vote de sensation thermique sur une échelle à 7 niveaux, allant de - 3 (très froid) à +3 (très chaud) et 0 le point central correspondant à la sensation thermique neutre (assimilé à la sensation de confort).

Dans ces formules, l'humidité absolue est utilisée au lieu de l'humidité relative puisque celle-ci permet d'exprimer la teneur réelle en eau de l'air.

Ils ont démontré qu'une diminution du vent entraînait un effet de "réchauffement" et que les variations dans l'intensité du vent et du rayonnement ont une forte influence sur la sensation confort, notamment en été.

Les formules proposées permettent également d'estimer la vitesse de vent nécessaire pour atteindre le confort thermique en milieu urbain dans la ville de Hong-Kong. Ainsi, pour une journée typique d'été où la température d'air extérieur est aux alentours de 28°C et pour une humidité relative d'environ 80%, une personne portant des vêtements légers d'été et assis à l'ombre se sentira en situation de confort avec une vitesse d'air de 1,6 m/s.

2.5.2.2. Indices empiriques basés sur des équations linéaires entre deux ou plusieurs variables environnementales

Ce groupe d'indices définit le confort thermique de l'homme en fonction de l'environnement thermique, en se focalisant sur l'impact de facteurs environnementaux tels que la température d'air, la vitesse d'air ou l'humidité relative et en négligeant le microclimat et les facteurs personnels (Coccolo et al., 2016). Ces indices sont généralement utilisés pour des études à long terme, comme des analyses historiques du climat ou des prédictions météorologiques. Ils sont plus simples d'application puisque ne nécessitant que quelques variables environnementales, facilement quantifiables.

2.5.2.2.1. « Effective Temperature » (ET)

L'indice ET est une équation linéaire établissant une relation entre la température d'air, la vitesse d'air et l'humidité relative. L'indice ET a été introduit par (Houghton and Yaglou, 1923) dans le but de déterminer l'impact de la température et de l'humidité sur le confort. (Missenard, 1933) a développé par la suite une formule mathématique de la « température résultante ».

Cet indice peut être utilisé en climat froid ou chaud (Blazejczyk et al., 2012). Il est d'ailleurs toujours utilisé en Allemagne. Cet indice montre une corrélation forte (coefficient R^2 de 96,7%) avec l'indice UTCI (Blazejczyk et al., 2012).

(Li and Chan, 2000) proposent une adaptation plus récente de la formule de l'ET de Missenard, nommée « Normal Effective Temperature » (NET), qui a été utilisée et validée pour la ville de Hong-Kong :

$$NET = 37 - \frac{37 - T_a}{0,68 - 0,0014 HR + \frac{1}{1,76 + 1,4 V_a^{0,75}}} - 0,29 T_a (1 - 0,01 HR)$$

Équation 2-11 : Formule actualisée du modèle NET pour la ville de Hong-Kong (Li and Chan, 2000)

avec T_a la température de l'air (en °C), V_a la vitesse d'air (en m/s) et HR l'humidité relative (en %).

2.5.2.2.2. « Heat Index » (HI) et « Temperature-Humidity Index » (THI)

L'indice de chaleur HI est un indice qui est utilisé par le National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) aux Etats-Unis, combinant la température de l'air ambiant et l'humidité relative pour tenter de déterminer leur impact sur le confort thermique de l'homme. Le résultat est connu comme une température de ressenti du corps lorsque température et humidité sont combinés.

HI est basé sur la capacité du corps humain à refroidir la peau grâce à la production de sueur et à la transpiration. En effet, une des principales fonctions de la transpiration est d'éliminer l'excès de chaleur produit par l'organisme et ainsi maintenir la température interne de l'organisme proche des 37°C physiologiques. Pour cela, la sueur produite dans le corps va traverser les pores de la peau puis s'évaporer dans l'air. C'est cette évaporation qui fait baisser la température corporelle, procurant une sensation de fraîcheur. Lorsque le taux d'humidité dans l'air est élevé, le phénomène d'évaporation se fait plus difficilement et procure donc une sensation subjective de « temps lourd » puisque notre corps n'arrive plus à évacuer la chaleur.

La formule de HI est dérivée de celle de la Température Apparente (AT) (Steadman, 1984) par de multiples analyses de régression (Rothfus, 1990), dont l'expression est la suivante (Blazejczyk et al., 2012):

$$\begin{aligned} HI = & -8,784695 + 1,61139411 \times T_a + 2,338549 \times HR - 0,14611605 \times T_a \times HR \\ & - 1,2308094 \times 10^{-2} \times T_a^2 - 1,6424828 \times 10^{-2} \times HR^2 \\ & + 2,211732 \times 10^{-3} \times T_a^2 \times HR + 7,2546 \times 10^{-4} \times T_a \times HR^2 \\ & - 3,582 \times 10^{-6} \times T_a^2 \times HR^2 \end{aligned}$$

Équation 2-12 : Formule de l'indice HI

Avec T_a la température de l'air (en °C) et HR l'humidité relative (en %). HI n'est applicable que pour des températures supérieures à 20°.

L'échelle des risques associés aux valeurs de HI est donnée dans le Tableau 2.9 ci-dessous.

Tableau 2.9: Echelle d'évaluation de l'indice de chaleur HI, pour des conditions de longue exposition (jours) ou une activité physique intense. (Emmanuel et al., 2016)

Heat Index (°C)	Catégorie
27 - 32	 Inconfort
32 - 41	 Extrême inconfort
41 - 54	 Danger
≥ 54	 Danger extrême

L'indice appelé « temperature-humidity index » (THI) est un indice empirique développé lui aussi aux Etats-Unis dans les années 1950 afin d'évaluer les conditions d'inconfort thermique dans les milieux chauds et humides. THI est calculé grâce à la formule suivante (Emmanuel et al., 2016) :

$$THI = 0,8T_a + \frac{HR \times T_a}{500}$$

Équation 2-13 : Formule de l'indice THI

Avec T_a la température de l'air (en °C) et HR l'humidité relative (en %).

L'échelle de sensation de confort qui en découle en fonction des valeurs limites de THI est présentée dans le Tableau 2.10 suivant :

Tableau 2.10: Echelle de confort de l'indice THI (Source : (Emmanuel, 2005))

THI	Conditions de confort
21 - 24	100 % des personnes en situation de confort
24 - 26	50 % des personnes en situation de confort
> 26	100 % des personnes en situation d'inconfort lié à la chaleur

Cependant, il est important de préciser que les limites de THI données ci-dessus ont été établies pour des latitudes moyennes. En climat tropical, les habitants pourraient tolérer des valeurs plus importantes de THI, grâce au phénomène d'acclimatation et leur contexte culturel.

Malgré cette limite, THI reste l'un des indices bioclimatiques « simples » les plus utilisés en milieu tropical, notamment en extérieur (Deosthali, 1999) (Emmanuel et al., 2016).

L'avantage de ces deux indices est que leur calcul ne nécessite que deux données, la température d'air et l'humidité relative, qui sont des variables météorologiques facilement accessibles ou mesurables. Leur limite est que ni le rayonnement, ni le vent ne sont pris en compte alors que ce sont des facteurs qui influencent de manière non négligeable le confort thermique en milieu urbain.

2.5.2.2.3. Humidex (HD)

L'indice humidex (HD) est une mesure utilisée par les météorologues canadiens pour intégrer les effets combinés de la chaleur et de l'humidité. Dans le principe, l'humidex est quelque peu similaire à l'indice précédent, l'indice de chaleur HI, cherchant tous les deux à quantifier l'effet de l'humidité sur la température ressentie. Ils diffèrent néanmoins l'un de l'autre sur un point. En effet, contrairement à HI, l'humidex utilise le point de rosée, et donc sur la mesure du contenu en humidité (vapeur d'eau) de l'air, au lieu de l'humidité relative.

La formule actuelle utilisée pour le calcul de l'indice humidex est basée sur les travaux effectués par (Masterson and Richardson, 1979), au Service de l'environnement atmosphérique (maintenant le SMC) d'Environnement Canada (D'Ambrosio Alfano et al., 2011) (Coccolo et al., 2016):

$$HD = T_a + \frac{5}{9} (p_{vs} - 10)$$
$$p_{vs} = 6,112 \times \left(10^{\frac{7,5 T_a}{237,7 + T_a}} \right) \times \frac{HR}{100}$$

Équation 2-14: Formule de l'humidex

Avec T_a la température de l'air (en °C), HR l'humidité relative (en %) et p_{vs} la pression en vapeur d'eau saturante (en hPa).

Cet indice est sans dimension. Les valeurs associées à l'inconfort de l'humidex ont été à la base développée pour une application en extérieur.

Le Tableau 2.11 ci-dessous présente les intervalles limites de valeur de l'humidex pour des conditions d'inconfort thermique croissantes et les possibles risques associés.

Tableau 2.11 : Valeurs limites de l'humidex et conditions d'inconfort thermique associées. (Masterson and Richardson, 1979)

Humidex	Niveau d'inconfort thermique
20 - 29	Aucun inconfort
30 - 39	Un certain inconfort
40 - 45	Beaucoup d'inconfort
> 45	Danger
> 54	Coup de chaleur imminent

Il est à noter que cet indice ne tient compte que de la température de l'air et de l'humidité. Il n'intègre pas les effets de l'exposition au soleil, qui va augmenter la température de la peau ni de la vitesse d'air qui participe au phénomène de l'évaporation de la sueur et donc au rafraîchissement de la peau.

2.5.2.2.4. « Wet Bulb Globe Temperature Index » (WBGT)

L'indice de température au thermomètre-globe mouillé, WBGT, est un indice empirique de stress thermique utilisé pour estimer les effets combinés de la température d'air, de l'humidité et du rayonnement solaire sur un individu. C'est un indice plus complet que les précédents et reconnu dans des normes internationales (ASHRAE, 2001) (ISO 7243, 2017). Il est l'un des indices le plus utilisé dans le monde et a de nombreuses applications dans des études d'impact sur la santé, notamment dans le monde du travail, que ce soit en milieu intérieur ou extérieur (Emmanuel et al., 2016).

En extérieur, l'indice s'exprime comme suit (Coccolo et al., 2016):

$$WBGT = 0,7T_w + 0,2 T_g + 0,1 T_a$$

Équation 2-15: Formule de l'indice WBGT pour une application extérieure

Avec T_w la température de bulbe humide en ventilation naturelle (en °C), T_g la température de globe noir exposé au soleil (en °C) et T_a la température de l'air sous abri (en °C).

Les résultats obtenus doivent être comparés avec les tables données dans la norme (ISO 7243, 2017), montrant pour chaque niveau d'activité métabolique, la sensation de confort correspondante (cf Tableau 2.12). Le globe doit être fin, de couleur noir mat et avec un diamètre de 150 mm (Parsons, 2006).

Tableau 2.12: Valeurs de référence de l'indice WBGT pour différents niveaux d'activité de personnes qui sont acclimatées et non acclimatées à la chaleur. Les valeurs suivantes sont obtenues pour des études en milieu extérieur avec une vitesse de vent supérieur à 0,15m/s . (Emmanuel et al., 2016)

Activité (métabolisme, M en W)	WBGT (en °C)	
	Acclimatation	Pas d'acclimatation
Repos, assis (M < 117)	33	32
Debout, marche lente (117 – 234)	30	29
Marche normale (234 – 360)	28	26
Marche rapide, travail peu intense (360 – 468)	26	23
Travail intense (M > 468)	25	20

T_w dépend de la température d'air et de l'humidité et T_g dépend du rayonnement et de la température d'air. L'utilisation d'un globe permet de prendre en compte de manière indirecte les effets du rayonnement solaire, de la couverture nuageuse ou encore du vent, qui sont des variables variant dans le temps. Il s'agit donc d'un indice « plus dynamique » que les indices humidex (HD) et de chaleur (HI), qui utilisent quant à eux uniquement les variables température et l'humidité de l'air.

La difficulté de l'indice WBGT réside dans le calcul de T_g qui n'est pas une donnée facilement mesurable en fonction des environnements étudiés. Un matériel spécifique doit également être utilisé pour le calcul de T_w .

WBGT est un indice standard, exprimé en °C, qui a été éprouvé et validé à travers de nombreuses applications. Afin d'obtenir des résultats probants, il est crucial de suivre le protocole de mesure défini dans la norme (ISO 7243, 2017).

2.6. Synthèse : Comparaison des différents indices thermiques

Choisir l'indice de confort thermique le plus adapté en milieu urbain en climat tropical n'est pas évident. Il en ressort que les indices « rationnels » sont plus que recommandés puisqu'ils se basent sur le bilan thermique de l'homme et prennent en compte l'ensemble des principaux facteurs influençant le confort thermique, qu'ils soient personnels ou environnementaux, (Emmanuel et al., 2016). De plus, la majorité de ces indices et notamment l'UTCI peuvent être appliqués pour différents types d'exposition ou d'activité et surtout dans différents climats voire microclimats, comme cela est le cas à La Réunion.

Enfin, les indices PT, PET, SET* et UTCI sont exprimés comme des températures équivalentes en °C, ce qui facilite leur compréhension et interprétation.

D'autres indices « empiriques », tels que le TEP développé par (Monteiro, 2013), incluent également toutes ces variables, mais comme nous l'avons vu précédemment, ces indices, basés sur des études de terrain, restent spécifiques au lieu d'étude et vont montrer des limites dans leur applicabilité à d'autres contextes culturels et climatiques. Les modèles tels que WBGT, HI, THI et HD sont applicables en milieu chaud et humide et présentent une échelle de sensation thermique détaillée pour la chaleur, mais négligent les sensations liées au froid. Ainsi, si l'on souhaite choisir un indice applicable à toute l'île de La Réunion, ces derniers peuvent montrer des limitations pour les régions en haute altitude où le froid est assez marqué.

Dans une étude récente, (Blazejczyk et al., 2012) ont comparé les performances d'une grande variété d'indices thermiques, à la fois rationnels et empiriques, en utilisant des données climatiques pour différents climats dont les climats chauds et humides. Ils ont montré que tous les indices rationnels donnaient d'excellents résultats et étaient fortement corrélés entre eux. Cependant, les indices simples, tels que WBGT et HI, n'étaient que très faiblement corrélés à des indices rationnels, plus complexes. Une exception était l'indice ET qui montrait lui une forte corrélation avec l'UTCI.

L'indice PMV a montré ses limites en utilisation extérieure puisque des écarts importants ont été trouvés entre les prédictions obtenues avec cet indice et les votes de perception thermique subjective. L'indice PT, dérivé du PMV et spécialement développé pour une utilisation en extérieure, n'a encore que très peu été utilisé en milieu urbain chaud et humide mais donne des résultats prometteurs (Emmanuel et al., 2016).

(Fang et al., 2018b) ont analysé la sensibilité de différents indices à différents paramètres, incluant les paramètres de l'individu et de l'environnement physique. Ils montrent une relation linéaire entre PET et température opérative. Quand la température opérative est inférieure à 32 °C, l'effet de la vitesse de l'air sur le PET est positif. A contrario, les autres facteurs, humidité relative, vêtue et métabolisme ont un effet insignifiant sur le PET. Une relation de type exponentiel a été trouvée entre l'UTCI et la température opérative. L'effet de la vitesse de l'air sur l'UTCI est de plus en plus faible quand la température opérative augmente. Une relation linéaire entre UTCI et humidité relative apparaît plus clairement que dans le cas du PET.

L'UTCI reste sans aucun doute l'indice rationnel thermique le plus avancé et le plus complet. Il est le seul se basant sur un modèle dynamique multi-nœuds. Les différentes sections du corps sont traitées de manière différente et les effets de toutes les variables environnementales sont pris en compte. De plus, le modèle d'habillement dépend de la température d'air extérieure. Si on le compare à un indice tel que le PET, qui lui se base sur un environnement de référence intérieur, l'UTCI présente l'avantage d'être basé sur des hypothèses plus adaptées en conditions extérieures, comme par exemple le niveau d'activité de référence choisi. Il présente également le grand avantage d'être universel et de pouvoir prédire de manière sensiblement adéquate les conditions de confort thermique pour des climats

différents. Cependant, la petite ombre au tableau est que l'UTCI est encore très récent et il n'a à l'heure actuelle qu'encore été très peu utilisé dans des études. On a donc encore très peu de retour d'expérience sur cet indice. Les premiers retours en climats chauds et humides montrent que le modèle d'habillement n'est pas tout à fait adapté pour des températures très élevées et donnent des valeurs décalées avec la réalité.

L'indice PET, bien que plus simple que l'UTCI, a quant à lui un niveau d'activité et un niveau d'habillement fixés et son environnement de référence est typique d'un milieu intérieur. Il a pourtant démontré son applicabilité en milieu tropical et montre des résultats probants pour l'étude du confort thermique en milieu urbain. Il est d'ailleurs à l'heure actuelle, l'indice le plus utilisé dans le monde à cette fin (Johansson et al., 2014).

Enfin, l'indice SET* (ou OUT_SET*) est moins complexe que les indices PET et UTCI mais son avantage est que les valeurs observées du niveau d'activité et du niveau d'habillement peuvent être utilisées au lieu de niveaux standards. Cet indice a été utilisé dans un nombre non négligeable d'études du confort thermique en milieu urbain et dont certaines en climat chaud et humide.

Le Tableau 2.13 ci-après liste les principales caractéristiques des indices de confort thermique présentés afin d'aider à choisir l'indice le plus adapté en fonction du contexte de l'étude et de contraintes données.

Tableau 2.13: Synthèse des caractéristiques des différents indices de confort urbain présentés

Indices – Référence	Type Indice (Unité)	Principe / Modèle	Type(s) échelle thermique associée	Climat - milieu d'application	Données climatiques / données occupants nécessaires	Calcul / Mesure / Calibration	Echelle d'évaluation
INDICES RATIONNELS							
PMV (Predicted Mean Vote) – (Fanger, 1970), (McIntyre, 1980) (ASHRAE, 2001)	Vote de sensation thermique (Sans dimension)	Equation du bilan thermique du corps humain	Pas d'échelle associée	Tout type de climat - Milieu intérieur	T_a , HR, V_a , T_{mrt} / M , I_{cl}	-Mesures des paramètres climatiques et calcul de l'indice. -Aucune calibration requise.	Bâtiment
	<u>Avantages :</u> - Un des indices les plus utilisés en intérieur - Prend en compte tous les facteurs climatiques influençant le confort thermique <u>Limites :</u> - Le calcul en régime permanent atteint ses limites pour la prise en compte des changements rapides en extérieur - Une évaporation totale de la transpiration est prise comme hypothèse - Indice non validé en extérieur, surestime la perception thermique des individus - La mesure de T_{mrt} et V_a peut s'avérer difficile en milieu urbain (matériel spécifique)						
PT (Perceived Temperature) – (Gagge et al., 1971) (VDI, 1998)	Température équivalente (°C)	Equation du bilan thermique du corps humain - Modèle Klima-Michel	Sensation thermique	Tout type de climat - Milieu extérieur	T_a , HR, V_a , T_{mrt} / Aucunes données personnelles	-Mesures des paramètres climatiques et calcul de l'indice. -Aucune calibration requise.	Toute échelle
	<u>Avantages :</u> - Indice développé pour une application en extérieur avec hypothèse d'une personne marchant en extérieur à 4 km/h - Habillement variable en fonction de la saison (été / hiver) - Amélioration du calcul du flux de chaleur latent : sensibilité à l'humidité mieux prise en compte - Rayonnement extérieur ajouté au modèle - Prend en compte tous les facteurs climatiques influençant le confort thermique - Prend en compte l'adaptation comportementale d'un individu en faisant varier l'habillement <u>Limites :</u> - Calcul en régime permanent - Modèle développé avec des données météorologiques enregistrées pour des villes allemandes - Indice peu éprouvé en climat tropical dans des études - Mesure de T_{mrt} et V_a peut s'avérer difficile en milieu urbain (matériel spécifique)						

SET* (Standard Effective Temperature) – (Gagge et al., 1971) (Gagge et al., 1986)	Température équivalente (°C)	Equation du bilan thermique du corps humain - modèle à deux nœuds	Sensation thermique	Climat tempéré à chaud – Milieu intérieur et extérieur	T_a , HR, V_a , T_{mrt}/M , I_{cl}	-Mesures des paramètres climatiques et calcul de l'indice. -Aucune calibration requise	Toute échelle
	<u>Avantages :</u> - Prend en compte tous les facteurs climatiques influençant le confort thermique <u>Limites :</u> - Indice plus adapté pour une évaluation du confort thermique en intérieur qu'en extérieur						
OUT_SET* - (Pickup and De Dear, 2000)	Température équivalente (°C)	Equation du bilan thermique du corps humain	Sensation thermique	Climat tempéré à chaud – Milieu extérieur	T_a , HR, V_a , T_{mrt}/M , I_{cl}	-Mesures des paramètres climatiques et calcul de l'indice. -Aucune calibration requise	Toute échelle
	<u>Avantages :</u> - Indice développé pour des études en extérieur à partir du modèle intérieur de Gagge - Prend en compte tous les facteurs climatiques influençant le confort thermique <u>Limites :</u> - Calcul en régime permanent - Développé au départ pour un milieu dégagé, notamment pour la partie radiation absorbée par le corps humain - Mesure de T_{mrt} et V_a peut s'avérer difficile en milieu urbain (matériel spécifique)						
PET (Physiological Equivalent Temperature) – (Höppe, 1999)	Température équivalente (°C)	Modèle MEMI (Munich Energy balance Model for Individuals) - Modèle à deux nœuds	Sensation thermique	Tout type de climat- Milieu intérieur et extérieur	T_a , HR, V_a , T_{mrt}/M , I_{cl} , Age, Sexe, Taille, Poids, Position	- Calibration de l'indice recommandée avec mesure des paramètres climatiques et questionnaires pour les paramètres personnels et le vote de sensation thermique. - Calcul de l'indice grâce à un code de calcul.	Toute échelle
	<u>Avantages :</u> - Evaluation flexible et pratique avec une échelle thermique qui peut être adaptée au climat - Indice validé dans de nombreuses études pour différents climats, différentes saisons et pour des formes urbaines même complexes - Prend en compte tous les facteurs climatiques influençant le confort thermique <u>Limites :</u> - Calcul en régime permanent - Modèle défini pour des conditions intérieures avec une activité légère et une valeur constante pour l'habillement et l'activité métabolique - Mesure de T_{mrt} et V_a peut s'avérer difficile en milieu urbain						

UTCI (Universal Thermal Climate Index) (Jendritzky et al., 2012) (Fiala et al., 2012)	Température équivalente (°C)	Modèle FPC (Fiala's multi-node human Physiology and thermal Comfort model) couplé avec un modèle pour l'habillement	Sensation thermique	Tout type de climat – Milieu extérieur	T _a , HR, V _a , T _{mrt} / Aucune donnée personnelle	- Mesures des paramètres climatiques et calcul de l'indice grâce à une procédure simplifiée développée par (Bröde et al. 2011). - Aucune calibration n'est requise mais certains auteurs recommandent de calibrer l'échelle d'origine.	Toute échelle
	<u>Avantages :</u> - Indice le plus complet, incluant les derniers modèles physiologiques et l'effet de l'habillement - Modèle dynamique - Indice universel : Applicable dans tout type de climat, toutes saisons et pour tout type d'exposition extérieure - Prend en compte tous les facteurs climatiques influençant le confort thermique <u>Limites :</u> - Indice récent encore peu éprouvé en climat tropical - Valeur de l'habillement déduite en fonction de la température d'air extérieure et basée sur des observations menées en Europe - Echelle de sensation thermique représentative d'un individu vivant en Europe - Valeur de V_a à 10 m est nécessaire alors que la mesure de V_a est faite à 1,3m lors des enquêtes - Valeur de rugosité non représentative d'un milieu urbain dense dans la formule logarithmique						
INDICES SIMPLES OU EMPIRIQUES							
ASV (Actual Sensation Vote) – (Nikolopoulou and Lykoudis, 2006)	Vote de sensation thermique (Sans dimension)	Equation linéaire établie entre les variables climatiques mesurées et les réponses aux votes de sensation thermique	Pas d'échelle associée	Climat Continental, Océanique, Méditerranéen (Europe) – Milieu extérieur	T _a , HR, V _a , Rglo/ Aucune donnée personnelle	-Calibration en climat tropical nécessaire avec étude de terrain combinant questionnaires et mesures des paramètres climatiques. - Traitement statistique pour déterminer les nouveaux coefficients.	Moyenne échelle (Rue, Quartier, Ville)
	<u>Avantages :</u> - Prend en compte l'ensemble des variables climatiques - Facteurs personnels pris en compte de manière indirecte pour une population spécifique <u>Limites :</u> - Indice applicable uniquement pour le climat et contexte dans lequel il a été défini et validé. Dans un autre contexte, il est difficilement transposable.						

TEP (Temperature of Equivalent Perception) - (Monteiro, 2013)	Température équivalente (°C)	Equation linéaire établie après régressions multiples en se basant sur des mesures climatiques et des questionnaires	Sensation thermique	Climat sub-tropical (Brésil) - Milieu extérieur	T_a , HR, V_a , T_{mrt} / Aucune donnée personnelle	-Calibration requise dans un autre contexte avec étude de terrain combinant questionnaires et mesures des paramètres climatiques. - Traitement statistique pour déterminer les nouveaux coefficients.	Moyenne échelle (Rue, Quartier, Ville)
	<u>Avantages :</u> - Prend en compte l'ensemble des variables climatiques - Facteurs personnels pris en compte de manière indirecte pour une population spécifique - Indice développé pour un climat chaud et humide - Indice exprimé comme une température ressentie en °C <u>Limites :</u> - Indice applicable uniquement pour le climat et contexte dans lequel il a été défini et validé. Dans un autre contexte, il est difficilement transposable.						
TS (Thermal Sensation) - (Cheng et al., 2012)	Vote de sensation thermique (Sans dimension)	Equation linéaire établie entre les variables climatiques mesurées et les réponses aux votes de sensation thermique	Pas d'échelle associée	Climat sub-tropical (Hong Kong) - Milieu extérieur	T_a , HR, V_a , R_{glo} / Aucune donnée personnelle	-Calibration requise dans un autre contexte avec étude de terrain combinant questionnaires et mesures des paramètres climatiques. - Traitement statistique pour déterminer les nouveaux coefficients.	Moyenne échelle (Rue, Quartier, Ville)
	<u>Avantages :</u> - Prend en compte l'ensemble des variables climatiques - Facteurs personnels pris en compte de manière indirecte pour une population spécifique - Développé pour un climat chaud et humide <u>Limites :</u> - Indice applicable uniquement pour le climat et contexte dans lequel il a été défini et validé. Dans un autre contexte, il est difficilement transposable.						
ET (Effective Temperature) - (Houghton and Yaglou, 1923) (Missenard, 1933)	Température équivalente (°C)	Analyse de régression multiple sur mesures prises en laboratoire	Sensation thermique	Tout type de climat – Milieu intérieur et extérieur	T_a , HR, V_a / Aucune donnée personnelle	Mesure des paramètres climatiques et calcul de l'indice grâce à une formule	Toute échelle

	<u>Avantages :</u> ▪ L'échelle de perception thermique de l'indice peut être adapté au climat (enquêtes de terrain avec mesures des variables climatiques et questionnaires) <u>Limites :</u> ▪ Mesures effectuées en laboratoire ▪ Ne prend pas en compte les variables personnelles ni la mesure de T_{mrt} qui a une grande influence sur le confort thermique (notamment échelle microclimatique)						
HI (Heat Index) - (Rothfusz, 1990)	Température équivalente (°C)	Analyse de régression multiple en termes de température et d'humidité	Stress thermique	Climat chaud - Milieu extérieur	T_a , HR / Aucune donnée personnelle	Mesure des paramètres climatiques et calcul de l'indice grâce à une formule	Grande échelle (Ville, Région)
	<u>Avantages :</u> ▪ Facile d'application, les données requises sont des variables faciles d'accès <u>Limites :</u> ▪ Ne prend pas en compte les variables personnelles ni la mesure de T_{mrt} et de V_a qui ont une grande influence sur le confort thermique						
THI (Temperature-Humidity Index) – (Thom, 1959) (Steadman, 1979)	Température équivalente (°C)	Analyse de régression multiple en termes de température et d'humidité	Stress thermique	Climat chaud - Milieu extérieur	T_a , HR / Aucune donnée personnelle	Mesure des paramètres climatiques et calcul de l'indice grâce à une formule	Grande échelle (Ville, Région)
	<u>Avantages :</u> ▪ Facile d'application, les données requises sont des variables faciles d'accès <u>Limites :</u> ▪ Ne prend pas en compte les effets du vent et du rayonnement, qui sont des paramètres influençant considérablement le confort thermique en extérieur						
Humidex - (Masterson and Richardson, 1979)	Nombre- (Sans dimension)	Modèle empirique	Stress thermique	Climat chaud - Milieu extérieur	T_a , HR / Aucune donnée personnelle	Mesure des paramètres climatiques et calcul de l'indice grâce à une formule	Grande échelle (Ville, Région)
	<u>Avantages :</u> ▪ Facile d'application, les données requises sont des variables faciles d'accès ▪ Indice couramment utilisé par les météorologues et les services de santé du travail au Canada <u>Limites :</u> ▪ Indice empirique formulé avec des hypothèses particulières sous des conditions climatiques spécifiques (Canada). ▪ Ne prend pas en compte les flux radiatifs, la vitesse de vent ou les paramètres personnels (M et I_{cl})						

WBGT (Wet Bulb Globe Temperature Index) – (ASHRAE, 2001) (ISO 7243, 2017)	Température équivalente (°C)	Modèle empirique	Stress thermique	Climat chaud – Milieu intérieur et extérieur	T_w, T_g, T_a / Aucune donnée personnelle	Mesure des paramètres climatiques et calcul de l'indice grâce à une formule	Moyenne échelle (du bâtiment au quartier)
	<u>Avantages :</u> ▪ Indice plus dynamique que l'humidex et l'indice de chaleur ▪ Prend en compte l'ensoleillement et la vitesse de vent indirectement avec la mesure de T_g ▪ Reconnu dans des normes ISO et très utilisé dans le domaine du travail et de l'impact sur la santé <u>Limites :</u> ▪ Nécessite une évaluation du niveau d'activité, de l'habillement et d'autres facteurs personnels pour avoir une bonne interprétation. ▪ Nécessite du matériel de mesure spécifique. Des erreurs peuvent apparaître si les instruments de mesure ne sont pas standardisés et si la calibration n'est pas bien réalisée.						

Avec T_a = Température d'air, HR = Humidité relative, V_a = Vitesse d'air, T_{mrt} = Température radiante moyenne, R_{glo} = Rayonnement solaire global, T_w = Température de bulbe humide en ventilation naturelle, T_g = Température de globe noir, M = Métabolisme et I_{cl} = Isolation vestimentaire

2.7. Conclusion

Dans le but de quantifier le confort thermique en espace extérieur, de nombreux travaux ont été menés en examinant les facteurs climatiques, physiologiques et psychologiques qui ont une influence sur le confort de l'individu. Aussi, un certain nombre d'indices de confort a été établi, dont le calcul permet l'évaluation du confort thermique en espace urbain extérieur, notamment en milieu tropical.

Deux types d'indices peuvent être distingués, les indices rationnels se basant sur le bilan thermique du corps humain et les indices empiriques, basés sur des analyses de régression. Les indices rationnels sont des indices plus complexes, prenant en compte l'ensemble des facteurs affectant le confort thermique. Les indices empiriques sont moins avancés, mais présentent l'avantage d'être plus faciles d'utilisation puisque ne nécessitant souvent que des variables environnementales, facilement mesurables.

Une grande majorité de ces indices sont exprimés en °C, ce qui leur permet d'être facilement interprétés par les acteurs de projets urbains, architectes, urbanistes, etc. Parmi eux, l'indice PET est le modèle de confort urbain le plus utilisé et a fait l'objet de nombreuses comparaisons avec des études de terrain.

Face à l'essor des études du confort thermique en extérieur, un nouvel indice capable d'évaluer et d'expliquer le comportement thermique en conditions climatiques extérieures a été défini : l'UTCI. 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 radiante. Il prend également en compte l'habillement et le métabolisme de la personne. L'UTCI est un indice universel, basé sur un modèle dynamique plus sensible aux variations temporelles et spatiales en extérieur, et qui peut être utilisé pour des environnements chauds ou froids. Il se présente comme un indice prometteur dans l'étude du confort en milieu urbain.

Cet état de l'art sur les modèles de confort urbain a permis de décrire les différents indices existants, applicables en milieu tropical. Le choix de l'indice à utiliser reste toutefois une étape délicate. D'une manière générale, il est plus judicieux de porter son choix sur un indice éprouvé et validé par des études pour un climat similaire afin de pouvoir comparer les résultats, voire d'utiliser plusieurs indices afin de déterminer celui le plus adapté. Quel que soit l'indice sélectionné, la plupart des études menées ont mis en évidence la nécessité de calibrer ces indices localement, notamment concernant l'échelle de perception thermique. En effet, celle-ci peut être bien différente en fonction des climats. Cette différence est d'autant plus marquée pour des climats où des saisons distinctes existent (été, hiver). De plus, les personnes sont plus tolérantes aux conditions de chaleur en milieu chaud et humide qu'en climat tempéré. Les échelles d'origine, comme celle « officielle » définie pour PET, ne devraient pas être utilisées directement en climat tropical mais être calibrées.

De plus, les indices rationnels permettent de quantifier le confort thermique à toutes les échelles (régionale, îlots urbains, etc.) alors que les indices empiriques sont généralement utilisés dans des études à grande échelle, où le microclimat peut être négligé.

En résumé, il n'existe pas de modèle parfait afin de quantifier le confort thermique de l'homme en milieu urbain. Il est nécessaire de comprendre les équations qui régissent chaque modèle et d'identifier celui qui correspond le mieux aux besoins de l'étude. Il n'en reste pas moins que ces indices sont définis comme des outils pertinents de la planification urbaine pour le confort thermique urbain en zone tropicale. Ils sont d'ailleurs intégrés dans de nombreux outils et modèles de simulation numérique permettant de quantifier les effets de différents facteurs sur le climat urbain. Des cartes bioclimatiques connaissent actuellement un fort essor, donnant des orientations aux aménageurs afin de promouvoir les villes durables de demain (Johansson et al., 2014).

Notre étude étant basée sur l'étude du confort thermique à l'échelle du quartier et donc du microclimat, les indices PET et UTCI ont été choisis. L'applicabilité de ces deux indices en climat tropical a été validée par différents auteurs. De plus, ces derniers ont l'avantage de prendre en compte les principaux facteurs physiques et physiologiques affectant le niveau de confort d'une personne en extérieur et de pouvoir être appliqués dans tout type de climat, en toute saison et pour des formes urbaines même complexes. Enfin, leur expression sous forme de température ressentie rend les résultats plus interprétables pour les différents acteurs de la Ville.

Enfin, cet état de l'art a permis de mettre en exergue différentes problématiques liées à l'évaluation du confort thermique extérieur en climat tropical. Les chapitres 3 et 4 suivants s'attacheront donc à lever les différents verrous scientifiques identifiés, notamment en termes de mesure de la T_{mrt} , de méthodologie d'évaluation et de calibration des indices.

CHAPITRE 3. Mesure de la température radiante moyenne en extérieur : entre nécessités et difficultés.

La T_{mrt} est une notion complexe mais essentielle à l'évaluation du confort thermique extérieur qui nécessite d'être étudiée de manière approfondie. Les différentes méthodes existantes permettant de l'estimer en environnement urbain, que ce soit par le biais de la modélisation ou de la mesure sont présentées dans ce chapitre. Une nouvelle mise en œuvre d'une méthode récente mais qui semble prometteuse permettant de calculer et de « cartographier » la T_{mrt} est également proposée.

3.1. Introduction et définition de la température radiante moyenne extérieure

L'état de l'art réalisé dans le chapitre 2 précédent a permis de mettre en évidence que l'un des paramètres affectant le plus le confort thermique en milieu urbain est la température radiante moyenne (T_{mrt}). La part radiative étant importante dans la perception du confort thermique extérieur par les usagers en climat tropical, il est nécessaire de pouvoir la caractériser de manière précise afin d'améliorer la conception des aménagements urbains. Ce paramètre est également inclus dans l'ensemble des indices « rationnels » de confort thermique en milieu urbain tels que l'UTCI ou la PET. Il est donc important de pouvoir disposer d'une valeur de T_{mrt} se rapprochant le plus possible de la réalité afin d'évaluer le confort thermique extérieur.

Bien que le nombre d'études du confort thermique en milieu urbain ne cesse d'augmenter, il n'existe encore aucune méthode standardisée permettant de déterminer précisément la T_{mrt} qui est pourtant l'un des paramètres les plus influents. En effet, bien que nécessaire, l'estimation de la T_{mrt} en extérieur est difficile dans la pratique en raison des morphologies urbaines complexes et de la diversité des flux de rayonnement. Il y a donc un besoin crucial d'évaluer la fiabilité et la précision des différentes méthodes généralement utilisées pour le calcul de T_{mrt} en milieu urbain.

De plus, en milieu urbain, les transferts thermiques conductifs entre l'homme et son environnement n'ont pas d'impact significatif sur la notion de confort thermique. Les échanges de chaleur par convection sont eux plus importants et dépendent notamment de la température d'air et de la vitesse d'air. La mesure de ces variables physiques de l'ambiance ne pose généralement pas de problèmes en extérieur. L'environnement radiatif a lui aussi un impact non négligeable sur le bilan thermique global du corps humain, notamment en cas d'exposition directe d'un individu à un rayonnement solaire important. Les échanges radiatifs sont également dépendants des températures de surface environnantes. Or, l'environnement radiatif extérieur est complexe, composé de nombreux flux de courte et grande longueur d'onde. La température radiante moyenne permet de globaliser l'ensemble des rayonnements de courte et de grande longueur d'onde atteignant le corps humain.

La notion de « température radiante équivalente » a ainsi été introduite afin de représenter les échanges radiatifs complexes entre un individu et son environnement en un seul indice qui a la dimension d'une température. Il s'agit d'une température équivalente.

Pour les études de confort thermique en intérieur, la T_{mrt} est définie comme la « température de surface uniforme d'une enceinte noire imaginaire dans laquelle un occupant échangerait la même quantité de chaleur par rayonnement que dans l'enceinte non uniforme réelle » (ISO 11855-1, 2012).

Cependant, pour le cas des études réalisées en extérieur, la notion de T_{mrt} varie selon les sources et les auteurs (Thorsson et al., 2007) (Kántor and Unger, 2011) (Johansson et al., 2014) (Lai et al., 2017) , bien que tous s'accordent sur le fait que T_{mrt} est une notion quantitative permettant de globaliser les échanges radiatifs entre le corps humain et l'environnement complexe dans lequel il est exposé et de les traduire sous la forme d'une température (voir Figure 3.1).

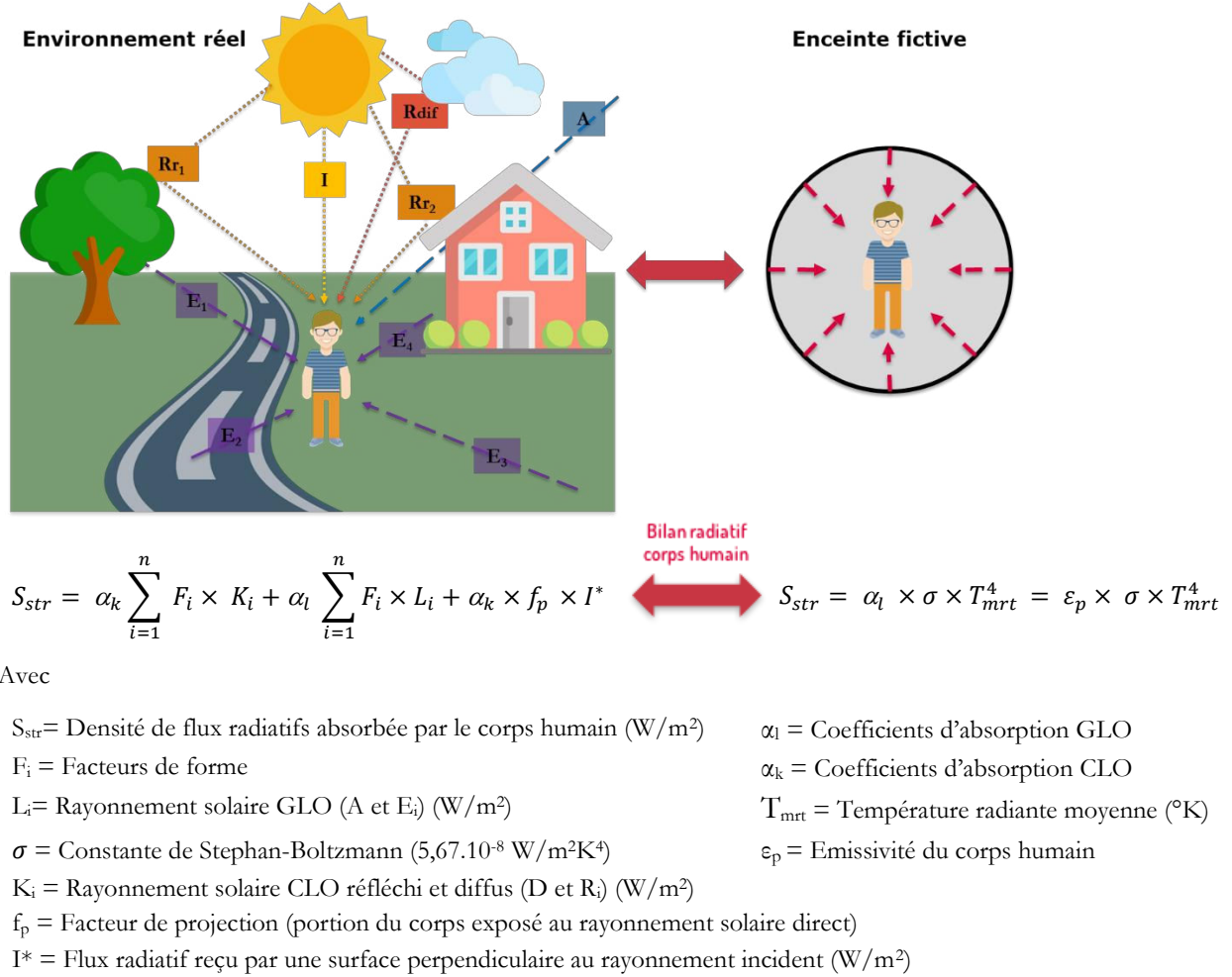


Figure 3.1: Principe de la température radiante moyenne en extérieur : « température moyenne pondérée d'une enceinte qui émettrait la même quantité de radiations que l'environnement urbain ». Source modifiée depuis (Kántor and Unger, 2011)

Les flux radiatifs considérés dans la notion de T_{mrt} sont :

- a) Les flux radiatifs de courte longueur d'onde (CLO) atteignant la basse atmosphère (longueur d'onde comprise entre 0,3 et 3 μm) dont :
 - I = rayonnement solaire direct
 - R_{dif} = rayonnement solaire diffus

- R_r = rayonnement solaire réfléchi (part du rayonnement direct et diffus réfléchi par le sol et les surfaces environnantes)
- b) Le rayonnement de grande longueur d'onde (GLO), dont la longueur d'onde est comprise entre 3 et 100 μm):
 - A = rayonnement atmosphérique (émission thermique provenant du ciel)
 - E = rayonnement de grande longueur d'onde provenant de l'environnement (émission thermique terrestre provenant du sol et des surfaces environnantes)

En se basant sur les travaux menés par (Höppe, 1992) et la norme allemande (VDI, 1998), (Kántor and Unger, 2011) exprime donc la densité de flux radiatif absorbée par le corps humain (S_{str}) de la manière suivante :

$$S_{str} = \alpha_k \sum_{i=1}^n F_i \times K_i + \alpha_l \sum_{i=1}^n F_i \times L_i + \alpha_k \times f_p \times I^*$$

Équation 3-1 : Densité moyenne de flux radiatif absorbée par le corps humain (Kántor and Unger, 2011)

La quantité d'énergie atteignant le corps humain s'exprime comme la somme des flux de courte longueur d'onde (rayonnement solaire diffus, rayonnement solaire réfléchi par les surfaces et le sol) et la somme des flux de grande longueur d'onde émis (GLO), chacun pondéré par le facteur de forme correspondant. De plus, l'une des composantes principales des flux de courte longueur d'onde (CLO) qui apparaît en extérieur est le rayonnement solaire direct. Le rayonnement solaire incident I^* est lui pondéré par le facteur de projection f_p afin de tenir compte de la proportion réelle du corps humain exposée. Ce coefficient dépend de la hauteur solaire ainsi que de la posture et de l'orientation du corps humain. Le Tableau 3.1 suivant donne les valeurs des facteurs de projection f_p en fonction de la hauteur solaire (hs) pour un corps cylindrique en position debout (généralement utilisées dans les études de confort thermique pour des raisons de simplification) :

Tableau 3.1 : Valeurs des facteurs de projection f_p en fonction de la hauteur solaire (hs) pour une personne debout. (Kántor and Unger, 2011)

hs	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
f_p	0,308	0,304	0,292	0,271	0,237	0,205	0,174	0,140	0,108	0,082

Enfin, seule une partie de l'énergie reçue par le corps humain est absorbée. Les différents flux atteignant le corps humain sont donc également pondérés par des coefficients d'absorption, α_k pour les flux CLO et α_l pour les flux GLO. Les valeurs de α_k et α_l sont respectivement égales à 0,7 et à 0,97 dans les études de confort thermique en extérieur. La valeur de α_l équivaut à celle du coefficient d'émission du corps humain habillé (noté ϵ_p) d'après la loi de Kirchhoff.

De plus, d'après la définition même de T_{mrt} , la quantité d'énergie reçue par le corps humain dans l'environnement réel est égale à celle dans un environnement fictif qui est un corps noir ($\epsilon=1$), soit une enceinte isotherme qui émet une énergie dans les GLO équivalente à $\sigma \times T_{mrt}^4$.

La densité de flux absorbée par le corps humain est donc égale à :

$$S_{str} = \alpha_l \times \sigma \times T_{mrt}^4 = \epsilon_p \times \sigma \times T_{mrt}^4$$

Équation 3-2 : Densité de flux radiatif absorbée par le corps humain dans l'enceinte fictive (corps noir). (Kántor and Unger, 2011)

D'après l'équation 2, l'expression de T_{mrt} est donc :

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{\frac{S_{str}}{\epsilon_p \times \sigma}}$$

En remplaçant l'expression de S_{str} par celle de l'équation 1 (environnement réel), on obtient alors d'après (Kántor and Unger, 2011) :

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{\frac{1}{\sigma} \sum_{i=1}^n (L_i + \alpha_k \times \frac{K_i}{\epsilon_p}) \times F_i + \frac{f_p \times \alpha_k \times I^*}{\epsilon_p \times \sigma}}$$

Le calcul de T_{mrt} doit donc tenir compte des surfaces radiantes environnantes et de la part visible du ciel. Afin de le calculer, il est donc nécessaire de connaître les propriétés radiatives des surfaces (émissivité, albédo). La valeur de T_{mrt} dépend également de la personne étudiée, notamment de sa position ou encore de la couleur de ses vêtements. T_{mrt} ne sera pas la même pour une personne assise que pour une personne en position debout et la valeur de T_{mrt} sera plus importante pour une personne portant des vêtements foncés plutôt que des vêtements clairs.

L'importance donnée à chacun de ces flux dans le calcul de T_{mrt} diffère en fonction de l'heure, du moment de l'année et de la localisation. Alors que durant la nuit, les échanges radiatifs se composent exclusivement de flux de grande longueur d'onde, le rayonnement de courte longueur d'onde n'intervient lui que durant la journée et son importance varie en fonction de l'altitude du soleil. Lors d'une journée ensoleillée sans nuage, l'exposition directe au rayonnement solaire sera la principale source d'inconfort thermique notamment en terrain dégagé. En environnement urbain dense, des obstacles peuvent être présents (masques solaires créés par des bâtiments, des protections solaires, des arbres de haute tige, etc.) et ainsi réduire la part liée au rayonnement direct. Cependant, la part liée aux flux radiatifs de grande longueur d'onde de ces mêmes surfaces peut être une source d'inconfort

thermique importante en fonction de leur température de surface, de leur émissivité ou encore de la position de la personne considérée.

Les flux radiatifs sont beaucoup plus importants et plus complexes en extérieur comparé à des environnements intérieurs, et dans des conditions très ensoleillées, T_{mrt} peut atteindre 30°C de plus que la température d'air (Kántor and Unger, 2011).

T_{mrt} est très complexe à calculer dans des environnements urbains puisqu'elle varie dans le temps et dans l'espace, et qu'elle est affectée par la diversité des surfaces. Les principales difficultés résident alors dans l'identification des flux de courte et de grande longueur d'onde ainsi que dans la détermination des différents facteurs de forme associés. En site dégagé, sans aucun obstacle, le calcul se simplifie puisque le sol représente la moitié basse de l'hémisphère et le ciel l'autre moitié soit un facteur de forme égale à 0,5 dans chaque cas.

Néanmoins, il est nécessaire de développer des méthodes simples mais fiables permettant d'évaluer T_{mrt} en extérieur, de déterminer les parts respectives du rayonnement liées aux flux de courte et grande longueur d'onde ou encore de pouvoir détecter d'où proviennent les sources d'inconfort. En effet, une meilleure conception des espaces urbains extérieurs passe par une caractérisation plus précise de l'environnement radiatif.

3.2. Etat de l'art sur les méthodes existantes permettant d'estimer T_{mrt} en extérieur

Dans la littérature, il existe différentes méthodes permettant de déterminer la température radiante moyenne. Certaines d'entre elles sont basées sur une instrumentation permettant de mesurer les flux radiatifs, de manière globale ou en distinguant les flux de courte longueur d'onde de ceux de grande longueur d'onde. D'autres se basent sur la modélisation numérique en 3D de l'environnement radiatif afin de déterminer la T_{mrt} .

3.2.1. Modélisation numérique de T_{mrt}

De nombreux outils de simulation ont été développés ces dernières années afin de quantifier le niveau de confort thermique en extérieur et simuler le champ radiatif en 3D dans des espaces urbains. En effet, la T_{mrt} est devenue un paramètre largement utilisé au niveau international puisqu'elle est l'un des paramètres influençant le plus le confort thermique en milieu urbain et qu'elle entre dans le calcul des principaux indices de confort thermique extérieur comme la PET et l'UTCI.

3.2.1.1. Principaux outils de simulation existants permettant de calculer T_{mrt}

De nombreux outils de simulation permettent à l'heure actuelle d'estimer la valeur de T_{mrt} en extérieur, parmi lesquels on peut citer Autodesk CFD (Autodesk, 2019), CityComfort+ (Huang et al., 2014), CitySim Pro (Robinson et al., 2009), ENVI-met (Bruse, 2004), la suite Honeybee et Ladybug (Roudsari and Pak, 2013), RayMan (Matzarakis et al., 2009), Solene (Miguet, 2000)(Vinet, 2000) ou encore SOLWEIG (Lindberg et al., 2008).

Pour la majorité de ces outils, les données d'entrée nécessaires sont principalement :

- Les données météorologiques (température d'air, humidité relative, température de sol, nébulosité, turbidité atmosphérique, etc.) issues de fichiers météorologiques types comme les fichiers TMY (Typical Meteorological Year), de stations météorologiques de référence ou bien de fichiers recalés avec de la mesure sur site ;
- La localisation géographique et la période de l'année considérée (jour, mois, année) pour laquelle la simulation est lancée ;
- Les données liées à la morphologie urbaine (bâtiments, arbres, etc.) et les caractéristiques des différentes surfaces et matériaux (albédo, émissivité, transmittance, absorptivité, etc.)

Deux principales méthodes de calcul sont utilisées dans les outils de simulation afin de modéliser la T_{mrt} dans les espaces urbains. La première méthode, se base sur la formule de mesure intégrale des flux radiatifs définis par (Höppe, 1992) reprise dans la norme (VDI, 1998), où :

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{\left(\frac{S_{str}}{\varepsilon_p \times \sigma}\right)} - 273,15$$

Équation 3-3 : Calcul de T_{mrt} en fonction de la densité de flux moyenne S_{str} selon la loi de Stefan -Boltzmann

Avec ε_p l'émissivité du corps humain et σ la constante de Stefan -Boltzmann.

Une description plus détaillée de cette méthode de calcul est donnée dans la section 3.2.2.1.1.

Cette méthode est celle utilisée dans les outils tels que Rayman et CitySim Pro.

La seconde formule, couramment utilisée pour le calcul de T_{mrt} en intérieur, consiste à pondérer les températures de surface avec les facteurs de forme correspondants :

$$T_{mrt} = \left[\sum_{i=1}^n F_i \times T_i^4 \right]^{1/4}$$

Équation 3-4 : Calcul de T_{mrt} en fonction de la température de surface T_i et des facteurs de forme F_i

Cette méthode est appliquée dans les outils LadyBug et Envi-Met.

(Naboni et al., 2019) proposent une comparaison entre 5 différents outils en mettant en avant les différentes hypothèses physiques sur lesquelles se basent ces outils pour le calcul de T_{mrt} . Ils ont organisé leur étude en fonction des équations et hypothèses utilisées pour les échanges au niveau du corps humain, les échanges radiatifs de CLO et GLO dans l'environnement urbain ainsi que le calcul des facteurs de vue du ciel et des facteurs de forme (voir Tableau 3.2 ci-dessous).

Tableau 3.2: Description des hypothèses prises pour le calcul de la T_{mrt} dans différents outils (Naboni et al., 2019)

	CitySim Pro	ENVI-met	RayMan	Ladybug Tools	Autodesk CFD
Human Body Radiation Exchange					
Shape/Position	Accounted	Accounted	Simplified	Accounted	Accounted
Shortwave absorption	Accounted	Accounted	Accounted	Accounted	Simplified
Longwave emissivity	Accounted	Accounted	Accounted	Accounted	Simplified
Shortwave Radiation					
Direct radiation	Accounted	Accounted	Accounted	Accounted	Accounted
Diffuse sky radiation	Accounted	Accounted	Accounted	Accounted	Accounted
Diffuse reflected radiation (Buildings)	Accounted	Accounted	Simplified	Simplified	Accounted
Diffuse reflected radiation (Free standing objects)	Accounted	Accounted	Not accounted	Not Accounted	Accounted
Diffuse reflected radiation (Vegetation)	Accounted	Accounted	Simplified	Accounted	Simplified
Diffuse reflected radiation (Ground)	Accounted	Accounted	Simplified	Simplified	Accounted
Sky view factor	Deterministically	Deterministically	Fish-eye photo	Ray Tracing	Deterministically
Surface view factor	Deterministically	Deterministically	Fish-eye photo	Ray Tracing	Deterministically
Longwave Radiation					
Longwave radiation exchange with the sky	Accounted	Accounted	Accounted	Accounted	Accounted
Longwave radiation (Buildings)	Accounted	Accounted	Simplified	Accounted	Accounted
Longwave radiation (Freestanding objects)	Not accounted	Accounted	Not accounted	Accounted	Accounted
Longwave radiation (Vegetation)	Accounted	Accounted	Not accounted	Accounted	Not accounted
Longwave radiation (Ground)	Accounted	Accounted	Simplified	Accounted	Accounted
Transpiration (Vegetation)	Accounted	Accounted	Not accounted	Not accounted	Not accounted
Evaporation (Ground)	Accounted	Accounted	Simplified	Not accounted	Not Accounted
Local Wind Speed	Not accounted	Accounted	Not accounted	Accounted	Accounted
Local Wind Direction	Not accounted	Accounted	Not accounted	Accounted	Accounted
Sky view factor	Deterministically	Deterministically	Fish-eye photo	Ray Tracing	Deterministically
Surface view factor	Deterministically	Deterministically	Fish-eye photo	Ray Tracing	Deterministically

Une comparaison entre 7 outils de simulation permettant de modéliser la T_{mrt} en milieu urbain a également été réalisée par (Guo et al., 2019), en fonction des simplifications prises pour la géométrie du corps humain ainsi que les méthodes utilisées pour la prise en compte du rayonnement CLO et GLO (voir Tableau 3.3) . Les outils développés se basent sur des hypothèses et des modèles de complexité différente pour la prise en compte des échanges radiatifs de CLO et GLO entrant dans le calcul de la T_{mrt} .

Tableau 3.3 : Comparaison entre différents outils de simulation en fonction du détail des modèles choisis afin de représenter la géométrie du corps humain et ceux choisis pour la modélisation du rayonnement CLO et GLO.
Source : (Guo et al., 2019)

Tools	Body Geometry	Shortwave Radiation	Longwave Radiation
CitySim Pro	Detailed	Detailed	Detailed; Longwave radiation for free standing objects, local wind speed and direction unaccounted for.
ENVI-met	Simplified	Detailed	Detailed; Simplified long wave radiation for buildings and free standing objects.
RayMan	Simplified	Simplified; Fisheye SVF	Simplified; Simplified model for exchange with sky, buildings, vegetation. Vegetation transpiration, ground evaporation unaccounted for. Uses Ray-tracing to compute the view factor.
Honeybee & Ladybug	Detailed	Simplified; Vegetation Reflection	Simplified model for exchange with sky, buildings and ground. Vegetation transpiration and ground evaporation is unaccounted for.
AutodeskCFD	Simplified	Simplified, Diffused sky, No other diffusive sources	Detailed; Exchange with sky, vegetation, and evaporation unaccounted for. Simplified exchange with ground. Vegetation transpiration, ground evaporation unaccounted for.
SOLWEIG	Simplified	Detailed (Reflection simplified), SOLWEIG1D: Simplified calculation of globe SVF	Detailed; No vegetation transpiration, ground evaporation accounted for.
TUF3D	Simplified	Detailed direct short-wave irradiance and inter-visibility determined with Ray-tracing	Detailed; Both shortwave (0.2–3.5 μm) and longwave (3.5–100 μm) assumed to be Lambertian.

Il est alors essentiel de comprendre comment les modèles radiatifs ont été définis dans ces derniers. Une description succincte des principaux modèles de rayonnement utilisés dans les outils pour le calcul du bilan des échanges radiatifs en milieu urbain est donnée la section 3.2.1.2. ci-après.

3.2.1.2. Modèles de rayonnement en milieu urbain

Les radiations de courte et de grande longueur d'onde ont un poids important dans le bilan thermique et de nombreux modèles ont été développés afin de calculer ces différents flux radiatifs. Ces modèles peuvent se baser sur des équations empiriques simplifiées ou bien sur des modèles d'échanges radiatifs beaucoup plus détaillés. Le rayonnement est généralement séparé en trois grands groupes dans les outils de simulation du microclimat, à savoir le rayonnement solaire direct, le rayonnement diffus et le rayonnement de grande longueur d'onde (Allegrini et al., 2015). Pour chacun de ces aspects, différents modèles numériques existent et sont présentés ci-après.

3.2.1.2.1. Rayonnement solaire CLO

Le rayonnement solaire CLO est généralement scindé en trois parties dans les modèles : le rayonnement solaire direct, le rayonnement diffus et le rayonnement réfléchi.

3.2.1.2.1.1 Rayonnement solaire direct

Le rayonnement direct est généralement issu des fichiers météorologiques de référence (exemple des fichiers TMY ou données issues d'une station météorologique). Il est également possible de calculer le rayonnement solaire direct en se basant sur des modèles énergétiques, pour lesquels différentes expressions sont données dans la littérature.

De plus, les outils de simulation intègrent généralement des formules permettant de calculer précisément les trajectoires solaires. Le rayonnement solaire incident sur une surface peut ensuite être obtenu en multipliant le rayonnement direct par un facteur de projection.

Enfin, en milieu urbain, les bâtiments se comportent comme des obstacles, bloquent une part non négligeable des rayons provenant du soleil et créent des zones ombragées. Cette part du rayonnement direct est généralement estimée de manière géométrique par le biais de méthodes de projection telles que la projection axonométrique ou sphérique (Yeziro and Shaviv, 1994) (Vinet, 2000) (Robinson and Stone, 2005) ou alors grâce à la méthode du lancer de rayons (Asawa et al., 2008) (Waibel et al., 2017). La méthode du lancer de rayons consiste à tracer un ou plusieurs rayon(s) qui partent de chaque surface de la scène étudiée vers différentes directions aléatoires et de calculer les intersections avec d'autres surfaces. Les effets des masques devront être calculés pour différentes périodes puisque ceux-ci sont dépendants de la position du soleil.

3.2.1.2.1.2 Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus, correspondant à la diffusion du rayonnement dans l'atmosphère, est lui plus difficile à modéliser en raison de sa nature variable (ciel sans nuages, nuageux ou partiellement nuageux). Il peut lui aussi être fourni par un fichier météorologique ou bien être estimé par des modèles de ciel isotropes ou anisotropes (Gros et al., 2011).

Le modèle le plus simple proposé par (Liu and Jordan, 1960) est basé sur une composante diffuse isotrope où le rayonnement total sur une surface est modélisé en prenant comme hypothèse que tout le rayonnement diffus est réparti de manière uniforme sur la voûte céleste.

D'autres modèles de ciel, dits anisotropes, ont été développés afin de mieux représenter la distribution de la radiance sur la voûte céleste, qui est plus importante dans le voisinage du soleil et sur l'horizon. Deux composantes anisotropes (dépendantes de la direction considérée) ont été introduites à savoir

« l'auréole du soleil » (en anglais, « circumsolar ») et « l'éclat de l'horizon » (en anglais « horizon brightness »). Ces modèles anisotropes se classent en deux catégories : ceux à deux composantes de ciel (isotrope + auréole du soleil), comme pour le modèle de Hay (Hay, 1979) et ceux à trois composantes (isotrope + auréole du soleil + éclat de l'horizon), tels que les modèles de Klucher (Klucher, 1979), de Reindl (Reindl et al., 1990) et de Perez (Perez et al., 1987) (Perez et al., 1990).

Comme pour le rayonnement direct, le rayonnement diffus est lui aussi soumis aux effets de masque des bâtiments en milieu urbain. La part effective du rayonnement diffus reçue par une surface est alors bien souvent estimée en utilisant le principe du facteur de vue du ciel (en anglais « Sky View Factor »). Le facteur de vue du ciel est un ratio géométrique donnant la part du ciel visible pour une surface. Ce dernier peut être déterminé de différentes manières : avec la méthode du lancer de rayons, grâce à des méthodes de projection ou encore à l'aide d'une photo « fish-eye » comme pour l'outil RayMan. Pour la méthode du tracer de rayons, le facteur de vue du ciel est alors obtenu en comptant le nombre de tracés partant de la surface étudiée et qui atteint la couche limite supérieure (voute céleste). Contrairement au rayonnement direct, le facteur de vue du ciel pour le diffus reste le même indépendamment du temps (jour, heure, etc.) et n'est donc calculé qu'une seule fois (Frayssinet et al., 2018). Le calcul du facteur de vue du ciel est assez difficile dans des environnements urbains très hétérogènes.

3.2.1.2.1.3 Rayonnement CLO réfléchi

Enfin, en plus de créer des obstacles, l'environnement urbain va également refléter le rayonnement solaire. A l'échelle d'une ville, le rayonnement réfléchi par l'environnement urbain peut être modélisé grâce à des modèles d'albédo urbain (Gros et al., 2011). Cependant, des modèles plus précis sont nécessaires afin de calculer la part du rayonnement piégé entre les bâtiments, en détaillant leur géométrie complexe et les propriétés des matériaux des surfaces constituant la scène étudiée (sol, peintures, arbres, etc.).

Les phénomènes de réflexions sont généralement pris en compte dans les modèles en posant comme hypothèse que l'environnement réfléchit les flux radiatifs de manière isotrope en suivant la loi Lambertienne. Cette hypothèse étant valide pour des matériaux opaques, elle permet ainsi d'utiliser la méthode des radiosités ou des méthodes simplifiées qui en découlent (Robinson and Stone, 2004) (Bozonnet et al., 2005). La méthode dite des radiosités permet de modéliser les inter réflexions entre surfaces diffuses. Ce principe est par exemple appliqué dans l'outil Solene (Vinet, 2000). Cette méthode a été introduite pour la première fois par Hottel (Hottel, 1954) et développée de manière plus détaillée par Gebhart (Gebhart, 1957), dans le but de modéliser les échanges radiatifs GLO dans une enceinte intérieure. Elle repose sur la notion de radiosité d'une surface, soit le flux de rayonnement émis et réfléchi quittant une surface. Cette méthode a été développée en se basant sur différentes hypothèses: les surfaces sont considérées comme grises, lambertiennes (réflexion diffuse uniquement) et opaques

pour le rayonnement GLO ; les densités de flux et les températures de surface sont définies uniformes et enfin le milieu au sein de l'enceinte est considéré comme parfaitement transparent. Plus tard, un algorithme simplifié de la méthode des radiosités, appelée méthode SRA (en anglais, Simplified Radiosity Method) a été proposée par (Robinson and Stone, 2004) et intégré dans certains outils dans le but de déterminer les échanges radiatifs en milieu urbain. En se basant sur la méthode complexe des radiosités, la méthode SRA suppose des surfaces Lambertiennes (réflexions diffuses seulement) et consiste à diviser le ciel en plusieurs facettes ou tuiles (en anglais « patches ») avec une surface occultante principale. L'environnement radiatif extérieur est décomposé en deux hémisphères, séparés par un plan horizontal. Ce principe est par exemple utilisé dans l'outil CitySim Pro afin de traiter les réflexions entre les surfaces de la scène étudiée et celles avec le sol.

Afin de traiter les phénomènes de multi-réflexions, il est alors nécessaire de définir les propriétés radiatives de chaque surface (absorption, réflexion, etc.). De plus, les modèles permettant de traiter les inter-réflexions solaires nécessitent l'évaluation des facteurs de forme entre surfaces. La définition du facteur de forme est purement géométrique et elle représente la part du rayonnement quittant une surface S_i et reçue par une autre surface S_j . Dans les outils de modélisation, ces derniers sont généralement calculés selon deux méthodes : de manière algébrique (exemple de l'analogie de Nusselt) ou grâce à la méthode du lancer de rayons (Beckers and Beckers, 2016).

Enfin, des méthodes simplifiées peuvent également être appliquées, comme dans le logiciel Envi-Met, où la réflexion du rayonnement CLO dans l'environnement est calculée en utilisant un coefficient égal à l'albédo moyen pour les murs des bâtiments.

3.2.1.2.2. Rayonnement GLO

Bien que le rayonnement solaire CLO représente la part la plus importante dans le bilan des échanges radiatifs en milieu urbain, les échanges radiatifs de GLO jouent également un rôle non négligeable notamment au niveau du bilan des échanges radiatifs avec les surfaces (Gros et al., 2011).

3.2.1.2.2.1 Rayonnement atmosphérique

L'un des premiers modèles de rayonnement GLO provenant de l'atmosphère a été proposé par Angström (Ångström, 1915) pour des conditions de ciel clair. En se basant sur les travaux menés par Angström, de nombreux auteurs ont par la suite proposé leurs propres modèles dans le but d'estimer le rayonnement atmosphérique, tels que (Brunt, 1932), (Anderson, 1954), (Swinbank, 1963), (Brutsaert, 1975) ou encore (Crawford and Duchon, 1999). Une comparaison entre les résultats numériques obtenus pour 20 modèles, comptant parmi les plus utilisés au niveau international, et des mesures sur site est proposée par (Kjaersgaard et al., 2007). La quantité rayonnement atmosphérique reçue par une surface est également estimée grâce au facteur de vue du ciel.

3.2.1.2.2.2 Rayonnement GLO provenant de l'environnement

Le calcul des échanges radiatifs GLO dans un environnement urbain est en règle générale similaire à la procédure utilisée pour calculer la part du rayonnement diffus, à savoir la méthode de la radiosité ou une des méthodes simplifiées qui en découlent (SRA, etc.). Cependant, les échanges ont lieu cette fois-ci non seulement avec le ciel mais aussi avec les surfaces des objets de la scène étudiée. Le calcul des facteurs de forme entre surfaces est également une étape cruciale à ce niveau.

Certains outils de simulation ne tiennent pas compte des phénomènes de réflexion en prenant comme hypothèse simplificatrice que les matériaux sont des corps noirs (Asawa et al., 2008) (Gros et al., 2014).

D'autres ont recours à des simplifications. Par exemple, le logiciel Envi-Met utilise des coefficients de réduction et pondère le rayonnement GLO horizontal émis par les murs des bâtiments avec le facteur de vue du ciel (Bruse, 2004).

De plus, le rayonnement GLO émis par les surfaces dépend de leurs températures respectives. Ce couplage implique de nombreuses itérations du modèle thermique et du modèle radiatif jusqu'à convergence, ce qui peut s'avérer très chronophage. Certaines hypothèses simplificatrices sont parfois posées, comme prendre la température des surfaces égale à la température d'air, ou bien à la température donnée par le modèle radiatif sans aucune itération (Yang et al., 2012) ou encore à la température calculée au pas de temps précédent (Robinson et al., 2009).

Il est également nécessaire de définir pour les différentes surfaces solides leurs différentes propriétés radiatives, notamment leur coefficient d'émissivité.

3.2.1.2.3. Synthèse

Comme nous avons pu le voir précédemment, différents modèles existent afin de calculer les échanges radiatifs en environnement urbain et les principales méthodes sont la radiosité et le lancer de rayons. Les phénomènes de réflexion sont eux simplifiés ou détaillés en fonction des outils considérés. De plus, le calcul de ces échanges radiatifs au niveau d'une surface va, lui, dépendre des paramètres physiques des objets de la scène étudiée, tels que l'angle d'incidence entre la surface et les rayons du soleil, le facteur de vue du ciel (en anglais Sky View Factor), les facteurs de forme entre surfaces solides ou encore l'albédo, l'absorption et l'émissivité des différentes surfaces solides.

Pour aller plus loin, il est important de souligner que la prise en compte ou non de certains phénomènes est conditionnée par le choix du modèle développé initialement dans les outils de simulation (modèle radiatif, aérodynamique ou énergétique) (Bozonnet et al., 2013). Par exemple, le modèle radiatif ajouté dans l'outil Envi-met, qui est à l'origine basé sur un modèle aérodynamique avec une discrétisation en maillage grille, ne lui permet pas de traiter les phénomènes d'inter-réflexions d'où l'utilisation de méthodes simplifiées. Enfin, ces outils utilisent souvent des modèles physiques simplifiés afin d'offrir aux

utilisateurs un compromis raisonnable entre précision et temps de calcul. Une validation de ces outils est donc nécessaire afin de vérifier le niveau de précision des simplifications proposées.

3.2.2. Mesures in situ de T_{mrt}

3.2.2.1. Mesure des flux de rayonnement de courte et grande longueur d'onde

3.2.2.1.1. Méthode complexe des trois radiomètres

Une première méthode consiste à mesurer, de manière simultanée, tous les flux de rayonnement atteignant le corps humain, en séparant les flux de courte longueur d'onde de ceux de grande longueur d'onde. Le principe de mesure consiste à diviser l'environnement en six parties à savoir l'Est, l'Ouest, le Nord, le Sud, vers le haut et vers le bas. Trois radiomètres différentiels sont généralement utilisés, chacun mesurant 4 flux radiatifs : rayonnement de courte longueur d'onde entrant, rayonnement de courte longueur d'onde sortant, rayonnement de grande longueur d'onde entrant, rayonnement de grande longueur d'onde sortant (Thorsson et al., 2007) (Kántor and Unger, 2011) (Kántor et al., 2014). La Figure 3.2 ci-dessous illustre le principe de mesure avec les trois radiomètres.



Figure 3.2 : Mesure intégrale des flux radiatifs avec radiomètres (Lai et al., 2017). L'environnement est séparé en directions perpendiculaires afin de représenter le champ radiatif en trois dimensions.

L'instrumentation utilisée est généralement composée de radiomètres de type « Kipp & Zonen » (CNR 1 ou 4). Chaque radiomètre se compose en fait d'une combinaison de deux pyranomètres pour la mesure des flux de courte longueur d'onde et de deux pyrgéomètres permettant de mesurer la part du

rayonnement de grande longueur d'onde. Au total, l'instrumentation comprend donc six pyranomètres et six pyrghéomètres. L'instrumentation est fixée sur un pied à une hauteur de 1.1m du sol.

La méthode de calcul se base sur l'équation décrite dans la norme allemande (VDI, 1998) donnée ci-après, qui consiste à calculer la densité moyenne des flux radiatifs absorbée par le corps humain dans les 6 directions mesurées:

$$S_{str} = \alpha_k \sum_{i=1}^6 K_i \times F_i + \alpha_l \sum_{i=1}^6 L_i \times F_i$$

Équation 3-5 : Calcul de la densité moyenne de flux radiatifs absorbée par le corps humain à partir de la méthode des radiomètres (VDI, 1998)

Avec,

- K_i , les flux de courte longueur d'onde (W/m^2)
- L_i , les flux de grande longueur d'onde (W/m^2)
- F_i , les facteurs de forme entre une personne et les surfaces environnantes
- α_k , le coefficient d'absorption d'une personne habillée de référence face au rayonnement de courte longueur d'onde (valeur standard 0,7)
- α_l , le coefficient d'absorption d'une personne habillée de référence face au rayonnement de grande longueur d'onde ($\alpha_l = \varepsilon_p = 0,97$).

Les flux mesurés doivent donc être multipliés par le facteur de forme correspondant ainsi que par leur coefficient d'absorption respectif.

Le facteur de forme F_i dépend de la position et de l'orientation de celui qui observe. Son calcul est difficile, notamment en extérieur où les formes urbaines sont très complexes. Cependant, des simplifications ont été faites. Le Tableau 3.4 suivant donne les valeurs de facteurs de forme pour les six directions en fonction de la forme et de la position de l'individu de référence. La somme des facteurs de forme doit être égale à 1.

Tableau 3.4: Facteurs de forme F_i en fonction de l'orientation et de la forme. Source : modifié depuis (Kántor and Unger, 2011).

	Est	Sud	Ouest	Nord	Haut	Bas
Personne debout	0,220	0,220	0,220	0,220	0,060	0,060
Personne assise	0,185	0,185	0,185	0,185	0,130	0,130
Sphère	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167

De plus, d'après la loi de Kirchhoff, ε_p est égal au coefficient d'absorption, nommé α_l , d'une personne de référence face au rayonnement de grande longueur d'onde.

Le Tableau 3.5 suivant donne les valeurs courantes des coefficients d'absorption courte longueur d'onde (α_k) et grande longueur d'onde (α_l) pour la peau et les vêtements d'une personne type habillée.

Tableau 3.5: Valeurs des coefficients d'absorption pour le rayonnement de courte et grande longueur d'onde (source : modifié depuis (Kántor and Unger, 2011))

Coefficient d'absorption		Peau	Vêtement	Valeur standard
Rayonnement de grande longueur d'onde	α_l	0,99	0,95	0,97
Rayonnement de courte longueur d'onde	α_k	0,55-0,85	0,4-0,9	0,7

T_{mrt} peut ensuite être calculé d'après l'équation de Stefan-Boltzmann :

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{\left(\frac{S_{str}}{\varepsilon_p \times \sigma}\right)} - 273,15$$

Équation 3-6 : Calcul de T_{mrt} en fonction de la densité de flux moyenne S_{str} selon la loi de Stefan -Boltzmann

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{\left(\frac{\sum_{i=1}^6 F_i \times (\alpha_k \times K_i + \alpha_l \times L_i)}{\alpha_l \times \sigma}\right)} - 273,15$$

Équation 3-7 : Expression de T_{mrt} en fonction de la somme des flux de courte et de grande longueur d'onde obtenue après substitution de S_{str} de l'Équation 3-5 dans l'Équation 3-6

Il existe quand même des incertitudes liées à cette méthode de calcul de T_{mrt} dues à la nature très fluctuante des flux radiatifs ainsi qu'à la sensibilité et précision du radiomètre utilisé (Tan et al., 2013). De plus, la méthode elle-même se base sur une simplification de l'environnement radiatif en six hémisphères et une approximation des facteurs de forme.

Cette méthode reste la plus fiable à l'heure actuelle mais c'est également la plus complexe et la plus onéreuse à mettre en pratique.

3.2.2.1.2. Méthode simplifiée avec un seul radiomètre

Une méthode simplifiée permettant de réduire les coûts liés à l'instrumentation consiste à n'utiliser qu'un seul radiomètre au lieu de trois et de le mettre sur un bras pivotant afin de couvrir l'ensemble des directions (voir Figure 3.3). Néanmoins, cette méthode demande plus de moyens humains et perd

en précision puisque les flux ne sont pas mesurés de manière simultanée en fonction des directions (Kántor and Unger, 2011).

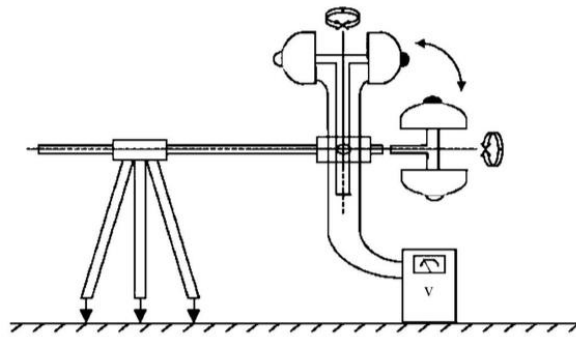


Figure 3.3: Principe de mesure de T_{mrt} avec un seul radiomètre sur bras pivotant (Kántor and Unger, 2011).

Les principales caractéristiques de cette méthode sont :

- Système pivotant constitué d'un seul radiomètre (deux pyranomètres et deux pyrgéomètres)
- Rotation de 90° , dans le sens horizontal et vertical, afin de mesurer les flux dans les 6 directions
- L'instrumentation est placée à une hauteur de 1,1m du sol ;
- Le temps de réponse des capteurs étant approximativement de 3 min, la période de mesure totale est donc de 9 min ;
- La résolution temporelle de T_{mrt} est de 3 min.

Le calcul de T_{mrt} est ensuite réalisé selon la même méthode de calcul que pour les 3 radiomètres présentée dans la partie 3.2.2.1.1. .

Moins précise et plus contraignante que la méthode précédente, cette alternative nécessite que les flux radiatifs soient relativement stables pour permettre la mesure de T_{mrt} vu que les mesures ne sont pas synchronisées.

3.2.2.1.3. Exemples d'application de la méthode des trois radiomètres en milieu urbain

L'ombre, procurée par les bâtiments ou les arbres, est un facteur important afin d'atteindre un niveau de confort thermique acceptable en milieu urbain tropical. Le niveau d'ombre apporté par les bâtiments est généralement quantifié à l'aide d'indicateurs de morphologie urbaine tels que :

- Le ratio d'aspect h/l , avec h la hauteur moyenne des bâtiments et l la largeur de la rue, pour caractériser des géométries de type rue canyon ;

- Le facteur de visibilité du ciel, « Sky View Factor » (SVF), qui représente la portion de ciel visible depuis un point dans la ville, pour des configurations urbaines complexes.

Le SVF est une variable adimensionnelle allant de 0 à 1, indiquant le niveau d'obstruction depuis un point dans un environnement urbain. Ainsi, plus le SVF est proche de 0 et plus la vue est obstruée ; plus le SVF est proche de 1, plus la vue est dégagée.

Un environnement très ombragé peut alors être créé en augmentant le ratio h/l pour une rue canyon ou en diminuant le SVF d'un ensemble urbain complexe.

Ces deux méthodes de création de zones ombragées ont été étudiées d'un point de vue de l'environnement radiatif grâce à la méthode de mesure intégrale du rayonnement avec les trois radiomètres.

(Kántor et al., 2016a) ont réalisé une étude mettant en évidence les effets bénéfiques d'un arbre à haute tige (*Sophora Japonica*), d'un point de vue biométéorologique sur le microclimat, pour le climat chaud tempéré (Köppen= Cfb) de la ville de Szeged, en Hongrie. Pour cela, la T_{mrt} et l'indice de confort thermique en milieu urbain PET ont été calculés. L'étude a été réalisée en été sur une place publique, au cours de journées très ensoleillées. Deux stations relevant les principales variables météorologiques ont été utilisées, l'une placée à l'ombre de l'arbre et l'autre placée en plein soleil.

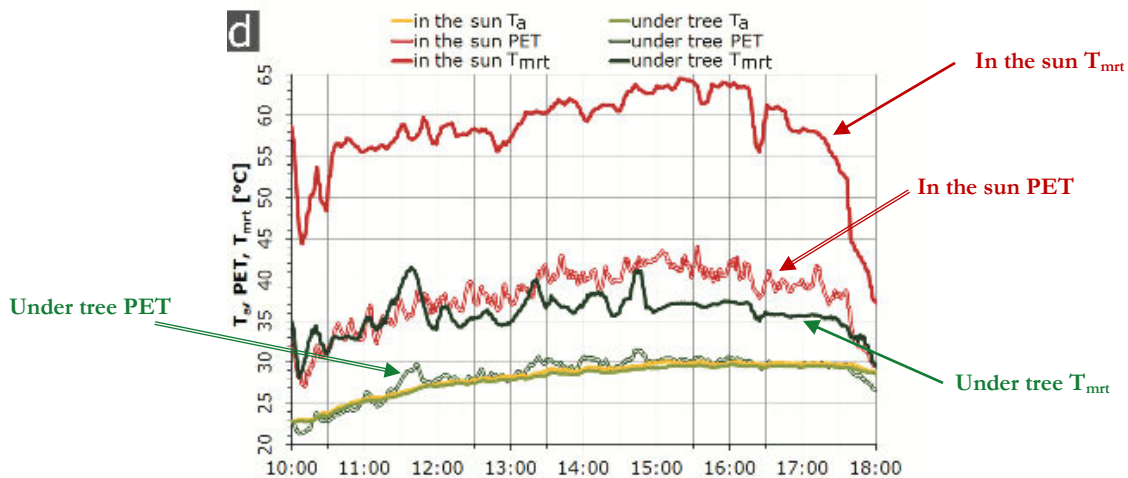


Figure 3.4: Comparaison de l'évolution de la température d'air, de T_{mrt} et de l'indice de confort PET, mesurés sous un arbre et en plein soleil lors d'une journée d'été à Szeged, en Hongrie. (Kántor et al., 2016a)

En comparant les résultats obtenus dans les deux cas, il a été observé que l'impact sur les variables météorologiques classiques n'était que très peu visible puisque la température d'air n'était inférieure que de 0,5°C et que l'humidité n'a augmenté que de 2% à l'ombre, sous l'arbre. Cependant, d'un point de vue biométéorologique, les différences observées sont plus marquées. En effet, la présence de l'arbre permet de diminuer les valeurs calculées de T_{mrt} de plus de 20°C et celles de l'indice PET de presque 10°C, soit jusqu'à deux classes de stress thermique en moins comme le montre la Figure 3.4.

Afin de comprendre d'où pouvait provenir une telle différence, les auteurs ont décidé d'analyser séparément les différents flux composant le bilan radiatif (cf Figure 3.5). Ils ont ainsi démontré que l'arbre diminuait de manière significative le rayonnement de courte longueur d'onde. Le feuillage dense de l'arbre permet de réduire le rayonnement solaire provenant de l'hémisphère supérieur de près de 83% et par conséquent, il permet également de limiter le rayonnement provenant du sol (rayonnement réfléchi de courte longueur d'onde et rayonnement émis de grande longueur d'onde).

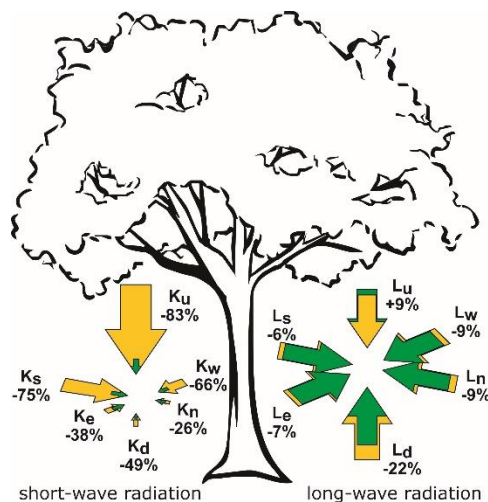


Figure 3.5: Modification des flux radiatifs de courte longueur d'onde (K_i) et de grande longueur d'onde (L_i) obtenue sous l'arbre étudié « *Sophora japonica* » . (Les flèches jaunes, plus claires, représentent la proportion du rayonnement au soleil tandis que les flèches vertes, plus foncées, sont pour le rayonnement sous un arbre). Source modifiée depuis (Kántor et al., 2016a).

(Lai et al., 2017) ont mené une étude visant à analyser la relation pouvant exister entre le SVF et la T_{mrt} dans un milieu urbain caractérisé par une forte densité bâtie, en se focalisant sur l'analyse des flux radiatifs, pour le climat subtropical (Köppen = Cwa) de Hong-Kong. Pour cela, ils ont eu recours à la méthode de mesure des flux radiatifs de courte et grande longueur d'onde dans les six directions avec trois radiomètres, sur différents sites ombragés lors de journées en ciel clair.

Les flux radiatifs de courte longueur d'onde étant principalement liés au rayonnement solaire (direct, diffus et réfléchi), créer de l'ombre permet de réduire cette part du rayonnement et donc de jouer sur la valeur de T_{mrt} . Cependant, en ce qui concerne les flux radiatifs de grande longueur d'onde, les conditions atmosphériques et environnementales du site étudié jouent un rôle prépondérant.

Dans cette étude, les auteurs ont montré que les flux radiatifs composant le calcul de T_{mrt} , notamment la part liée aux flux GLO, sont fortement et positivement corrélés au rayonnement solaire global et à la température d'air de référence locale (issue de la station météorologique la plus proche). D'après leur

étude, 82% des variations observées dans l'estimation de T_{mrt} sont attribués à la température d'air locale, la part restante serait quant-à-elle liée à d'autres facteurs microclimatiques liés à la morphologie urbaine (disposition des bâtiments, matériaux, etc.).

Aussi, cette étude a permis de mettre en évidence qu'une augmentation de 10 W/m^2 des flux radiatifs, qu'ils soient de courte ou de grande longueur d'onde, entraîne une augmentation de T_{mrt} de 1,6 K.

De plus, les résultats obtenus montrent que le rayonnement de grande longueur d'onde provenant de l'environnement proche peut s'avérer aussi problématique que le rayonnement de courte longueur d'onde lorsqu'un site est ombragé. En effet, même si la présence de dispositifs artificiels créant de l'ombre permet de bloquer le rayonnement solaire direct, le rayonnement solaire augmente la température de surface des objets aux alentours. L'absorption de chaleur de l'environnement entraîne une augmentation de la part des flux radiatifs de grande longueur d'onde et, par conséquent, une augmentation de la valeur de T_{mrt} .

A l'ombre, pour un espace urbain bâti dense, les flux radiatifs de grande longueur d'onde liés aux températures de surface de l'environnement proche joue un rôle prépondérant dans le calcul de T_{mrt} .

Il est donc possible de jouer sur la morphologie urbaine ainsi que sur le type de surface afin d'atteindre une valeur de T_{mrt} optimale.

3.2.2.2. Calcul de T_{mrt} à partir de la mesure de la température de globe

3.2.2.2.1. Température de globe noir

Afin de faciliter la mesure et de réduire les coûts d'instrumentation, une seconde méthode consiste à mesurer la température de globe noir et les principales variables météorologiques affectant le confort (vitesse du vent, température d'air, humidité) de manière simultanée afin d'en déduire T_{mrt} .

La formule générale de la température radiante moyenne T_{mrt} à partir de la température de globe noir, donnée dans la norme (ISO 7726, 1998), en convection forcée est la suivante :

$$T_{mrt} = \left[(T_g + 273,15)^4 + \frac{1,1 \times 10^8 \times V_a^{0,6}}{\varepsilon \times D^{0,4}} \times (T_g - T_a) \right]^{1/4} - 273,15$$

Équation 3-8 : Formule générale de T_{mrt} en convection forcée selon la norme (ISO 7726, 1998) à partir de la mesure de température de globe noir

Avec T_g la température de globe noir (°C), V_a la vitesse du vent en (m/s), T_a la température d'air (°C), D le diamètre du globe (en m, ici égal à 0,150 m) et ε l'émissivité du globe (égale à 0,95).

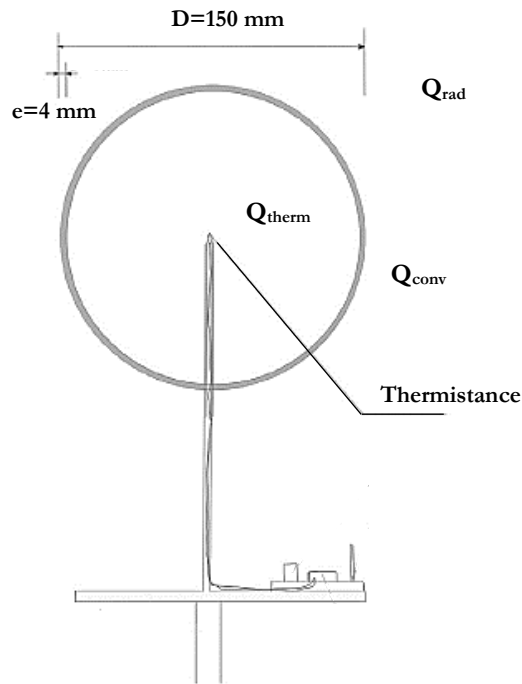


Figure 3.6: Principe de la mesure de température de globe noir. Source : modifié depuis (Guo et al., 2018)

Le globe noir traditionnellement utilisé est en cuivre d'épaisseur 4 mm, de couleur noir mat, avec un diamètre de 150 mm. Le globe contient une sonde de température de type Pt100 (thermistance), comme le montre la Figure 3.6. Cette méthode est traditionnellement utilisée pour les mesures de T_{mrt} en intérieur. La surface du globe est en fait noircie par dépôt de peinture noir mat afin que la surface extérieure du globe absorbe le rayonnement provenant des parois de l'enceinte intérieure. Le diamètre de la sphère peut être différent, cependant les formules exprimant T_{mrt} sont fonction du diamètre et celles données par la norme (ISO 7726, 1998) ont été établies pour une sphère de diamètre égale à 0,150 m. La méthode de calcul de T_{mrt} donnée par la norme (ISO 7726, 1998) amenant à l'Équation 3-8, qui est détaillée en Annexe 11.

Lorsque l'équilibre est atteint, la température mesurée au centre du globe représente en fait la moyenne pondérée de T_{mrt} et de T_a , résultant des échanges convectifs et radiatifs entre l'environnement et la surface du globe. Plus le vent est fort, plus la valeur mesurée de T_g se rapproche de T_a . A contrario, T_g équivaut à T_{mrt} lorsqu'il n'y a pas de mouvements d'air.

Le capteur à globe noir est traditionnellement utilisé dans les études de confort en milieu intérieur, où il donne une bonne approximation de la valeur de T_{mrt} lorsque les flux de chaleur radiatifs sont uniformes. Cependant, les études précédentes ont montré que ce capteur n'était pas adapté pour des mesures dans les conditions extérieures (Spagnolo and De Dear, 2003) (Johansson et al., 2014). En

effet, en extérieur, les conditions de rayonnement et de vent fluctuent rapidement et du fait de son diamètre trop important, le globe noir utilisé traditionnellement peut prendre 20 à 30 minutes avant d'atteindre l'équilibre. Il n'a donc pas le temps d'atteindre son équilibre en extérieur. Ainsi, afin de pouvoir enregistrer ces variations soudaines dans le calcul de T_{mrt} , le capteur globe doit être de plus petite taille afin de réduire son temps de réponse. Le risque est que T_g soit plus affecté par les flux convectifs que par les flux radiatifs. En effet, plus le diamètre de la sphère est petit, plus grande est l'influence de la température et de la vitesse d'air, ce qui provoque ainsi une mesure moins précise de la température radiante moyenne.

De plus, les caractéristiques du globe posent divers problèmes :

- La couleur noire surestime l'absorptivité du rayonnement de courte longueur d'onde comparé à une personne type habillée en extérieur.
- La forme sphérique du globe suppose que les flux radiatifs sont absorbés de manière égale dans chaque direction. Il ne permet pas donc pas de représenter précisément les charges radiatives affectant une personne de référence se tenant debout, position pour laquelle les flux latéraux sont plus importants.

Bien que non recommandé en extérieur, (Kántor et al., 2014) ont développé des fonctions de correction entre les valeurs de T_{mrt} calculées par la méthode du globe noir et celles calculées avec la méthode des radiomètres pour le climat subtropical humide (Köppen= Cwa) de la ville de Huwei à Taïwan (latitude 23,7°N). Leur but était de pouvoir comparer de manière fiable des bases de données déjà existantes sur le confort thermique en milieu urbain même si celles-ci contenaient des valeurs de T_{mrt} calculées selon des méthodes de mesure différentes. Les fonctions proposées ont permis de réduire les différences observées entre les deux méthodes de manière significative pour leur étude à Taïwan. Cependant, l'application de ces fonctions de correction sur une base de données issues d'études de confort thermique réalisées en Hongrie (climat chaud tempéré, Köppen= Cfb) a montré ses limites. Ces fonctions de correction ne doivent pas être utilisées dans un contexte climatique totalement différent.

3.2.2.2.2. Température de globe gris

Afin de pallier les problèmes énoncés du globe noir, (Thorsson et al., 2007) ont trouvé qu'une balle de tennis de table de diamètre 40 mm, d'épaisseur 1 mm, peinte en gris mat (RAL 7001) et contenant une sonde de température Pt100 donne des résultats plus précis que le globe noir, même s'il surestime quelque peu T_{mrt} lorsque les mesures sont réalisées à l'ombre et sous-estime T_{mrt} en plein soleil (cf Figure 3.7). Le gris moyen permettrait de mieux représenter la surface extérieure d'une personne habillée (ASHRAE, 2001). Sa plus petite taille permet de réduire le temps de réponse du globe à moins de 5 min environ, permettant de ne pas attendre 30 min comme pour le globe noir afin d'atteindre « l'équilibre ». Un pas de temps de mesure moyenné à 5 min est cependant recommandé afin de limiter

les effets liés aux variations rapides des flux radiatifs et de la vitesse de vent (Thorsson et al., 2007) puisque ce globe y est très sensible.



Figure 3.7: Capteur globe gris adapté aux études de confort en extérieur (Thorsson et al., 2007)

Le principe consiste alors à calculer T_{mrt} à partir de la formule générale de T_{mrt} en convection forcée selon la norme (ISO 7726, 1998) précédente (Équation 3-8) en remplaçant les valeurs du diamètre et d'émissivité du globe noir par celles du globe gris :

$$T_{mrt} = \left[(T_g + 273,15)^4 + \frac{1,1 \times 10^8 \times V_a^{0,6}}{\varepsilon \times D^{0,4}} \times (T_g - T_a) \right]^{1/4} - 273,15$$

Équation 3-9 : Formule de T_{mrt} adaptée selon la norme (ISO 7726, 1998) à partir de la mesure de température de globe gris

Avec T_g la température de globe gris (°C), V_a la vitesse du vent en (m/s), T_a la température d'air (°C), D le diamètre du globe (en m, ici égal à 0,040 m) et ε l'émissivité du globe (égale à 0,97).

Des études ont montré que l'utilisation de la formule donnée dans la norme (ISO 7726, 1998), développée à l'origine pour les études de confort thermique en intérieur avec le globe noir, n'était pas adaptée pour les études en extérieur avec le globe gris. Le coefficient de convection moyen dépend des caractéristiques du globe utilisé, à savoir le matériau et les dimensions du globe.

La formule de T_{mrt} utilisée avec le globe gris nécessite une validation et une calibration en extérieur.

3.2.2.2.3. Calibration de la formule de T_{mrt} en extérieur pour le globe gris

(Thorsson et al., 2007) ont réalisé une étude comparative entre trois méthodes permettant de déterminer la température radiante moyenne à savoir les 3 radiomètres, le globe gris et l'outil de modélisation Rayman. L'étude s'est déroulée sur une place publique à Gothenburg, en Suède (Latitude 57°), caractérisée par un climat tempéré chaud (classification Köppen= Cfb). Les courbes d'évolution

de T_{mrt} obtenues lors d'une journée ensoleillée en Octobre (en automne) pour chacune des méthodes sont présentées dans la Figure 3.8 ci-après.

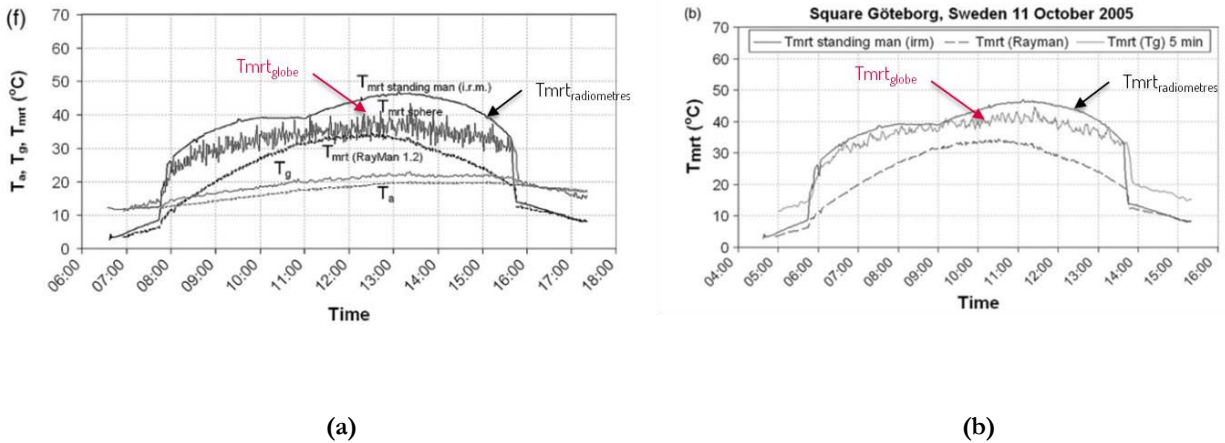


Figure 3.8: Évolution des différentes températures obtenues pour T_{mrt} selon les 3 méthodes (a) avant calibration de la formule de T_{mrt} (formule norme ISO7726 : 1998) et (b) après calibration de la formule du globe gris. Les résultats sont obtenus pour une journée ensoleillée. (Thorsson et al., 2007)

Les valeurs de T_{mrt} obtenues sont différentes en fonction de la méthode utilisée bien qu'elles suivent la même tendance. Les valeurs maximales de T_{mrt} sont obtenues en début d'après-midi entre 13h et 14h pour la méthode des radiomètres et du globe gris. La courbe d'évolution de T_{mrt} pour le globe gris montre des valeurs de T_{mrt} plus faibles que celles obtenues avec la méthode des radiomètres. De plus, on constate que ces valeurs fluctuent rapidement au cours du temps. Ces fluctuations sont en fait liées à la méthode de mesure elle-même et au calcul de T_{mrt} . Les auteurs ont en effet montré qu'il y avait une dispersion plus importante pour les valeurs de T_{mrt} estimées avec la méthode du globe gris et que cela pouvait s'expliquer par le fait que la température et la vitesse d'air soient, elles, mesurées de manière instantanée alors qu'il y a un temps de réponse pour le globe gris. De plus, le calcul de T_{mrt} tient compte des valeurs de la vitesse de vent, qui fluctuent rapidement en milieu urbain. En comparaison, les valeurs de T_{mrt} obtenues avec la méthode des radiomètres sont plus stables.

Les auteurs ont néanmoins observé que les oscillations observées au pas de temps de la minute sont « lissées » en moyennant les valeurs à un pas de temps de 5 min. Ce pas de temps permet notamment de diminuer les effets dus au changement rapide des conditions de vitesse de vent.

Afin de réduire les écarts observés et ainsi améliorer la précision du globe gris, la formule exprimant T_{mrt} en fonction de la température de globe gris a été calibrée en utilisant la méthode de mesure 3D du rayonnement global de courte et grande longueur d'onde (méthode des 3 radiomètres) comme référence, menant à la nouvelle formule suivante :

$$T_{mrt} = \left[(T_g + 273,15)^4 + \frac{1,335 \times 10^8 \times V_a^{0,71}}{\varepsilon \times D^{0,4}} \times (T_g - T_a) \right]^{1/4} - 273,15$$

Équation 3-10 : Equation de T_{mrt} calibrée pour le climat tempéré (Köppen= Cfb) de la ville de Gothenburg, en Suède (Latitude 57° 42' N) par (Thorsson et al., 2007)

Avec T_g la température de globe gris (°C), V_a la vitesse du vent en (m/s), T_a la température d'air (°C), D le diamètre du globe (en m, ici égal à 0,04 m) et ε l'émissivité du globe (égal à 0,97).

Les résultats obtenus avec la formule sont valides pour V_a compris entre 0,1 and 4,0 m/s et un rayonnement solaire compris entre 100 et 850 W/m². Elle peut être utilisée dans des études présentant un climat similaire de type tempéré et pour une latitude proche de celle de l'étude.

Après calibration, la différence observée entre la méthode des radiomètres et celle du globe gris est réduite. Les écarts restants seraient en partie liés à la couleur du globe gris qui sous-estime légèrement le rayonnement de courte longueur d'onde et les auteurs suggèrent de choisir une couleur avec un albédo légèrement plus faible. Ces écarts peuvent aussi être dus à des erreurs d'instrumentation ou encore à la différence de forme choisie : forme sphérique pour la méthode du globe et personne debout pour celle des radiomètres.

(Tan et al., 2013) se sont basés sur l'approche méthodologique décrite par (Thorsson et al., 2007) pour développer leur propre formule calibrée de T_{mrt} à partir de la méthode de mesure des globes gris pour le climat tropical de Singapour (Köppen = Af) après avoir observé un écart important entre les valeurs de T_{mrt} obtenues pour les deux méthodes (voir Figure 3.9).

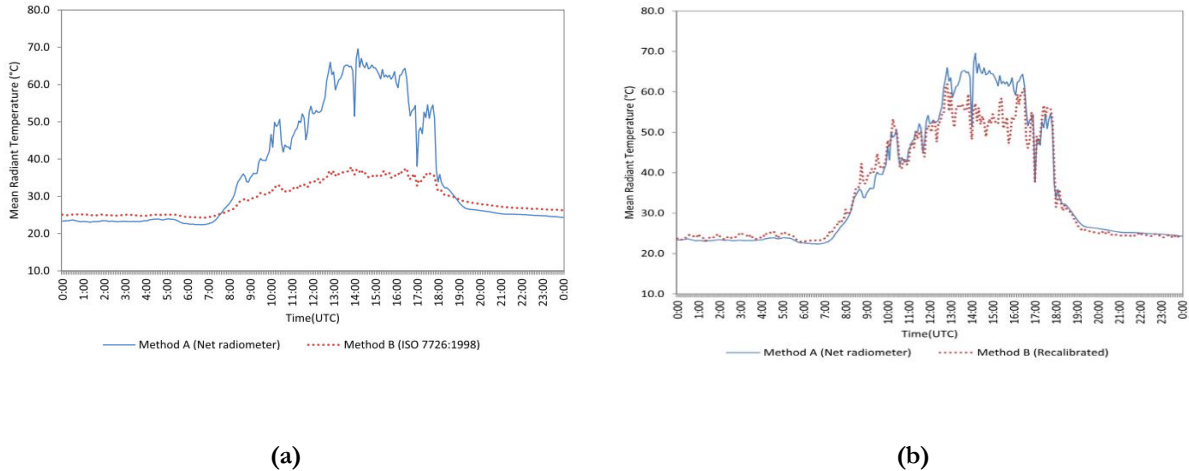


Figure 3.9: Évolution de T_{mrt} obtenue pour la méthode des radiomètres et du globe (a) avant calibration et (b) après calibration de la formule de T_{mrt} du globe gris. Les résultats sont obtenus pour une journée ensoleillée en toiture, à Singapour (Climat Tropical équatorial). (Tan et al., 2013)

Ils ont ainsi constaté une légère surestimation de T_{mrt} quand il n'y a pas de soleil et une sous-estimation considérable de T_{mrt} lorsque le rayonnement est important, avec un écart pouvant atteindre 30°C. Ils ont tiré comme conclusion que le coefficient de convection de la formule de T_{mrt} de la norme (ISO 7726, 1998) n'était pas représentatif des conditions extérieures en milieu tropical et ont calibré la formule pour le climat de Singapour. La formule calibrée obtenue est la suivante :

$$T_{mrt} = \left[(T_g + 273,15)^4 + \frac{3,42 \times 10^9 \times V_a^{0,119}}{\varepsilon \times D^{0,4}} \times (T_g - T_a) \right]^{1/4} - 273,15$$

Équation 3-11 : Equation de T_{mrt} calibrée pour le climat de type forêt tropicale humide (Köppen= Af) de Singapour (latitude 1° 17' N) par (Tan et al., 2013)

Avec T_g la température de globe gris (°C), V_a la vitesse du vent en (m/s), T_a la température d'air (°C), D le diamètre du globe (en m, ici égal à 0,04 m) et ε l'émissivité du globe (égale à 0,97).

La nouvelle formule est validée pour des conditions extérieures typiques à Singapour, soit des vitesses de vent comprises entre 0,1 et 4,0 m/s et un rayonnement solaire maximum de 1 300 W/m².

Après calibration, une légère sous-estimation de T_{mrt} avec le globe gris est toujours observée à certains moments de la journée, lorsque les flux radiatifs de courte longueur d'onde augmentent. L'albédo serait peut-être un peu trop élevé comme pour l'étude précédente et les auteurs suggèrent eux-aussi une nuance plus foncée de gris.

Récemment, une étude a été menée dans la ville de Chandigarh, en Inde, caractérisée par un climat de type subtropical humide (classification Köppen= Cwg) dans trois espaces urbains dégagés avec des caractéristiques différentes et pour trois différentes saisons (Manavvi and Rajasekar, 2020). Le but de cette étude visait dans un premier temps à comparer la méthode de mesure intégrale des flux radiatifs dans les six directions avec la méthode du globe gris en utilisant différentes équations calibrées dans d'autres pays (issues de la littérature). Les différentes équations utilisées comprenaient l'équation donnée dans la norme (ISO 7726, 1998) ainsi que les deux équations calibrées par (Thorsson et al., 2007) et (Tan et al., 2013) présentées précédemment. Dans un second temps, ils ont calibré et validé le coefficient de convection moyen du globe gris, qui compose la formule donnant T_{mrt} en fonction de T_g , pour leur climat. Pour leur étude, les auteurs ont choisi la méthode alternative aux 3 radiomètres, en n'utilisant qu'un seul radiomètre avec un système de rotation.

Ils ont montré que la formule issue de la norme (ISO 7726, 1998) et celle développée par (Thorsson et al., 2007) en climat tempéré sous-estimaient de manière non négligeable la valeur de T_{mrt} , en comparaison avec les valeurs obtenues avec la méthode utilisant le radiomètre (écart médian proche de 13°C). A contrario, la formule développée par (Tan et al., 2013) donnait des valeurs surestimées de

T_{mrt} (écart médian de 14.8°C). Ils proposent alors l'équation suivante pour un espace urbain similaire, situé en climat de type subtropical humide :

$$T_{mrt} = \left[(T_g + 273,15)^4 + \frac{1,5 \times 10^9 \times V_a^{0,93}}{\varepsilon \times D^{0,4}} \times (T_g - T_a) \right]^{1/4} - 273,15$$

Équation 3-12 : Equation de T_{mrt} calibrée pour le climat subtropical humide (Köppen= Cwg) de Chandigarh, en Inde (latitude 30° 44' N), proposée par (Manavvi and Rajasekar, 2020).

Cette formule est valide pour des conditions de vent comprises entre 0,1 et 4,0 m/s et un rayonnement solaire incident maximal de 950 W/m².

A l'heure actuelle, encore peu d'études ont validé la méthode des globes et calibré la formule permettant de calculer T_{mrt} en milieu urbain tropical et aucune pour l'hémisphère Sud.

3.2.2.3. Comparaison entre les principales méthodes de mesure de T_{mrt} en extérieur

Les auteurs Kántor et Chen ont réalisé une comparaison entre les trois principales méthodes de mesure permettant de déterminer la température radiante moyenne pour le climat subtropical humide de la ville de Shanghai (Kántor and Chen, 2017). Leur étude avait notamment pour objectif d'évaluer les différences pouvant exister entre les méthodes de mesure les plus courantes de la T_{mrt} sous différentes conditions expérimentales. Le matériel utilisé comprenait deux thermomètres pour la mesure de température de globe, en acrylique, de diamètre 38 mm (balle de ping-pong), l'un peint en noir, l'autre en gris ainsi qu'une station de mesure équipée de trois radiomètres Kipp & Zonen CNR 4.

Le calcul de T_{mrt} a été effectué pour la méthode des globes selon deux formules :

1. La formule originale de la norme (ISO 7726, 1998) pour le globe noir, citée dans l'Équation 3-8 ;
2. La formule développée par (Thorsson et al., 2007) pour le globe gris avec la balle de tennis, donnée par l'Équation 3-10.

Pour la méthode avec les radiomètres, la formule développée par Höppe (1992) et reprise par la norme allemande (VDI, 1998) a été appliquée, en utilisant les facteurs de forme pour une personne debout et pour une sphère (Voir Équation 3-7).

Les auteurs ont montré que durant la journée, lorsque l'instrumentation est exposée au rayonnement solaire direct, les méthodes donnent des valeurs de T_{mrt} différentes alors que durant la nuit, lorsqu'il n'y a plus que des flux radiatifs de grande longueur d'onde, les valeurs de T_{mrt} obtenues pour les trois

méthodes sont relativement proches. En journée, les valeurs de T_{mrt} obtenues à partir du globe peint en noir sont plus élevées que celles calculées à partir de la méthode du globe gris.

De plus, les valeurs de T_{mrt} estimées par la méthode des globes fluctuent énormément durant la journée comparée à la nuit. Le phénomène observé est lié aux fluctuations de la température du globe, affectée par un vent fort et très fluctuant.

La plus grande correspondance avec la valeur de T_{mrt} dite de référence, calculée grâce à la mesure intégrale des flux radiatifs par les radiomètres, est obtenue pour la formule modifiée de T_{mrt} donnée par (Thorsson et al., 2007) pour le globe gris.

Enfin, la variabilité observée dans les valeurs obtenues pour T_{mrt} en fonction des méthodes de mesure utilisées met en évidence le besoin urgent d'une méthode standardisée pour la mesure de T_{mrt} en extérieur et l'étude du confort thermique en milieu urbain en général.

3.2.2.4. Une nouvelle méthode de mesure : « Radiant Ambience Imaging »

Afin de pallier aux problèmes de précision et de temps nécessaire à la stabilisation de la mesure lors de l'estimation de T_{mrt} pour des milieux urbains complexes, (Hatefnia et al., 2017a) propose une nouvelle méthode innovante: la méthode « Radiant Ambience Imaging » (RAI).

La méthode RAI s'inspire de la méthode de « sphère infrarouge » (Infrared Sphere Method) présentée par (Leung and Ge, 2013), qui est quant à elle basée sur l'approche « Nusselt Analog ». Les auteurs avaient utilisé une sphère en métal poli de faible émissivité et de deux capteurs infrarouges permettant la mesure de la température de surface moyenne. Les limites de cette méthode étaient multiples. Outre le fait que la sphère était fabriquée en acier inoxydable qui n'est pas le matériau le plus réfléchissant, leur méthode, utilisée en intérieur, excluait volontairement le rayonnement de courte longueur d'onde d'où l'utilisation des capteurs infrarouges. Cette méthode reste donc une approximation assez grossière de l'ensemble du champ radiatif existant.

La méthode RAI tente de résoudre les limites évoquées en se basant sur deux principes clés, qui sont:

- La thermographie avec la prise d'images infrarouge (IR) et HDR (high dynamic range) au-dessus d'un hémisphère en métal poli de faible émissivité ;
- Suivie d'une méthode de traitement numérique appelée « Numerous Vector » (NV), analogue à la méthode Nusselt et qui consiste à projeter les objets environnants sur une sphère centrée sur le point d'étude (Hatefnia et al., 2017b).

La Figure 3.10 ci-dessous illustre le principe d'instrumentation utilisé pour la mesure de T_{mrt} .

L'hémisphère est placé à 1,1m du sol, correspondant à la hauteur moyenne du centre de gravité du corps humain pour un adulte. La caméra est quant à elle placée à 0,5m au-dessus de l'hémisphère. Le matériau choisi pour l'hémisphère est du métal poli en raison de sa faible émissivité, environ 0,03, pour

une grande gamme de longueur d'onde, lui permettant de refléter la majorité du rayonnement reçu. Dans leur étude, la caméra IR choisie était une FLIR One, couvrant une gamme de longueur d'onde dans l'IR entre 8 et 15 μm .

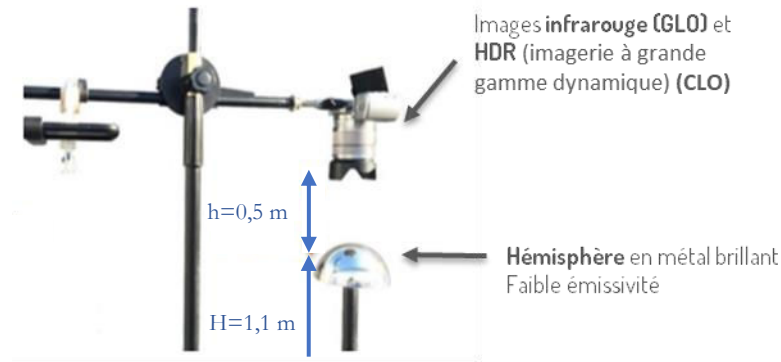


Figure 3.10: Principe de mesure de T_{mrt} selon la méthode RAI (Hatefnia et al., 2017a).

Pour cette méthode, deux types d'image sont requis :

- Une image IR pour les flux radiatifs de grande longueur d'onde ;
- Une image HDR pour prendre en compte les flux de courte longueur d'onde provenant des objets environnants.

L'image HDR est généralement obtenue à l'aide d'un appareil photo avec capteurs CCD (Charge-Coupled Device, en français « dispositif à transfert de charges »). Le principe consiste alors à convertir les valeurs de luminance en valeur radiative pour chaque point en se basant sur l'efficacité lumineuse de la lumière visible en ce point, qui dépend de l'échelle de couleurs. Les couleurs de la photographie HDR exprimées en RVB (Rouge, Vert, Bleu) donnent les longueurs d'onde principales.

La méthode d'analyse numérique utilisée pour le traitement des images obtenues est basée sur la méthode NV (Hatefnia et al., 2016). Une sphère est placée au point d'intérêt, qui est également le centre de l'hémisphère. Un nombre de points N sont distribués de manière homogène sur la sphère. La part des points à l'intérieur de chaque surface découpée correspond au facteur de forme de la surface. De plus, chaque point situé sur la sphère peut être affecté aux surfaces environnantes réelles.

Les auteurs ont constaté qu'un nombre de 10 000 points étaient suffisants et nécessaires afin d'obtenir des résultats suffisamment précis. Ils ont alors testé leur méthode en environnement intérieur ainsi qu'en semi-extérieur, sur un balcon exposé au rayonnement solaire direct. Un exemple de série d'images obtenues après traitement numérique, montrant la répartition des flux radiatifs CLO et GLO ainsi que la densité de flux moyenne S_{str} est donné en Figure 3.11.

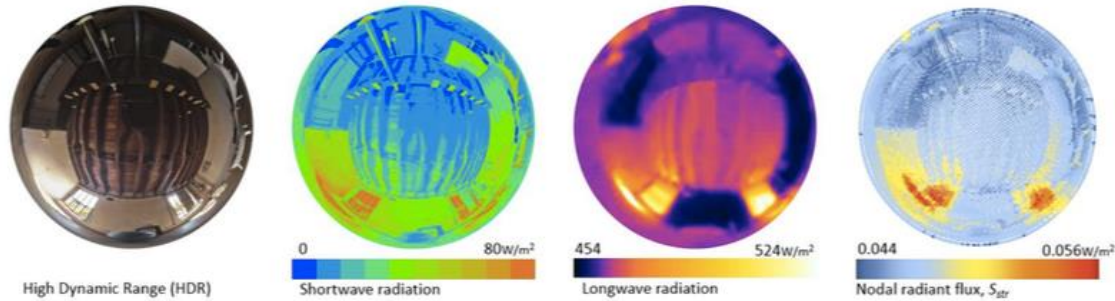


Figure 3.11 : Exemple de résultats obtenus avec la méthode RAI montrant une « cartographie » de la densité de flux radiatifs CLO (shortwave), GLO (longwave) et globale (S_{str}) en milieu intérieur. (Hatefnia et al., 2017a)

Une des limites de cette méthode est que la caméra IR et l'appareil photo, placés au-dessus du miroir hémisphérique, ne prend pas en image toute la surface de l'hémisphère et ne permet pas d'avoir la part relative aux surfaces proches du sol et le sol lui-même. Les auteurs ont montré que le champ de vue de la caméra dépend de la distance H entre la caméra et l'hémisphère. Plus la caméra est éloignée et plus le champ de vue est important, permettant de prendre en compte des surfaces proches du sol. Les flux radiatifs des parties du sol non prises en compte par les images IR et HDR sont approximés par ceux des points situés aux extrémités de l'hémisphère.

Néanmoins, les avantages de cette méthode sont nombreux. Elle peut être utilisée autant en environnement intérieur qu'en milieu urbain extérieur puisque la mesure reste fiable même en pleine exposition solaire ou en présence de surfaces avec des gradients de température complexes. En outre, contrairement à la méthode des globes, elle ne nécessite pas de temps de stabilisation, nécessaire pour atteindre l'équilibre. Elle permet également de s'affranchir des effets directs de la température d'air et du vent sur les valeurs de T_{mrt} mesurées. De plus, cette méthode permet non seulement d'estimer une valeur moyenne de T_{mrt} au point étudié, mais aussi d'avoir une « image » de la distribution des différents flux de rayonnement (courte et grande longueur d'onde). Elle permet d'obtenir la part radiative liée à chaque objet et donc d'identifier rapidement les sources radiatives pouvant créer un inconfort thermique sur un individu dans un environnement donné. Elle permet d'analyser de manière plus précise les effets du soleil ou encore les problèmes d'asymétrie thermique. Enfin, le calcul des facteurs de forme est simplifié, et ce même en environnement urbain complexe, grâce à la méthode NV proposée.

Mais cette méthode est encore peu éprouvée et présente de nombreuses difficultés dans sa mise en œuvre en site extérieur ainsi que dans le traitement des données, comme nous allons le voir dans la section 3.3. suivante.

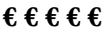
3.2.2.5. Synthèse sur les méthodes de mesure de T_{mrt} en extérieur

La méthode la plus précise est celle de la mesure simultanée du rayonnement de courte et grande longueur d'onde mais c'est également la méthode la plus onéreuse et la plus complexe à déployer en environnement urbain. De plus, elle ne permet pas de disposer d'informations sur l'emplacement exact de la source radiative la plus influente. Ainsi, même si cette méthode permet d'obtenir une bonne mesure globale, elle ne permet pas une compréhension fine des phénomènes, telle que la détermination de la paroi contribuant le plus à l'inconfort.

L'utilisation de la méthode du globe gris est, quant à elle, plus simple et moins chère mais la formule permettant de calculer T_{mrt} en fonction de la température du globe nécessite d'être calibrée en extérieur et la référence choisie est basée sur la méthode des radiomètres. Il devient donc difficile de calibrer la formule de T_{mrt} sans un budget conséquent. De plus, utiliser une formule calibrée dans une autre étude, avec un contexte climatique et un environnement urbain différent, présente des risques. Le recours à la méthode du globe noir, traditionnellement utilisée en intérieur, est à éviter en extérieur et ce dans la mesure du possible, en raison de l'ensemble des inconvénients liés à ses caractéristiques dont sa couleur noire et surtout son diamètre. La nouvelle méthode RAI, bien que récente et encore peu éprouvée, présente de son côté un double intérêt. D'une part, elle permet de simplifier le calcul des facteurs de forme (très complexes en milieu urbain dense) et d'autre part, elle permet d'obtenir une répartition spatiale des flux radiatifs ainsi que de la T_{mrt} . Cette « image » de T_{mrt} conduirait alors à une analyse plus fine du champs radiatif affectant le corps humain. Elle permettrait ainsi de remonter aux éléments responsables de la sensation d'inconfort thermique et de contribuer à l'amélioration de l'aménagement des espaces urbains. C'est pour ces différentes raisons que nous avons voulu lancer une expérimentation en milieu urbain tropical, en se basant sur le principe de la méthode RAI.

Le Tableau 3.6 ci-dessous liste l'ensemble des avantages et inconvénients identifiés au sein de la revue littéraire réalisée sur la mesure de T_{mrt} en extérieur.

Tableau 3.6: Avantages et inconvénients des différentes méthodes permettant d'estimer la valeur de T_{mrt} en milieu urbain

Méthode	Avantages	Limites	Précision	Coût
3 radiomètres	▪ Méthode la plus précise et la plus fiable ▪ Methodologie recommandée et décrite dans la norme allemande (VDI, 1998) ▪ Mesure intégrale des flux en 3D ▪ Permet de distinguer la part liée au rayonnement de courte longueur d'onde de celle de grande longueur d'onde ▪ Donne une indication sur la direction de la densité de flux ▪ Mesure de T_a et V_a n'est pas nécessaire ▪ Résultats non influencés par la convection ▪ Pas de temps d'attente pour atteindre l'équilibre ▪ Aucune intervention humaine nécessaire	▪ Difficile à mettre en œuvre en milieu urbain pour des études à long terme ou répétées, matériel peu mobile et encombrant ▪ Instrumentation complexe très onéreuse ▪ Ne permet pas une analyse fine des phénomènes radiatifs ni d'identifier précisément la source d'inconfort (uniquement la direction principale) ▪ Nombreuses simplifications notamment sur les facteurs de forme		
1 radiomètre sur bras pivotant	▪ Méthode alternative décrite dans la norme allemande (VDI, 1998) ▪ Permet de réduire les coûts ▪ Matériel plus léger et plus facile à déployer que les 3 radiomètres ▪ Méthode reste assez précise comparée aux 3 radiomètres ▪ Permet de distinguer la part liée au rayonnement de courte longueur d'onde de celle de grande longueur d'onde ▪ Donne une indication sur la direction de la densité de flux ▪ Mesure de T_a et V_a n'est pas nécessaire ▪ Résultats non influencés par la convection ▪ Pas de temps d'attente pour atteindre l'équilibre	▪ Protocole assez complexe et chronophage ▪ Intervention humaine requise : rotation toutes les 3 min ▪ Mesures désynchronisées : ne peut pas être utilisée dans des conditions très fluctuantes (vent, rayonnement) ▪ Ne permet pas une analyse fine des phénomènes radiatifs ni d'identifier précisément la source d'inconfort (uniquement la direction principale) ▪ Nombreuses simplifications notamment sur les facteurs de forme		

Méthode	Avantages	Limites	Précision	Coût
Globe gris – formule calibrée	- Simple à mettre en œuvre même dans des environnements urbains complexes - Méthode éprouvée en milieu urbain tropical : donne des valeurs de T_{mrt} proches des radiomètres lorsque la formule est calibrée dans le pays d'étude - Diamètre plus petit, permet de réduire le temps de réponse et d'atteindre plus rapidement l'équilibre - Coût très abordable (sonde Pt 100 et balle de ping-pong) - Aucune intervention humaine nécessaire - Ne nécessite pas le calcul des facteurs de forme	- Calibration nécessite les 3 radiomètres : coût non négligeable - Dans le cas où une formule calibrée dans un autre contexte est utilisée, le globe fabriqué, le type d'environnement urbain, le climat et la latitude doivent être similaires - Fabrication « artisanale », variable en fonction des études - Méthode sensible aux variations fluctuantes de V_a - Diamètre plus petit peut augmenter les effets liés aux échanges convectifs et T_g est moins affecté par le rayonnement - Ne permet pas de différencier les flux de courte longueur d'onde de ceux de grande longueur d'onde - Ne permet pas d'avoir la répartition spatiale du champ radiatif - La forme sphérique du globe ne représente pas de manière adéquate le rayonnement reçu par une personne debout		€
Globe gris _ formule ISO 7726	- Simple à déployer en milieu urbain - Coût très abordable (sonde Pt 100 et balle de ping-pong) - Calcul de T_{mrt} simple et rapide - Diamètre plus petit permet de réduire le temps de réponse et d'atteindre plus rapidement l'équilibre - Aucune intervention humaine nécessaire - Ne nécessite pas le calcul des facteurs de forme	- Formule ISO n'est pas adaptée au globe gris et sous-estime de manière non négligeable la valeur de T_{mrt} en milieu urbain tropical - Méthode à n'utiliser que si aucune calibration n'est possible - Fabrication « artisanale », variable en fonction des études - Méthode sensible aux variations fluctuantes de V_a - Diamètre plus petit peut augmenter les effets liés aux échanges convectifs et T_g est moins affecté par le rayonnement - Ne permet pas de différencier les flux de courte longueur d'onde de ceux de grande longueur d'onde - Ne permet pas d'avoir la répartition spatiale du champ radiatif - La forme sphérique du globe ne représente pas de manière adéquate le rayonnement reçu par une personne debout		€

Méthode	Avantages	Limites	Précision	Coût
Globe noir - formule ISO 7726	▪ Simple à mettre en œuvre ▪ Coût abordable ▪ Matériel et formule normalisés selon la norme (ISO 7726, 1998): Méthode similaire pour chaque étude ▪ Aucune intervention humaine nécessaire ▪ Ne nécessite pas le calcul des facteurs de forme	▪ Méthode la moins précise, à n'utiliser que dans les cas où aucune autre alternative n'est envisageable et à l'ombre uniquement et faible vitesse de vent ▪ N'atteint pas l'équilibre en extérieur en raison de son diamètre trop important face aux variations rapides des variables microclimatiques extérieures ▪ Couleur noire absorbe beaucoup trop le rayonnement de courte longueur d'onde comparée à une personne type habillée ▪ Ne permet pas de différencier les flux de courte longueur d'onde de ceux de grande longueur d'onde ▪ Ne permet pas d'avoir la répartition spatiale du champ radiatif ▪ La forme sphérique du globe ne représente pas de manière adéquate le rayonnement reçu par une personne debout	⊕	€ €
RAI	▪ Aucune intervention humaine nécessaire ▪ Mesure de T_a et V_a n'est pas nécessaire ▪ Pas de temps d'attente pour atteindre l'équilibre ▪ Image de la répartition spatiale de l'environnement radiatif: permet une analyse fine des phénomènes radiatifs et d'identifier d'éventuelles sources d'inconfort ▪ Calcul des facteurs de forme F_i simplifié	▪ Méthode récente encore peu éprouvée : peu d'informations sur la précision des valeurs de T_{mrt} obtenues ▪ Traitement des images IR et HDR assez complexe ▪ Cartographie de T_{mrt} uniquement sur l'hémisphère haut (parts des flux radiatifs latéraux et voûte céleste) : pertes d'informations sur les limites de la demi-sphère et aucune information pour l'hémisphère bas (apports liés au sol) ▪ Nécessite des informations sur l'émissivité des surfaces, qui peut s'avérer complexe en milieu urbain dense ▪ Le choix de l'instrumentation a une grande influence sur les valeurs de T_{mrt}: capacité du matériau à refléter le rayonnement (chrome, métal, argent, etc.), longueurs d'onde prises en compte par la caméra IR et HDR.	?	€ € €

3.3. Proposition d'une nouvelle mise en œuvre de la méthode RAI afin d'estimer T_{mrt} en milieu urbain tropical

3.3.1. Intérêts de la méthode

En milieu urbain tropical, une des principales solutions apportées afin d'améliorer le confort thermique est la création de zones ombragées (artificielles ou naturelles), afin de protéger du rayonnement solaire direct non seulement les usagers mais aussi les bâtiments et les différents aménagements urbains. De plus, lors des enquêtes de confort thermique en extérieur, la majorité des enquêtes se déroulent généralement à l'ombre. L'intérêt ici n'est donc pas porté sur l'étude du confort thermique pour une exposition plein soleil. En outre, nous avons vu que les obstacles naturels tels que les arbres diminuaient de manière significative une grande partie du rayonnement de CLO, à savoir le rayonnement solaire direct et le rayonnement réfléchi provenant du sol. Le rayonnement GLO est lui peu impacté. Les flux radiatifs de GLO émis par les surfaces environnantes peuvent toutefois s'avérer être une source d'inconfort thermique, encore plus dans le cas de zones protégées par des protections solaires artificielles ou dans les configurations type canyon urbain. Dans cette étude, nous cherchons donc à mettre en œuvre une méthode permettant de caractériser la part des flux radiatifs GLO provenant de l'environnement et de localiser les sources éventuelles d'inconfort thermique. En se basant sur la méthode RAI présentée précédemment, une expérimentation a donc été mise en place afin de pouvoir estimer de manière plus précise la part des flux GLO de l'environnement entrant dans le calcul de la T_{mrt} . La mesure de la part liée au rayonnement de CLO, notamment le réfléchi, n'est pas abordée ici mais devra être prise en compte afin de pouvoir estimer la valeur réelle de T_{mrt} à l'ombre.

Une des principales hypothèses simplificatrices sur laquelle repose la méthodologie qui sera appliquée ici consiste à décomposer l'environnement radiatif extérieur en deux hémisphères. Ce principe est également utilisé dans certains outils de simulation comme évoqué dans la partie 3.2.1. . Par exemple, dans l'outil CitySim Pro, l'environnement est séparé en deux hémisphères par un plan horizontal situé au niveau du centre de gravité d'une personne debout ($h=1,10m$).

Le protocole expérimental mis en place et la procédure envisagée pour le traitement numérique des images obtenues ainsi que les limites et perspectives identifiées pour cette méthode sont présentés dans les parties suivantes.

3.3.2. Protocole expérimental

3.3.2.1. Matériel utilisé

Le matériel utilisé est un imageur infrarouge du ciel (aussi appelé Sky InSight™), développé et breveté initialement pour l'observation en continu et la prévision de la couverture nuageuse (Liandrat et al., 2017) (Kurzrock et al., 2018). Celui-ci est illustré en Figure 3.12.

Cet imageur présentait de nombreux intérêts dans le cadre de cette expérimentation puisque le matériel disposait des caractéristiques nécessaires à l'application de la méthode RAI, soit d'une demi-sphère réfléchissante et d'une caméra IR faisant face au miroir. De plus, il était prêt à l'emploi donc plus facilement mobilisable dans le cadre de notre étude et a été conçu pour une utilisation en extérieur.



Figure 3.12: Imageur Sky InSight™ utilisé dans le cadre de l'expérimentation. (Crédit photo : Réuniwatt)

En effet, l'imageur est constitué d'une caméra infrarouge qui filme un miroir hémisphérique composé d'un revêtement chrome poli de faible émissivité. La réflectance du miroir est élevée avec une valeur généralement supérieure à 0,9 pour un revêtement en chrome lorsque la longueur d'onde est supérieure à $4,0\ \mu\text{m}$ (Paquin, 1995), de manière à ce que l'on puisse considérer que toute la radiance réfléchi sur le miroir corresponde à la radiance des objets mesurés au loin.

Dans notre cas, l'utilisation de l'ensemble composé du miroir hémisphérique et de la caméra IR permet de refléter la voûte céleste et les bâtiments environnants selon un angle de champ de 320° sur l'axe horizontal et de 180° sur l'axe vertical.

Les principales caractéristiques techniques de l'instrumentation utilisée sont les suivantes :

- Résolution des images : 382x288 pixels
- Bande spectrale pour la caméra IR: 8-14 μm
- Détecteur : FPA (Focal Plan Array) microbolomètres non-refroidis

- Précision : $\pm 2,0^{\circ}\text{C}$
- Rayon de la sphère dans laquelle le miroir hémisphérique a été coupé : 9 pouces (0,23 m).
- Rayon de la coupe : 7 pouces (0,18 m)
- Distance entre le point haut du miroir et la caméra : 0,35 m
- Résolution temporelle à la minute
- Champ de vue couvert par l'ensemble caméra et miroir : $180 \times 320^{\circ}$
- Résistant aux conditions extérieures : température de fonctionnement allant de $-20,0$ à $+60,0^{\circ}\text{C}$ et protection IP65 poussière et humidité

L'imageur Sky InsightTM est également équipé de différents capteurs météorologiques, dont un capteur d'ensoleillement (cellule de référence).

De plus, il existe une fonction de transfert simplifiée du signal des pixels, qui est fonction de l'émissivité de l'objet mesuré, de la température ambiante, de la température interne de la caméra ainsi que d'un coefficient de calibration qui dépend de la caméra. Celle-ci a été établie par le fabricant de la caméra thermique et est définie de la manière suivante :

$$T = (\text{CN} - 1\,000,0) / 10,0 (^{\circ}\text{C})$$

Équation 3-13 : Température de brillance exprimée en fonction du compte numérique ⁴ (CN) du pixel brut de l'image obtenue avec la caméra IR (donnée constructeur).

L'hypothèse émise sur l'émissivité des surfaces filmées par la caméra est celle d'un corps noir, soit une valeur égale à 1.

Enfin, en parallèle de l'imageur, une station météorologique mobile créée dans le cadre de cette thèse permettait également de mesurer d'autres variables physiques telles que la température et l'humidité relative de l'air, la vitesse d'air, les températures de globes (gris et noir) ainsi que la température du sol par l'intermédiaire d'un thermocouple. Une caméra infrarouge FLIR b60, dont les principales caractéristiques sont données en Annexe 12, a également été utilisée afin de prendre des photographies du sol à proximité de l'imageur. La station météorologique mobile et les capteurs qui la constituent sont présentés de manière plus détaillée dans le chapitre 4 suivant. Les différents capteurs permettent de mesurer les paramètres physiques nécessaires au calcul de la T_{mrt} avec la méthode des globes gris et noir. Une comparaison entre les trois méthodes de mesure de la T_{mrt} (Méthode RAI, globe gris et globe noir) pourra à terme être effectuée.

⁴ Valeur numérique correspondant à un niveau de gris du pixel considéré.

Le miroir et le globe gris ont été placés à une hauteur de 1,1 m représentatif du centre de gravité d'une personne debout (Johansson et al., 2014). Pour des raisons pratiques, le globe noir est légèrement surélevé, à une hauteur de 1,3 m.

3.3.2.2. Choix des sites étudiés

L'expérimentation a été déployée sur le site universitaire (IUT) de Saint-Pierre, à La Réunion (latitude 21°20' S, longitude 55°29' E) dans deux types de sites différents : un site dit dégagé, en toiture d'un bâtiment et un site de type canyon urbain simplifié entre deux bâtiments.

3.3.2.2.1. Site dégagé

Le premier site choisi est un site dégagé en toiture d'un bâtiment (voir Figure 3.13).



Figure 3.13: Expérimentation menée en site dégagé sur la toiture d'un bâtiment

Le matériel, composé de l'imageur Sky Insight™ et de la station météorologique mobile, a été placé de manière à ce que le facteur de vue du ciel (SVF) soit proche de 1 et que les surfaces verticales aux alentours soient suffisamment éloignées de l'équipement pour négliger leur flux radiatifs CLO réfléchis et GLO. Une représentation des masques, extraite du logiciel RayMan v1.2 est donnée en Annexe 13. Le SVF est égal à 0,95.

L'expérimentation s'est déroulée en été, au mois de Décembre, entre 9h30 et 16h30, pour deux journées ensoleillées. Les principales caractéristiques météorologiques issues de la station météorologique située sur le campus de l'IUT pour les deux journées étudiées sont données dans le Tableau 3.7 ci-après.

Tableau 3.7 : Données météorologiques des jours de mesure réalisées en toiture, issues de la station météorologique installée sur le site de l'IUT, à Saint-Pierre.

Date	Température air sec (°C)			Humidité relative (%)	Rayonnement global horizontal (kWh/m ²)	Rayonnement diffus (kWh/m ²)	Vitesse du vent à 10 m (m/s)	
	Moy	Min	Max	Moy	Cumul journalier	Cumul journalier	Moyen	Max moyen
05/12/2018	25,3	20,5	28,7	73,3	8,5	1,4	2,0	5,7
06/12/2018	24,5	19,6	28,5	69,8	8,7	0,9	2,0	5,3

De plus, les vitesses de vent relevées à 10m par la station météorologique de référence présente sur le site étudié sur ces deux journées sont en moyenne relativement faibles.

Enfin, la journée du 5 Déc. est caractérisée par un ciel dégagé en matinée et plutôt nuageux dans l'après-midi alors que la journée du 6 Déc. est quant-à elle majoritairement dégagée avec des passages nuageux en début d'après-midi (voir Figure 3.14).

Des analyses pourront être réalisées le matin entre 10h00 et 11h00 pour un ciel dégagé afin de limiter la part du diffus et l'après-midi entre 13h00 et 15h00 pour un ciel cette fois-ci nuageux et avec une part de rayonnement diffus plus importante

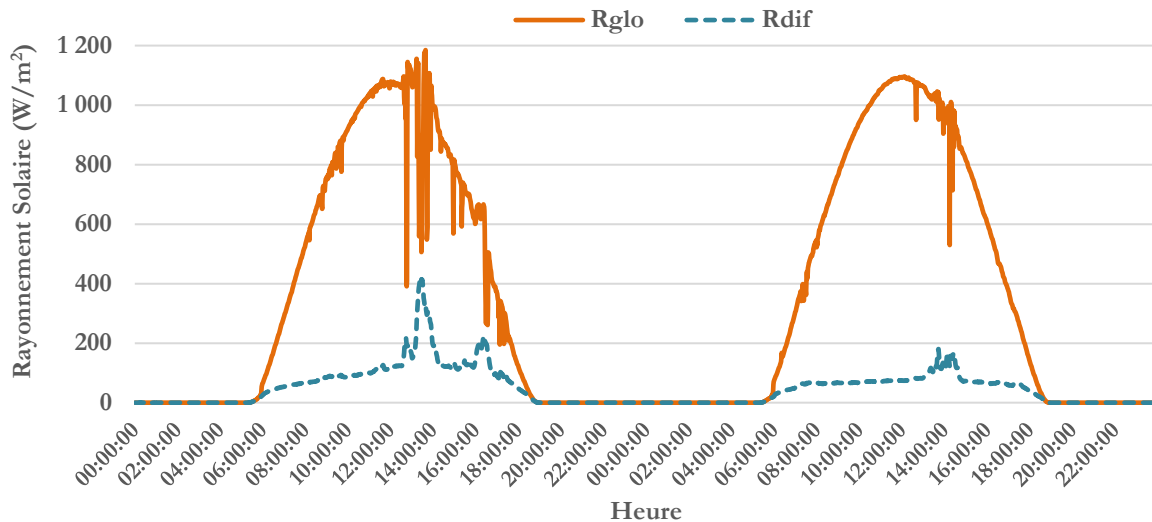


Figure 3.14: Profils du rayonnement solaire global (Rglo) et du diffus (Rdif) pour les journées des 5 et 6 Décembre 2018. Données issues de la station météorologique de l'IUT de Saint-Pierre.

Des mesures de vitesse d'air prises à proximité de l'imager par la station mobile montrent des séquences avec des vitesses d'air inférieures à 1,5 m/s durant ces deux créneaux horaires, pour la journée du 5 Déc. (voir Figure 3.15). Ces séquences seront à privilégier lors du choix des images à analyser afin de limiter les effets liés à la convection sur les mesures.

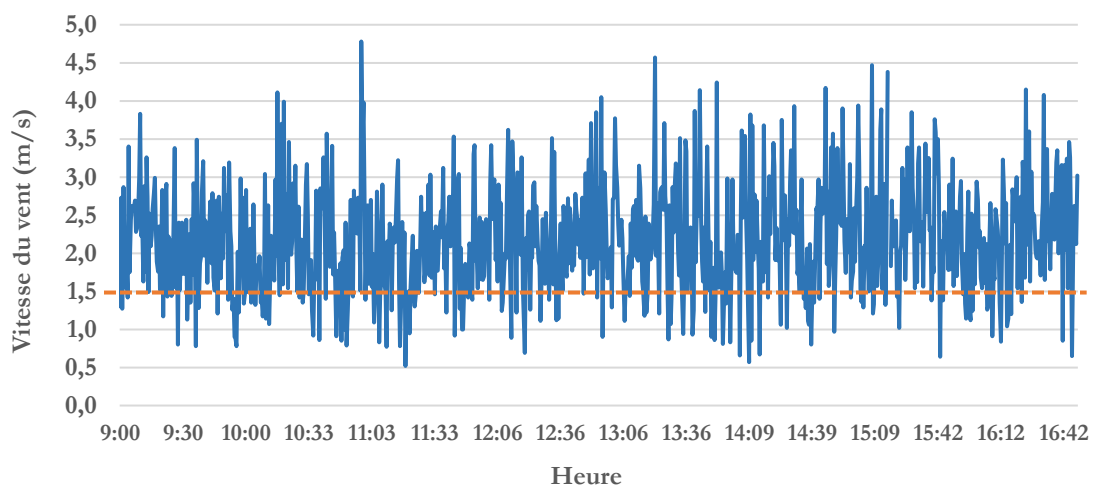


Figure 3.15: Profil de vitesse du vent en toiture pour la journée du 5 Déc. Les données ont été mesurées sur site à proximité de l'imager à 1,1 m du sol avec la station mobile.

3.3.2.2.2. Canyon urbain simplifié

Un second site a été choisi afin de représenter un environnement urbain avec des masques. Le matériel a cette fois-ci été placé entre deux bâtiments dans une configuration type canyon urbain simplifié, de petite dimension (voir Figure 3.16). Le canyon simplifié a un rapport d'aspect h/l égal à 1,4. Le facteur de vue du ciel (SVF) est égal à 0,24. Il a été calculé grâce au logiciel RayMan à partir de l'image sphérique prise par la caméra (voir Annexe 13). L'imageur a été placé de manière à ce que les objets mesurés (bâtiments) soient approximativement à la même distance de la caméra, afin d'obtenir une mesure uniforme et que les pixels de l'image puissent couvrir des surfaces équivalentes de part et d'autre du canyon.



Figure 3.16 : Expérimentation déployée en extérieur dans une configuration de type canyon urbain simplifiée

Comme dans le cas précédent, la température de sol a été relevée grâce à un thermocouple et à une caméra IR.

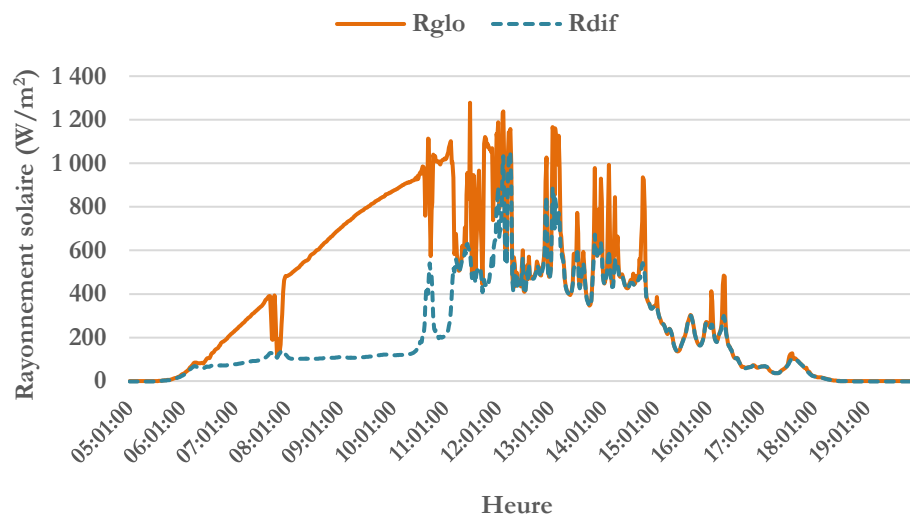
L'expérimentation s'est déroulée sur une journée en Octobre entre 10h00 et 16h00. Les principales données météorologiques issues de la station météorologique la plus proche située sur le campus de l'IUT pour cette journée étudiée sont données dans le Tableau 3.8 ci-après.

Les vitesses de vent relevées à 10m par la station météorologique de référence présente sur le site étudié sont en moyenne relativement faibles.

Tableau 3.8 : Données météorologiques pour la journée du 19 Octobre, issues de la station météorologique installée sur le site de l'IUT, à Saint-Pierre.

Date	Température air sec (°C)			Humidité relative (%)	Rayonnement global horizontal (kWh/m ²)	Rayonnement diffus (kWh/m ²)	Vitesse du vent à 10 m (m/s)	
	Moy	Min	Max	Moy	Cumul journalier	Cumul journalier	Moyen	Max moyen
19/10 /2018	23,2	19,0	27,3	80,5	5,8	3,1	1,2	4,5

Enfin, la journée du 19 Octobre est caractérisée par un ciel très nuageux à partir de 10h30 (voir Figure 3.17) et donc une part de rayonnement diffus importante .

**Figure 3.17 : Profil du rayonnement solaire global horizontal (Rglo) et du diffus (Rdif) pour la journée du 19 Octobre 2018. Données météorologiques relevées sur le site de l'IUT de Saint-Pierre.**

Des analyses pourront être réalisées le matin entre 10h et 10h30 pour un ciel dégagé afin de limiter la part du diffus et l'après-midi entre 13h30 et 14h30 pour un ciel cette fois-ci nuageux et avec une part de rayonnement diffus proche du rayonnement global.

Des mesures de vitesse d'air prises à proximité de l'imageur dans le canyon par la station mobile montrent des séquences avec des vitesses d'air inférieures à 1,0 m/s durant ces deux créneaux horaires (cf Figure 3.18). Ces séquences seront à privilégier lors du choix des images à analyser afin de limiter les effets liés à la convection sur les mesures.

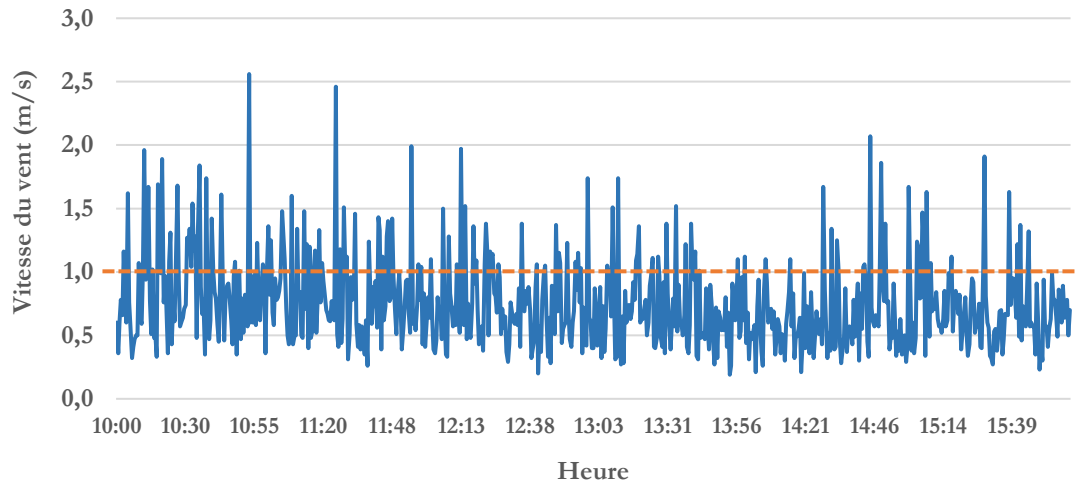
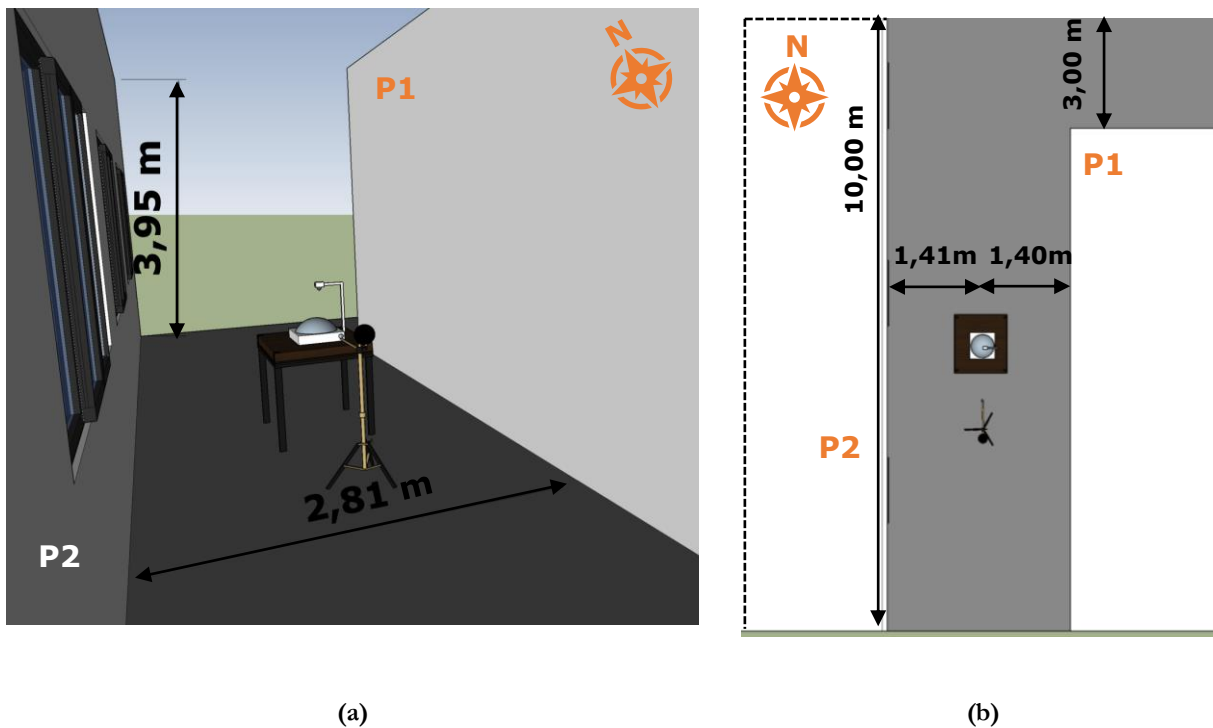
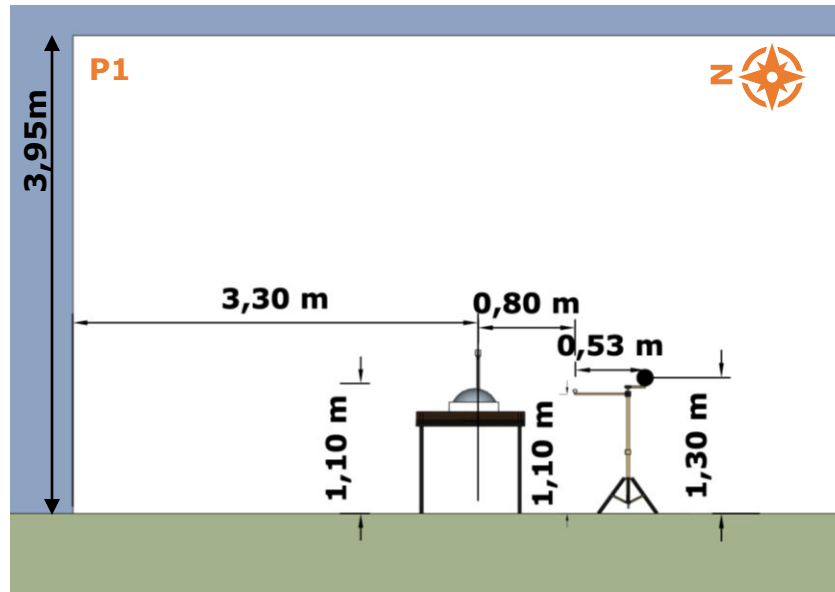


Figure 3.18: Profil de vitesse du vent dans le canyon urbain pour la journée du 19 Oct. Les données ont été mesurées sur site à proximité de l'imageur à 1,1m du sol avec la station mobile.

Les dimensions du canyon et la position des différents appareils de mesure sont schématisées dans la Figure 3.19 ci-dessous.





(c)

Figure 3.19 : Dimension et position du matériel de mesure dans le canyon urbain simplifié selon différents angles de vue : (a) vue vers le nord, (b) vue de dessus et (c) vue de profil selon la paroi P1.

3.3.3. Principe de la méthode

Le miroir hémisphérique de l'imageur permet de refléter une partie importante de l'environnement comme le montre la Figure 3.20 ci-dessous. Cependant, il existe toujours un « angle mort » à partir duquel une partie des « objets » environnants ne peut être vu.

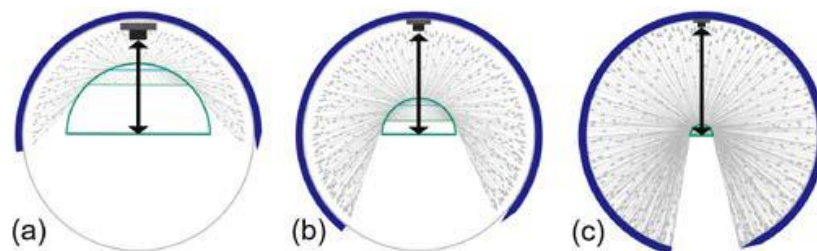


Figure 3.20: Schématisation du champ de vue de la caméra en fonction de la distance entre celle-ci et le miroir.

Plus le ratio entre la hauteur de la caméra et le rayon du miroir est importante et plus le champ de vue est important bien qu'il reste toujours un « angle mort ».

La configuration existante entre le miroir et la caméra IR permet d'obtenir un champ de vue jusqu'à 320° . Ainsi, si on prend l'exemple du canyon urbain, seule la partie basse des parois ($h=0,43\text{m}$ du sol) n'apparaît pas sur l'image prise par la caméra (voir Figure 3.21). Il en va de même pour la totalité du sol.

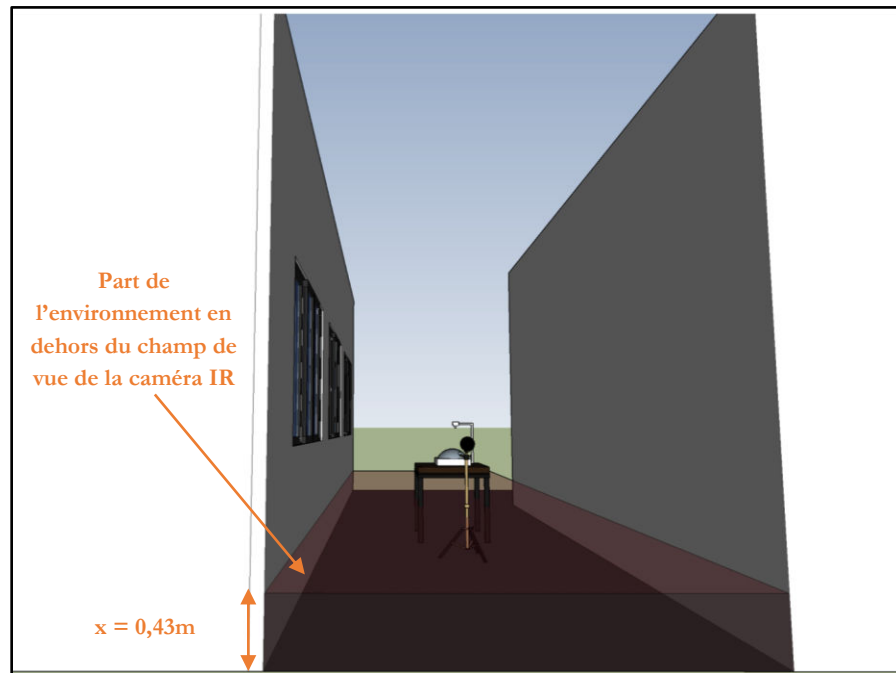


Figure 3.21: Identification des surfaces environnantes non prises en compte dans le champ de vue de la caméra IR et qui ne sont pas reflétées sur le miroir hémisphérique.

Cette configuration permet de découper l'environnement radiatif du canyon urbain en deux hémisphères simplifiés. L'hémisphère supérieur reflété par le miroir représente principalement les flux radiatifs de la voûte céleste et des deux parois des bâtiments environnants. Le second hémisphère est principalement caractérisé par les apports radiatifs du sol ainsi qu'une petite partie des murs ($0\text{m} < h < 0,43\text{m}$). Pour la partie manquante des bâtiments, une approximation peut être réalisée en leur attribuant le même flux (ou la même température) que celui obtenu pour les points les plus proches et les rajouter à l'image (Hatefnia and Ghobad, 2018). Finalement, le second hémisphère ne serait représenté que par les flux radiatifs venant du sol.

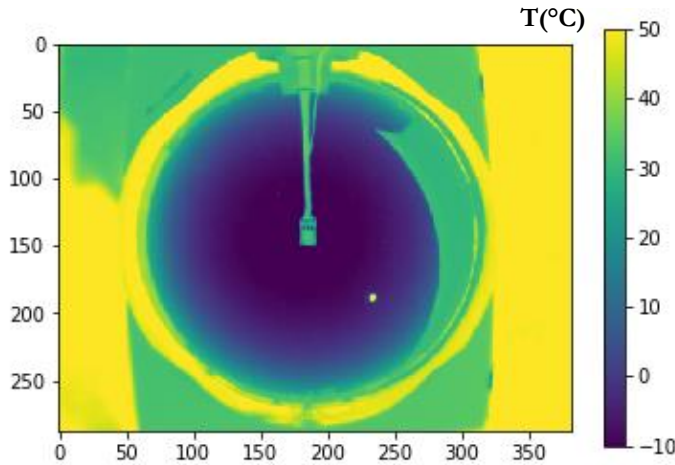
Le principe généralement utilisé dans les outils de simulation consiste, lui, à diviser l'environnement en deux hémisphères avec un plan horizontal situé à $1,1\text{m}$ du sol. Dans notre cas, l'hypothèse simplificatrice suivante est posée :

- Le premier hémisphère représente la voute céleste et les objets environnants (flux radiatifs descendants et latéraux), soit la part reflétée sur le miroir hémisphérique de l'imageur ;
- Le second hémisphère caractérise principalement les apports radiatifs du sol.

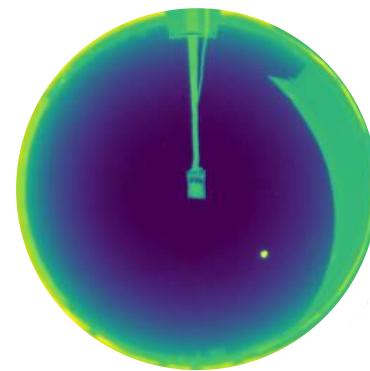
On néglige ici les apports de la table sous le miroir car celle-ci n'influence pas la prise d'images, les mesures météorologiques et la mesure de la température du sol.

3.3.4. Procédure envisagée pour le traitement des données

Les images prises par la caméra IR de l'imageur Sky InsightTM comportent des informations pour chaque pixel. Ainsi, en les ouvrant avec des bibliothèques telles que PIL sur Python, on obtient une matrice de dimension 288×382 (de la taille de la résolution de l'image) avec un compte numérique (CN) spécifique pour chacun des pixels bruts de l'image. L'image obtenue est de type rectangulaire et elle ne se limite pas au périmètre du miroir hémisphérique (voir Figure 3.22.a). Une partie du support sur lequel repose le miroir est pris dans le champ de la caméra IR. Afin de ne garder que le périmètre du miroir sur lequel est reflété l'environnement urbain nous intéressant, un filtre aux dimensions du miroir est appliqué sur l'image initiale. Des exemples d'images obtenues pour la configuration du canyon urbain simplifié ainsi que pour les mesures en toiture sont donnés en Figure 3.22.



(a)



(b)

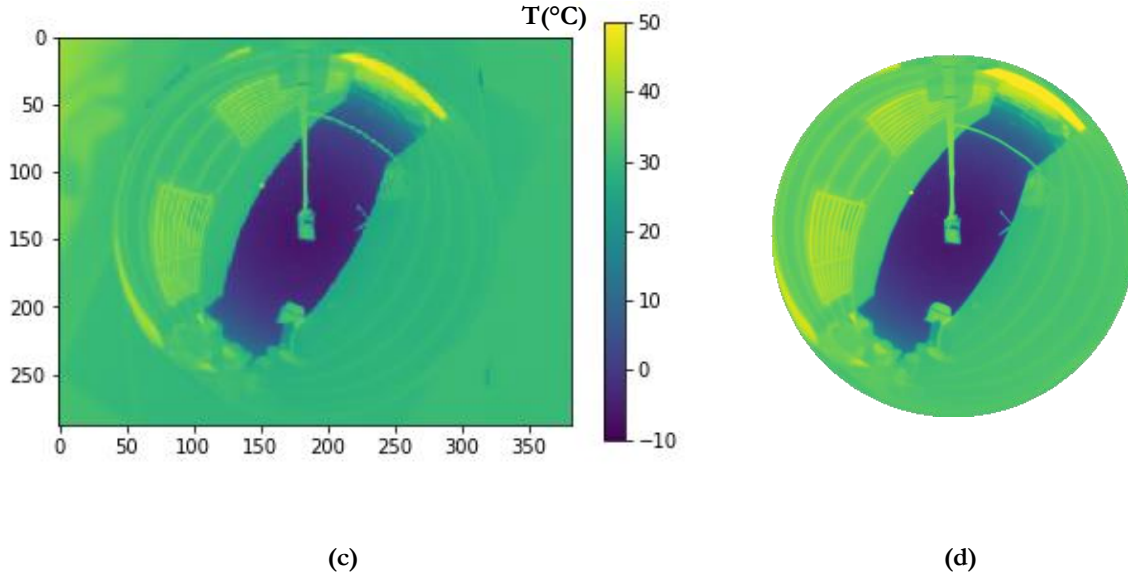


Figure 3.22: Exemples d'images IR obtenues pour les expérimentations menées : (a) image d'origine et (b) image sphérique finale rognée au diamètre de la coupe du miroir en toiture, (c) image d'origine et (d) image rognée pour le canyon urbain. Un gradient de couleur a été appliqué à la température de brillance calculée pour chaque pixel des images.

La fonction de transfert donnée dans l'Équation 3-13 a été appliquée à chacun des pixels de l'image afin d'obtenir la répartition des températures de brillance observées.

Le but de cette expérimentation est de pouvoir quantifier la part de rayonnement GLO émise par les surfaces environnantes et donc reçue par le corps humain. Il est également possible de calculer un indice global comme dans l'étude menée par (Lai et al., 2017). Ces derniers ont séparé la part des flux GLO de celle des flux CLO mesurée grâce à la méthode des 3 radiomètres et ils ont calculé une température radiante moyenne équivalente pour chaque part. Dans notre cas, nous pouvons donc calculer une température radiante moyenne GLO, appelée T_{mrt_GLO} .

On rappelle la formule générale de la T_{mrt} , donnée dans l'Équation 3-3 et celle de la densité de flux totale S_{str} donnée dans l'Équation 3-1 :

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{\left(\frac{S_{str}}{\varepsilon_p \times \sigma}\right)} - 273,15$$

avec

$$S_{str} = \alpha_k \sum_{i=1}^n F_i \times K_i + \alpha_l \sum_{i=1}^n F_i \times L_i + \alpha_k \times f_p \times I^*$$

Dans notre cas, on définit la variable T_{mrt_GLO} comme étant égale à :

$$T_{mrt_{GLO}}(^{\circ}C) = \sqrt[4]{\frac{1}{\sigma} \sum_{i=1}^n F_i \times L_i} - 273,15$$

Équation 3-14 : Définition de la température radiante moyenne de GLO

Le coefficient d'absorption de GLO α_l étant égal à l'émissivité du corps humain notée ε_p , celui-ci n'apparaît pas dans l'Équation 3-14.

L'utilisation de l'imagerie IR repose sur le principe de l'émittance énergétique totale émise par un objet (Me en W/m^2), qui est fonction de sa température. Cette densité de flux d'énergie est définie pour un corps noir d'après la loi de Stefan-Boltzman selon la formule suivante :

$$Me_0 = \sigma \times T^4$$

avec T est la température (en Kelvin) et σ la constante de Stefan-Boltzman ($5,67.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$).

Cette loi a été établie pour les corps noirs, qui sont des objets idéaux absorbant parfaitement toute l'énergie qu'ils reçoivent (quelle que soit sa longueur d'onde). Dans la réalité, les matériaux ont un comportement différent et ne vont émettre qu'une partie de l'énergie reçue. Leur capacité à émettre est exprimée grâce au paramètre physique appelé émissivité, noté ε , et qui est compris entre 0 et 1. Pour un corps noir, ε est égale à 1.

L'émissivité correspond donc au rapport de l'émittance énergétique d'un objet (Me) à une température donnée sur l'émittance énergétique d'un corps noir (Me_0) porté à la même température :

$$\varepsilon = \frac{Me(T)}{Me_0(T)}$$

L'émittance énergétique d'un objet est mesurée sur une gamme de longueurs d'onde, soit dans notre cas entre 8 et 14 μm . Elle est utilisée, avec l'émissivité ε pour calculer la température de surface de l'objet étudié selon la loi :

$$Me = \varepsilon \times \sigma \times T^4$$

Ainsi, afin de pouvoir calculer la T_{mrt_GLO} deux étapes sont alors nécessaires :

1. Remonter aux valeurs de flux radiatifs à partir des températures de brillance
2. Calculer les facteurs de forme F_i

Afin de calculer les facteurs de forme, deux méthodes peuvent être utilisées.

La première méthode est une méthode simplifiée qui s'appuie sur le principe de transformation géométrique. La méthode de transformation des coordonnées entre la caméra et l'environnement réel dépend de l'angle solide et par conséquent, du rayon du miroir et de la distance entre la caméra et le miroir. Cette transformation est divisée en trois étapes. Dans un premier temps, une transformation entre les coordonnées des pixels et celles de l'image est effectuée. Dans un second temps, une transformation, qui tient compte de la taille des pixels et de la distance focale, est appliquée entre les coordonnées de l'image et celles de la caméra. La dernière étape consiste à passer des coordonnées de la caméra à celles de l'environnement réel en utilisant les variables telles que l'altitude et l'azimut. Cette méthode revient finalement à calculer une matrice de « poids » à appliquer à la matrice obtenue pour les flux radiatifs de chacun des pixels de l'image. La procédure à suivre est donnée en Annexe 14.

(Hatefnia and Ghobad, 2018) préconisent, quant à eux, d'utiliser une méthode plus précise pour le traitement des données et le calcul des facteurs de forme, à savoir la méthode NV, qui consiste à générer une série de vecteurs depuis le centre d'une sphère vers une série de points disposés de manière homogène à sa surface (voir Figure 3.23). Il faudrait donc distribuer un nombre de points sur une sphère et voir comment ces derniers seraient vus avec la caméra IR. Cette méthode se rapproche de la méthode du lancer de rayons, avec une distribution homogène des points.

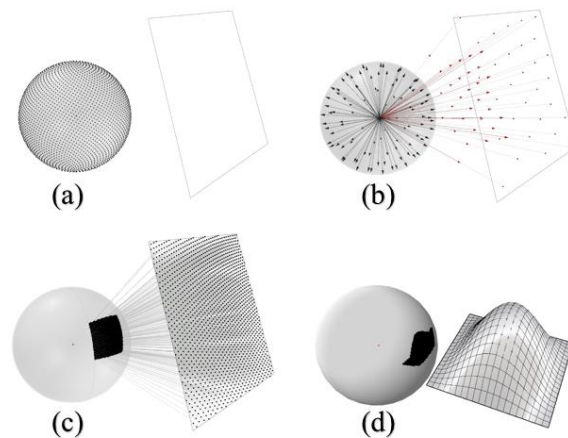


Figure 3.23: Principe de la méthode NV proposée par (Hatefnia et al., 2017a) : (a) un nombre de points choisis est distribué de manière homogène sur la sphère, (b) des rayons sont lancés depuis le centre de la sphère et passent par les points définis afin d'atteindre la surface environnante. Plus le nombre de points est important et plus la projection de la surface sur la sphère sera précise (c) et ce même pour des surfaces avec une géométrie complexe (d).

La résolution numérique et mathématique de ce problème est donc l'étape la plus complexe et dépend des caractéristiques de la caméra IR, du diamètre du miroir ainsi que de la distance entre la caméra et le miroir.

3.3.5. Principales limites de la méthode mise en œuvre

La méthodologie proposée présente des limites à prendre en compte lors de l'interprétation des résultats. Tout d'abord, la bande spectrale de la caméra IR utilisée se situe entre 8 et 14 μm soit une partie de l'IR dit « lointain » (voir Figure 3.24). Les flux mesurés ne comprennent donc pas la part du rayonnement GLO située dans les bandes spectrales de l'IR proche (PIR) et de l'IR moyen (MIR). La valeur de $T_{\text{mrt_GLO}}$ obtenue ne reflète donc pas la totalité des flux de GLO.

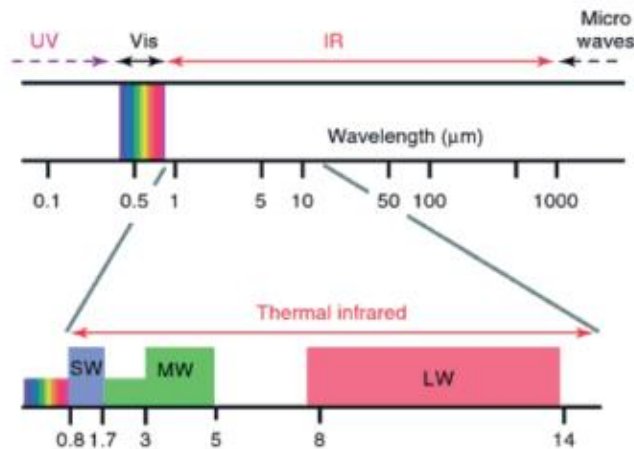


Figure 3.24: Bandes spectrales de l'IR. L'IR est compris entre 0,8 et 14 μm et il est composé de l'IR proche (SW), moyen (MW) et lointain (LW). Source : (Vollmer and Möllmann, 2013)

De plus, la présence de surfaces vitrées sur une des parois du canyon est une difficulté supplémentaire. En effet, les vitrages se comportent comme des matériaux spéculaires pour la caméra IR et ces derniers sont donc difficiles à caractériser.

Le principe de mesure utilisé pour le sol, qui consiste à placer un ou plusieurs thermocouples sur les surfaces radiantes environnantes, peut entraîner des erreurs d'approximation non négligeables puisque la température mesurée aux points choisis ne représente pas forcément la température de surface réelle en raison de l'existence de gradients de température complexes. Ceci est notamment le cas pour le site

choisi de type rue canyon, où, à certains moments de la journée, une partie des surfaces étaient exposées et où d'autres étaient à l'ombre.

Certaines informations des images obtenues sont également perdues à cause du bras de l'imageur qui supporte la caméra IR et de l'ombre que celui-ci peut créer sur le miroir. Les informations sur les bords circulaires des images sont également inexploitable.

Un des points importants à souligner est que cette méthode ne permet pas de calculer l'ensemble du champ radiatif affectant le corps humain. Afin de pouvoir utiliser cette méthodologie dans le but d'estimer la T_{mrt} en extérieur ou de calibrer le globe gris pour notre climat, il faudra la combiner à une autre méthode permettant de mesurer la part du rayonnement de CLO. Une des méthodes pourrait être celle utilisée par Hatefnia et al. qui consiste à utiliser le même principe avec le miroir hémisphérique mais en prenant cette fois-ci une photographie HDR qui permet de calculer les flux dans le domaine du visible et du PIR (Hatefnia and Ghobad, 2018). Cependant, dans ce cas précis, le revêtement en chrome ne serait pas adéquat puisque sa réflectance est faible pour les longueurs d'onde correspondant au visible et PIR. (Hatefnia et al., 2017a) suggère d'utiliser un revêtement en argent poli qui présente une réflectance importante dans une grande gamme de longueur d'onde et qui n'a pas un impact négatif sur le système de codage RVB des images contrairement à des matériaux tels que l'or et le cuivre. L'utilisation d'un outil de simulation numérique pourrait également être envisagée afin de simuler les échanges radiatifs de CLO dans le canyon urbain simplifié. Dans une première approche simplifiée, la méthode utilisant les transformations de coordonnées sphériques pour trouver la matrice de « poids » de chaque pixel pourrait être combinée à l'outil Rayman pour le calcul des flux CLO. Celui-ci utilise une photo fish-eye et un albédo moyen pour représenter la géométrie urbaine. Dans un second temps, une approche plus précise pourrait être utilisée. Pour le rayonnement de CLO, (Naboni et al., 2019) préconisent d'utiliser les outils CitySim Pro, ENVI-met ou Ladybug puisqu'ils prennent en considération le direct, le diffus et le réfléchi par les bâtiments, les objets, la végétation et le sol de manière plus détaillée. Le logiciel Solene pourrait également être utilisé puisqu'il permet lui aussi de tenir compte des phénomènes d'inter-réflexion. Ces différents outils ont une précision plus importante et pourraient être utilisés dans le cas où les facteurs de forme entrant dans le calcul de T_{mrt_GLO} seraient calculés avec la méthode NV plus complexe et plus précise.

Enfin, la journée pour laquelle l'expérimentation a été menée dans le canyon urbain simplifié n'était pas idéale en termes de rayonnement. Une journée avec un ciel dégagé et peu de diffus aurait été préférable afin de pouvoir négliger cette composante et simplifier le calcul de la T_{mrt} .

3.4. Conclusion

La T_{mrt} est une notion qui a été introduite afin de pouvoir exprimer sous la forme d'une température équivalente les effets du rayonnement CLO et GLO atteignant le corps humain en environnement extérieur. Elle est un paramètre essentiel dans les études de confort thermique en milieu urbain et elle est nécessaire au calcul de nombreux indices complexes tels que l'UTCI ou la PET.

De nombreux modèles ont été développés et implémentés dans divers outils de simulation numérique au cours des dernières années afin de pouvoir déterminer l'ensemble des échanges radiatifs qui ont lieu en milieu urbain. Ces outils proposent également de calculer la T_{mrt} ainsi qu'une sélection d'indices de confort thermique extérieur. Chacun de ces outils se base sur des hypothèses et/ou simplifications différentes et présente donc des limites. De plus, ces derniers nécessitent d'être validés. Certains auteurs ont choisi de confronter les résultats obtenus numériquement pour la T_{mrt} avec les valeurs mesurées sur site (Matzarakis et al., 2006) (Thorsson et al., 2007).

En effet, différentes méthodes permettant d'estimer la T_{mrt} en extérieur expérimentalement avec des mesures sur site existent et sont employées dans les études de confort. Parmi elles, les plus répandues sont celles des trois radiomètres et des globes (gris ou noir). La méthode des radiomètres est à l'heure actuelle la méthode la plus précise mais aussi la plus onéreuse et la plus complexe à mettre en place. De plus, elle ne permet pas des études sur le long terme dans les espaces urbains. Elle est également utilisée comme référence afin de pouvoir calibrer la méthode du globe gris en extérieur. En effet, même s'il est plus pratique de déployer des capteurs de mesure « low-cost » tels que les globes, il est d'abord nécessaire de les calibrer avec un appareil de mesure plus précis.

Récemment, une nouvelle méthode de mesure de la T_{mrt} a été présentée par (Hatefnia et al., 2017a) : la méthode RAI. Celle-ci permet en plus de « cartographier » les flux radiatifs et les températures des objets environnants grâce à un miroir hémisphérique à faible émissivité et une caméra IR. Une expérimentation basée sur le principe de la méthode RAI a été mise en œuvre dans cette thèse avec un double objectif : pouvoir estimer la part des flux de GLO et évaluer la contribution des objets environnants dans la valeur de T_{mrt_GLO} . Malgré la complexité du traitement numérique des images obtenues, cette méthode présente un grand intérêt dans la caractérisation de la T_{mrt} en environnement urbain. En effet, à terme, une mesure de tous les flux radiatifs entrant dans le calcul de la T_{mrt} sera effectuée. Cela permettra de disposer d'une méthode de mesure plus précise de la T_{mrt} , autre que la méthode des radiomètres. Elle permettra ainsi la calibration du globe gris en extérieur et une meilleure compréhension des sources radiatives contributives dans la valeur de la T_{mrt} estimée.

Néanmoins, à ce stade, cette méthode reste expérimentale et nécessite un travail plus approfondi. Par conséquent, la méthode utilisant les globes (noir et gris) sera privilégiée dans le chapitre 4 suivant afin de pouvoir calculer la T_{mrt} et mener notre étude sur l'évaluation du confort thermique dans l'EcoQuartier de la Ravine Blanche.

CHAPITRE 4. Evaluation du confort thermique et calibration des indices PET et UTCI en climat tropical. Application dans l'écoquartier de la Ravine Blanche situé en zone littorale.

Dans ce chapitre, nous proposons une méthodologie pour l'évaluation du confort thermique en milieu urbain, appliquée au cas d'étude de l'EQ de la Ravine Blanche, avec la problématique du confort d'été. Nous nous intéressons également à la calibration des indices de confort urbain PET et UTCI pour le climat tropical de la ville de Saint-Pierre, en se basant sur des enquêtes de terrain combinant la mesure des paramètres microclimatiques et la réalisation de questionnaires.

4.1. Introduction et revue de littérature sur la calibration des indices de confort urbain PET et UTCI

Avec l'émergence des projets d'aménagement urbain durables et d'écoquartiers, une attention toute particulière est portée sur la création d'espace public de qualité, la mise en place de mode de circulation douce avec voies piétonnes et soutenant l'utilisation du vélo en tant que mode de déplacement alternatif à la voiture et la conception de bâtiments bioclimatiques. Cependant, afin de pouvoir profiter pleinement des espaces publics extérieurs pour toutes les activités quotidiennes, il est important de créer des environnements thermiques confortables. L'environnement extérieur a aussi un impact direct sur le confort thermique à l'intérieur des bâtiments, notamment dans le cas de bâtiments favorisant la ventilation naturelle, pour lesquels le lien intérieur/extérieur est très fort.

La notion de confort thermique est d'autant plus importante en climat tropical où les conditions en termes de température, d'humidité relative et de rayonnement solaire peuvent être contraignantes, particulièrement en été. Il est donc important d'avoir une réflexion globale en amont des projets afin de créer des conditions confortables en extérieur pour les différents usagers des espaces publics et des bâtiments.

Avec la problématique grandissante des îlots de chaleur urbain en milieu tropical, la nécessité du retour d'expérience de la part des usagers à l'échelle urbaine se fait de plus en plus sentir, à l'image de ce que l'on peut voir à l'intérieur des bâtiments avec l'évaluation en mode occupé (POE). Aussi, on voit émerger dans les publications actuelles des papiers sur des enquêtes de terrain en milieu urbain dans différents types de climats, comme le montrent les revues de littérature effectuées par (Johansson et al., 2014) (Rupp et al., 2015) (Coccolo et al., 2016) (Kántor et al., 2016b).

Ces études de confort en milieu urbain, tout comme les études en intérieur, comprennent généralement des mesures « objectives » de facteurs climatiques et de l'évaluation « subjective » de la perception thermique des usagers de l'espace étudié. Afin d'évaluer la perception thermique des usagers, les études de terrain incluent donc des questionnaires où les personnes interrogées expriment comment elles perçoivent leur environnement actuel selon une échelle de jugement prédéfinie. L'échelle à 7 niveaux, identifiée comme étant l'échelle ASHRAE, est la plus utilisée en milieu intérieur et elle est également utilisée très fréquemment pour les études en extérieur, comme le montre l'étude réalisée par (Fang et al., 2018a). Etant donné que les conditions extérieures ont des variations plus importantes et peuvent être plus extrêmes qu'en intérieur, certains auteurs recommandent d'utiliser une échelle à 9 niveaux (Yahia and Johansson, 2013) (Emmanuel et al., 2016). Néanmoins, certaines études ont relevé le fait que cette échelle est parfois difficile d'application et que les personnes interrogées ont du mal à

répondre en faisant preuve d'autant de précision. Une échelle à 5 niveaux a été suggérée afin de pallier à cette difficulté (Nikolopoulou and Lykoudis, 2006). De plus, dans les pays situés en climat chaud et humide, ces échelles peuvent présenter un biais puisque les votes de perception thermique seront plus rarement en dessous de « légèrement froid » et que les chaleurs extrêmes peuvent s'avérer beaucoup plus fréquentes que pour des études menées dans des pays où la saison froide est bien marquée (Emmanuel et al., 2016).

En plus de la perception thermique, les notions de préférence thermique, de confort thermique et d'acceptabilité thermique peuvent également être étudiées. Certains auteurs étudient de la même manière la sensation et la préférence des personnes interrogées face aux autres facteurs climatiques tels que la vitesse du vent, l'humidité et le rayonnement solaire (Lin, 2009) (Lai et al., 2014) (Sharmin et al., 2015).

De plus, afin de faciliter l'évaluation du confort thermique en extérieur et la perception qu'ont les individus de leur environnement thermique, des indices rationnels permettant de combiner différentes variables climatiques et physiologiques influençant le confort thermique ont été développés. La température physiologique équivalente (PET) (Höppe, 1999) et l'indice UTCI (Universal Thermal Climate Index) (Jendritzky et al., 2012) comptent parmi les plus récents et les plus utilisés dans les études de confort thermique en milieu urbain. Grâce à ces indices, il est possible de retranscrire les effets d'un environnement thermique sur des individus en termes de sensation thermique et de stress thermique au travers d'une échelle de température. L'un des grands avantages de ces indices étant qu'ils tiennent compte des facteurs physiologiques. L'indice UTCI a été créé dans le but d'être universel et de pouvoir ainsi être appliqué dans tous types de climats et à différentes échelles urbaines.

Cependant, de nombreuses études ont montré que les limites des zones de sensation thermique définies par les échelles d'origine des indices PET ou UTCI diffèrent de la sensation observée dans leurs villes d'étude, notamment en climat chaud et humide, où les personnes montrent une plus grande tolérance pour des valeurs de PET ou d'UTCI plus élevées (Lin and Matzarakis, 2008) (Krüger et al., 2017) (Johansson et al., 2017) (Lam and Lau, 2018). Par exemple, pour l'indice PET les différentes catégories thermiques sont basées sur les réponses physiologiques d'un homme vivant en Europe centrale (Matzarakis et al. 1999). Les personnes vivant en climat chaud peuvent donc se sentir confortables dans une ambiance thermique alors même que l'échelle d'origine de l'indice de confort utilisé indiquerait que l'environnement n'est pas confortable. Ceci pourrait être lié aux différents phénomènes d'adaptation (physiologique, psychologique ou comportementale) et notamment au phénomène d'acclimatation (Nasir et al., 2012) (Emmanuel et al., 2016) (Lam and Lau, 2018). De nombreux auteurs ont cherché à calibrer des indices de confort thermique urbain dans leurs contextes ou à définir d'autres « benchmarks » (températures de référence), tels que la température neutre ou la température de préférence, afin de refléter les sensibilités thermiques locales de la population étudiée. Cependant, aucun consensus clair n'a été établi au sein de la communauté scientifique sur la méthode à utiliser pour la définition de ces « benchmarks » et la calibration des indices.

A titre d'exemple, Lin et Matzarakis ont calibré l'indice PET pour la ville de Sao Paulo, au Brésil, en se basant sur des études de terrain avec 1 644 personnes interrogées (Lin and Matzarakis, 2008). La température neutre a été déterminée selon la méthode consistant à moyenner les votes de sensation thermique par intervalle d'1°C de PET. Les zones de sensation thermique de la PET ont été calibrées en se basant sur les votes de préférence thermique, en considérant les votes « aucun changement » comme des votes « acceptables ». La courbe donnant le pourcentage de votes inacceptables en fonction de la PET a été tracée et la zone de confort thermique a été choisie pour un taux de 88% d'acceptabilité.

(Hirashima et al., 2016) ont quant à eux calibré l'indice PET pour la ville de Belo Horizonte, au Brésil, en se focalisant sur deux saisons, l'été et l'hiver, avec un total de 1 693 questionnaires réalisés. La température neutre a été déterminée selon la même procédure que l'étude précédente mais la calibration des zones de sensation de la PET a été effectuée en se basant sur une analyse probit, soit les probabilités prédites de sensation thermique en fonction des valeurs de l'indice.

(Salata et al., 2016) ont évalué le confort thermique pour le climat méditerranéen de la ville de Rome en Italie, en se basant sur 1 000 questionnaires réalisés sur une année entière. La température neutre et la zone de confort thermique ont été déterminées à partir de la méthode linéaire donnant le vote de sensation thermique moyen par 1°C de l'indice PET en fonction de la valeur de PET correspondante.

En ce qui concerne la calibration de l'indice UTCI, l'étude de (Pantavou et al., 2013) se base sur un total de 1 706 questionnaires réalisés dans la ville d'Athènes, en Grèce, pour différentes saisons de l'année. Comme pour les autres études, la température neutre a été déterminée par régression linéaire en moyennant les votes de sensation thermique par intervalle de 1°C de l'UTCI. Cependant, la calibration des différentes classes de l'indice UTCI a été faite en traçant la courbe donnant le pourcentage de votes inacceptables en fonction de l'UTCI. La zone neutre a été définie pour une acceptabilité de 85% soit 15% de votes inacceptables, et les limites des 4 catégories de sensation de chaleur de l'échelle UTCI ont été fixées pour un taux de 30%, 60%, 90% et >90% de votes inacceptables respectivement.

(Lai et al., 2014) ont calibré l'indice UTCI pour la ville de Tianjin dans le Nord de la Chine, en se basant sur 1 565 questionnaires réalisés pour les différentes saisons de l'année. Les auteurs ont ici choisi d'appliquer la méthode de régression linéaire corrélant le vote moyen de sensation thermique par intervalle d'1°C de l'UTCI.

L'utilisation de méthodes différentes pour la calibration des indices rend difficile la comparaison entre études. Pour pallier à cette problématique, (Krüger et al., 2017) proposent une procédure de calibration pour l'indice PET appliquée à 3 villes situées dans des climats différents, i.e. Curitiba et Rio de Janeiro au Brésil et Glasgow en Angleterre. Les auteurs ont porté attention à ce que le protocole et le matériel de mesure utilisés dans chaque étude de terrain soient similaires. La procédure de calibration est basée sur les votes de sensation thermique exprimés par les personnes interrogées uniquement, à savoir une régression linéaire établie entre les votes de sensation thermique moyennés par 1°C de l'indice PET et les valeurs de PET correspondantes. La même méthode a été appliquée dans chaque cas et une

comparaison entre les limites des classes de sensation thermique pour l'indice PET obtenues pour chaque ville est alors faite, confirmant une sensibilité thermique différente en fonction du climat étudié.

(Lam and Lau, 2018) ont calibré l'indice UTCI et comparé les valeurs obtenues pour deux villes situées dans deux zones climatiques différentes, à savoir la ville de Melbourne et celle d'Hong-Kong, pour la période de l'été. L'instrumentation utilisée et le nombre de questionnaires réalisés diffèrent entre chaque étude. Cependant, la même méthodologie a été appliquée pour le calcul de la température radiante moyenne et pour la calibration de l'UTCI. La calibration de l'UTCI se base sur une régression linéaire entre le vote moyen de sensation thermique par intervalle d'1°C de l'UTCI et la valeur de l'UTCI correspondante.

Enfin, des études ont cherché à comparer les différentes méthodes de calibration des indices et/ou de détermination des « benchmarks » issus des différentes études et donnent des recommandations. On peut citer l'étude de (Kántor et al., 2016b), visant à évaluer la perception thermique des Hongrois grâce à l'indice PET, en réalisant 5 800 questionnaires dans la ville de Szeged pendant différentes saisons de l'année. Les auteurs ont choisi de tester différentes méthodes de détermination de la température neutre et des limites des zones de sensation, comme les méthodes de statistique descriptive, les analyses par régression (linéaire et quadratique) ou encore les modèles dits « probit », qui sont parmi les plus fréquemment utilisés dans la littérature. Ils se sont principalement basés sur 26 études réalisées dans différentes régions du monde et proposent un tableau résumant le climat et lieu d'étude, l'échelle de sensation thermique appliquée, l'indice de confort utilisé ainsi que les techniques de détermination de la température neutre et/ou des limites des zones de sensation des indices, permettant de se rendre compte d'une grande disparité entre les études. Ils ont d'ailleurs montré que les limites de chaque zone et les valeurs de la température neutre variaient en fonction de la saison étudiée mais aussi en fonction de la méthode d'analyse choisie.

Ce constat soulève pour les auteurs l'importance de développer des méthodes standardisées afin de faciliter la compréhension des études de confort thermique en milieu urbain et de permettre des comparaisons entre études. (Cheung and Jim, 2017) proposent quant à eux une étude détaillée sur les différents « benchmarks » utilisés dans les études de confort thermique en milieu urbain, à savoir la température neutre, la température de préférence, la zone de température acceptable, la zone de température de confort et la zone de température neutre ainsi que sur les méthodes de calibration des indices PET et UTCI. Les auteurs se sont basés sur 24 études récentes, parues entre 2003 et 2016, présentant au moins l'un de ces cinq « benchmarks » et/ou calibration des indices et ils les ont caractérisées selon le climat étudié, l'indice de confort choisi, l'échelle de sensation thermique appliquée et les « benchmarks » sélectionnés. Ils ont ainsi constaté de nombreuses différences dans les méthodes utilisées et une méconnaissance des concepts, souvent employés de manière interchangeable en fonction des études. Il est pour eux urgent de clairement définir les termes employés et de donner des méthodes pour les déterminer de manière correcte. Ils décrivent également les avantages et inconvénients de chacune des méthodes utilisées avant de donner leurs propres recommandations.

Ces études renforcent l'argument défendu par Johansson et al. sur la nécessité de proposer une méthode standardisée des études de confort thermique en milieu urbain et ceci, tant sur la partie instrumentation et montage des questionnaires que sur la partie analyse des données (Johansson et al., 2014).

En termes d'instrumentation, une des problématiques majeures est la mesure de la T_{mrt} , qui est une des variables microclimatiques influençant le plus les indices de confort thermique en milieu urbain. Comme nous l'avons vu au chapitre 3 précédent, différentes méthodes sont utilisées pour la déterminer en fonction des études, à savoir la méthode de mesure des flux radiatifs grâce aux radiomètres, la méthode du globe noir et celle du globe gris, la méthode RAI ou encore l'utilisation de logiciels de simulation. Certains auteurs ont pu calibrer les valeurs de T_{mrt} obtenues à l'aide des globes en les comparant aux valeurs de T_{mrt} obtenues avec la méthode des radiomètres, qui est la méthode la plus précise à l'heure actuelle (Thorsson et al., 2007) (Tan, et al. 2013) (Lam and Lau, 2018). Dans notre cas, une nouvelle mise en œuvre de la méthode RAI a été proposée dans le chapitre précédent, mais cette méthode reste expérimentale et nécessite un travail plus approfondi. Par conséquent, la méthode utilisant les globes a été privilégiée pour cette étude.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la calibration des indices de confort urbain PET et UTCI pour le climat tropical de la ville de Saint-Pierre, à La Réunion, en se basant sur des enquêtes de terrain combinant la mesure des paramètres microclimatiques et la réalisation de questionnaires. La particularité de cette étude repose sur le fait que la détermination de T_{mrt} a été faite à la fois selon la méthode du globe noir et celle du globe gris, afin d'évaluer l'impact de la méthode de mesure de T_{mrt} sur la calibration des indices PET et UTCI.

Les principaux objectifs de cette étude sont :

1. Évaluer le confort thermique des habitants d'un quartier situé sur une zone littorale, avec la problématique du confort d'été, en utilisant les indices PET et UTCI ;
2. Comparer les résultats obtenus pour la température radiante en fonction des méthodes de mesure (globe noir / globe gris) et déterminer leur influence sur les indices de confort choisis ;
3. Calibrer les indices PET et UTCI pour le contexte étudié en se basant sur l'étude de (Krüger et al., 2017) afin de refléter au mieux la sensibilité thermique de la population et proposer la zone de neutralité thermique pour la ville de Saint-Pierre ;
4. Comparer les résultats obtenus pour notre étude avec d'autres études menées en climat chaud en appliquant la même méthodologie que celle développée dans notre étude pour la calibration des indices et la détermination de la température neutre.

4.2. Contexte climatique du cas d'étude de la Ravine Blanche, Saint-Pierre, La Réunion

L'île de La Réunion est un département d'Outre-Mer français, qui fait également partie de l'Union Européenne. Elle est située dans l'hémisphère Sud ($21^{\circ}06'$ Sud and $55^{\circ}32'$ Est) dans la zone tropicale (voir Figure 4.1).

S'étalant sur une superficie de $2\,512\text{ km}^2$ avec une population estimée à 860 896 en 2018 selon les chiffres de l'Insee, le climat y est généralement chaud et humide le long des côtes et tempéré en altitude, avec un sommet culminant à $3\,000\text{ m}$. La spécificité du climat observé est liée au relief de l'île. Ainsi, de nombreux microclimats existent et les conditions climatiques peuvent varier de manière importante notamment entre la zone de haute altitude et la zone littorale. De nombreux travaux ont été réalisés afin d'identifier et de délimiter ces zones climatiques, qui ont par ailleurs été incluses dans la réglementation locale, RTAA DOM (Réglementation Thermique, Acoustique et Aération) et dans un guide local, PERENE 2009 (Garde et al., 2010). Les différentes zones climatiques ont été définies en fonction de l'altitude et de l'influence du vent dominant (zone au vent, zone sous le vent). Deux saisons distinctes sont cependant observées, séparées par des périodes d'intersaison : une saison chaude marquée par une pluviométrie importante entre décembre et mars et une saison plus fraîche et plus sèche entre Juin et Octobre. L'île connaît également des épisodes cycloniques qui s'étendent de décembre à avril avec un risque plus important sur les trois mois d'été austral, à savoir janvier, février et mars.

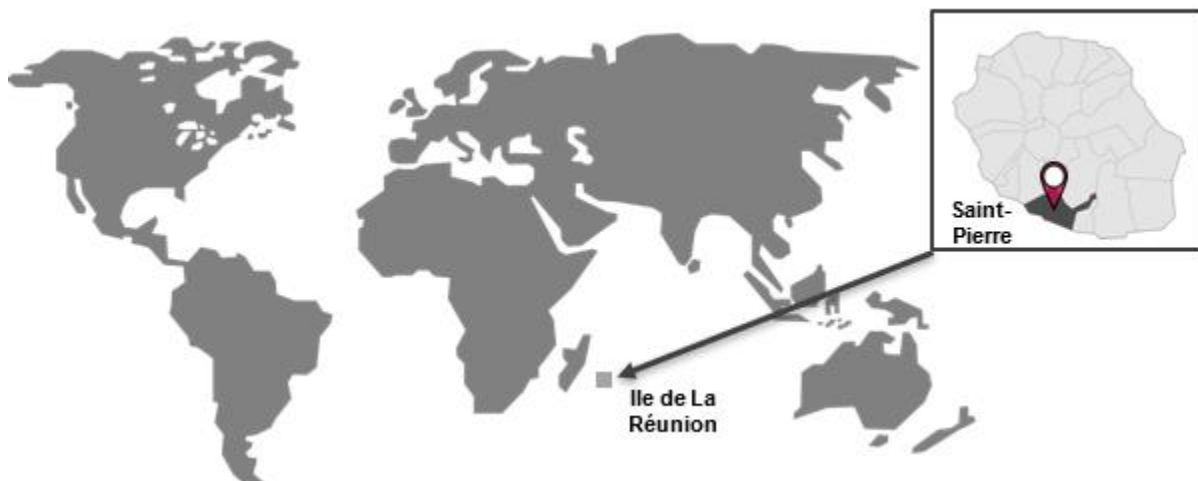


Figure 4.1 : Localisation de La Réunion et de la Ville de Saint-Pierre, où se trouve le cas d'étude.

Le cas d'étude est situé dans le quartier de la Ravine Blanche, dans la Ville de Saint-Pierre, au Sud de l'île, au niveau de la zone littorale (altitude 0 m). Le climat de Saint-Pierre est classé de type Aw selon la classification de Köppen-Geiger, soit un climat de type savane avec hiver sec. La température moyenne annuelle est aux alentours de 23°C pour un taux moyen de 76% d'humidité relative.

La Figure 4.2 ci-après nous présente les conditions climatologiques principales de Saint-Pierre (station météorologique de Pierrefonds de Météo France). Les températures relevées sont élevées en été avec des températures maximales supérieures à 30°C atteintes durant les mois les plus chauds (Janvier à Mars). En hiver, les températures sont relativement fraîches, avec des minimales approchant les 15°C en Juillet-Août. Les écarts mensuels entre les températures moyennes maximales et minimales sont constants (de l'ordre de 8°C), ce qui est caractéristique du climat tropical. Ainsi les températures moyennes maxi/mini sont de 32°C/24°C et 25°C/16°C respectivement en été et en hiver.

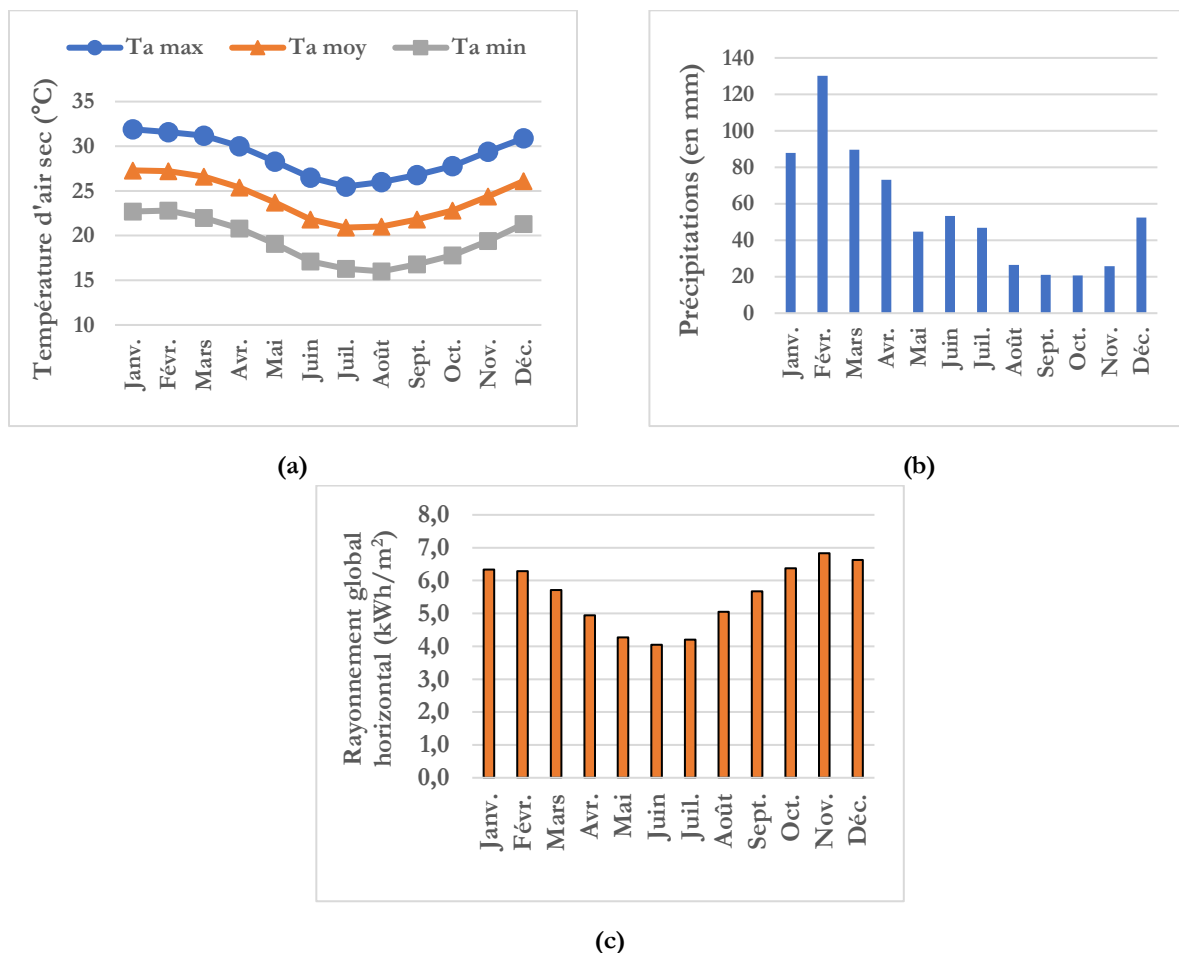


Figure 4.2: Conditions climatiques de la ville de Saint-Pierre, Réunion : (a) Température sous abri d'air sec moyenne, minimale et maximale mensuelle, (b) hauteur moyenne des précipitations et (c) rayonnement global horizontal moyen journalier (normales climatiques 1981-2010 pour la station de Pierrefonds, source : Météo France).

Le taux d'humidité moyen est quant à lui relativement élevé sur l'année ($>70\%$). La pluviométrie est assez faible comparée à d'autres zones de l'île, avec une saison pluvieuse marquée durant l'été (de Janvier à Avril) et une saison plus sèche en hiver. Le niveau d'ensoleillement est important tout au long de l'année avec une valeur journalière moyenne de $5,6 \text{ kWh/m}^2$ pour le rayonnement global. En été, le rayonnement solaire global journalier moyen est supérieur à $6,0 \text{ kWh/m}^2$.

Enfin, la période hivernale est marquée par des vents d'alizés forts ($>5\text{m/s}$) orientés Sud-Est (100° - 120°) (voir Figure 4.3).

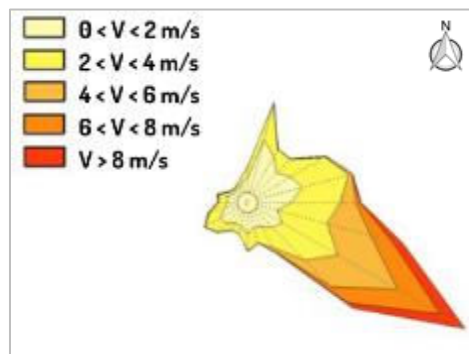


Figure 4.3: Rose des vents pour la Ville de Saint-Pierre illustrant l'importance de la fréquence des vents selon leur provenance sur une rose de 360°(Source : Outil PERENE 2009)

La représentation des données mensuelles ne donne pas d'information sur le couple température d'air sec et humidité relative contrairement à la représentation de ces couples sur le diagramme de Givoni (Givoni, 1998). Il est notamment possible de montrer les différences en termes de confort en fonction de la saison étudiée. La Figure 4.4 présente les différents points obtenus pour les couples température d'air sec et humidité relative pour les périodes d'été et d'hiver sur le diagramme de Givoni. Les données sont de types horaires et ont été extraites de la station météorologique de Pierrefonds. La période été représentée est comprise entre Décembre 2017 et Mars 2018 (voir Figure 4.4.a) et celle d'hiver a été sélectionnée pour les mois de Juin à Septembre 2018 (voir Figure 4.4.b).

La période estivale présente des températures d'air et des niveaux d'humidité relative élevés alors que l'air est plus frais et plus sec en hiver.

La saison estivale est la saison la plus problématique en termes de conception afin d'atteindre un niveau de confort thermique optimal, tant au niveau de la prise de compte de la température d'air que du taux d'humidité. Cette étude se focalisera donc sur cette période afin de calibrer les indices de confort thermique.

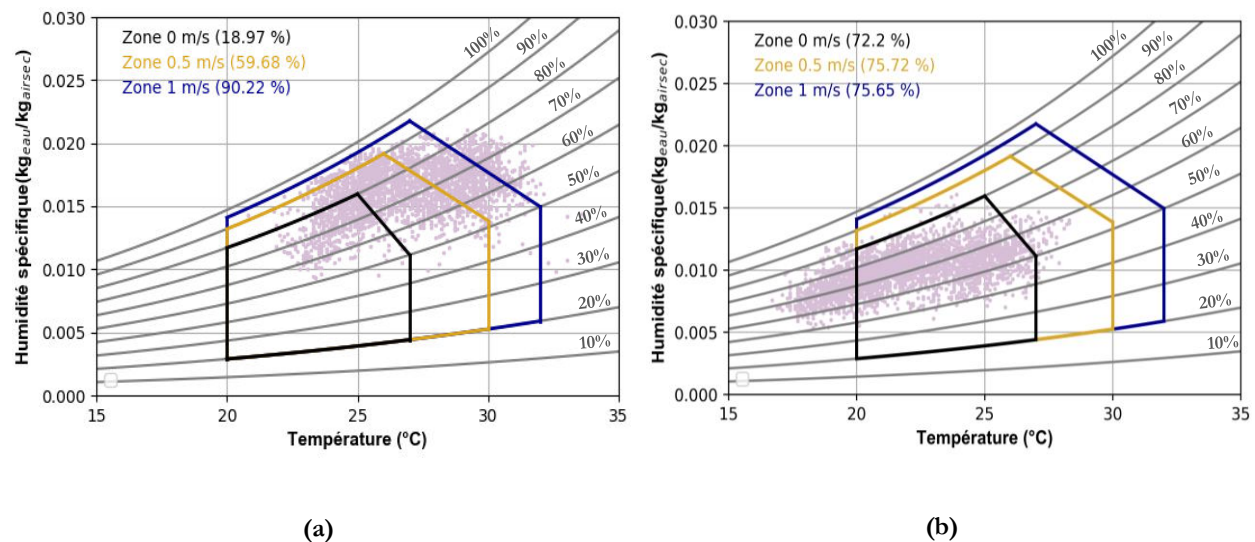


Figure 4.4: Diagramme de Givoni représentant les couples température d'air sec / humidité relative pour le climat de Saint-Pierre en fonction de la saison : (a) période d'été allant de Décembre 2017 à Mars 2018 et (b) période d'hiver s'étalant de Juin à Septembre 2018 (selon les données horaires de la station de Pierrefonds, source : Météo France).

4.3. Matériel et méthode

Des mesures des conditions microclimatiques ainsi que des questionnaires d'enquête ont été réalisés simultanément, principalement en été entre 2017 et 2019.

4.3.1. Localisation des enquêtes

Les différentes sessions d'enquête se sont déroulées dans le périmètre rénové de l'écoquartier de la Ravine Blanche, à Saint-Pierre. Les enquêtes ont été réalisées principalement en été et en intersaison, sur différents sites à proximité de la mer. En règle générale, les enquêtes sont menées à différents moments de la journée (matin, après-midi, soirée) et à différentes périodes de l'année (été/hiver), afin de couvrir les deux parties de l'échelle thermique (sensation de froid ou de chaleur). Dans notre cas, cette étude s'est basée sur l'analyse du confort d'été qui est la principale problématique pour la zone étudiée. Le quartier étudié n'est que peu fréquenté, à part le samedi matin, en raison du marché forain qui se tient à proximité. Les enquêtes se sont donc concentrées durant cette période et comparé à d'autres études, le nombre de votes est faible et peu diversifié, mais il reste représentatif de la population étudiée.

5 sites différents ont été choisis le long d'un axe principal du quartier, traversant le parc urbain et perpendiculaire à la mer (cf Figure 4.5). Cet axe est l'un des plus fréquentés en termes de circulation douce (piéton, vélo).



Figure 4.5 : Localisation des enquêtes dans l'écoquartier de la Ravine Blanche. Les sites A, B et C sont situés le long la rue Luthuli, alors que les sites D et E se trouvent au niveau du parc urbain.

Les sites A, B et C se situent au niveau de la rue Luthuli, sur le trottoir, caractérisée par un alignement de « raisiniers de bord de mer », qui existent depuis de nombreuses années déjà et qui sont très bien adaptés aux conditions du littoral marin de l'île. C'est une rue où il y a beaucoup de circulation de voitures. Le trottoir est assez large avec des cheminements piétons, une partie composée de terre où sont implantés les arbres et des bancs publics, ainsi qu'une voie cyclable, en béton désactivé. Les « raisiniers de bord de mer » créent de l'ombre sur quasiment toute la longueur de cette rue et couvrent ainsi le cheminement piéton, la piste cyclable et les bancs qui se trouvent sous ses arbres pendant une bonne partie de la journée.

Du côté Est de la rue où les enquêtes ont été réalisées, l'espace urbain est caractérisé par la présence de nombreux commerces de proximité, d'un bâtiment de grande hauteur (10-20m de hauteur), de la végétation de plus de 3 mètres de hauteur (raisins bord de mer) et d'un canal pour l'eau pluviale (canal SOREMA), à ciel ouvert, qui contient fréquemment de l'eau sur cette partie.

C'est un lieu de passage important mais aussi un lieu de rencontre. En effet, en plus des bancs disponibles, les habitants y ramènent des chaises pour profiter de l'endroit.

Les points D et E sont quant à eux situés dans le parc urbain. C'est un espace très végétalisé avec beaucoup d'arbres qui s'étend sur près d'un hectare, réalisé afin d'être le poumon vert du quartier. L'espace est structuré avec des cheminements piétons et une piste cyclable qui traverse le parc du Nord au Sud. Des bancs ont également été disposés le long de cette voie de circulation douce. Cependant, ce cheminement principal n'est que très peu protégé du soleil. Un alignement d'arbres y a été planté mais les arbres ne produisent pas encore assez d'ombre pour le moment. Les bancs sont également en grande majorité exposés en plein soleil.

En raison d'une fréquentation relativement faible des sites C, D et E, les sessions d'enquête se sont majoritairement déroulées sur les sites A et B, afin de pouvoir réaliser suffisamment de questionnaires. D'une manière générale, le quartier est peu fréquenté durant la semaine, excepté au moment de la sortie des écoles primaires. La fréquentation du parc urbain est très faible également. Il faut attendre des manifestations organisées sur site pour y voir du monde. Le reste du temps, c'est plutôt un lieu de passage. Cela explique pourquoi la majorité des enquêtes ont eu lieu au niveau des sites A et B, le samedi matin, qui est le jour le plus fréquenté, en raison du marché forain qui se tient à proximité. Au total, ce sont 370 personnes qui ont été interrogées sur le site de Ravine Blanche.

Le Tableau 4.1 ci-dessous liste les principales caractéristiques de chacun des lieux d'enquête concerné.

Tableau 4.1: Résumé des conditions de réalisation des enquêtes (localisation et période)

Date	Nombre de personnes interrogées	Lieu des enquêtes	Espace urbain	Type de sol	Exposition	Heure de début-Heure de fin
07/11/2017	9	C	Rue / trottoir	Béton désactivé	Entre les deux	10h-12h
10/11/2017	10	D	Parc urbain	Béton désactivé	Plein soleil	10h-12h
09/01/2018	6	C	Rue / trottoir	Béton désactivé	Entre les deux	10h-12h
20/01/2018	40	B	Rue / trottoir	Béton désactivé	Plein soleil	9h30-12h30
24/01/2018	4	E	Parc urbain	Béton désactivé	Entre les deux	14h-16h
27/01/2018	52	B	Rue / trottoir	Béton désactivé	Plein soleil	8h30-12h30
10/02/2018	66	A	Rue / trottoir	Terre	A l'ombre	10h-12h
03/03/2018	23	A	Rue / trottoir	Terre	A l'ombre	9h30-11h30
09/06/2018	79	A	Rue / trottoir	Terre	A l'ombre	8h30-13h30
06/10/2018	50	B	Rue / trottoir	Béton désactivé	Plein soleil	9h-12h
12/01/2019	31	A	Rue / trottoir	Terre	A l'ombre	9h-12h

4.3.2. Mesure des variables microclimatiques et instrumentation

Les mesures ont été réalisées à proximité des personnes questionnées, grâce à une station microclimatique mobile spécialement conçue pour l'étude, à une hauteur comprise entre 1,1m et 1,3m du sol, correspondant à la hauteur moyenne du centre de gravité du corps humain (cf Figure 4.6).

La station mobile comprend un globe noir et un globe gris, un capteur numérique d'humidité de l'air et de température, ainsi qu'un anémomètre à fil chaud, montés sur un trépied photo. La sonde de température et d'humidité a été placée dans un abri météorologique ventilé naturellement.

Le thermomètre globe noir est composé d'une sonde Pt100 placée au cœur d'un globe en cuivre de couleur noir et de diamètre 150 mm. Un capteur globe gris a également été créé afin de permettre de mesurer la température radiante extérieure comme préconisée par (Thorsson et al., 2007). Le globe gris est constitué d'une balle de ping-pong de diamètre 40mm et peinte de couleur grise (RAL7001).

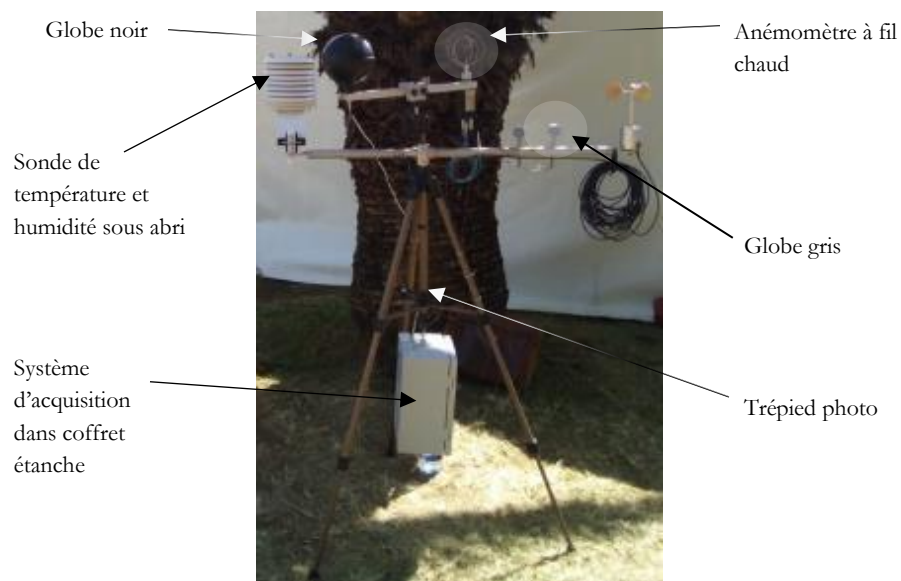


Figure 4.6 : Station microclimatique mobile réalisée dans le cadre des enquêtes de terrain en milieu urbain

Le Tableau 4.2 ci-dessous présente les caractéristiques générales des capteurs utilisés.

Le système d'acquisition et d'enregistrement de données est composé de la centrale ALMEMO 2890-9. Les mesures ont été prises toutes les 10 secondes et moyennées à la minute.

Tableau 4.2: Caractéristiques techniques des capteurs utilisés pour la mesure des paramètres climatiques

Paramètres mesurés	Equipement/ capteurs	Plage de mesure	Précision de mesure
Température d'air (T_a)	Capteur numérique d'humidité/température (Matériel ALMEMO – mesures d'ambiance)	-48 à +85°C	$\pm 0,2$ °C à 5-60°C
Humidité relative (HR)		5 à 98%	$\pm 3,0$ % à 5-98 % HR
Vitesse d'air (V_a)	Anémomètre à fil chaud (ou capteur d'écoulement thermoélectrique) (Matériel ALMEMO – mesures d'ambiance)	0,15 à 5,0 m/s	$\pm 1,0$ %
Température de globe noir (T_{g_noir})	Sonde Pt100 placée au centre d'un globe en cuivre de couleur noir (D=150mm) (Matériel ALMEMO – mesures d'ambiance)	-40 à +200°C	$\pm 0,3$ °C
Température de globe gris (T_{g_gris})	Thermocouple type T placé au centre d'une balle de ping- pong peinte en gris (D=40mm)	-40 à +350°C	$\pm 0,5$ °C

4.3.3. Questionnaire utilisé

Afin d'évaluer la perception thermique des usagers, les études de terrain incluent des questionnaires où les personnes interrogées expriment comment elles perçoivent leur environnement actuel selon une échelle de jugement prédéfinie. Les questionnaires permettent donc de prendre en compte la partie qualitative dite subjective (liée à l'individu lui-même) du confort thermique. D'une manière générale, les principales prérogatives des questionnaires sont les suivantes :

- Les questionnaires doivent être réalisés de manière aléatoire ;
- La date et l'heure du début et de fin de l'interview doivent être relevées ;
- Il doit être bien expliqué aux répondants qu'il s'agit d'avoir leur perception au moment précis de l'interview et à l'endroit précis où ils se trouvent (et non leur « jugement général ») ;
- Les personnes interrogées doivent être en extérieur depuis au moins 15 min et vivre dans le pays d'étude depuis au moins 6 mois (acclimatation court terme et long terme) ;
- Les enquêtes doivent couvrir différentes périodes journalières et saisonnières, ainsi que différents types d'espaces urbains ;
- Enfin, (Johansson et al., 2014) proposent une taille d'échantillon moyenne de 400 à 500 personnes interrogées avec une bonne représentativité de la population locale (en termes d'âge, de sexe, etc.).

Dans notre cas, pour chacun des questionnaires réalisés, les heures de début et de fin d'interview sont notées ainsi que l'exposition de la personne (au soleil, à l'ombre ou entre les deux). Il est également

demandé aux personnes le temps qu'elles ont passé en extérieur avant le questionnaire afin de ne prendre en compte dans l'analyse des questionnaires que les personnes ayant été exposées aux conditions extérieures depuis au moins 15min.

La première partie du questionnaire interroge les personnes sur leur sensation et préférence en lien avec les variables climatiques.

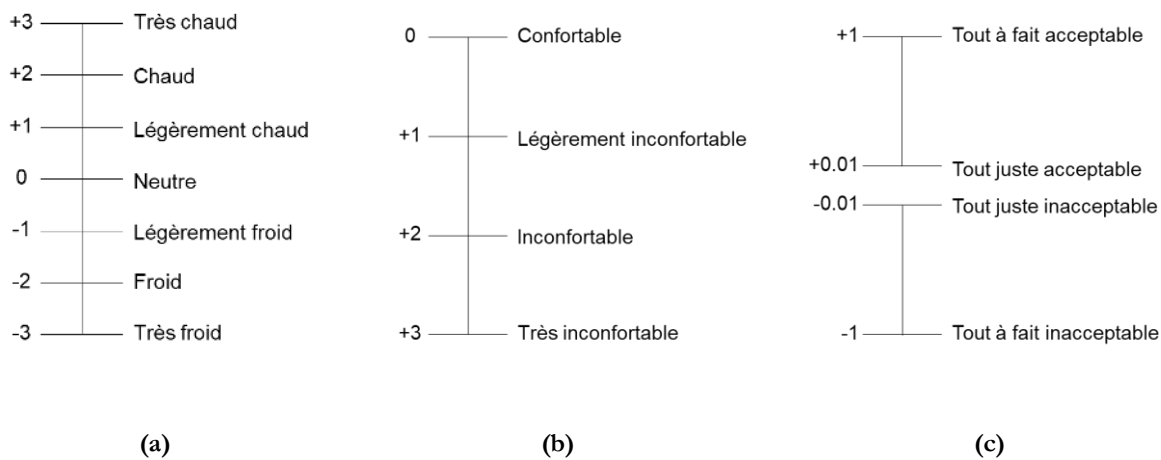


Figure 4.7 : Codage des différentes échelles thermiques utilisées dans cette étude : (a) échelle de sensation thermique, (b) échelle du confort thermique et (c) échelle d'acceptabilité thermique.

En ce qui concerne la température d'air, la sensation thermique est évaluée selon l'échelle ASHRAE à 7 niveaux allant de très froid à très chaud et des échelles conventionnelles à 4 niveaux ont été utilisées pour la perception du confort thermique, ainsi que pour l'acceptabilité thermique (cf Figure 4.7 ci-dessus).

Les échelles à 7 niveaux ont également été choisies pour exprimer la sensation des individus face au vent et au rayonnement solaire alors que pour l'humidité relative, une échelle simplifiée, ne comprenant que 3 niveaux, a été utilisée (voir Figure 4.8).

En effet, avant d'être appliqué dans le cadre de l'étude, le questionnaire a été testé par des étudiants dans le quartier et il a été constaté que les gens avaient beaucoup de mal à évaluer le taux d'humidité sur des échelles très détaillées.

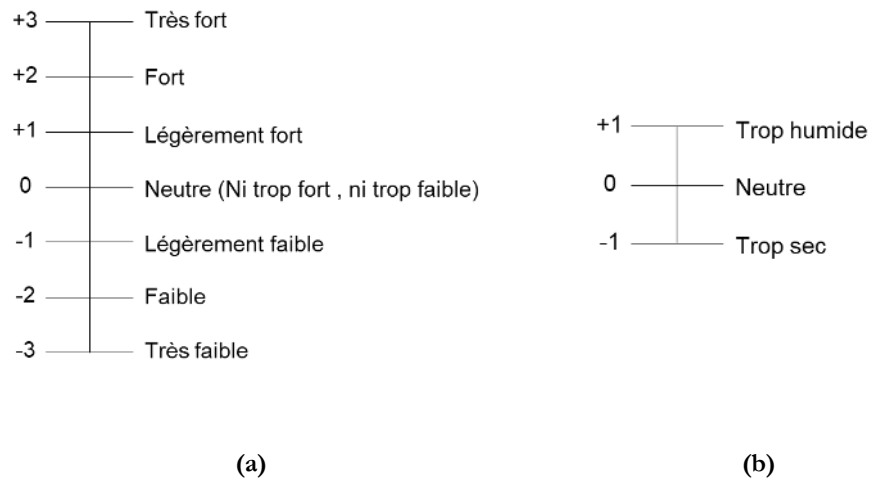


Figure 4.8: (a) Echelle de sensation liée au rayonnement solaire et au vent et (b) Echelle de sensation simplifiée pour l'humidité relative, utilisées dans cette étude

L'évaluation de la préférence des personnes s'est faite sur des échelles à 7 niveaux pour la température d'air, le rayonnement solaire et le vent, alors que pour l'humidité, une simple échelle à 3 niveaux a été choisie (voir Figure 4.9).

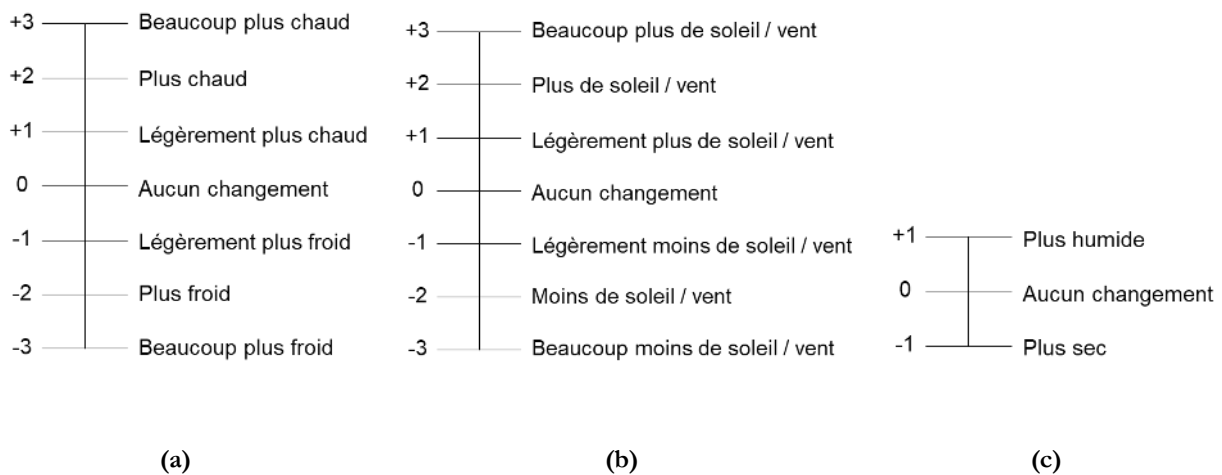


Figure 4.9: Echelles de préférence utilisées dans cette étude : (a) préférence thermique, (b) préférence liée au vent et au rayonnement solaire et (c) à l'humidité relative.

Dans une seconde partie, les questions portent sur les paramètres psychologiques pouvant affecter le confort thermique, telles que la raison et la fréquence de leur visite, la perception de l'environnement les entourant en termes de végétalisation, d'ombrage ou encore de bruit, l'utilisation des équipements présents et adaptés ou non à leur besoin, leur affection et/ou attachement pour le lieu et l'agréabilité de la journée pour être en extérieur.

Enfin, la dernière partie recueille des informations sur les paramètres identifiés comme étant d'ordre personnel et physiologique comme le sexe, l'âge, la taille, le poids, le niveau d'activité 30 minutes avant le questionnaire, la position pendant le questionnaire (assis ou debout), les vêtements portés et leur couleur, la catégorie professionnelle, le temps vécu à La Réunion et dans le quartier si concerné, la ville de résidence, l'environnement de travail (intérieur et/ou extérieur, climatisé ou non).

Le questionnaire détaillé est donné en Annexe 15.

4.3.4. Choix des indices de confort thermique en milieu urbain

Cette étude se base sur deux indices de confort thermique extérieur fréquemment utilisés dans des études microclimatiques en climat tropical, à savoir la PET et l'UTCI, ce qui facilite une comparaison avec les résultats obtenus dans les études précédentes. De plus, ces deux indices sont des indices rationnels, basés sur le bilan thermique du corps humain. Ils prennent en compte tous les facteurs environnementaux qui ont un impact sur le confort thermique, ainsi que des facteurs personnels tels que le sexe, l'habillement et le métabolisme. Les principales caractéristiques de ces deux indices sont présentées dans le Tableau 4.3.

L'indice PET est basé sur le modèle de bilan d'énergie MEMI (en anglais, Munich Energy balance Model for Individuals), qui est un modèle à deux noeuds. La PET est définie comme équivalente à « la température d'air à laquelle, dans un local typique intérieur (sans vent et sans rayonnement solaire), le bilan thermique du corps humain est équilibré avec les mêmes températures interne et de peau que celles obtenues dans les conditions extérieures étudiées » (Höppe, 1999).

L'environnement intérieur de référence est défini par une température radiante moyenne égale à la température de l'air, une vitesse de l'air fixée à 0,1 m/s et une pression de vapeur d'eau de 12 hPa (soit une humidité relative d'à peu près 50% pour $T_a=20^{\circ}\text{C}$).

L'indice PET est l'un des indices les plus utilisés ces dernières années pour les études de confort en extérieur et notamment en climat chaud et humide, où son applicabilité a été démontrée par de nombreux auteurs à différentes échelles urbaines (Lin and Matzarakis, 2008) (Hwang et al., 2011) (Makaremi et al., 2012) (Ng and Cheng, 2012) (Cheng et al., 2012) (Johansson et al., 2014) (Niu et al., 2015) (Li et al., 2016).

Tableau 4.3: Caractéristiques générales des deux indices de confort choisis pour l'étude à l'échelle du quartier

Indice de confort thermique	Auteurs and références	Expression (Unité)	Modèle	Environnement de référence	Climat d'application	Echelle d'application
PET	(Höppe, 1999)	Température équivalente (°C)	Modèle MEMI (Munich Energy balance Model for Individuals) - Modèle à deux nœuds	▪ $T_a = T_{mrt} = 20^{\circ}\text{C}$ ▪ Pression de vapeur d'eau = 12 hPa (HR=50% environ pour $T_a = 20^{\circ}\text{C}$) ▪ $V_a = 0,1\text{m/s}$ ▪ $M = 80\text{ W/m}^2$ ▪ $I_{cl} = 0,9\text{clo}$	Tout type de climat (dont climat chaud et humide)	Toute échelle (rue, îlot urbain, quartier, ville, région)
UTCI	International Society of Biometeorology-Commission 6 COST action 730 (Bröde et al., 2011), (Havenith et al., 2012), (Fiala et al., 2012)	Température équivalente (°C)	Modèle FPC (Fiala's multi-node human Physiology and thermal Comfort model) couplé avec un modèle pour l'habillement. Modèle à plusieurs nœuds.	▪ $T_a = T_{mrt}$ ▪ HR=50 % ▪ $V_a = 0,5\text{m/s}$ (à 10m) ▪ $M = 135\text{W/m}^2$ ▪ Marche à 1,1m/s	Tout type de climat (dont climat chaud et humide)	Toute échelle (rue, îlot urbain, quartier, ville, région)

L'indice UTCI est quant à lui l'un des derniers modèles développés, permettant de refléter les conditions de stress thermique d'un individu en combinant un modèle thermo-physiologique, un modèle pour l'habillement et les principaux facteurs météorologiques (T_a , V_a , HR, T_{mrt}) (Fiala et al., 2012). Il est défini comme « la température d'air équivalente d'un environnement de référence entraînant chez un individu de référence, la même réponse physiologique que l'environnement actuel » (Blazejczyk et al., 2012). L'environnement de référence est défini par une température radiante moyenne égale à la température de l'air, une vitesse de l'air égale à 0,5 m/s à 10m et une humidité relative égale à 50%.

Il a été développé par une équipe internationale multidisciplinaire comme un indicateur extérieur universel pouvant être utilisé dans tout type de climat, pour toute saison de l'année et tout type d'application (Jendritzky et al., 2012).

Cependant, il présente quelques faiblesses en termes d'utilisation en climat chaud et humide. Le niveau d'activité correspond à une personne marchant à 1,1m/s, soit un métabolisme égal à 2,3 met, ce qui est supérieur à ce qui est pratiqué en climat tropical. De plus, la valeur de l'isolation vestimentaire calculée par le modèle d'habillement inclus dans le calcul de l'indice présente des valeurs peu réalistes

pour des températures d'air élevées (Johansson et al., 2017) (Pantavou et al., 2013). Enfin, la vitesse du vent est prise à 10m dans le calcul de l'UTCI et non à 1,1m du sol comme mesurée dans les études microclimatiques (Blazejczyk et al., 2012). A côté de cela, la formule logarithmique permettant de calculer la vitesse de vent à 10m à partir des mesures prises à 1,1m du sol utilise une valeur pour la longueur de rugosité égale à 0,01, qui est plutôt représentative d'un terrain plat, dégagé et non d'un milieu urbanisé.

Malgré ces limitations, l'applicabilité de cet indice en climat chaud et humide a été validée par certains auteurs (Bröde et al., 2012) (Kruger et al., 2012).

4.3.5. Méthode de traitement des données et calcul des indices PET et UTCI

Les paramètres personnels tels que l'isolation par les vêtements et le niveau d'activité métabolique ainsi que l'IMC sont calculés pour chaque individu. Les valeurs pour I_{cl} en clo et M en met ont été définies selon l'ASHRAE Standard 55 (ASHRAE 55, 2017) et la norme (ISO 7730, 2005) (voir Annexe 16). La valeur globale de l'isolation par les vêtements, I_{cl} , est obtenue en faisant la somme des valeurs en clo pour chaque pièce de vêtement. Les valeurs de 0,03 et 0,04 clo ont été attribuées aux sous-vêtements des hommes et des femmes respectivement. La valeur de l'activité métabolique utilisée est calculée en moyennant le niveau d'activité métabolique 30min avant le questionnaire et le niveau d'activité au moment du questionnaire.

Puis, les variables climatiques mesurées (T_a , HR, V_a et T_g) sont moyennées sur la durée des enquêtes (5 à 7min en moyenne) pour chaque individu. Enfin, on calcule les valeurs de la température radiante moyenne et des deux indices de confort extérieur.

Pour le calcul du PET, la correction de la version originale, proposée par (Walther and Goestchel, 2018) a été utilisée. En effet, les auteurs ont pu identifier trois erreurs majeures ainsi qu'un modèle de diffusion de vapeur incohérent dans la routine du code de calcul du PET. Ils ont ainsi mis en évidence que la résistance à la diffusion de vapeur est définie dans l'ancien code comme une constante sans justification ou référence appuyant ce choix. De plus, afin de réduire la complexité du calcul aux outils numériques disponibles à cette époque, une hypothèse d'indépendance des équations a été posée permettant une résolution approchée d'un système d'équations non linéaires grâce à des polynômes du second degré. Enfin, la température de vêtue n'est pas dépendante des conditions ambiantes et constitue une simplification importante. Ils proposent alors une version corrigée du modèle en y intégrant un modèle de diffusion de vapeur basé sur l'état de l'art ainsi qu'une méthode de calcul plus récente pour la résolution du système non linéaire complet (bilans thermiques sur le noyau, sur la peau nue et à la surface de vêtue).

Leur code source est disponible à l'adresse suivante : https://github.com/eddes/AREP/blob/master/VDI_PET_corrected.py#cat.name.

Pour l'UTCI, le code de calcul simplifié proposé par (Bröde et al., 2011) a été utilisé, les valeurs des variables climatiques mesurées ne dépassant pas les conditions limites d'application qu'ils ont définies.

Le Tableau 4.4 ci-dessous présente la méthodologie suivie pour le calcul du PET et de l'UTCI.

Tableau 4.4: Méthode utilisée et paramètres requis pour le calcul des indices de confort urbain choisis

Indice de confort urbain	Méthode de calcul	Informations personnelles requises	Paramètres climatiques requis
PET	Version corrigée du code inclus dans la norme allemande VDI, proposée par (Walther and Goestchel, 2018)	M, I _{cl} , âge, sexe, taille, poids, position (assis ou debout)	T _a , HR, V _a (1,1m), T _{mrt}
UTCI	Equation de régression polynomiale proposée par (Bröde et al., 2011) : UTCI (T _a , T _{mrt} , V _a , p _v) = T _a + Offset (T _a , T _{mrt} , V _a , p _v)	Aucune	T _a , HR, V _a (10m), T _{mrt}

Les indices PET et UTCI peuvent également être calculés en utilisant les logiciels gratuits RayMan 1.2 (<https://www.urbanclimate.net/rayman/rayman.htm>) et BioKlima2.6 (<http://www.igipz.pan.pl/bioklima.html>).

Pour chacun des indices, quatre variables climatiques sont nécessaires (T_a, HR, V_a et T_{mrt}). Les valeurs pour T_a et HR sont directement obtenues lors des mesures. Des étapes de calcul supplémentaires sont nécessaires en ce qui concerne V_a et T_{mrt}. En effet, pour le calcul de l'UTCI, la vitesse d'air doit être celle à 10m de hauteur alors que la vitesse d'air est mesurée à 1,1m du sol dans les études de terrain. La formule suivante a été utilisée afin de calculer la vitesse à 10m :

$$V_{a,10m} = V_{a,1,1m} \times \frac{\log(\frac{10}{0,01})}{\log(\frac{1,1}{0,01})}$$

Équation 4-1 : Formule logarithmique pour le calcul de la vitesse du vent à 10m pour l'UTCI (Bröde et al., 2011)

Cette formule est celle utilisée dans la définition de l'indice UTCI (Bröde et al., 2011) (Fiala et al., 2012), avec une longueur de rugosité fixée à 0,01 par les auteurs, sans plus de justification. Cette valeur est plutôt représentative d'un milieu dégagé, où l'on peut retrouver des stations météorologiques classiques, mais pas d'un milieu urbain dense.

Pour le calcul de la température radiante moyenne, trois formules différentes ont été utilisées, afin de comparer l'impact sur les indices de confort mesurés et leur calibration respective :

- a) La formule de la norme (ISO 7726, 1998) appliquée au globe noir, notée $T_{mrt_noir_ISO}$, dont l'équation est la suivante :

$$T_{mrt} = \left[(T_g + 273,15)^4 + \frac{1,1 \times 10^8 \times V_a^{0,6}}{\varepsilon \times D^{0,4}} \times (T_g - T_a) \right]^{1/4} - 273,15$$

Équation 4-2 : Formule générale de T_{mrt} en convection forcée selon la norme (ISO 7726, 1998)

Avec T_g la température de globe noir (°C), V_a la vitesse du vent en (m/s), T_a la température d'air (°C), D le diamètre du globe noir (en m, ici égal à 0,150 m) et ε l'émissivité du globe noir (=0,95).

- b) La formule de la norme (ISO 7726, 1998) appliquée au globe gris, notée $T_{mrt_gris_ISO}$, donnée par Équation 3-8 , avec D le diamètre du globe gris (en m, ici égal à 0,040 m) et ε l'émissivité du globe gris (=0,97).
- c) La formule de T_{mrt} calibrée par (Tan et al., 2013) pour le globe gris et pour le climat tropical de Singapour, notée $T_{mrt_gris_Tan}$. Les auteurs ont calibré la formule de T_{mrt} pour le globe gris en la confrontant à la méthode de mesure intégrale des flux radiatifs selon la méthodologie décrite par (Thorsson et al., 2007). Cette méthode est plus précise et prend en compte tous les flux de rayonnement de courte et de longue longueur d'ondes provenant de six directions (Est, Ouest, Nord, Sud, Haut et Bas), grâce à l'utilisation de trois radiomètres différentiels. La formule suivante a été obtenue après calibration :

$$T_{mrt} = \left[(T_g + 273,15)^4 + \frac{3,42 \times 10^9 \times V_a^{0,119}}{\varepsilon \times D^{0,4}} \times (T_g - T_a) \right]^{1/4} - 273,15$$

Équation 4-3 : Equation de T_{mrt} calibrée pour la méthode du globe gris pour le climat tropical de Singapour par (Tan et al., 2013)

Avec D le diamètre du globe gris (en mm, ici égal à 40 mm) et ε l'émissivité du globe gris (=0,97).

Il y a des limitations quant à l'utilisation du globe noir en extérieur. La couleur noire du globe absorbe beaucoup trop le rayonnement de courte longueur d'onde et a donc tendance à surestimer la valeur de T_{mrt} au soleil. De plus, à cause de son diamètre important, le globe noir peut prendre plus de 15 minutes avant d'atteindre l'équilibre. Avec les conditions de fluctuations rapides du rayonnement et du vent, il se peut que celui-ci n'ait pas le temps d'atteindre l'équilibre (Kántor et al., 2014). Aussi, afin de pouvoir enregistrer ces variations soudaines dans le calcul de T_{mrt} , le capteur globe doit être de plus petite taille afin de réduire son temps de réponse et afin de réduire l'absorption du rayonnement de courte longueur

d'onde, il doit être de couleur plus claire (Johansson et al., 2014). Cela explique l'utilisation du globe gris avec un diamètre beaucoup moins important. De plus, afin de réduire la sensibilité des globes aux variations rapides du vent, les températures de globe ont été moyennées sur la durée des enquêtes soit 10 min.

Enfin, le calcul de l'indice PET demande de nombreuses informations personnelles alors que le calcul de l'UTCI se base sur une équation de régression obtenue à partir de paramètres climatiques uniquement (cf. Tableau 4.4).

4.3.6. Méthodologie suivie pour l'analyse des résultats

4.3.6.1. Statistique descriptive

Différentes méthodes de statistique descriptive ont été utilisées afin de traiter et d'analyser les données obtenues, comptant notamment le calcul des moyennes, écarts-types, minimum et maximum pour les différentes variables quantitatives étudiées.

Les données relatives à la dispersion des valeurs de T_{mrt} et des indices de confort PET et UTCI ont été représentées de manière graphique à l'aide de boîtes à moustaches (boxplot) qui permettent de visualiser rapidement la dispersion des données (médiane, quartiles, minimum, maximum) (cf Figure 4.10). La boîte représentée contient 50% des observations et elle est coupée par la médiane (milieu de la série). La longueur des moustaches donne la dispersion des valeurs minimales et maximales (correspondant à 25% des observations dans chaque cas). Ainsi, plus la boîte et les moustaches sont étendues, et plus la dispersion de la série statistique est grande. Les valeurs dites « aberrantes » sont schématisées par des points aux extrémités des moustaches. La moyenne peut également être représentée, ici par une croix.

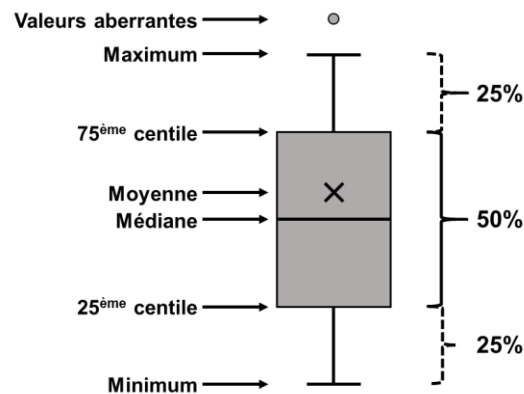


Figure 4.10: Représentation de la boîte à moustaches

4.3.6.2. Définition de la température neutre, de la zone de neutralité thermique et méthode de calibration des indices PET et UTCI

La méthode utilisée pour la définition des différents « benchmarks » et pour la calibration de l'indice PET s'appuie sur des études récentes, où les votes de sensation thermique ont été regroupés et moyennés (en anglais Mean Thermal Sensation Vote - MTSV) par intervalle de 1°C pour l'indice PET et l'UTCI. Une simple analyse de régression linéaire entre le MTSV et l'indice choisi est ensuite réalisée. Cette méthode est l'une des plus utilisées dans les études de calibration des indices et de comparaison entre climats (Lin and Matzarakis, 2008) (Lai et al., 2014) (Li et al., 2016) (Salata et al., 2016) (Krüger et al. 2017) (Lam and Lau, 2018) car elle est simple d'application et qu'une calibration complète de toutes les catégories de sensation thermique peut être faite. Cependant, (Cheung and Jim, 2017) soulignent également les limites de cette méthode, à savoir que cette méthode est basée sur l'hypothèse que l'intervalle entre chaque classe de sensation ou de stress est le même. De plus, l'extrapolation des données au-dessus ou en-dessous des données obtenues peut entraîner des biais dans la calibration.

Pour illustrer la méthode, supposons que les votes de plusieurs personnes sont moyennés pour un indice PET compris entre 23 et 24°C et que l'on obtient un MTSV égal 0,4. Sur le graphique représentant MTSV en fonction de PET, on placera la valeur de MTSV égale à 0,4 pour un PET de 23,5°C. Ce principe est appliqué à chaque réponse pour chaque intervalle de température de PET. De plus, afin de réduire le risque d'avoir des valeurs pour les moyennes de vote aberrantes, un minimum de 5 votes a été fixé par intervalle d'un degré. Certains intervalles de température peuvent donc parfois ne pas avoir de votes moyens associés.

La température dite neutre est ici définie comme la température pour laquelle la sensation thermique est égale à 0 en se projetant sur la courbe de régression linéaire obtenue entre MTSV et l'indice de confort étudié.

La zone de neutralité thermique, correspondant à la catégorie « aucun stress thermique », est quant à elle définie pour un vote de sensation thermique compris entre -0,5 et 0,5 (Lai et al., 2014) (Krüger et al. 2017). En effet, il a été démontré que les votes subjectifs qui sont situés dans les trois catégories centrales de l'échelle de perception thermique démontrent généralement une satisfaction des individus avec leur environnement thermique alors que les votes dans les autres catégories sont associés à une insatisfaction (ASHRAE, 2001) (Spagnolo and De Dear, 2003) (Lin, 2009) (Cheng et al., 2012).

La Figure 4.11 présente les principes de température neutre (T_n) et de zone de neutralité thermique qui sont utilisés dans cette étude.

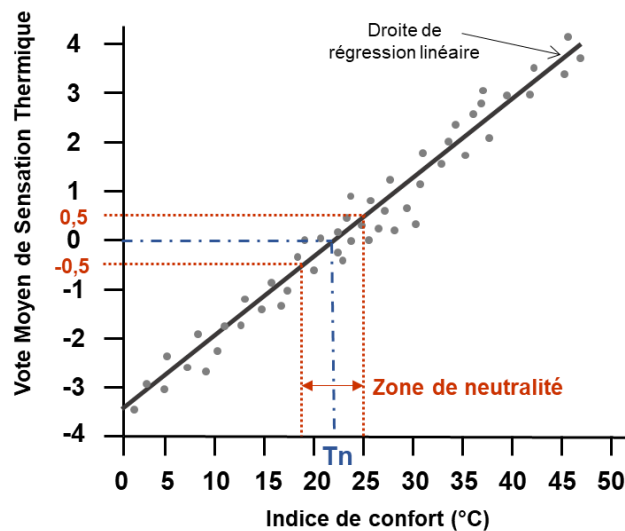


Figure 4.11: Principe utilisé pour la calibration des indices de confort urbain et définition de la température neutre (T_n) et de la zone de neutralité. Dans cet exemple, la température neutre est égale à 22°C et la zone de neutralité est comprise entre 19°C et 25°C.

La calibration des zones de sensation thermique des indices PET et UTCI est ici réalisée en établissant une relation entre les catégories de sensation thermique et les valeurs de température des indices, au travers des valeurs de votes de sensation thermique TSV. Cette méthodologie sera ensuite appliquée dans notre cas au vote moyen de sensation thermique MTSV.

Le Tableau 4.5 suivant donne les valeurs de votes de sensation thermique (TSV) définies dans cette étude pour les différentes catégories de sensation thermique appliquées à l'indice PET. Les valeurs de référence pour l'échelle d'origine de la PET ont été déduites en se basant sur les études de (Matzarakis et al., 1999) et (Krüger et al. 2017). La zone neutre associée à la zone de confort est définie pour une température de PET comprise entre 18 et 23°C.

Tableau 4.5 : Echelle de sensation thermique liée à la chaleur définie pour l'indice PET en fonction des valeurs de vote de sensation thermique (adaptée depuis (Matzarakis et al., 1999)). Les votes négatifs liés au froid ne sont pas pris en compte ici.

Vote de sensation thermique (TSV)	Sensation thermique	PET (°C)
-0,5 à 0,5	Neutre	18 - 23
0,5 à 1,5	Légèrement chaud	23 - 29
1,5 à 2,5	Chaud	29 - 35
2,5 à 3,5	Très chaud	35 - 41
>3,5	Extrêmement chaud	>41

De la même manière, le Tableau 4.6 donne les valeurs de votes de sensation thermique TSV correspondant aux différentes catégories de sensation proposées pour l'indice UTCI dans notre étude. La correspondance entre sensation thermique et intervalle de l'UTCI a été adaptée depuis l'étude réalisée par (Bröde et al., 2011) sur la procédure opérationnelle de l'UTCI, où la définition de zone de neutralité thermique a été appliquée à un sous-intervalle de la zone neutre comprise entre 18 et 26°C.

Tableau 4.6 : Echelle de sensation thermique liée à la chaleur définie pour l'indice UTCI en fonction des valeurs de TSV (adaptée depuis (Bröde et al., 2011)). Les votes négatifs liés au froid ne sont pas pris en compte ici.

Vote de sensation thermique (TSV)	Sensation thermique	UTCI (°C)
-0,5 à 0,5	Neutre	18 - 26
0,5 à 1,5	Légèrement chaud	26 - 32
1,5 à 2,5	Chaud	32 à 38
2,5 à 3,5	Très chaud	38 à 46
>3,5	Extrêmement chaud	>46

Les valeurs définies pour les votes de sensation thermique (TSV) seront appliquées dans le cas de la calibration des indices aux votes moyens MTSV calculés.

Les droites de régression obtenues entre MTSV et les valeurs de PET et d'UTCI permettront ainsi d'obtenir les limites de chaque catégorie de sensation thermique en appliquant la méthodologie décrite ci-dessus. Dans notre cas, on ne s'intéresse qu'à la partie « chaude » de l'échelle thermique puisque

l'étude se concentre sur la problématique du confort d'été. De ce fait, il n'y a pas de vote de sensation thermique négatif dans les tableaux.

4.4. Résultats

4.4.1. Statistiques générales des enquêtes

Avec une population estimée à 7 200 habitants dans le quartier de la Ravine Blanche (Source Insee, Recensements de la population en 2015), le nombre de répondants requis est de 365 pour une marge d'erreur de 5% et un intervalle de confiance de 95%. Dans notre cas, 370 personnes ont été interrogées sur la période des enquêtes. Cependant, sur ces 370 questionnaires, ceux remplis par des touristes ou des personnes ne vivant pas à La Réunion depuis plus de 6 mois, ainsi que ceux remplis par des personnes qui étaient en extérieur depuis moins de 15 min ont été écartés. L'étude finale se base donc sur un total de 334 questionnaires valides, ramenant la marge d'erreur à 5,24% pour un intervalle de confiance fixé à 95%.

La Figure 4.12 montre que la majorité des personnes interrogées vivent à La Réunion depuis plus de 10 ans (60%). De plus, 60 % des personnes ayant répondu vivent à Saint-Pierre et 46% d'entre eux résident dans le quartier de Ravine Blanche. Les réponses étudiées représentent donc en majorité la perception des habitants de Saint-Pierre.

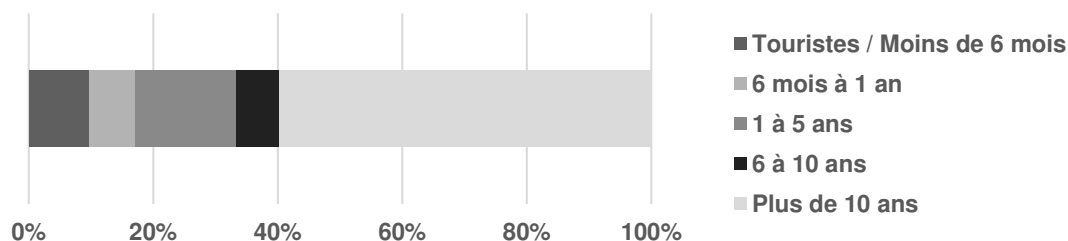


Figure 4.12: Répartition de l'échantillon en fonction du temps vécu à La Réunion.

L'échantillon étudié est assez diversifié en termes de sexe, d'âge et de catégorie professionnelle. Il est composé de 45% de femmes et de 55% d'hommes, âgés principalement entre 21 et 60 ans, dont la majorité sont actifs (voir Figure 4.13). Il est également important de noter que 55% des personnes actives travaillent en intérieur (type bureau), 16% en extérieur et les 29% restant ont un travail qui leur

fait passer du temps à la fois en intérieur et en environnement extérieur. De plus, 46% des personnes actives ont un bureau climatisé en été.

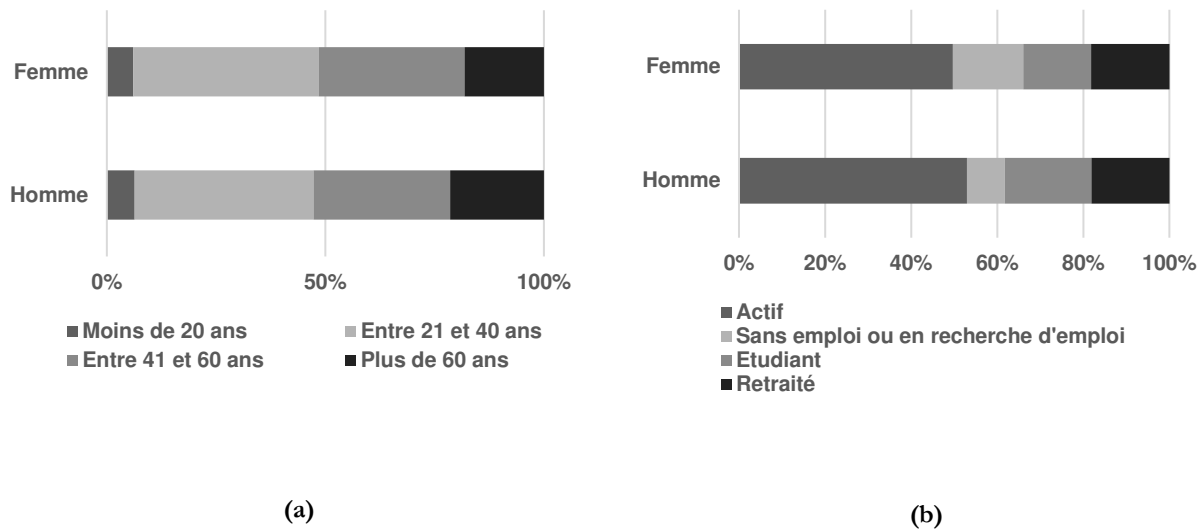


Figure 4.13: Répartition de l'échantillon étudié en termes (a) d'âge et (b) de catégorie professionnelle selon le sexe.

Enfin, en termes physiologiques, la population étudiée est caractérisée par un IMC moyen de 24 kg/m^2 (poids normal) et une activité métabolique moyenne de 1,8 met soit environ 190W (en prenant $1 \text{ met} = 58,1 \text{ W/m}^2$ et en multipliant par la surface de la peau d'un individu moyen adulte de $1,8 \text{ m}^2$) et correspondant à une activité légère, ou à une personne qui marche tranquillement (voir Tableau 4.7).

Tableau 4.7: Caractéristiques personnelles et physiologiques des personnes enquêtées

	Taille (cm)	Poids (kg)	IMC (kg/m^2)	I_{cl} (clo)	Métabolisme (met)
Moyenne	169,2	69,3	24,1	0,37	1,79
Ecart-type	10,1	14,3	4,2	0,09	0,94

La valeur d'isolation vestimentaire moyenne est de 0,37, ce qui correspond à une tenue vestimentaire d'été en climat chaud et humide, et proche de pays comme Singapour ou Hong-Kong, comme le montre le Tableau 4.8 ci-après.

Tableau 4.8: Valeurs observées de l'isolation par l'habillement dans certaines études réalisées en climat chaud et humide (Emmanuel et al., 2016) et valeur de la présente étude.

Ville, Pays	I _{cl} (clo)	Climat	Référence
Saint-Pierre, La Réunion	0,37	Chaud et humide	L'étude proposée
Singapour	0,30	Chaud et humide	(Yang et al., 2013)
Hong-Kong	0,45	Chaud et humide	(Cheng et al., 2012)
Guayaquil, Equateur	0,50	Chaud et humide	(Johansson and Yahia, 2011)
Taichung, Taïwan	0,60	Chaud et humide	(Lin, 2009)

4.4.2. Conditions climatiques générales et microclimatiques des jours d'enquête

La période des enquêtes s'étend de Novembre 2017 à Janvier 2019.

La majorité des sessions d'enquête se sont déroulées en été, durant les mois de Janvier, Février et Mars, avec 222 questionnaires soit 60% des enquêtes :

- 102 questionnaires en Janvier 2018, soit 27,6% des enquêtes ;
- 66 questionnaires en Février 2018, soit 17,8% des enquêtes ;
- 23 questionnaires en Mars 2018, soit 6,2% des enquêtes ;
- 31 questionnaires en Janvier 2019, soit 8,4% des enquêtes.

Les autres sessions ont eu lieu en inter-saison durant les mois d'Octobre, de Novembre et début Juin, avec 148 questionnaires réalisés au total (40% des enquêtes) dont :

- 19 questionnaires en Novembre 2017, soit 5,1% des enquêtes ;
- 79 questionnaires début Juin 2018, soit 21,4% des enquêtes ;
- 50 questionnaires en Octobre 2018, soit 13,5% des enquêtes.

Chaque session avait une durée minimale de 2h et la quasi-totalité d'entre elles se sont déroulées le matin entre 9h et 12h, durant la période la plus fréquentée du quartier.

Le Tableau 4.9 ci-après nous donne les conditions climatiques principales issues de la station météorologique de Météo France la plus proche en fonction des différents jours d'enquête.

Les journées sont généralement chaudes et humides notamment durant la période estivale de 2018, fortement marquée par de nombreux épisodes cycloniques. En effet, la saison cyclonique a débuté en Janvier 2018 et s'est terminée fin Avril 2018, avec 9 systèmes cycloniques. Certains ont entraîné dans leur sillage des épisodes pluvieux significatifs en passant au large de nos côtes.

Tableau 4.9: Données météorologiques des jours d'enquête issues de la station météorologique la plus proche (Pierrefonds, Saint-Pierre. Source : Météo France)

Date	Température d'air sec (°C)			Humidité relative (%)	Rayonnement global horizontal (kWh/m ²)	Vitesse du vent à 10 m (m/s)		Précipitation (mm)
	Moy	Min	Max	Moy	Cumul journalier	Moyen	Max moyen (sur 10min)	Cumul journalier
07/11/2017	24,4	19,8	28,3	62,0	8,4	3,1	4,6	0
10/11/2017	26,0	22,2	29,6	69,0	7,6	3,0	5,2	0
09/01/2018	28,2	26,0	30,7	76,0	7,6	2,6	4,4	0
20/01/2018	27,1	23,7	29,9	81,0	8,2	2,8	7,4	0
24/01/2018	27,2	23,7	30,4	78,0	7,9	5,6	9,1	15,7
27/01/2018	27,5	24,6	30,8	75,0	6,5	2,3	3,7	0
10/02/2018	25,4	23,1	28,1	87,0	3,9	3,9	8,6	20,3
03/03/2018	27,6	24,3	31,7	76,0	6,8	2,6	5,4	1,8
09/06/2018	23,9	20,9	27,6	72,0	2,8	3,3	6,3	3,2
06/10/2018	22,7	18,6	27,3	58,0	5,6	3,7	6,9	0
12/01/2019	28,2	25,6	32,7	68,0	6,5	2,9	7,6	4,2

Concernant, les journées d'enquête, les journées les plus chaudes sont celles du 9 Janv. 2018, du 3 mars 2018 et du 12 Janv. 2019 avec des maximales dépassant les 30°C. Les journées les plus fraîche sont celles de Juin et d'octobre.

Les sessions d'enquête ont été réalisées à la fois pour des journées dégagées, avec passage nuageux et couvertes. Mais dans l'ensemble, les journées étaient bien ensoleillées, excepté les journées du 10 Fév. et du 9 Juin 2018. Certaines journées présentent même un rayonnement global supérieur aux normales saisonnières, généralement comprises entre 6,0 et 7,0 kWh/m² en été. La vitesse du vent à 10m du sol est en moyenne supérieure à 2,5m/s, avec les journées du 24 Janv. 2018 et du 10 Fév. 2018 étant les plus ventées.

Le Tableau 4.10 liste les paramètres physiques mesurés sur site avec la station microclimatique mobile et les valeurs de température radiante moyenne calculée selon les différentes formules données dans la

partie 4.3.5. . Un descriptif plus détaillé des variables physiques mesurées par journée d'enquête est donné en Annexe 17 et les statistiques obtenues pour la T_{mrt} calculée selon les différentes formules sont présentées en Annexe 18.

Tableau 4.10: Valeurs moyennes et maximales des variables microclimatiques mesurées sur site et de la T_{mrt} calculée pour chaque formule en fonction des jours d'enquête

Date	Exposition	T_a (°C) Moy./ Max.	HR (%) Moy./ Max.	V_a (m/s) Moy./ Max.	T_{g_noir} (°C) Moy./ Max.	T_{g_gris} (°C) Moy./ Max.	$T_{mrt_noir_ISO}$ (°C) Moy./ Max.	$T_{mrt_gris_ISO}$ (°C) Moy./ Max.	$T_{mrt_gris_Tan}$ (°C) Moy./ Max.
07/11/2017	Entre les deux	26,6 / 27,1	58,6 / 61,1	1,0 / 2,4	34,2 / 40,8	30,8 / 33,8	48,1 / 71,9	44,8 / 63,3	56,8 / 74,6
10/11/2017	Plein soleil	28,4 / 29,3	71,8 / 77,1	1,6 / 3,3	41,3 / 43,3	34,7 / 36,2	70,7 / 80,5	60,5 / 71,4	72,9 / 78,6
09/01/2018	Entre les deux	30,0 / 30,6	79,5 / 82,4	0,7 / 2,1	36,7 / 43,2	33,1 / 36,9	46,9 / 70,6	41,5 / 59,8	51,7 / 75,0
20/01/2018	Plein soleil	29,0 / 30,5	81,1 / 84,5	1,1 / 2,6	40,2 / 45,8	32,9 / 36,7	61,6 / 78,4	46,7 / 60,3	57,4 / 75,6
24/01/2018	Entre les deux	29,3 / 30,1	80,2 / 83,6	1,2 / 2,9	36,1 / 41,7	32,4 / 36,0	50,5 / 70,6	43,9 / 62,5	52,4 / 74,6
27/01/2018	Plein soleil	29,4 / 30,2	76,8 / 81,8	1,3 / 2,3	41,8 / 46,1	35,3 / 38,1	66,4 / 81,7	56,3 / 68,1	70,1 / 83,0
10/02/2018	A l'ombre	26,7 / 27,1	95,2 / 98,2	3,2 / 5,2	28,2 / 29,2	27,5 / 28,3	34,5 / 40,5	33,4 / 39,9	34,0 / 39,4
03/03/2018	A l'ombre	29,7 / 30,0	74,6 / 79,8	0,8 / 2,7	31,2 / 34	30,3 / 30,9	33,8 / 41,9	32,2 / 34,4	34,5 / 37,6
09/06/2018	A l'ombre	24,8 / 25,6	83,3 / 88,2	1,1 / 2,4	26,2 / 27,8	25,8 / 27,1	29,6 / 35,0	29,7 / 34,5	33,2 / 38,3
06/10/2018	Plein soleil	25,5 / 26,6	60,1 / 65,6	1,2 / 2,3	36,3 / 40,4	30,1 / 33,0	58,3 / 70,9	47,1 / 57,1	59,5 / 71,2
12/01/2019	A l'ombre	30,3 / 31,3	73,9 / 76,7	1,1 / 2,3	32,3 / 33,4	31,5 / 32,7	36,8 / 41,1	35,9 / 40,9	39,6 / 44,5

En termes de température d'air sec mesurée sur site, les trois journées les plus chaudes sont bien celles du 9 Janv. 2018, du 3 mars 2018 et du 12 Janv. 2019 (été) avec des moyennes supérieures à 29,5°C. Les journées du 9 juin et du 6 Oct. 2018 (intersaison) présentaient les températures les plus basses. Les températures moyennes de globes (noir et gris) se rapprochent des valeurs de températures moyennes d'air sec pour les journées à l'ombre. Cependant, les valeurs de T_{mrt} sont supérieures à la température

moyenne d'air sec pour chacun des jours d'enquête. Les journées présentaient un fort ensoleillement en général. Les écarts observés entre la température d'air sec et la T_{mrt} sont d'autant plus importants pour les journées où les enquêtes se sont déroulées avec une exposition plein soleil, avec des maximales dépassant les 70°C.

Le taux d'humidité est généralement supérieur à 70%, excepté pour les journées du 7 Nov. 2017 et du 6 Oct. 2018 (intersaison). La vitesse d'air est en moyenne supérieure à 1m/s, excepté sur les journées du 9 janv. et du 3 mars 2018, qui sont aussi les plus chaudes. La journée du 10 Fév. 2018 présente le taux d'humidité relative le plus élevé proche de 100% et une vitesse d'air élevée avec des vitesses maximales supérieures à 5m/s. Un système dépressionnaire se trouvait à proximité des côtes réunionnaises à ce moment-là.

4.4.3. Influence du choix de la méthode de mesure et de calcul de T_{mrt} sur les indices de confort PET et UTCI

Cette partie vise à étudier l'impact du choix de méthode de calcul de T_{mrt} sur les indices de confort urbain choisis. Les données microclimatiques obtenues durant les différents jours d'enquête ont été utilisées pour le calcul de T_{mrt} , de la PET et de l'UTCI. Le calcul de la température radiante a été effectué en utilisant les différentes méthodes présentées dans la partie 4.3.5. Contrairement à l'UTCI, des données relatives aux caractéristiques personnelles et physiologiques sont requises pour le calcul de la PET. Les valeurs de la PET présentées dans cette partie ont été calculées à partir des valeurs moyennes de l'échantillon de la population soit un homme de 40 ans en position debout, mesurant 1,74m avec un poids égal à 74kg, un niveau d'activité moyen de 190W et une valeur d' I_{cl} égale à 0,37 clo.

Une analyse globale de tous les jours d'enquêtes est proposée ainsi qu'une distinction entre les jours où les personnes et la station étaient exposées au soleil et les jours où les enquêtes se sont déroulées à l'ombre. La Figure 4.14 ci-après nous présente les résultats obtenus pour T_{mrt} et pour les indices PET et UTCI selon la formule choisie.

Il peut être observé que le choix de la méthode de mesure (globe noir ou globe gris) et de la formule appliquée influence de manière non négligeable les valeurs de T_{mrt} sur la globalité des enquêtes (Figure 4.14 a). Les valeurs de $T_{mrt_noir_ISO}$ et $T_{mrt_gris_Tan}$ sont en moyenne supérieures à celles $T_{mrt_gris_ISO}$ et présentent également des valeurs maximales bien plus élevées, avec 82,1°C pour le globe noir et 81,6°C pour le globe gris selon la formule de (Tan et al., 2013). La formule issue de la norme ISO 7726 appliquée au globe gris présente des valeurs plus faibles en moyenne et $T_{mrt_gris_ISO}$ ne dépasse pas les 70°C contrairement aux deux autres méthodes. Un écart de 8°C est observé entre la moyenne de $T_{mrt_gris_ISO}$ et celle de $T_{mrt_gris_Tan}$. Les valeurs de $T_{mrt_noir_ISO}$ et $T_{mrt_gris_Tan}$ sont relativement proches.

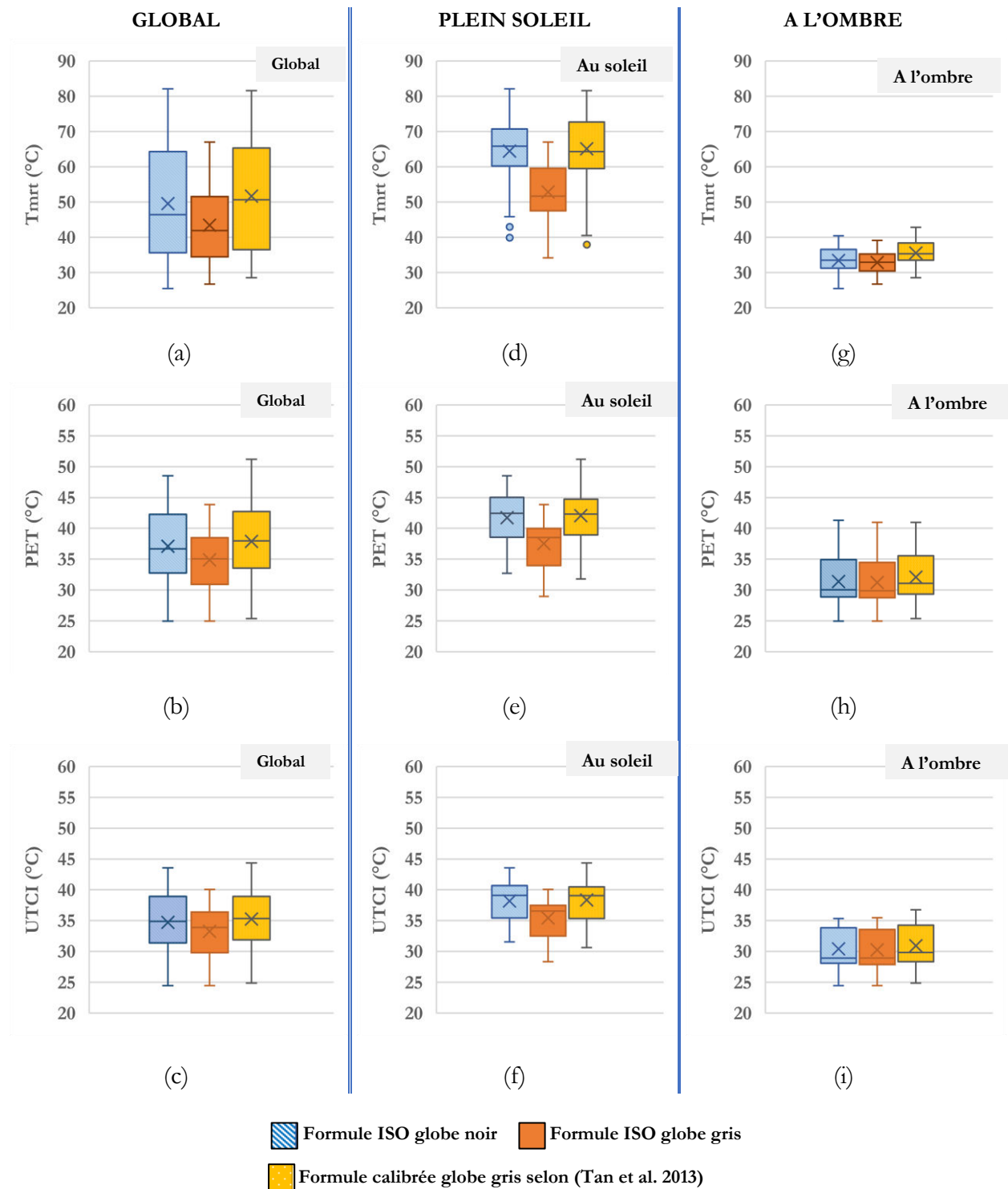


Figure 4.14 : Impact du choix de la méthode de calcul choisie sur les valeurs de T_{mrt} et les indices de confort PET et UTCI pour l'ensemble des jours d'enquêtes toutes expositions confondues (a, b et c respectivement), pour les jours où les enquêtes se sont déroulées au soleil (d, e et f) et pour les sessions qui ont eu lieu à l'ombre (g, h et i)

Une décomposition de ces données a ensuite été réalisée en fonction de l'exposition (au soleil ou à l'ombre). Pour une exposition plein soleil, les valeurs de T_{mrt} calculées sont élevées dans chaque cas (en moyenne supérieures à 50°C). La même tendance est observée dans la répartition des valeurs de T_{mrt} que celle obtenue pour l'ensemble des enquêtes, mais avec un écart beaucoup plus important entre la moyenne de $T_{mrt_gris_ISO}$ et celle de $T_{mrt_gris_Tan}$, de l'ordre de 12°C (Figure 4.14 d). L'écart entre la moyenne de $T_{mrt_noir_ISO}$ et celle de $T_{mrt_gris_ISO}$ est quant à lui de 11,6°C.

Les valeurs de $T_{mrt_noir_ISO}$ et $T_{mrt_gris_Tan}$ sont proches, notamment en termes de valeur moyenne et maximale. Néanmoins, les valeurs minimales sont différentes et la valeur la plus basse de T_{mrt} est obtenue pour $T_{mrt_gris_Tan}$.

Cependant, lorsque la mesure est faite à l'ombre, l'écart se réduit nettement et les moyennes observées sont plus proches, avec 33,4°C pour $T_{mrt_noir_ISO}$, 32,8°C pour $T_{mrt_gris_ISO}$ et 35,5°C pour $T_{mrt_gris_Tan}$ (Figure 4.14 g). De plus, les valeurs de T_{mrt} sont beaucoup plus faibles à l'ombre dépassant légèrement les 40°C pour les méthodes du globe noir et du globe gris avec formule calibrée. Les valeurs de T_{mrt} calculées avec la formule calibrée du globe gris selon (Tan et al., 2013) sont en moyenne plus élevées que pour les deux autres méthodes.

Une exposition au rayonnement direct a donc une influence non négligeable sur les variations de T_{mrt} en fonction du globe choisi mais aussi selon la formule de calcul appliquée. Si les mesures sont faites à l'ombre, le choix de la formule impacte moins les valeurs de T_{mrt} , bien que la formule calibrée du globe gris donne des valeurs de T_{mrt} en moyenne supérieures aux deux autres méthodes de calcul. Les valeurs de $T_{mrt_gris_Tan}$ sont en moyenne plus élevées que celles obtenues avec les deux autres méthodes. Les écarts observés entre $T_{mrt_noir_ISO}$ et $T_{mrt_gris_ISO}$ lorsque les enquêtes se font au soleil, pourraient s'expliquer par le fait que le globe noir surestime l'absorption du rayonnement solaire de courte longueur d'onde. Pour la formule calibrée du globe gris, les écarts peuvent être liés au fait que la calibration a été faite dans un contexte différent, en termes de latitude, de sites instrumentés et de conditions microclimatiques mais aussi de paramètres personnels différents (facteurs physiologiques, psychologiques, etc.).

L'impact du choix de la formule de T_{mrt} sur les indices de confort PET et UTCI est également étudié. Les tendances observées avec la répartition de T_{mrt} sont répercutées de manière similaire au niveau des deux indices de confort. Ceci était prévisible puisque les indices PET et UTCI sont très fortement et positivement corrélés à T_{mrt} . Ainsi, on observe une variation plus marquée au niveau des valeurs moyennes et des extrema pour une exposition plein soleil (Figure 4.14 e et f) et des valeurs très proches lorsque les mesures sont faites à l'ombre (Figure 4.14 h et i). Pour les mesures réalisées au soleil, la valeur moyenne de PET peut différer de jusque 5°C et celle de l'UTCI de jusque 3°C en fonction des formules utilisées. Les valeurs de la PET et de l'UTCI calculées avec $T_{mrt_gris_Tan}$ sont en moyenne plus élevées que pour les deux autres méthodes. La méthode du globe gris selon la norme ISO 7726 ($T_{mrt_gris_ISO}$) donne dans chaque cas les valeurs les plus faibles.

En conclusion, le choix de la méthode de mesure (globe noir ou globe gris) ainsi que celui de la méthode de calcul de T_{mrt} (formule selon norme ISO 7726 ou calibrée dans un pays avec les radiomètres) ont une influence non négligeable pour une exposition plein soleil sur les valeurs de T_{mrt} obtenues et impactent par conséquent les valeurs des indices de confort obtenues de manière non négligeable. Lorsque les enquêtes sont réalisées totalement à l'ombre, les écarts observés entre la valeur de T_{mrt} obtenue pour chaque méthode de calcul sont réduits. Néanmoins, nous cherchons ici à définir la zone de confort thermique et non la notion de stress ou d'inconfort thermique. Un fort écart observé loin de la zone de confort a donc peu d'importance alors qu'un faible écart à proximité des limites de zone de confort aura un fort impact. En été, les limites de la zone de confort sont probablement plus liées aux conditions thermiques obtenues à l'ombre, plutôt qu'à une exposition plein soleil.

L'impact de ces trois méthodes de calcul de T_{mrt} sur les valeurs obtenues pour la température neutre et pour la zone de neutralité thermique des indices PET et UTCI sera également étudiée dans les sections suivantes.

4.4.4. Analyse du confort thermique

Cette section présente les principaux résultats obtenus pour l'étude « subjective » de la perception du confort thermique de la population interrogée, en termes de sensation thermique, de confort thermique, d'acceptabilité thermique et de préférence thermique. Une analyse de la sensation et de la préférence liée aux autres variables microclimatiques, à savoir le vent, le rayonnement solaire et l'humidité, est également proposée. Une distinction est faite en fonction de la saison d'étude (été/intersaison) pour l'ensemble des facteurs étudiés, et aussi en fonction de l'exposition (soleil/ombre) pour la partie relative au rayonnement solaire.

4.4.4.1. Sensation thermique et sensation liée aux autres variables microclimatiques

La Figure 4.15 présente la répartition des fréquences des votes de sensation pour différentes variables climatiques affectant le confort thermique, à savoir la température sèche d'air, l'humidité relative et la vitesse d'air en fonction des saisons d'étude.

Comme le montre la Figure 4.15.a, les votes de sensation thermique sont principalement exprimés pour la partie chaude de l'échelle de sensation, avec moins de 5 % des votes compris entre -1 et -3, puisque les enquêtes ont principalement été réalisées durant l'été ou l'intersaison. Les votes les plus fréquents sont les votes « neutre » avec 46,3 % en intersaison et 32,0 % en été, ainsi que les votes « légèrement chaud » avec 31,3 % en intersaison et 28,0 % en été. Le vote « neutre » est plus souvent

exprimé en intersaison qu'en été. Les votes « assez chaud » à « très chaud » (+2 et +3 sur l'échelle de sensation) sont cependant plus importants en été.

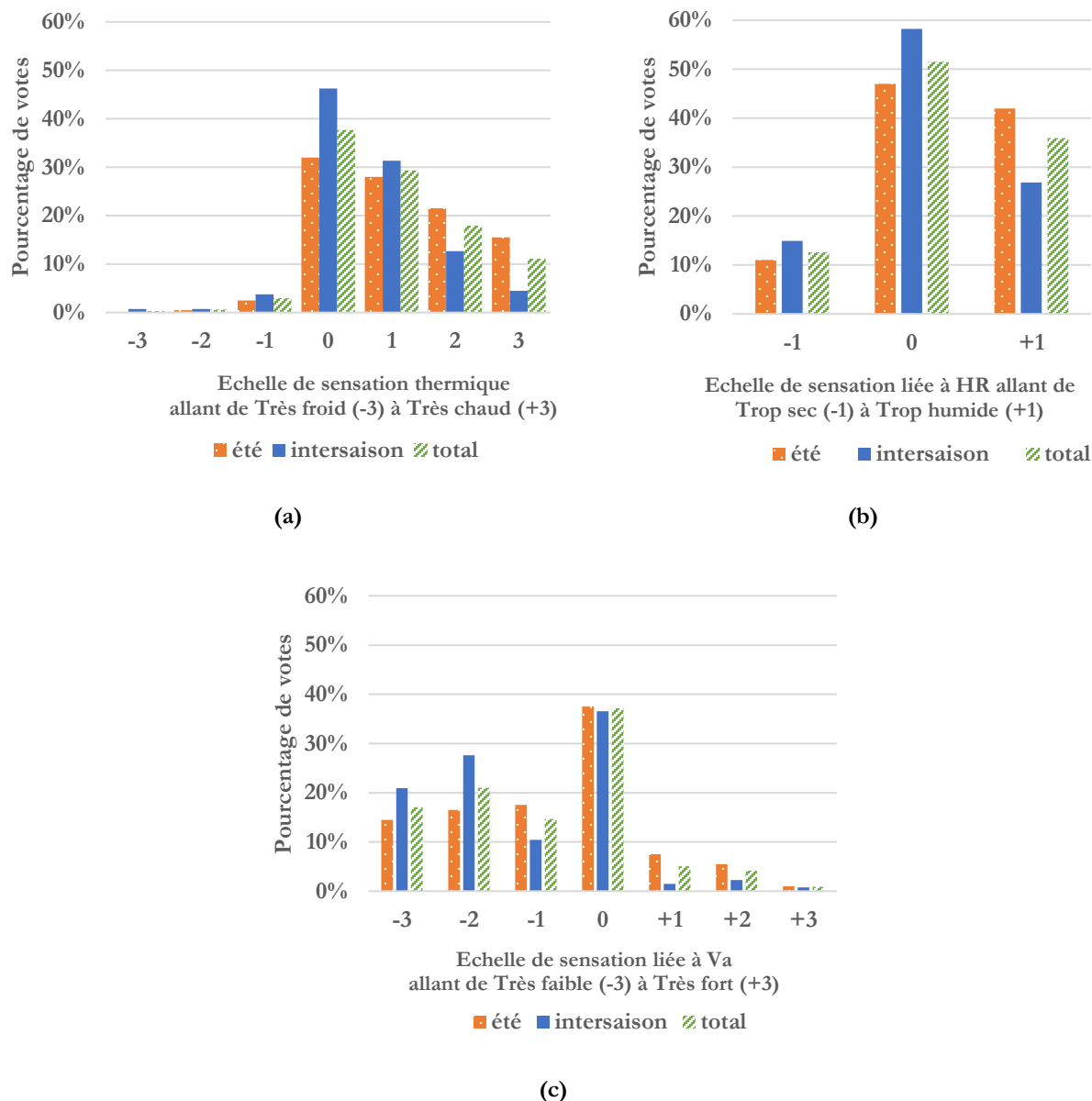


Figure 4.15: Répartition des votes de sensation en fonction de la saison des enquêtes pour différentes variables climatiques : (a) la température d'air, (b) l'humidité relative et (c) la vitesse d'air.

En ce qui concerne l'humidité, que ce soit en été ou durant l'intersaison, les votes « neutre » et « trop humide » sont plus souvent exprimés. Durant l'intersaison, l'humidité relative est ressentie comme

« neutre » avec 58 % des votes, soit deux fois plus de votes que pour la sensation « trop humide » alors qu'en été, l'humidité relative est quasiment autant ressentie comme « neutre » que « trop humide » (voir Figure 4.15.b).

La fréquence des votes de sensation en lien avec la vitesse d'air est quant à elle plus importante dans la partie basse de l'échelle de sensation, exprimant une vitesse d'air perçue comme un peu faible à très faible avec 53 % des votes exprimés au total. La vitesse est notamment perçue comme assez faible et très faible durant l'intersaison. De plus, il y a autant de votes neutres exprimés en été qu'en intersaison avec 37 % des votes (voir Figure 4.15.c).

La distribution des fréquences des votes de sensation en lien avec le rayonnement solaire est également étudiée dans la Figure 4.16 ci-dessous en fonction des saisons et en fonction de l'exposition des personnes interrogées, soit en plein soleil et totalement exposées au rayonnement solaire, à l'ombre et donc non exposées au rayonnement direct et enfin, les votes exprimés pour une exposition partielle au rayonnement direct (pas totalement ombragé).

Pour une exposition plein soleil (cf Figure 4.16.a), la majorité des votes est exprimée dans la partie positive de l'échelle de sensation, soit un rayonnement ressenti comme un peu fort à très fort, pour les saisons étudiées avec 78% des votes pour l'ensemble de la période des enquêtes. Les fréquences pour les votes +2 et +3 sont plus importantes en été que durant l'intersaison.

Lorsque les personnes ont été interrogées à l'ombre (voir Figure 4.16.b), les réponses données diffèrent selon la saison d'étude. Durant l'intersaison, les votes « très faibles » sont plus fréquents avec 78% des votes exprimés alors qu'en été, les votes sont plus répartis, avec une majorité de votes neutres représentant 40% des votes. Enfin, lors d'une exposition partielle (cf Figure 4.16.c), les votes « neutres » et « très faibles » sont les plus fréquents durant l'intersaison avec respectivement 41% et 35% des votes. Durant l'été, les gens perçoivent le rayonnement solaire comme un peu fort à très fort avec 68% des votes exprimés.

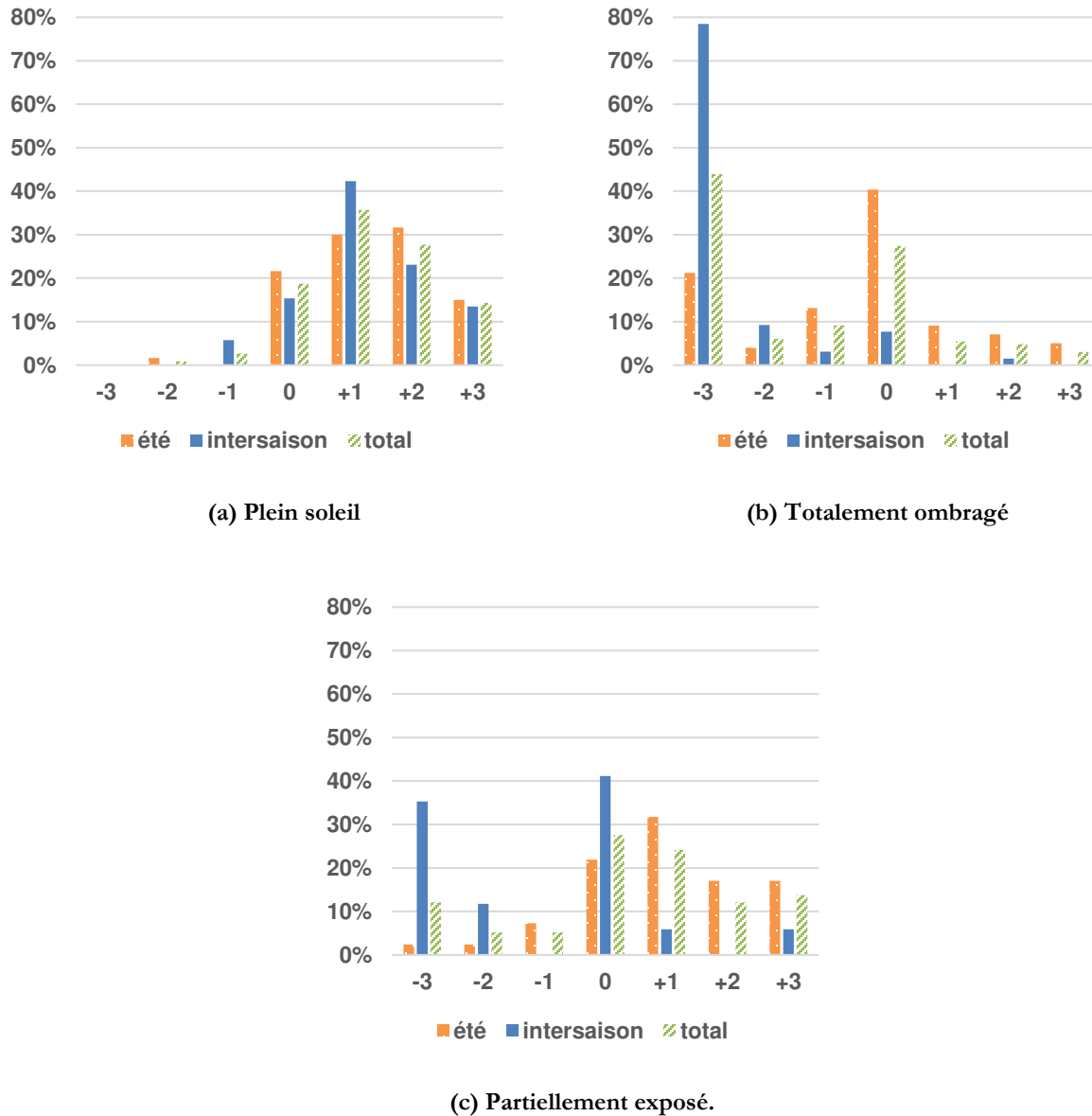


Figure 4.16: Répartition des votes de sensation liée au rayonnement solaire en fonction de l'exposition et selon la saison des enquêtes, pour des personnes (a) totalement exposées au rayonnement solaire direct, (b) à l'abri du rayonnement solaire direct et (c) partiellement exposées au rayonnement direct. L'échelle de sensation s'étend de « Très faible » (-3) à « Très fort » (+3) avec les votes « neutres » représentés par la valeur 0.

4.4.4.2. Confort thermique et acceptabilité thermique

La Figure 4.17 ci-dessous montre la relation entre le vote de sensation thermique et le vote de confort thermique sur l'ensemble des enquêtes. On remarque ainsi que le vote « confortable » est le plus fréquent avec 55% des votes exprimés, suivi du vote « légèrement inconfortable », « inconfortable » et « très inconfortable » avec respectivement 26%, 13% et 5% des votes.

On constate également que malgré des votes de sensation thermique élevés, certaines personnes perçoivent leur environnement comme confortable thermiquement. De plus, le maximum de votes confortables correspond au vote de sensation neutre (55%) à légèrement chaud (27%). Les votes de sensation thermique compris entre -1 et +1 représentent donc 86% des votes confortables. En outre, plus les votes de sensation thermique sont élevés dans la partie chaude de l'échelle et plus les votes d'inconfort thermique sont élevés. Enfin, on s'aperçoit que les conditions extérieures lors des jours d'enquête n'étaient pas défavorables au point d'avoir de nombreuses personnes en situation ressentie comme très inconfortable.

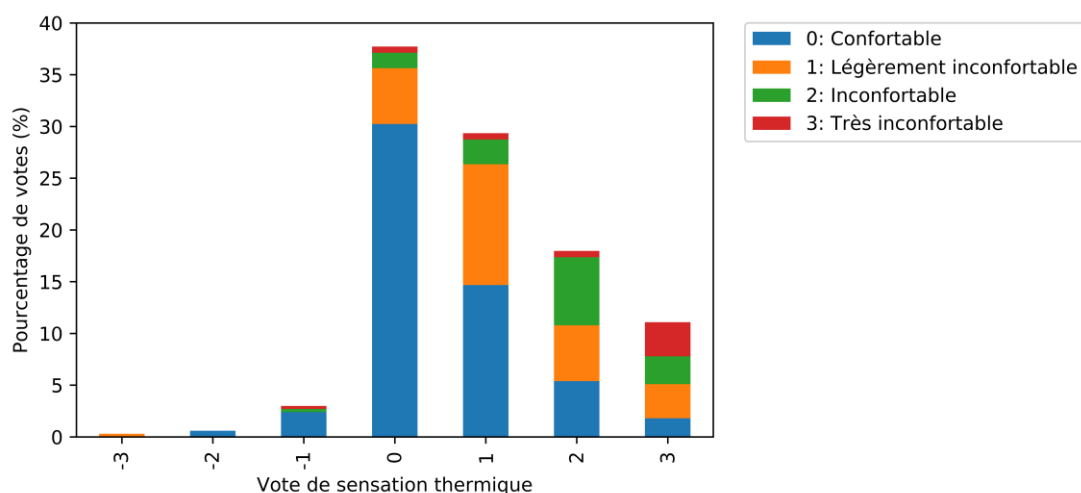


Figure 4.17: Répartition des votes de confort thermique en fonction de l'échelle de sensation thermique (-3 : «Très froid», -2 : «Froid», -1 : «Légèrement froid», 0 : «Ni chaud, ni froid», 1 : «Légèrement chaud», 2 : «Chaud» ; 3:«Très chaud »).

La Figure 4.18 ci-dessous montre la relation entre le vote de sensation thermique et le vote d'acceptabilité thermique sur l'ensemble des enquêtes réalisées. Le vote « tout à fait acceptable » est le plus fréquent avec 55% des votes suivi du vote « tout juste acceptable » avec 36% des votes, soit un total de 91% des votes considérant les conditions extérieures comme acceptables. Les conditions n'étaient pas défavorables au point d'être perçues comme tout à fait inacceptable par la population interrogée. Enfin, tout comme pour le vote de confort thermique, les votes de la catégorie « tout à fait

acceptable » sont principalement compris pour des votes de sensation thermique compris entre -1 et +1 avec 87% des votes, avec la majorité des votes exprimés comme neutres (51% des votes). Plus le vote de sensation thermique est élevé et plus les personnes considèrent l'environnement thermique comme inacceptable.

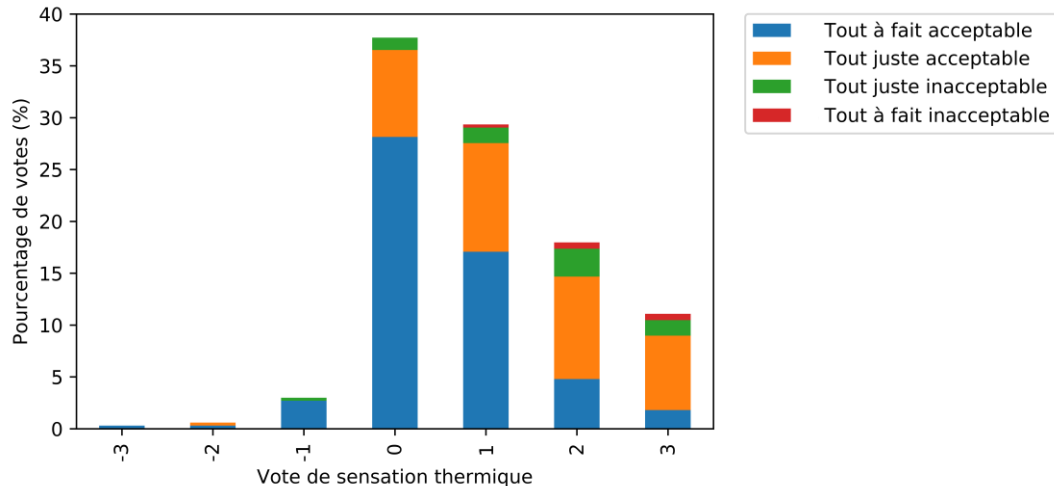


Figure 4.18: Répartition des votes d'acceptabilité thermique en fonction de l'échelle de sensation thermique (-3 : «Très froid», -2 : «Froid», -1 : «Légèrement froid», 0 : «Ni chaud, ni froid», 1 : «Légèrement chaud», 2 : «Chaud» ; 3:«Très chaud »)

4.4.4.3. Préférences liées aux variables climatiques étudiées

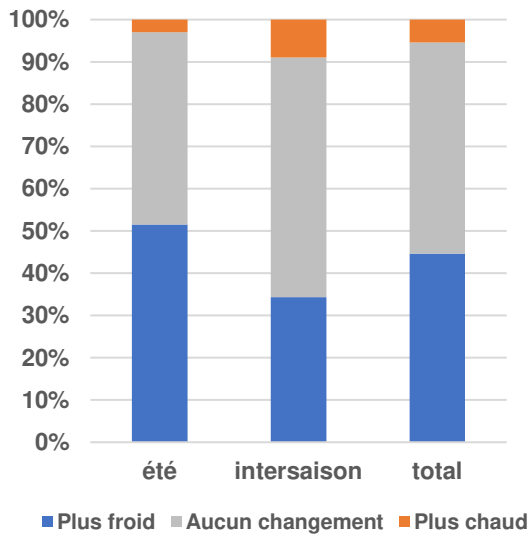
La Figure 4.19 ci-après donne la distribution des fréquences des votes de préférence selon les saisons d'enquête pour les différentes variables climatiques influençant le confort thermique, à savoir la préférence thermique, la préférence en lien avec l'humidité relative, la vitesse d'air ou encore le rayonnement solaire.

En termes de préférence thermique, la moitié des individus préféreraient avoir plus froid en été contre seulement 34% en intersaison. Une grande partie d'entre eux préféreraient ne ressentir aucun changement en termes de ressenti thermique (cf Figure 4.19.a).

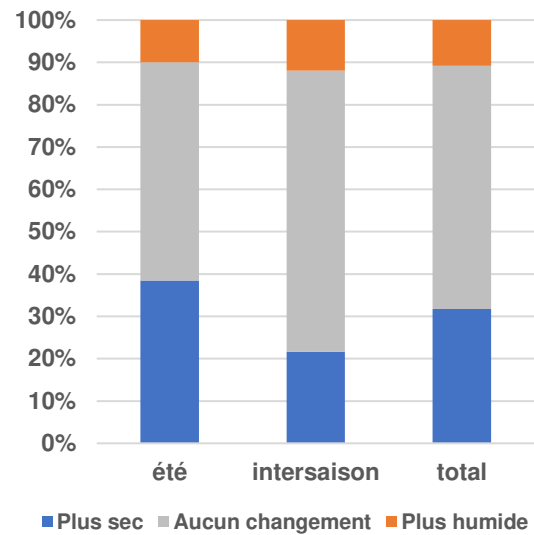
Pour la préférence liée à l'humidité, 39% des personnes interrogées préféreraient avoir un air plus sec en été contre 22% en intersaison. D'une manière générale, 57% individus ne souhaitent aucun changement en termes d'humidité relative ressentie sur l'ensemble des enquêtes (voir Figure 4.19.b).

En ce qui concerne le vent, la moitié des personnes préféreraient ressentir plus de mouvements d'air, notamment en été. Très peu de personnes aimeraient ressentir moins de mouvements d'air sur l'ensemble des enquêtes menées (moins de 10%) (cf Figure 4.19.c).

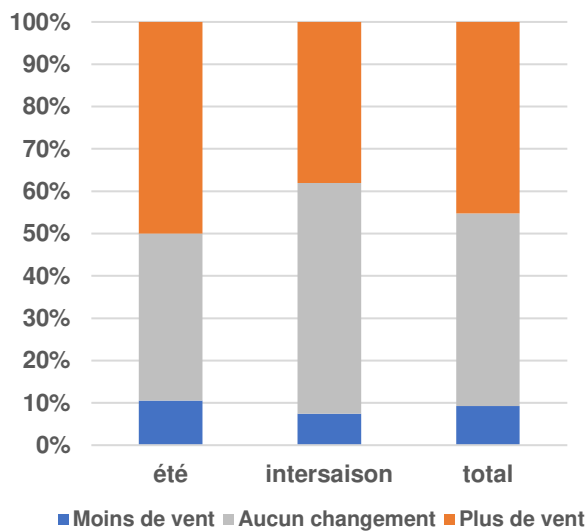
Enfin, la préférence en lien avec le rayonnement solaire est exprimée différemment en fonction de la saison étudiée avec 39% des personnes qui préféreraient moins de soleil en été alors que durant l'intersaison, 36% des individus préféreraient ressentir plus de soleil (voir Figure 4.19.d).



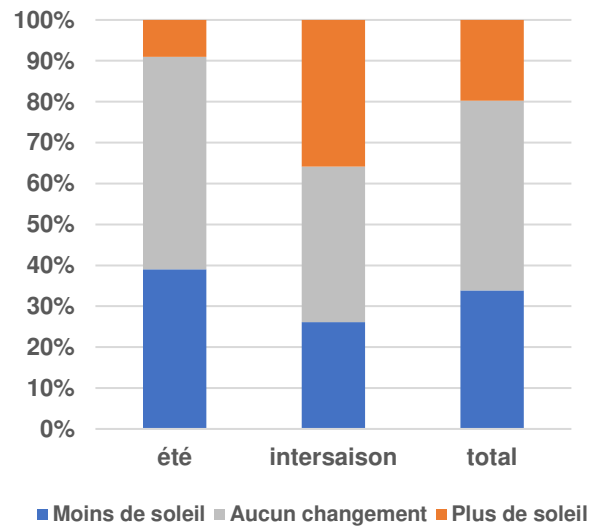
(a) Préférence thermique



(b) Préférence liée à l'humidité



(c) Préférence liée au vent



(d) Préférence liée au rayonnement solaire

Figure 4.19: Répartition des votes de préférence selon les saisons d'enquête pour les différentes variables climatiques influençant le confort thermique :(a) la température d'air, (b) l'humidité relative, (c) la vitesse d'air et (d) le rayonnement solaire.

4.4.5. Benchmark et calibration de l'indice PET

Dans cette partie, la méthodologie de calibration consistant à moyenner les votes de sensation thermique par intervalle d'un degré est appliquée à l'indice PET en fonction des différentes formules choisies pour le calcul de T_{mrt} . L'impact du choix de la formule de T_{mrt} sur la définition de la température neutre et de la zone de neutralité thermique est analysé, avant de définir les valeurs retenues pour la ville de Saint-Pierre. Enfin, une comparaison avec d'autres études réalisées en climat chaud et s'appuyant sur la même méthodologie de calibration est proposée en fonction de la méthode de calcul de T_{mrt} utilisée par les auteurs.

4.4.5.1. Comparaison entre méthodes de calcul de T_{mrt}

La Figure 4.20 ci-dessous présente les graphiques en nuage de points ainsi que les courbes de régression linéaire obtenus pour le vote moyen de sensation thermique par intervalle de 1°C pour le PET, selon les différentes formules utilisées pour le calcul de T_{mrt} .

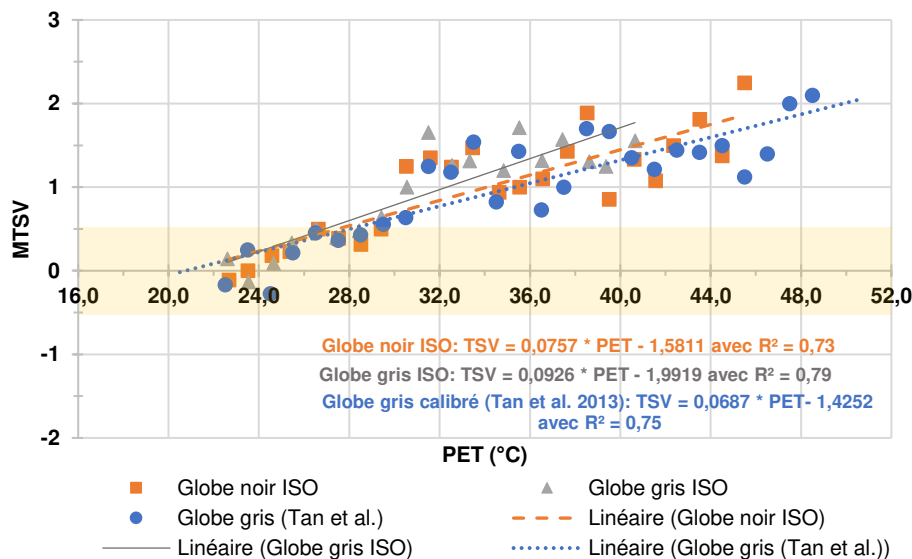


Figure 4.20: Vote moyen de sensation thermique calculé par intervalle de 1°C de l'indice PET et droite de régression linéaire obtenue pour notre cas d'étude. La zone de neutralité est définie pour un MTSV compris entre -0,5 et 0,5. Une comparaison est faite en fonction de la méthode de calcul de T_{mrt} en utilisant l'équation de la norme (ISO 7726, 1998) pour le globe noir et le globe gris, ainsi que l'équation de T_{mrt} calibrée par (Tan et al., 2013) pour le globe gris.

Le coefficient de détermination (R^2) est quant à lui supérieur à 0,7 dans chaque cas, démontrant une relation linéaire modérée entre MTSV et PET. L'analyse de régression linéaire montre également une association positive entre les deux variables : plus la valeur de l'indice PET augmente et plus le vote de sensation augmente dans l'échelle de chaleur.

L'influence des différentes méthodes utilisées pour le calcul de T_{mrt} peut ici être observée puisque la pente de la droite de régression est différente dans chaque cas. La pente obtenue à partir du calcul de $T_{mrt_noir_ISO}$ est plus élevée que celle pour obtenue à partir des valeurs de $T_{mrt_gris_ISO}$. Ainsi, pour $T_{mrt_noir_ISO}$, on observe une pente égale à 0,076 correspondant à 13,2°C PET / TSV, pour $T_{mrt_gris_ISO}$, la pente est de 0,093 soit 10,8°C PET / TSV et enfin pour $T_{mrt_gris_Tan}$, la pente obtenue est égale à 0,069 soit 14,4°C PET / TSV.

Le Tableau 4.11 ci-après présente les valeurs des benchmarks thermiques associés à l'indice PET définis dans la partie 4.3.6.2.

Tableau 4.11: Comparaison des températures neutres et des zones de neutralité thermique obtenue pour l'indice de confort PET en fonction de la méthode de calcul de T_{mrt}

Méthode de calcul de T_{mrt}	PET _n (°C) (TSV=0)	Zone de neutralité thermique (-0,5<TSV<0,5)
Globe noir - formule ISO 7726 ($T_{mrt_noir_ISO}$)	20,9	14,3 – 27,5
Globe gris - formule ISO 7726 ($T_{mrt_gris_ISO}$)	21,5	16,1 - 26,9
Globe gris formule calibrée de (Tan et al., 2013) ($T_{mrt_gris_Tan}$)	20,7	13,5 – 28,0

La température neutre (PET_n) obtenue en résolvant l'équation des droites de régression pour $y=0$ est elle aussi différente dans chaque cas : 20,9°C pour le globe noir, 21,5°C pour le globe gris selon la norme ISO 7726 et 20,7°C pour le globe gris selon la formule calibrée de (Tan et al., 2013). Les valeurs obtenues à partir de $T_{mrt_noir_ISO}$ et de $T_{mrt_gris_Tan}$ sont assez proches alors que la température neutre est plus élevée dans le cas de $T_{mrt_gris_ISO}$.

La zone de neutralité thermique est obtenue en résolvant l'équation des droites de régression pour $y=-0,5$ et $y=+0,5$. Dans chaque cas, la limite basse (TSV=-0,5) est obtenue par régression linéaire puisque cette valeur n'a pas été atteinte durant nos enquêtes. On constate que la zone de neutralité est elle aussi différente en fonction de la méthode utilisée avec une zone beaucoup plus large dans le cas du calcul

de $T_{mrt_gris_Tan}$ (intervalle de 14,5°C). La zone la plus resserrée est celle obtenue avec $T_{mrt_gris_ISO}$ (intervalle de 10,8°C).

Le choix de la méthode de calcul de T_{mrt} influence donc également la valeur de la température neutre et de la zone de neutralité du PET de manière non négligeable. Il est donc important de pouvoir calibrer la formule de T_{mrt} utilisée dans la méthode des globes (gris ou noir) dans sa zone d'étude (latitude et climat spécifique). Dans notre cas, la calibration de la formule de T_{mrt} obtenue avec la méthode des globes (noir ou gris) face à la méthode des radiomètres n'a pu être réalisée.

Afin de réduire les risques d'être en dehors de la zone de neutralité thermique et de se situer dans la classe de sensation thermique au-dessus, à savoir « légèrement chaud », la méthode du globe gris avec formule ISO 7726 est ici choisie ($T_{mrt_gris_ISO}$). La zone de neutralité thermique est donc définie pour une valeur de l'indice PET comprise entre 16,1 et 26,9°C et une température de PET neutre égale à 21,5°C.

4.4.5.2. Comparaison avec d'autres études réalisées en climat chaud

Quatre études menées dans des pays chauds ont été sélectionnées afin de comparer les résultats obtenus pour le climat de Saint-Pierre, comprenant deux études situées dans l'hémisphère Sud à des latitudes proches de notre cas d'étude et deux autres études réalisées dans l'hémisphère Nord. Outre le climat chaud, le principal critère de sélection de ces études est que, pour chacune de ces études, les auteurs ont réalisé une régression linéaire établissant une relation entre le vote moyen de sensation thermique (MTSV) et chaque intervalle d'1°C de PET. De plus, l'évaluation de la sensation thermique se base dans chaque cas sur la même échelle ASHRAE à 7 niveaux allant de -3 (très froid) à +3 (très chaud). Ce sont ces droites de régression qui sont utilisées dans la suite de l'étude en appliquant la même méthodologie que celle définie dans cette étude pour Saint-Pierre. De plus, deux de ces études se basent sur la méthode du globe noir et les deux autres sur celles du globe gris avec application de la formule ISO 7726 pour le calcul de T_{mrt} . Nous avons vu précédemment que le choix de la méthode de détermination de T_{mrt} influençait sur les droites de régression obtenues. Aussi, afin de pouvoir comparer ces études avec celle menée à Saint-Pierre, les courbes de régression linéaire obtenues pour la méthode du globe noir et du globe gris à Saint-Pierre selon la formule ISO 7726, notées respectivement *Saint-pierre_noir* et *Saint-pierre_gris*, sont représentées ci-après. La formule calibrée pour le globe gris par (Tan et al., 2013) n'est donc pas représentée dans cette partie.

La localisation des villes dans lesquelles les études de terrain ont été menées est présentée dans la Figure 4.21 ci-dessous.



Figure 4.21: Localisation des cas d'étude de calibration du PET utilisés à titre comparatif avec notre cas d'étude.

La ville de Taichung, située à 24°08'N et 120°40'E, est caractérisée par une période estivale chaude et un hiver doux. Les températures varient entre 23°C et 32°C (température minimale moyenne et maximale moyenne) en été avec les maximales atteintes en Juin, Juillet, Août et entre 12°C et 22°C (température minimale moyenne et maximale moyenne) en hiver pour les mois de Décembre, Janvier et Février. L'humidité relative moyenne est comprise entre 70-80% sur l'année. La ville de Rome (41°55' N et 12°29'E) est caractérisée par un climat typiquement méditerranéen avec des températures comprises entre 17 et 31°C (température minimale moyenne et maximale moyenne) pour les mois les plus chauds de Juillet -Août et des minimales observées entre Décembre et Février avec des températures inférieures à 10°C. L'humidité relative moyenne est comprise entre 70 et 80% sur l'année.

Curitiba (25°25'S et 49°16'W) présente en été des températures variant entre 16 et 27°C (température minimale moyenne et maximale moyenne) durant les mois plus chauds de Janvier et Février, marqués par de fortes pluies. L'hiver est plus sec avec des températures qui varient entre 8 et 20°C (température minimale moyenne et maximale moyenne) pour les mois les plus froids de Juin et Juillet. L'humidité relative moyenne est supérieure à 80% sur l'année. Rio de Janeiro, localisée à 22°54'S et 43°10'W, présente un climat tropical avec un été chaud et humide et un hiver très doux. Les températures atteignent 17°C en minimal moyen et 25°C en maximal moyen en hiver entre Juin et Août. En été, les mois plus chauds sont ceux de Janvier et Février avec une température minimale moyenne de 22°C et maximale moyenne de 30°C. L'humidité relative moyenne est comprise entre 70 et 80% sur l'année.

Tableau 4.12 : Caractéristiques principales des études de confort thermique menées en milieu urbain extérieur et en climat chaud dans le cadre de la calibration de l'indice PET et utilisées à titre comparatif avec notre étude

Ville, Pays	Climat*	Altitude	Saison(s)	Période(s) de la journée	Ta(°C) Min-Max mesuré sur site	Calcul de T _{mrt}	Nombre de questionnaires valides	Référence
Taichung, Taïwan	Cwa - subtropical humide	26 m	Toutes les saisons (Avr. 2007-Fév. 2208)	Après-midi et début de soirée (13h-18h)	15,0-36,0	Formule ISO7726 - Globe noir	505	(Lin, 2009)
Rome, Italie	Csa- Méditerranéen	21 m	Toutes les saisons sur une année (2014-2015)	Matin au soir (8h-21h)	3,2 – 35,9	Formule ISO7726 - Globe noir	941	(Salata et al., 2016)
Curitiba, Brésil	Cfb- Tempéré chaud	926 m	Été, hiver, automne (2009-2010)	Matin et après-midi (10h-15h)	6,4 -30,7	Formule ISO7726 - Globe gris	1 685	(Krüger et al. 2017)
Rio de Janeiro, Brésil	Aw – Tropical savane	380 m	Printemps et été (2012-2015)	Matin et après-midi (10h-15h)	24,9 -36,8	Formule ISO7726 - Globe gris	985	(Krüger et al. 2017)
Saint-Pierre, Réunion	Aw – Tropical savane	0 m	Été et intersaison	Matin	22,8-33,6	Formule ISO7726 - Globe gris et globe noir	334	Cette étude

En plus des normales climatiques données ci-dessus pour chaque ville, le Tableau 4.12 ci-dessus donne les valeurs minimales et maximales de température d'air sec mesurées sur site par les auteurs grâce à leurs stations microclimatiques respectives. Il peut être observé que les conditions minimales en température d'air ont été atteintes pour la ville de Rome suivie par la ville de Curitiba, où des enquêtes ont été menées en hiver. Avec un hiver plus doux pour la ville de Taichung, la température d'air minimale mesurée sur site n'était pas aussi basse, avec 15°C minimum. La température d'air maximale mesurée était aux alentours de 36-37°C pour les villes de Taichung, de Rome et de Rio. Pour les villes de Curitiba et de Saint-Pierre, la température d'air mesurée sur site n'a pas dépassé les 34°C comme dans le cas des autres villes.

Bien que la calibration des indices ait été réalisée selon la même méthodologie pour chaque cas choisi, certains critères diffèrent entre chaque étude, comme le montre le Tableau 4.12. En effet, les altitudes, les périodes de l'année et de la journée durant lesquelles les enquêtes ont été menées, la méthode de mesure de T_{mrt}, le lieu d'études ou encore le nombre de réponses récoltées ne sont pas les mêmes en fonction des études.

L'étude menée par (Salata et al., 2016) à Rome prend en compte l'ensemble des saisons et l'ensemble des variations climatiques journalières mais n'est pas totalement représentative de la population de Rome puisque les deux sites étudiés sont des sites universitaires, avec un échantillon principalement

composé de jeunes étudiants. De plus, comparé aux autres études, T_{mrt} a été déterminée selon la méthode du globe noir.

Comme pour notre étude, les enquêtes menées par (Krüger et al. 2017) dans les villes de Curitiba et Rio de Janeiro ont été réalisées en ville dans différentes zones piétonnes (15 sites pour Curitiba et 7 sites différents pour Rio), donnant une meilleure représentativité de la population locale. La méthode de détermination de T_{mrt} est la même pour ces deux villes.

L'étude menée par (Lin, 2009) n'a été réalisée que sur un seul site, un espace public très fréquenté et aucune information n'est donnée sur les caractéristiques personnelles ou démographiques des personnes interrogées. Les enquêtes ont été menées à différents moments de l'année dans chaque cas.

Cependant, seules les études menées à Rio et à Saint-Pierre dans notre cas ne prennent pas en compte la saison froide. Enfin, il peut être observé que le nombre de personnes interrogées dans notre étude est bien moins important que dans les autres études, et que notre cas est le seul se situant sur une zone littorale.

La Figure 4.22 présente les courbes de régression linéaire obtenue pour le vote de sensation moyen en fonction de l'indice PET pour les différentes villes présentées précédemment. Chaque courbe a été tracée en fonction des équations de régression linéaire trouvées par les auteurs entre MTSV et PET, par intervalle de 1°C :

- a) Taichung : $TSV = 0,1184 * PET - 3,0253$
- b) Curitiba : $TSV = 0,0839 * PET - 1,6142$
- c) Rio : $TSV = 0,0734 * PET - 1,1284$
- d) Saint-Pierre_noir : $TSV = 0,0757 * PET - 1,5811$
- e) Saint-Pierre_gris : $TSV = 0,0926 * PET - 1,9919$

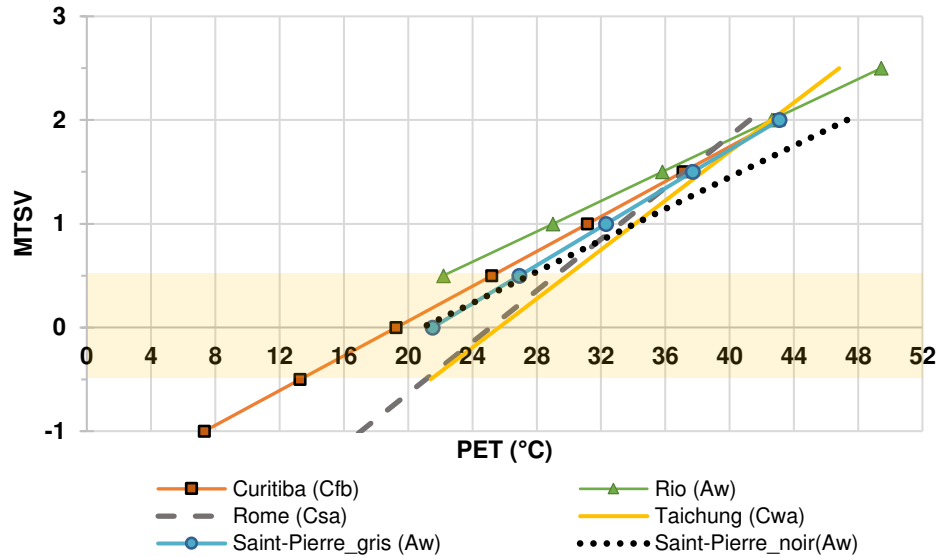


Figure 4.22: Comparaison entre les courbes de régression linéaire du vote moyen de sensation thermique (MTSV) calculé par intervalle de 1°C de l'indice PET, obtenues pour les villes de Curitiba, Rio de Janeiro, Rome, Taichung et Saint-Pierre.

Les pentes des courbes sont différentes et montrent que la sensation thermique diffère en fonction des climats et de la population étudiée. Ainsi, les pentes sont plus fortes pour les villes de Taichung et de Rome, avec une sensibilité de 8,5°C PET/TSV et de 8,1°C PET/TSV respectivement. Les villes de Curitiba et Rio présentent des pentes plus faibles, qui correspondent à une sensibilité de 11,9°C PET/TSV pour Curitiba et 13,6°C / TSV pour Rio, proche des valeurs obtenues pour la ville de Saint-Pierre. Les résidents des villes de Taichung et de Rome sont donc plus sensibles au changement de température ressentie.

De plus, les zones de neutralité de Rio et de Curitiba sont situées plus à gauche de l'échelle de PET, suggérant que les résidents ont une plus grande tolérance pour des valeurs de PET plus faibles que dans le cas de Taichung et de Rome, où la zone de neutralité est observée pour des valeurs plus élevées de PET.

Enfin, si on compare en termes de température neutre, en remplaçant dans chaque équation TSV par 0, on observe des valeurs différentes avec un PET de 25,6°C pour Taichung et 25,1°C pour Rome soit des valeurs assez élevées par rapport à Curitiba par exemple avec un PET neutre 19,2°C ou encore Saint-Pierre avec un PET neutre compris entre 20 et 21°C.

Grâce aux courbes de régression linéaire exprimant le MTSV en fonction du PET, les différentes classes de sensation thermique associée à l'indice PET peuvent être calibrées en fonction des valeurs de TSV définies.

Le Tableau 4.13 liste les valeurs de PET obtenues pour chaque ville ainsi que l'échelle d'origine.

Tableau 4.13: Calibration de l'échelle de sensation thermique pour les villes de Curitiba, Rio de Janeiro, Rome, Taichung et Saint-Pierre et comparaison avec les classes de sensation d'origine de l'indice PET.

Sensation thermique	TSV	Echelle PET d'origine (°C)	PET calibrée Curitiba (°C)	PET calibrée Rio (°C)	PET calibrée Rome (°C)	PET calibrée Taichung (°C)	PET calibrée Saint-Pierre Globe noir(°C)	PET calibrée Saint-Pierre Globe gris (°C)
Neutre	-0,5-0,5	18-23	13 -25	9* -22	21 - 29	21 - 30	14* -27	16* -27
Légèrement chaud	0,5-1,5	23-29	25 - 37	22 -36	29-37	30 - 38	27 -41	27 -38
Chaud	1,5 -2,5	29-35	37-49*	36-49	37 -45*	38 -47*	41-54*	38-49*
Très chaud	2,5-3,5	35-41	49*-61*	49-63*	45*- 53*	47* - 55*	54*-67*	49*-59*
Extrêmement chaud	> 3,5	>41	>61*	>63*	>53*	>55*	>67*	>59*

*Valeurs de PET obtenues par extrapolation de la droite de régression linéaire

Les catégories de sensation diffèrent entre les villes étudiées et ne correspondent pas aux catégories définies dans l'échelle d'origine du PET, correspondant à des pays d'Europe. Rio, Curitiba et Saint-Pierre présentent des valeurs de PET inférieures à celles de l'échelle d'origine pour un vote égal à -0,5. A part pour Rio, la limite haute de la zone de neutralité thermique définie pour un TSV égal à +0,5 est supérieure à celle de l'échelle d'origine pour les autres villes étudiées. De plus, les écarts sont encore plus importants pour les autres catégories de l'échelle de chaleur, avec des valeurs de PET supérieures dans chaque cas par rapport à l'échelle d'origine, suggérant une plus grande tolérance à la chaleur dans les pays chauds.

Les villes de Rio et Saint-Pierre ont toutes les deux un climat de type tropical savane avec des températures moyennes proches en été et un niveau d'humidité relativement élevé. Si on les compare selon la méthode du globe gris, on s'aperçoit que pour les catégories de sensation thermique « neutre » et « légèrement chaud » (TSV allant de -0,5 à 1,5), les valeurs de PET sont plus faibles pour les habitants

de Rio que pour ceux de Saint-Pierre. Ainsi, les résidents de Saint-Pierre considèrent comme neutre des valeurs de PET allant jusqu'à 27°C contre seulement 22°C pour les habitants de Rio.

Cependant, lorsque la sensation thermique est plus élevée (catégories « très chaud » à « extrêmement chaud »), la valeur de l'indice PET est cette fois-ci plus élevée pour les résidents de Rio avec 4°C d'écart. Ces écarts pourraient provenir de la différence de taille de l'échantillon de la population interrogée qui n'est pas négligeable (trois fois plus petit dans notre cas).

De plus, pour la zone de neutralité thermique, il est difficile d'en tirer des conclusions pour la ville de Rio puisque les conditions extérieures n'ont pas permis d'atteindre ce niveau de sensation thermique lors des enquêtes. Des différences restent néanmoins observées entre ces deux villes situées dans l'hémisphère Sud, à des latitudes proches et présentant des climats similaires.

A l'inverse, si on compare les villes de Taichung et de Rome, on s'aperçoit que les valeurs seuils obtenues pour chaque catégorie de l'échelle thermique de PET sont proches alors que les deux villes présentent des climats différents avec des valeurs de température plus basses en hiver pour Rome.

Les valeurs seuils obtenues selon la méthode du globe noir pour la ville de Saint-Pierre diffèrent de manière considérable pour les classes allant de « légèrement chaud » à « extrêmement chaud » par rapport aux autres villes, suggérant une plus grande tolérance de la population à des valeurs extrêmes de PET.

Enfin, si on compare les valeurs obtenues pour Saint-Pierre en fonction des méthodes de détermination de T_{mrt} (globe noir/ globe gris), on constate que le choix de la méthode impacte peu la définition de la zone neutre mais qu'il a une plus grande répercussion sur les différentes catégories de sensation de chaleur, bien que les valeurs obtenues par extrapolation soient à considérer avec précaution.

(Krüger et al., 2017) ont mis en évidence que la sensibilité thermique d'une population donnée ne dépend pas seulement du climat local (écart de température journalier, effet des saisons, etc.). D'autres phénomènes rentrent en compte comme la morphologie urbaine et les conditions culturelles et sociales. Si on compare par exemple les villes de Curitiba et de Rio, deux villes brésiliennes, on se rend compte que les résidents de Curitiba considèrent comme neutre des valeurs de PET plus élevées que Rio, alors que c'est l'une des villes les plus froides du pays. Les auteurs expliqueraient cela par le fait que l'usage de la climatisation est plus commun à Rio, influençant donc la perception thermique des résidents.

En ce qui concerne notre étude, 60% des répondants vivent à Saint-Pierre et 46% d'entre eux résident dans le quartier de Ravine Blanche. Or, dans ce quartier la grande majorité des logements ne sont pas équipés de système de climatisation et fonctionnent sur le principe de ventilation naturelle et seulement 24% des personnes interrogées au total travaillent dans un bureau climatisé. Cela pourrait également expliquer la différence observée entre Saint-Pierre et Rio.

En conclusion, le choix de la méthode de calcul de T_{mrt} est important à prendre en compte lors de la comparaison entre les classes de sensation thermique obtenues après calibration de l'indice PET dans différents climats. Dans cette étude, la calibration de l'indice PET a été faite selon les deux méthodes de mesure les plus utilisées dans la détermination de T_{mrt} , à savoir le globe noir et le globe gris, avec application de la formule de T_{mrt} selon la norme ISO7726. Le globe noir donne des valeurs pour la PET supérieures à celles obtenues avec le globe gris pour les limites des classes de sensation thermique. Afin de minimiser le risque d'être en inconfort thermique, la méthode du globe gris est donc choisie. La sensation « neutre » est obtenue pour une valeur de PET comprise entre 16 et 27°C et la sensation « légèrement chaud » pour une valeur de PET comprise entre 27 et 38°C.

4.4.6. Benchmark et calibration de l'indice l'UTCI

Cette partie vise à appliquer la méthodologie de calibration cette fois-ci à l'indice UTCI en fonction des différentes formules choisies pour le calcul de T_{mrt} . L'impact du choix de la formule de T_{mrt} sur la définition de la température neutre et de la zone de neutralité thermique est étudié, avant de définir les valeurs retenues pour la ville de Saint-Pierre. Enfin, une comparaison avec d'autres études réalisées en climat chaud et s'appuyant sur la même méthodologie de calibration est proposée en fonction de la méthode de calcul de T_{mrt} utilisée par les auteurs.

4.4.6.1. Comparaison entre méthodes de calcul de T_{mrt}

La Figure 4.23 ci-après représente les moyennes des votes de sensation thermique calculée par intervalle de 1°C de l'UTCI ainsi que les courbes de régression linéaire associée, selon les différentes formules utilisées pour le calcul de T_{mrt} .

Le coefficient de détermination (R^2) est cette fois-ci supérieur à 0,8 dans chaque cas, démontrant une relation linéaire forte entre le vote moyen de sensation thermique et l'UTCI. Comme pour l'indice PET, plus la valeur de l'UTCI est élevée et plus le vote de sensation augmente dans l'échelle de chaleur. De plus, la pente de la droite de régression obtenue est également différente en fonction des cas, avec là aussi une pente plus forte pour les valeurs d'UTCI calculés à partir de $T_{mrt_gris_ISO}$ correspondant à un changement de 7,9°C UTCI / TSV. Les valeurs calculées à partir de $T_{mrt_noir_ISO}$ montrent une pente plus faible correspondant à 10,2°C UTCI / TSV, de même que les valeurs obtenues avec $T_{mrt_gris_Tan}$ où la pente obtenue est similaire. Contrairement à l'indice PET, les droites obtenues à partir de $T_{mrt_noir_ISO}$ et $T_{mrt_gris_Tan}$ sont très proches et se superposent quasiment. La sensibilité est donc différente en fonction de la méthode choisie pour la mesure et le calcul de T_{mrt} , avec d'un côté $T_{mrt_gris_ISO}$ et de l'autre côté, $T_{mrt_noir_ISO}$ et $T_{mrt_gris_Tan}$.

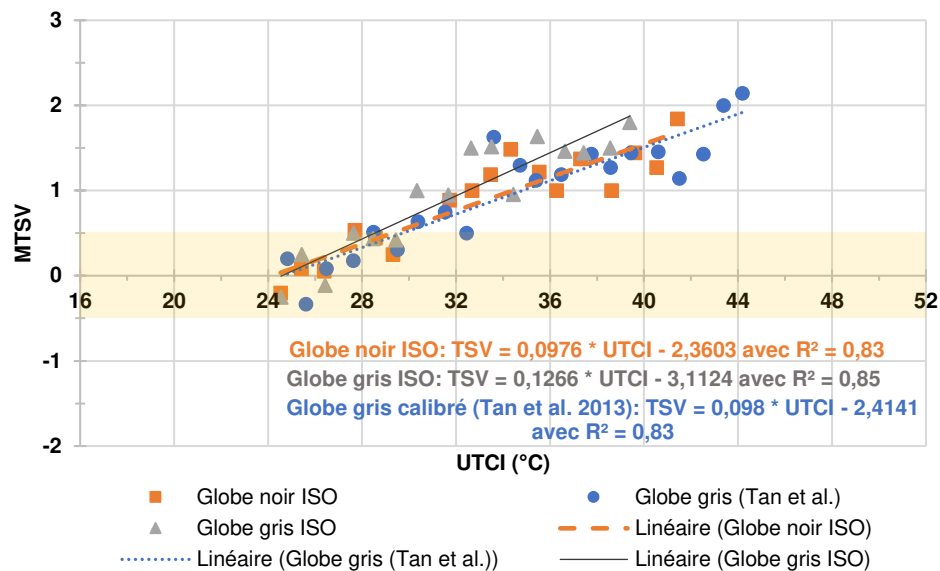


Figure 4.23: Vote moyen de sensation thermique calculé par intervalle de 1°C de l'indice UTCI et droite de régression linéaire associée. La zone de neutralité est définie pour un MTSV compris entre -0,5 et 0,5. Une comparaison est faite en fonction de la méthode de calcul de T_{mrt} en utilisant l'équation de la norme (ISO 7726, 1998) pour le globe noir et pour le globe gris, ainsi que celle utilisant l'équation calibrée par (Tan et al., 2013) pour le globe gris.

Le Tableau 4.14 ci-dessous liste les différentes valeurs des benchmarks thermiques associés à l'indice UTCI définis dans la partie 4.3.6.2. . On observe que la température neutre de l'UTCI ($UTCI_n$) obtenue en résolvant l'équation des droites de régression pour $y=0$ est, cette fois-ci, la même pour les deux méthodes utilisant le globe gris. La température neutre obtenue pour la méthode du globe noir est quant à elle légèrement plus faible.

La zone de neutralité thermique est obtenue en résolvant l'équation des droites de régression pour $y=-0,5$ et $y=+0,5$. Dans chaque cas, la limite basse ($TSV=-0,5$) est obtenue par régression linéaire puisque cette valeur n'a pas été atteinte durant nos enquêtes. Les zones obtenues sont différentes dans chaque cas avec une zone de température plus petite dans le cas de $T_{mrt_gris_ISO}$ (intervalle de 7,9°C) comparée aux deux autres méthodes, qui présente un intervalle de température de 10,2°C pour la zone neutre.

Le choix de la méthode de calcul de T_{mrt} influence donc également la valeur de la température neutre et de la zone de neutralité de l'UTCI, mais de manière moins importante que dans le cas de l'indice PET. L'indice UTCI semble plus robuste que le PET à ce niveau.

Tableau 4.14: Comparaison des températures neutres et des zones de neutralité thermique obtenue pour l'indice UTCI en fonction de la méthode de calcul de T_{mrt} ssss

Méthode de calcul de T_{mrt}	UTCI _n (°C) (TSV=0)	Zone de neutralité thermique (-0,5<TSV<0,5)
Globe noir- formule ISO 7726 ($T_{mrt_noir_ISO}$)	24,2	19,1 – 29,3
Globe gris- formule ISO 7726 ($T_{mrt_gris_ISO}$)	24,6	20,6 – 28,5
Globe gris-formule calibrée de (Tan et al. 2013) ($T_{mrt_gris_Tan}$)	24,6	19,5 – 29,7

Comme dans le cas de l'indice PET, afin de réduire les risques d'être en dehors de la zone de neutralité thermique et de se situer dans la classe de sensation thermique au-dessus, à savoir « légèrement chaud », la méthode du globe gris avec formule ISO ($T_{mrt_gris_ISO}$) est celle choisie. La zone neutre est donc définie pour une valeur de l'indice UTCI comprise entre 20,6 et 28,5°C et une température d'UTCI neutre égale à 24,6°C.

4.4.6.2. Comparaison avec des études récentes menées dans des climats chauds

Une comparaison entre les résultats obtenus pour la calibration de l'indice UTCI à Saint-Pierre, La Réunion et ceux obtenus par d'autres études récentes menées dans des climats chauds est proposée dans cette partie. Il n'y a que peu d'études qui ont été faites sur la calibration des zones de confort de l'indice UTCI comparé à l'indice PET, beaucoup plus utilisé dans les études de confort thermique en extérieur et notamment dans les climats chauds. Certaines de ces études se basent sur la méthode du globe noir et d'autres sur celles du globe gris avec application de la formule ISO 7726 pour le calcul de T_{mrt} .

Afin de pouvoir comparer ces études avec celle menée à La Réunion, les courbes de régression linéaire obtenues pour la méthode du globe noir et du globe gris à Saint-Pierre selon la formule ISO 7726, notées respectivement Saint-pierre_noir et Saint-pierre_gris, sont représentées ci-après. La formule du globe gris calibrée par (Tan et al., 2013) n'est donc pas représentée. La courbe de régression obtenue étant d'ailleurs quasiment superposable à celle obtenue pour le globe noir avec application de la formule ISO, les résultats obtenus auraient été très proches.

Deux études, menées par (Pantavou et al., 2013) (Lam and Lau, 2018), proposent un lien entre le TSV et l'indice UTCI en utilisant la méthode de la moyenne des votes par intervalle de 1°C de l'UTCI. La première étude a été réalisée à Athènes alors que Lam et Lau proposent une comparaison entre la ville de Hong-Kong et la ville de Melbourne. Deux études ont été menées dans l'hémisphère Nord à des latitudes différentes et une étude a été réalisée dans l'hémisphère Sud, comme nous le montre la Figure 4.24.



Figure 4.24: Localisation des villes pour lesquelles une calibration de l'indice UTCI a été réalisée et utilisées à titre comparatif avec notre cas d'étude.

Athènes (37°59'N, 23°43' E) a un climat méditerranéen, de type Csa selon la classification de Köppen-Geiger, avec des étés chauds et plutôt secs, et des hivers doux mais humides. Deux saisons distinctes se détachent : la saison froide et pluvieuse de mi-Octobre à fin Mars, avec des températures variant entre 7°C et 14°C (température minimale moyenne et maximale moyenne) pour les mois les plus froids avec une humidité moyenne de 71% ; la saison chaude et sèche entre Avril et Octobre, avec des températures variant entre 22°C et 33°C (température minimale moyenne et maximale moyenne) et un taux d'humidité relative moyen de 48%.

Hong-Kong (22°17'N, 114°10'E) a un climat subtropical, de type Cwa selon la classification de Köppen-Geiger, avec des étés chauds et humides et des hivers doux. Les mois les plus chauds se situent entre Juin et Septembre avec des températures variant entre 26 et 31°C pour les températures minimales et maximales moyennes. Les mois les plus froids sont ceux de Janvier et Février avec des températures variant entre 14,5 et 19°C (température minimale moyenne et maximale moyenne). Les taux d'humidité relative sont très élevés toute l'année et sont compris entre 70% et 80% en moyenne (Source : https://www.weather.gov.hk/cis/normal/1981_2010/normals_e.htm). La ville est

également touchée par des cyclones entre Juillet et Septembre, entraînant des périodes de vents forts et de fortes pluies.

Melbourne (37°50'S, 144°58'E) a un climat tempéré chaud, de type Cfb selon la classification de Köppen-Geiger, caractérisé par des conditions parfois extrêmes durant les mois chauds entre Décembre et Février. La température d'air varie entre 14°C et 26°C (température minimale moyenne et maximale moyenne) durant les mois les plus chauds et peut dépasser 40°C durant les vagues de chaleur. Les mois les plus froids sont ceux compris entre Juin et Août, avec des températures pouvant varier entre 6 et 15°C (température minimale moyenne et maximale moyenne). Le taux d'humidité relative fluctue en fonction des saisons, avec une saison sèche en été et plus humide en hiver (Source : http://www.bom.gov.au/climate/averages/tables/cw_086071.shtml).

Tableau 4.15: Principales caractéristiques des études menées en climat chaud utilisant l'indice UTCI

Ville, Pays	Climat*	Altitude	Saison(s)	Période(s) de la journée	Ta(°C) Min- Max mesuré sur site	Calcul de T _{mrt}	Nombre de questionnaires valides	Référence
Athènes, Grèce	Csa - Méditerranéen	20m	Eté, automne et hiver (Juil., Oct. et Fév. 2010-2011)	Matin au soir	7,1-39,3	Formule ISO7726 - Globe gris	1 706	(Pantavou et al., 2013)
Hong-Kong, Hong Kong	Cwa – Subtropical humide	10-50m	Eté (Juil.-Août 2007)	Matin au soir	29,0-38,7	Formule ISO7726- Globe noir	414	(Lam and Lau, 2018)
Melbourne, Australie	Cfb – Tempéré chaud	20-80m	Eté (Janv.- Fév. 2014)	Fin matinée – début après- midi (10h- 15h)	15,8-41,3	Formule calibrée- Globe noir	2 162	(Lam and Lau, 2018)
Saint-Pierre, Réunion	Aw – Tropical savane	0 m	Eté et intersaison	Matin (9h- 12h)	22,8-33,6	Formule ISO7726 - Globe gris et globe noir	334	Cette étude

En plus des normales climatiques décrites ci-dessus pour chaque ville, le Tableau 4.15 ci-dessus donne les valeurs minimales et maximales de température d'air sec mesurées sur site grâce aux stations microclimatiques.

Ainsi, nous pouvons voir que les conditions minimales en température d'air ont été atteintes pour la ville d'Athènes, où des enquêtes ont été menées en hiver et que la température d'air maximale a été observée à Melbourne, qui a subi une vague de chaleur durant la période des enquêtes. Dans le cas de la ville de Saint-Pierre, la température d'air mesurée sur site n'a pas dépassé les 34°C comme dans le cas des autres villes.

Le Tableau 4.15 liste également les principales informations relatives aux enquêtes de confort thermique extérieur menées par les auteurs en fonction des villes d'étude.

Les études menées à Athènes et à Melbourne reposent sur un plus grand échantillon de population que les deux autres études. Les études ont été menées à des latitudes différentes mais pour des altitudes similaires dans certains cas et inférieures à 100m. Dans chaque cas, les enquêtes ont été réalisées dans des espaces publics où la fréquentation est importante et où l'échantillon est représentatif de la population locale.

Dans les villes de Hong-Kong et de Melbourne, les lieux enquêtés se situaient à des altitudes différentes. Les lieux enquêtés diffèrent également en termes de proximité à la mer. A Melbourne, deux jardins botaniques ont été sélectionnés, se situant à environ 4km et 12km des côtes respectivement. A Hong-Kong, les sessions d'enquêtes se sont concentrées dans deux parcs urbains, le premier se trouvant à environ 800m des côtes et le second à 100m de la plage approximativement.

En ce qui concerne la ville d'Athènes, les enquêtes ont eu lieu dans trois sites différents, dont deux situés en plein centre d'Athènes, à plus de 5km des côtes et le troisième site localisé à quelques mètres de la côte.

Dans notre étude sur Saint-Pierre, les sessions d'enquête se sont déroulées dans un seul quartier et sur cinq sites répartis le long d'un axe perpendiculaire à la mer. Le site principal étant localisé à quelques mètres du littoral. La majorité des enquêtes ont été réalisées en été dans chaque cas, à part pour la ville d'Athènes où les enquêtes couvrent aussi la saison froide, expliquant ainsi que les températures d'air relevées sur site durant les enquêtes atteignent des valeurs plus basses à Athènes.

La ville de Melbourne présente les plus grandes variations de températures mesurées sur site en été en comparaison avec les villes de Hong-Kong et de Saint-Pierre. La température a même dépassé les 40°C, la ville ayant été soumise à une vague de chaleur durant la période des enquêtes.

La ville de Saint-Pierre est celle où l'écart entre le minimum et le maximum de température d'air mesurée sur site est le plus faible avec des maximales bien inférieures aux autres villes. De plus, seules les enquêtes réalisées à Saint-Pierre se focalisent sur la matinée alors que pour les autres études, différents moments de la journée ont été pris en compte.

Enfin, différentes méthodes de mesure ont été utilisées pour le calcul de T_{mrt} . Dans le cas des villes de Melbourne et de Hong-Kong, le globe noir a été utilisé et les formules ont été calibrées ou comparées avec la méthode des radiomètres. Dans le cas de la ville d'Athènes, la méthode du globe gris a été appliquée en utilisant la formule normalisée (ISO 7726, 1998) (ASHRAE, 2001).

Afin de comparer la sensation thermique selon les villes, les droites de régression linéaire entre le vote moyen de sensation thermique et l'UTCI ont été tracées pour les trois villes (cf Figure 4.25), en utilisant les équations suivantes :

- a) Athènes : $TSV = 0,1259 * UTCI - 2,5524$
- b) Hong-Kong : $TSV = 0,0889 * UTCI - 2,0944$
- c) Melbourne : $TSV = 0,1047 * UTCI - 2,0257$
- d) Saint-Pierre_noir : $TSV = 0,0976 * UTCI - 2,3603$
- e) Saint-Pierre_gris : $TSV = 0,1266 * UTCI - 3,1124$

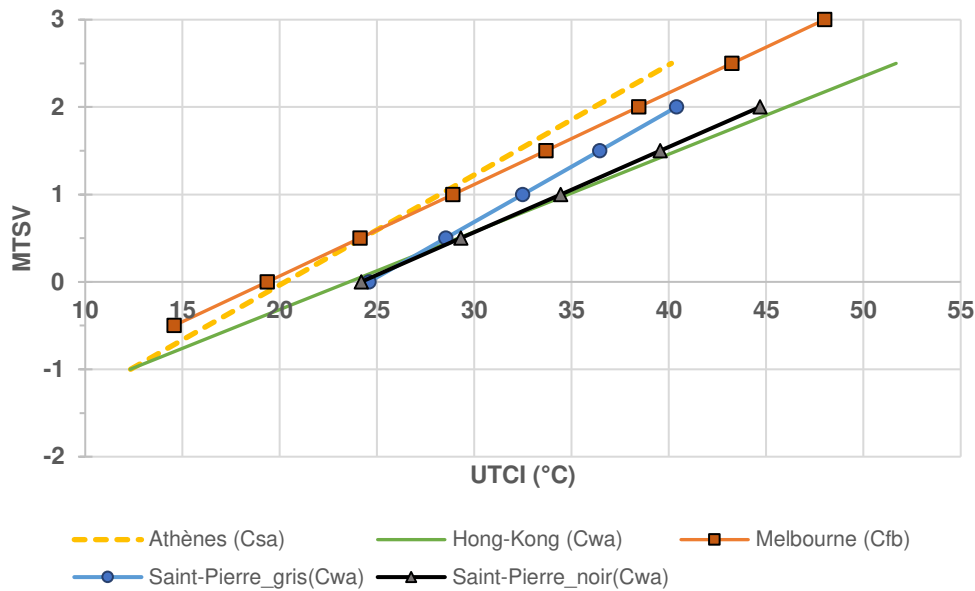


Figure 4.25: Comparaison entre le vote moyen de sensation thermique (MTSV) obtenu pour les villes d'Athènes, d'Hong-Kong, de Melbourne et de Saint-Pierre en fonction de l'indice UTCI.

Il peut être observé que les sensations diffèrent en fonction des villes étudiées. Les pentes des droites obtenues pour les villes d'Athènes et de Melbourne sont assez proches lorsque le vote de sensation thermique est ≤ 1 mais s'éloigne pour des valeurs de sensation thermique plus élevées.

Cette différence provient peut-être de la méthode de mesure de T_{mrt} , qui est différente dans chaque cas. En effet, pour la ville d'Athènes, T_{mrt} a été déterminée selon la méthode du globe gris, sans calibration préalable alors que dans le cas de Melbourne, T_{mrt} a été calculée avec la méthode du globe noir calibrée pour leur climat.

Les droites obtenues pour la ville de Hong-Kong et la ville de Saint-Pierre selon le globe noir se superposent pour les votes de sensation moyens compris entre 0 et 1, et restent très proches pour les votes de sensation supérieurs. Pour ces deux villes, les similitudes peuvent s'expliquer par leur climat ayant la même classification, une taille d'échantillon très proche et enfin le calcul de T_{mrt} a été fait selon la même méthode du globe noir avec la formule de la norme ISO 7726. Il est à noter qu'à Hong-Kong,

les valeurs de T_{mrt} obtenues avec la formule ISO pour le globe noir ne différaient pas des valeurs de T_{mrt} calculées avec la méthode des radiomètres, d'où le fait que la formule ISO n'a pas été corrigée (Lam and Lau, 2018). Il se peut donc que dans certains cas, le globe noir donne des valeurs de T_{mrt} qui ne soient pas surestimées.

Les courbes de sensation des villes d'Athènes et de Melbourne sont plus décalées vers la gauche de l'échelle UTCI, et montrent une valeur de température neutre ($MTSV=0$) plus faible en comparaison des villes de Hong-Kong et de Saint-Pierre. Ainsi, la température neutre est de 20,3°C pour Athènes, 19,3°C pour Melbourne et 23,6°C pour Hong-Kong. Pour la ville de Saint-Pierre, les températures neutres obtenues en fonction du globe noir et du globe gris sont de 24,2 et 24,6°C respectivement, soit plus élevées que les autres villes, mais proches de la valeur de Hong-Kong. En outre, la ville d'Athènes présente la pente la plus faible avec 7,9°C UTCI/TSV, suivie de Melbourne avec 9,6°C /TSV et de Hong-Kong avec 11,2°C. Pour la ville de Saint-Pierre, il avait été constaté dans la partie précédente que la pente était différente en fonction du globe utilisé avec 7,9°C UTCI / TSV pour le globe gris, ce qui nous rapprocherait de la sensibilité des résidents de la ville d'Athènes, contre 10,2°C UTCI / TSV avec le globe noir et dans ce cas, on est plus proche de la ville de Hong-Kong.

Grâce aux équations donnant TSV en fonction de l'UTCI, nous avons pu calibrer les valeurs de l'UTCI pour chaque classe de sensation thermique et les comparer avec les classes d'origine de l'UTCI extraites de l'étude de (Bröde et al., 2011). Les valeurs obtenues pour chaque ville sont présentées dans le Tableau 4.16.

Comme dans le cas de l'indice PET, les classes de sensation thermique des villes étudiées diffèrent de celles de l'échelle d'origine de l'UTCI, notamment dans le cas des villes situées en climat tropical.

La ville d'Athènes présente les valeurs les plus proches de l'échelle d'origine. La zone de neutralité thermique de l'échelle d'origine est définie pour un UTCI compris entre 18 et 26 selon (Bröde et al., 2011). Les résidents des villes d'Athènes et de Melbourne tolèrent des températures ressenties plus faibles alors que les résidents des villes d'Hong-Kong et de Saint-Pierre considèrent comme neutres des valeurs plus élevées de l'UTCI que l'échelle d'origine. Les zones de neutralité de Melbourne et d'Athènes sont quasiment similaires, de même que les zones de neutralité thermique d'Hong-Kong et de Saint-Pierre. Pour la zone de sensation « légèrement chaud », les villes d'Athènes et de Melbourne se rapprochent de la zone de l'échelle d'origine alors que la différence est bien plus marquée pour Hong-Kong et Saint-Pierre, où les résidents ressentent cette sensation pour des valeurs d'UTCI plus élevées. Les différences sont encore plus marquées entre les échelles des villes de Melbourne, d'Hong-Kong et de Saint-Pierre et l'échelle d'origine pour les catégories de sensation chaude à extrêmement chaude. Pour la ville de Saint-Pierre, si on considère la méthode du globe noir, les classes de sensation thermique sont très proches de celles d'Hong-Kong. Ce qui n'est pas le cas avec la méthode du globe gris, notamment pour les catégories de sensation allant de « chaud » à « extrêmement chaud », qui se rapprochent plus des valeurs calibrées obtenues pour la ville de Melbourne.

Tableau 4.16: Classes d'origine de sensation thermique en fonction de la valeur de l'indice UTCI et comparaison avec les valeurs de l'UTCI obtenues pour différents climats chauds après calibration, dont le climat tropical de Saint-Pierre, La Réunion.

Sensation thermique	UTCI (°C) Echelle d'origine (Bröde et al. 2011)	Echelle UTCI calibrée Athènes (°C)	Echelle UTCI calibrée Hong-Kong (°C)	Echelle UTCI calibrée Melbourne (°C)	Echelle UTCI calibrée Saint- Pierre Globe noir (°C)	Echelle UTCI calibrée Saint-Pierre Globe gris (°C)
Neutre	18 - 26	16-24	18-29	15-24	19*-29	21*-29
Légèrement chaud	26 - 32	24-32	29-40	24-34	29-40	29-36
Chaud	32 à 38	32-40	40-52	34-43	40-50	36-44
Très chaud	38 à 46	40-48*	52-63*	43-53*	50-60*	44-52*
Extrêmement chaud	>46	>48*	>63*	>53*	>60*	>52*

*Valeurs obtenues par extrapolation de la droite de régression linéaire

Dans leur étude, (Lam and Lau, 2018) émettent l'hypothèse que le fait que les résidents de la ville d'Hong-Kong aient moins chauds que ceux de Melbourne pour des valeurs similaires d'UTCI, est lié au phénomène d'acclimatation et donc à l'histoire thermique à long-terme. Les habitants de ces deux villes auraient des niveaux d'acclimatation différents durant la période estivale. A Hong-Kong, les habitants se seraient acclimatés à un climat plus chaud et plus humide alors qu'à Melbourne, le climat est plus doux et plus sec en général (avec quelques jours marqués par de fortes chaleurs). Ceci est également le cas à Athènes, un climat plus doux et plus sec. A La Réunion, la majorité des personnes interrogées vivent sur l'île depuis des années. Ils ont eux aussi pu s'acclimater à un climat chaud et humide.

Un autre facteur important selon (Lam and Lau, 2018) serait « l'histoire thermique à court-terme », comme le fait d'avoir été dans un environnement climatisé avant l'enquête. Ainsi, 56,8% des personnes interrogées à Hong-Kong se trouvaient dans un environnement climatisé avant l'enquête alors que 96% des répondants se trouvaient déjà dans un environnement extérieur 15 minutes avant les enquêtes. A Athènes, seulement 31,3% des personnes interrogées se trouvaient dans un milieu climatisé avant de répondre au questionnaire et à Saint-Pierre, ce chiffre n'est seulement que de 8%.

En conclusion, le choix de la méthode de calcul de T_{mrt} est important à prendre en compte lors de la comparaison entre les classes de sensation thermique obtenues après calibration de l'indice UTCI dans

différents climats. Dans le cas de la ville de Saint-Pierre, la calibration de l'indice UTCI a été faite selon les deux méthodes de mesure les plus utilisées dans la détermination de T_{mrt} , à savoir le globe noir et le globe gris. Le globe noir donne des valeurs d'UTCI supérieures au globe gris pour les limites des classes de sensation thermique. Afin de minimiser le risque d'être en inconfort thermique, la méthode du globe gris est donc choisie. La sensation « neutre » est obtenue pour une valeur d'UTCI comprise entre 21 et 29°C et la sensation « légèrement chaud » pour un UTCI compris entre 29 et 36°C.

4.5. Conclusion

Cette étude permet de tirer des conclusions préliminaires sur la perception du confort thermique dans un quartier situé sur une île bénéficiant d'un climat tropical, et notamment sur la calibration de deux indices de confort thermique urbain, à savoir la PET et l'UTCI. La calibration de ces deux indices, appliqués à la ville de Saint-Pierre selon deux méthodes de mesure de la T_{mrt} (globe gris et globe noir), a été également réalisée pour la première fois à La Réunion, ceci grâce à des enquêtes de terrain, combinant la mesure de variables microclimatiques et l'utilisation de questionnaires afin de recueillir la sensation des habitants. La majorité des enquêtes a été réalisée durant la période estivale (60% des questionnaires) et bien que le nombre de votes soit faible comparé à d'autres études, il reste représentatif en termes de population étudiée. Sur l'ensemble de la période des enquêtes (été et intersaison confondus), 70% des votes de sensation thermique exprimés sont compris dans les 3 catégories centrales de l'échelle thermique (i.e. « légèrement froid », « neutre », « légèrement chaud »), représentant 86% des votes confortables. De plus, la majorité des personnes interrogées préféreraient avoir plus froid et surtout ressentir plus de vent en été. Lorsque les enquêtes se sont déroulées en plein soleil, les personnes auraient préféré avoir plus d'ombre.

Le nombre d'enquêtes devra néanmoins être plus important et plus diversifié en termes de lieu, afin de minimiser les effets liés au site lui-même sur les votes de sensation thermique, mais aussi en termes de conditions climatiques journalières avec des mesures tout au long de l'année afin de tenir compte de l'effet des saisons et permettre la calibration des indices dans l'échelle de froid. Aussi, plus le nombre de votes de sensation thermique sera important et diversifié, et plus les limites de température définies pour la zone de confort seront précises.

En ce qui concerne la mesure de la température radiante moyenne, nous avons pu constater que le choix de la méthode impacte non seulement les valeurs de la T_{mrt} mais aussi celles des indices étudiés, et que l'impact est d'autant plus important lorsque les mesures sont faites au soleil. La calibration des indices PET et UTCI diffère alors en fonction de la méthode de mesure de T_{mrt} , compliquant la comparaison entre études. En effet, certains auteurs ont pu calibrer leur globe avec la méthode des radiomètres, d'autres, comme nous, utilisent à défaut la méthode du globe gris ou du globe noir en appliquant la formule de T_{mrt} issue de la norme ISO 7726.

Dans notre cas, le choix se porte sur la méthode du globe gris avec formule ISO pour la calibration de la PET et de l'UTCI puisqu'elle minimise le risque de se trouver dans une des catégories d'inconfort thermique. Pour l'indice PET, la zone de neutralité thermique est donc définie pour une valeur de l'indice **PET** comprise entre **16,1 et 26,9°C** et une température de PET neutre égale à 21,5°C. Pour **l'UTCI**, la zone de neutralité thermique est comprise entre **20,6 et 28,5°C** et la température neutre est égale à 24,6°C. Les zones de neutralité thermique étant associées à la zone dite de confort thermique, un espace urbain extérieur aura donc le niveau de confort requis si celui-ci est compris dans la zone définie précédemment pour chaque indice.

Les collectivités locales pourront donc évaluer le niveau de confort thermique extérieur dans leurs EQ livrés grâce à des mesures sur site et au calcul d'un des indices de confort calibrés, soit la PET ou l'UTCI (pour des climats similaires à celui de Saint-Pierre). Dans le cas de projets de renouvellement urbain, des mesures avant rénovation et après rénovation pourront être réalisées. Le choix des sites à évaluer devrait englober les principaux espaces de vie fréquentés : parcs urbains, cours des écoles, rues piétonnes principales, espaces de détente aménagés avec du mobilier urbain tel que des bancs, des arrêts de bus, des jeux pour enfants, etc. Les mesures doivent être effectuées lors d'une journée chaude et ensoleillée en été, à différents moments de la journée (matin, midi, après-midi).

Cette étude confirme les résultats obtenus par d'autres auteurs montrant une sensibilité thermique différente des individus en fonction des villes et climats étudiés, et des catégories de sensibilité thermique différentes comparées aux échelles d'origine des indices PET et UTCI (Pantavou et al., 2013) (Salata et al., 2016) (Krüger et al., 2017) (Lam and Lau, 2018). Les échelles d'origine de ces deux indices ne devraient donc pas être utilisées directement en climat tropical mais être calibrées, c'est-à-dire que les limites des différentes catégories de l'échelle thermique doivent être modifiées et refléter au mieux la perception thermique de la population locale. Il est important de pouvoir prendre en compte l'histoire thermique à long-terme (phénomène d'acclimatation) et l'histoire à court-terme (présence dans un environnement climatisé), de même que les habitudes en termes d'utilisation de la climatisation dans ces échelles, puisqu'elles influent sur la sensation thermique des individus et sur leurs attentes.

Enfin, un consensus de la communauté scientifique devrait être établi quant au protocole expérimental à suivre pour les enquêtes en extérieur et la calibration de la T_{mrt} , ainsi qu'au choix de la méthode à appliquer pour la définition des « benchmarks » et la calibration des indices de confort. Ceci permettrait de faciliter la dissémination du savoir sur les études de confort thermique en milieu urbain en s'appuyant sur un socle commun validé et normalisé et de rendre la comparaison entre études possible. Le but final étant de permettre aux chercheurs de proposer des recommandations afin de créer des espaces urbains confortables dans les différents projets d'aménagement.

Conclusion générale et perspectives

La question du climat urbain est un champ de recherche encore vaste, qui suscite un intérêt grandissant chez l'ensemble des acteurs de la ville (climatologues, collectivités territoriales, urbanistes, aménageurs, etc.), afin de mieux appréhender les impacts du changement climatique (Roth, 2007) (Grimmond et al., 2010).

Les collectivités territoriales sont de plus en plus sensibilisées à la notion de développement durable et sont encouragées à intégrer l'ensemble de ses dimensions dans leurs nouveaux projets d'aménagement urbain ou de renouvellement urbain, sous l'impulsion des différents leviers nationaux mis en place par l'Etat français, tel que le Label EQ. Ces dernières expriment également un besoin d'évaluer l'impact des actions mises en œuvre dans le cadre de leur projet et de vérifier que les objectifs qu'elles se sont fixées sont bien atteints. Cette démarche d'amélioration continue leur permet alors d'identifier et de diffuser les bonnes pratiques au sein de leurs projets à venir.

C'est dans ce but que le Ministère a choisi de mettre en place un Label en quatre étapes afin de pouvoir accompagner les collectivités dans différentes étapes de la vie du projet, jusqu'à trois ans après la livraison de l'EQ. Le quartier rénové de la Ravine Blanche, situé sur l'île de La Réunion, est aujourd'hui labellisé comme EcoQuartier confirmé, soit la quatrième et dernière étape du processus de Labellisation. Il a été le seul projet lauréat situé sur une île en climat tropical à avoir participé à la première campagne d'évaluation (CEQ) lancée en 2014.

La CEQ visait à évaluer les projets des collectivités volontaires selon une méthodologie d'évaluation des engagements relatifs à l'énergie, à l'eau et aux déchets, proposée par des experts du CEREMA, de l'ADEME et du CSTB, sous maîtrise d'ouvrage du Ministère (MLETR and CSTB, 2016). Ces trois engagements nécessitaient un appui technique et scientifique plus important que pour les autres engagements de la charte EQ.

L'application de cette méthode à des EQ situés dans des contextes différents a permis de mettre en avant la nécessité de pouvoir disposer de degrés de liberté dans le choix des indicateurs à évaluer mais aussi dans la définition des valeurs seuils de référence ou des valeurs à atteindre. Le retour d'expérience de l'évaluation menée dans le quartier de la Ravine Blanche proposé au chapitre 1 montre également qu'une approche purement énergie n'est pas adaptée pour l'évaluation d'un EQ situé en climat tropical, avec la problématique du confort d'été. La notion de confort thermique est essentielle en climat tropical, particulièrement en été.

En effet, les indicateurs développés afin de mesurer la sobriété énergétique ne permettent pas de refléter la réalité vécue au sein des logements sociaux et des salles de cours des écoles, peu ou pas équipés en systèmes énergivores tels que la climatisation.

Le faible ratio de consommation moyen calculé pour le secteur résidentiel n'est pas forcément lié au fait qu'il s'agisse d'un écoquartier. Il reflète plutôt le fait que le parc de logements est majoritairement composé de logements sociaux, présentant un faible taux d'équipements en termes de climatisation et où aucun système de chauffage n'est installé.

Aussi, bien que les ratios énergétiques des logements sociaux de l'EQ soient inférieurs ou égaux à la moyenne locale, la majorité des personnes interrogées jugent qu'il fait très chaud en été et que leur logement est inconfortable thermiquement. Cette perception a été confirmée par des mesures sur site.

De plus, le contexte climatique, culturel et réglementaire local pousse à s'orienter vers la construction de bâtiments bioclimatiques, favorisant le principe de ventilation naturelle. Les bâtiments sont donc étroitement liés à l'environnement extérieur. Aussi, créer des aménagements urbains confortables a non seulement des conséquences directes sur l'utilisation et la fréquentation du quartier et de ses espaces extérieurs, mais aussi sur les conditions intérieures des bâtiments.

Bien que l'aspect confort thermique apparaisse dans l'Engagement 16 de la méthode nationale d'évaluation, celui-ci n'est pas traité de manière approfondie et propose des indicateurs simples, qui ne permettent pas réellement de quantifier le niveau de confort thermique atteint en intérieur ou en extérieur. Un questionnaire et des indicateurs applicables dans différents contextes ont été proposés à la fin du chapitre 1, en complément des indicateurs proposés dans la méthode nationale.

L'étude du confort thermique en milieu urbain est plus récente et plus complexe que celle en intérieur, où de nombreuses études ont déjà été menées et où des normes existent (Chen and Ng, 2012) (Rupp et al., 2015). Néanmoins, des indices de confort thermique, permettant d'apprécier et quantifier les effets du microclimat sur la perception thermique des usagers, existent (Coccolo et al., 2016). Certains ont d'ailleurs été intégrés dans des outils d'évaluation développés en climat tropical, à l'instar de l'outil BEAM Plus Neighbourhood à Hong-Kong (HKGBC, 2016).

Afin de choisir des indicateurs pertinents pour l'évaluation du confort thermique en milieu urbain tropical à l'échelle du quartier, un état de l'art sur les différents modèles et indices existants, et applicables en climat tropical a été réalisé dans le chapitre 2. Les indices rationnels, par opposition aux indices simples ou empiriques, sont des indices plus complexes, qui prennent en compte l'ensemble des facteurs affectant le confort thermique, notamment la température radiante moyenne extérieure et la vitesse d'air. La majorité d'entre eux s'expriment comme une température équivalente, et sont donc plus facilement interprétables par les différents acteurs de la ville et plus faciles à communiquer aux usagers.

Les indices PET et UTCI ont été sélectionnés comme indicateurs pouvant être intégrés à la méthode nationale afin d'évaluer le confort thermique en extérieur. Ces deux indices comptent parmi les plus

utilisés au niveau international, notamment en milieu tropical, que ce soit dans les outils de simulation numérique ou dans des études de terrain (Johansson et al., 2014). Leur échelle de sensation permettant de couvrir différents climats et/ou saisons distinctes (été, hiver), la PET et l'UTCI peuvent être utilisés pour évaluer le confort d'été ou d'hiver, sur l'ensemble du territoire français continental et dans les DROM.

La description des modèles de confort urbain et des facteurs physiques influençant le plus le confort thermique réalisée dans le chapitre 2 a permis de soulever différents verrous scientifiques et techniques auxquels des réponses ont été apportées dans les chapitres 3 et 4.

En effet, il a notamment été soulevé que :

- Les échelles d'origine de ces deux indices ne devraient donc pas être utilisées directement en climat tropical mais être calibrées, c'est-à-dire que les limites des différentes catégories de l'échelle thermique doivent être modifiées et refléter au mieux la perception thermique de la population locale.
- La T_{mrt} , nécessaire au calcul des indices PET et UTCI, est un facteur clé pour l'évaluation du confort thermique en extérieur. Il est donc important de pouvoir la mesurer le plus précisément possible.
- Aucune méthodologie standardisée n'existe pour les enquêtes de terrain, le traitement des données ou encore la calibration des indices de confort thermique.

La T_{mrt} permet de globaliser l'ensemble des flux radiatifs atteignant le corps humain et de l'exprimer sous la forme d'une température équivalente (Kántor and Unger, 2011). Ce paramètre est difficilement caractérisable en milieu urbain extérieur, que ce soit du point de vue de la simulation numérique ou des mesures sur site, en raison de la complexité des formes urbaines et de la diversité des flux entrant dans le calcul.

Le chapitre 3 présente de manière détaillée la notion de T_{mrt} ainsi que les différentes méthodes permettant de la calculer en milieu urbain, en mettant en avant leurs avantages et leurs limites. La méthode la plus précise à l'heure actuelle est celle utilisant trois radiomètres mais c'est également la plus onéreuse. Une des méthodes les plus récentes est la méthode RAI, qui présente de nombreux atouts, et notamment la possibilité de pouvoir cartographier les flux radiatifs sur un miroir hémisphérique (Hatefnia et al., 2017a). Une nouvelle mise en œuvre de cette méthode ainsi que la méthodologie de traitement envisagée sont proposées dans le chapitre 3 afin de pouvoir quantifier la part des flux GLO entrant dans le calcul de la T_{mrt} . Cette méthode étant encore exploratoire, la méthode

des globes, qui est actuellement la méthode la plus répandue, a été utilisée afin de calculer la T_{mrt} dans le chapitre 4.

Une étude de terrain combinant la mesure des principaux facteurs influençant le confort thermique et des questionnaires a été menée dans l'EQ de la Ravine Blanche afin d'évaluer la perception du confort thermique en été et de calibrer les indices PET et UTCI. La méthodologie développée pour l'étude de terrain, notamment en termes de montage de questionnaires, ainsi que pour la calibration des indices PET et UTCI est présentée dans le chapitre 4.

Concernant la perception des usagers du quartier, il en ressort que la majorité des personnes se sentaient en situation de confort thermique (86% de votes confortables), bien qu'elles préféreraient avoir plus froid et surtout ressentir plus de vent en été. Lorsque les enquêtes se sont déroulées en plein soleil, les personnes auraient préféré avoir plus d'ombre.

Cette étude a également permis de comparer différentes méthodes de mesure et de calcul de la T_{mrt} (globes gris et noir) et il en ressort que le choix de la méthode impacte non seulement les valeurs de la T_{mrt} mais aussi celles des indices étudiés. L'impact est plus important lorsque les mesures sont réalisées en plein soleil et que les globes sont exposés au rayonnement solaire direct. La méthode du globe noir est donc déconseillée lorsque les enquêtes sont réalisées au soleil. De plus, il est préférable d'éviter d'utiliser une formule de T_{mrt} calibrée dans un contexte très différent (en termes de climat, de culture, de sites étudiés, etc.) puisque des facteurs personnels (physiologiques, psychologiques, etc.) peuvent entrer en jeu. Dans notre cas, il en ressort que la méthode du globe gris permettant de calculer la T_{mrt} selon la formule donnée dans la norme ISO 7726 est la plus adéquate (ISO 7726, 1998).

Finalement, les indices PET et UTCI ont été calibrés pour le climat de la Ville de Saint-Pierre et sont applicables pour des villes avec un climat similaire à La Réunion. Pour l'indice PET, la zone de neutralité thermique est donc définie pour une valeur de l'indice PET comprise entre 16,1 et 26,9°C. Pour l'UTCI, la zone de neutralité thermique est comprise entre 20,6 et 28,5°C. Les zones de neutralité thermique étant associées à la zone dite de confort thermique, un espace urbain extérieur aura donc le niveau de confort requis si celui-ci est compris dans la zone définie précédemment pour chaque indice.

Le niveau de confort atteint dans les espaces extérieurs des projets d'aménagement peut ainsi être évalué grâce à ces deux indices de confort, que ce soit en amont du projet (par de la mesure sur site ou grâce aux outils de simulation) ou après livraison du quartier, comme dans le cas de la Ravine Blanche.

L'étude du confort thermique en milieu urbain tropical est un domaine de recherche encore vaste, qui s'inscrit dans un champ pluridisciplinaire et qui ouvre la voie à de nombreuses perspectives de recherches.

Perspectives :

Une estimation plus précise de la T_{mrt} est importante afin de pouvoir caractériser l'influence du rayonnement sur le corps humain et quantifier le niveau de confort en milieu urbain. Dans le chapitre 2, nous proposons une expérimentation basée sur la récente méthode RAI afin de caractériser la part liée aux flux de GLO avec la T_{mrt_GLO} . Une première étape serait alors d'aller jusqu'au traitement des données et de calculer cette variable grâce aux deux procédures présentées (transformation des coordonnées et méthode NV proposée par (Hatefnia et al., 2016)). Dans un second temps, le calcul de la T_{mrt} pourrait être réalisé en incluant la part liée aux flux CLO, soit par la mesure ou par la simulation.

En outre, une comparaison entre cette méthode et celle plus précise des trois radiomètres devrait être envisagée. Les 3 radiomètres permettent également de séparer le calcul des flux CLO et GLO. Cela permettrait de comparer les valeurs obtenues de T_{mrt_GLO} pour l'imageur avec celles mesurées par les radiomètres. Cela permettra également de comparer les valeurs de T_{mrt} obtenues pour les principales méthodes de mesure de la T_{mrt} : celles de l'imageur IR, des radiomètres et des globes.

La méthode des radiomètres permettrait également de calibrer la formule de T_{mrt} pour le globe gris à La Réunion et ainsi pouvoir appliquer la méthodologie d'évaluation présentée dans le chapitre 4 avec une valeur plus précise de la T_{mrt} . En effet, la méthode des globes est plus facilement mobilisable et donc plus opérationnelle afin de pouvoir évaluer le niveau de confort thermique atteint dans les espaces urbains avec les indices PET et UTCI. Cependant, comme le montre l'étude menée dans le chapitre 4, le choix de la méthode (globe gris ou noir) et le choix de la formule appliquée pour le calcul de T_{mrt} impacte les valeurs des indices et les limites de leur zone de confort. Aussi, même s'il est plus pratique de déployer des capteurs de mesure « low-cost » tels que les globes, il est d'abord nécessaire de les calibrer avec un appareil de mesure plus précis.

La définition de la zone de confort des indices se base sur un échantillon représentatif à l'échelle du quartier mais qui reste assez réduit à l'échelle de la population réunionnaise. De plus, les enquêtes ont été réalisées sur un site bien spécifique et très ombragé. Il est donc recommandé d'augmenter le nombre d'enquêtes mais aussi de diversifier les sites et les périodes de l'année pour la ville de Saint-Pierre. Cela permettra de mieux définir les différentes catégories thermiques de l'échelle de sensation des indices.

Cette méthodologie pourrait également s'appliquer aux différentes zones climatiques définies dans la RTAA DOM (RT2ADOM, 2009) ou dans l'outil PERENE (LPBS and Imageen, 2009), ce qui permettrait de définir les zones de confort des indices pour l'ensemble des climats présents sur l'île. Les différentes collectivités disposeraient alors d'un indicateur de mesure du niveau de confort thermique extérieur de leurs projets d'aménagement.

De plus, le questionnaire réalisé comporte des éléments permettant d'appréhender certains aspects psychologiques ou encore la notion d'adaptation, qui n'ont pas été exploitées dans le cadre de ces

travaux de recherche. Les usagers ont en effet été questionnés sur le temps passé en extérieur, les raisons pour lesquelles ils fréquentent le site étudié, leur appréciation et leur perception du lieu (ombrage, végétation), le temps vécu à La Réunion, le milieu dans lequel ils travaillent (intérieur ou extérieur) ou encore la présence de climatisation sur leur lieu de vie. Or, différentes études ont mis en évidence qu'une simple approche quantitative ne suffit pas à caractériser les conditions de confort thermique en extérieur et que les phénomènes d'acclimatation et de différences régionales nécessiteraient d'être étudiés de manière plus approfondie (Lin, 2009) (Honjo, 2009) (Nasir et al., 2012).

Enfin, les cartes bioclimatiques connaissent actuellement un fort essor, donnant des orientations aux aménageurs et aux collectivités afin de promouvoir les villes durables de demain (Johansson et al., 2014) (Ng and Ren, 2015). Aussi, afin d'offrir une vision plus large de ces travaux de recherche, il serait intéressant de pouvoir réaliser des « cartes thermiques » basés sur les indices PET et UTCI, à l'image de l'atlas thermique proposé par (Yang and Chen, 2016). Pour cela, il est nécessaire d'avoir des modèles précis de la T_{mrt} et de la vitesse d'air au niveau des piétons dans les outils de modélisation, afin de pouvoir calculer ces indices de confort extérieur et ainsi prédire le niveau de confort thermique. Ces cartes pourront alors être utilisées comme outil d'aide à la décision afin d'identifier les zones vulnérables et d'orienter les acteurs de la ville sur les solutions à privilégier en termes d'aménagement dans leurs projets.

Références bibliographiques

- Abdel Sabour, E., 2015. Neighbourhood Sustainable assessment tools analytical overview. QScience Proceedings 2015, 16. <https://doi.org/10.5339/qproc.2015.qgbc.16>
- Aberg, M., Sillen, M., 2002. Benchmarking for Sustainable Urban Development in Malmo - Using a Structured Comparison as a Pre-Study. Presented at the SB02 Oslo: Sustainable Building 2002. Proceedings of the International COncference - The Challenge, the Knowledge, the Solutions, in-house publishing, Rotterdam (Netherlands).
- Abu Dhabi Urban Planning Council, 2016. The Pearl Rating System for Estidama Emirate of Abu Dhabi. Public Realm Rating System: Design & Construction, Version 1.0.
- Ahmed, K.S., 2003. Comfort in urban spaces: defining the boundaries of outdoor thermal comfort for the tropical urban environments. Energy and Buildings, Special issue on urban research 35, 103–110. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00085-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00085-3)
- Al Nasa'a, R., 2015. The role of rating systems in the development of sustainable urban environments. QScience Proceedings 2015, 12. <https://doi.org/10.5339/qproc.2015.qgbc.12>
- Allegrini, J., Orehounig, K., Mavromatidis, G., Ruesch, F., Dorer, V., Evins, R., 2015. A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews 52, 1391–1404. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.123>
- Anderson, E.R., 1954. Energy budget studies, water-loss investigations, Lake Hefuer studies." prof. paper No. 269. US Geological Survey, Reston, Va.
- Ångström, A.K., 1915. A study of the radiation of the atmosphere, based upon observations of the nocturnal radiation during expeditions to Algeria and to California. Smithsonian Institution.
- Asawa, T., Hoyano, A., Nakaohkubo, K., 2008. Thermal design tool for outdoor spaces based on heat balance simulation using a 3D-CAD system. Building and Environment 43, 2112–2123. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.12.007>
- ASHRAE, 2001. ASHRAE Handbook Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA. ASHRAE.
- ASHRAE 55, 2017. Standard 55-2017 -- Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (ANSI/ASHRAE Approved).
- ASHRAE 55, 2004. Standard 55-2017 -- Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (ANSI/ASHRAE Approved).

- Autodesk, 2019. Autodesk CFD 2019 | Radiation [WWW Document]. URL <https://knowledge.autodesk.com/support/cfd/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/SimCFD-UsersGuide/files/GUID-E532C49F-8EEC-4B56-B7B6-79B31F0D5115-htm.html> (accessed 9.6.20).
- BCA, 2009. BCA Green Mark for Districts. Version 1.0. Building and Construction Authority.
- Beckers, B., Beckers, P., 2016. Fast and accurate view factor generation, in: FICUP, An International Conference on Urban Physics.
- Berardi, U., 2013. Sustainability assessment of urban communities through rating systems. *Environment, development and sustainability* 15, 1573–1591.
- Berg, P.G., 2004. Sustainability resources in Swedish townscape neighbourhoods: Results from the model project Hågaby and comparisons with three common residential areas. *Landscape and Urban Planning* 68, 29–52. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(03\)00117-8](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(03)00117-8)
- Berg, P.G., Nycander, G., 1997. Sustainable neighbourhoods—a qualitative model for resource management in communities. *Landscape and Urban Planning* 39, 117–135. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(97\)00050-9](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(97)00050-9)
- Bijoux, D., Lietz, K., Saville-Smith, K., 2007. Measuring Neighbourhood Sustainability in New Zealand. UPE7: World Class Cities-Environmental Impacts and Planning Opportunities.
- Blazejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H., Tinz, B., 2012. Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International Journal of Biometeorology* 56, 515–535.
- Blum, A., Grant, M., 2006. Sustainable neighbourhoods: Assessment tools for renovation and development. *Journal of International Research Publications: Ecology and Safety* 1, 37–54.
- Boutaud, B., 2009. Quartier durable ou éco-quartier ? Cybergeorge : *European Journal of Geography*.
- Bozonnet, E., Belarbi, R., Allard, F., 2005. Modelling solar effects on the heat and mass transfer in a street canyon, a simplified approach. *Solar Energy* 79, 10–24. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.10.007>
- Bozonnet, E., Musy, M., Calmet, I., Rodriguez, F., 2013. Modeling methods to assess urban fluxes and heat island mitigation measures from street to city scale. *International Journal of Low-Carbon Technologies* 1–16. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt049>
- Bröde, P., Fiala, D., Blazejczyk, K., Holmer, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Tinz, B., Havenith, G., 2011. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>

- Bröde, P., Krüger, E.L., Rossi, F.A., Fiala, D., 2012. Predicting urban outdoor thermal comfort by the Universal Thermal Climate Index UTCI—a case study in Southern Brazil. *International journal of biometeorology* 56, 471–480.
- Brunt, D., 1932. Notes on radiation in the atmosphere. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 58, 389–420.
- Bruse, M., 2004. ENVI-met 3.0: updated model overview. University of Bochum. Retrieved from: www.envi-met.com.
- Brutsaert, W., 1975. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. *Water resources research* 11, 742–744.
- Burton, I., Ebi, K.L., McGregor, G., 2009. Biometeorology for adaptation to climate variability and change, in: *Biometeorology for Adaptation to Climate Variability and Change*. Springer, pp. 1–5.
- Cerema, 2015. Méthodologie pour l'évaluation de l'engagement 16 du Label ÉcoQuartier - Produire un urbanisme permettant d'anticiper et de s'adapter aux changements climatiques et aux risques.
- Charlot-Valdieu, C., Outrequin, P., 2007. La démarche HQE2R: des outils d'analyse pour des projets de quartiers durables. *Urbia, Les Cahiers du développement urbain durable* 193–209.
- Chastenet, C.A., Belziti, D., Bessis, B., Fauchaux, F., Le Sceller, T., Monaco, F.-X., Pech, P., 2016. The French eco-neighbourhood evaluation model: Contributions to sustainable city making and to the evolution of urban practices. *Journal of Environmental Management* 176, 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.03.036>
- Chen, L., Ng, E., 2012. Outdoor thermal comfort and outdoor activities: A review of research in the past decade. *Cities* 29, 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2011.08.006>
- Chen, Q., Acey, C., Lara, J.J., 2015. Sustainable Futures for Linden Village: A model for increasing social capital and the quality of life in an urban neighborhood. *Sustainable Cities and Society* 14, 359–373. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.03.008>
- Cheng, V., Ng, E., Chan, C., Givoni, B., 2012. Outdoor thermal comfort study in a sub-tropical climate: a longitudinal study based in Hong Kong. *International journal of biometeorology* 56, 43–56.
- Cherqui, F., 2005. Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier - méthode ADEQUA (phdthesis). Université de La Rochelle.
- Cheung, P.K., Jim, C.Y., 2017. Determination and application of outdoor thermal benchmarks. *Building and Environment* 123, 333–350. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.008>

- Choguill, C.L., 2008. Developing sustainable neighbourhoods. *Habitat International* 32, 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2007.06.007>
- Coccolo, S., Kämpf, J., Scartezzini, J.-L., Pearlmutter, D., 2016. Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards. *Urban Climate* 18, 33–57. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.08.004>
- Cohen, P., Potchter, O., Matzarakis, A., 2013. Human thermal perception of Coastal Mediterranean outdoor urban environments. *Applied Geography* 37, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.11.001>
- Corbella, O.D., Magalhães, M.A.A.A., 2008. Conceptual differences between the bioclimatic urbanism for Europe and for the tropical humid climate. *Renewable Energy* 33, 1019–1023. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.04.004>
- Crawford, T.M., Duchon, C.E., 1999. An improved parameterization for estimating effective atmospheric emissivity for use in calculating daytime downwelling longwave radiation. *Journal of Applied Meteorology* 38, 474–480.
- D'Ambrosio Alfano, F.R., Palella, B.I., Riccio, G., 2011. Thermal environment assessment reliability using temperature-humidity indices. *Industrial health* 49, 95–106.
- de Dear, R., Brager, G., 2001. The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment. *Int. J. Biometeorology* 100–108.
- Deosthali, V., 1999. Assessment of impact of urbanization on climate: an application of bio-climatic index. *Atmospheric Environment* 33, 4125–4133. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00154-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00154-5)
- DRIEA, 2015. Enquête de la DRIEA sur les outils d'aménagement [WWW Document]. Ekopolis. URL <http://www.ekopolis.fr/rendez-vous/enquete-de-la-driea-sur-les-outils-damenagement> (accessed 5.29.15).
- Emmanuel, R., 2005. Thermal comfort implications of urbanization in a warm-humid city: the Colombo Metropolitan Region (CMR), Sri Lanka. *Building and Environment* 40, 1591–1601. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.12.004>
- Emmanuel, R., Lin, T.-P., Ng, E., Duarte, D.H.S., Johansson, E., Perera, N., Giridharan, R., Drach, P., Mills, G., 2016. Urban Climate Challenges in the Tropics: Rethinking Planning and design opportunities.
- Fang, Z., Feng, X., Liu, J., Lin, Z., Mak, C.M., Niu, J., Tse, K.-T., Xu, X., 2018a. Investigation into the differences among several outdoor thermal comfort indices against field survey in subtropics. *Sustainable Cities and Society*. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.022>

- Fang, Z., Lin, Z., Mak, C.M., Niu, J., Tse, K.-T., 2018b. Investigation into sensitivities of factors in outdoor thermal comfort indices. *Building and Environment* 128, 129–142. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.11.028>
- Fanger, P.O., 1970. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.
- Farajzadeh, H., Saligheh, M., Alijani, B., Matzarakis, A., 2015. Comparison of selected thermal indices in the northwest of Iran. *Natural Environment Change* 1, 1–20.
- Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P., Kampmann, B., Jendritzky, G., 2012. UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *Int J Biometeorol* 56, 429–441. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0424-7>
- Frayssinet, L., Merlier, L., Kuznik, F., Hubert, J.-L., Milliez, M., Roux, J.-J., 2018. Modeling the heating and cooling energy demand of urban buildings at city scale. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81, 2318–2327. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.040>
- Gagge, A.P., Fobelets, A.P., Berglund, L., 1986. A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Trans.:(United States)* 92.
- Gagge, A.P., Stolwijk, J.A.J., Nishi, Y., 1971. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Trans* 77 (1): 247-262.
- Garde, F., Lenoir, A., David, M., 2010. Building design and energy performance of buildings in the French island of La Reunion. Feedback and updating of the PERENE project. the Proceedings of Clima2010, Antalya, Turkey.
- Gebhart, B., 1957. Unified Treatment for Thermal Radiation Transfer Processes: Gray, Diffuse Radiators and Absorbers. American Society of Mechanical Engineers.
- GIEC, 2019. Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté.
- Gil, J., Duarte, J.P., 2013. Tools for evaluating the sustainability of urban design: a review. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Urban Design and Planning* 166, 311–325. <https://doi.org/10.1680/udap.11.00048>
- Givoni, B., 1998. Climate considerations in building and urban design. John Wiley & Sons.
- Grimmond, C.S.B., Roth, M., Oke, T.R., Au, Y.C., Best, M., Betts, R., Carmichael, G., Cleugh, H., Dabberdt, W., Emmanuel, R., Freitas, E., Fortuniak, K., Hanna, S., Klein, P., Kalkstein, L.S., Liu, C.H., Nickson, A., Pearlmutter, D., Sailor, D., Voogt, J., 2010. Climate and More Sustainable Cities: Climate Information for Improved Planning and Management of Cities

- (Producers/Capabilities Perspective). *Procedia Environmental Sciences* 1, 247–274. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.09.016>
- Gros, A., Bozonnet, E., Inard, C., 2014. Cool materials impact at district scale—Coupling building energy and microclimate models. *Sustainable Cities and Society* 13, 254–266. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.02.002>
- Gros, A., Bozonnet, E., Inard, C., 2011. Modelling the radiative exchanges in urban areas: A review. *Advances in Building Energy Research* 5, 163–206. <https://doi.org/10.1080/17512549.2011.582353>
- Grosdemouge, V., Garde, F., 2016. Passive design in tropical climates: Key strategies implemented in a French certified sustainable neighbourhood, in: *PLEA 2016 Cities, Buildings, People: Towards Regenerative Environments*.
- GSB, 2011. Green Building Index. GBI Assessment Criteria for Township. Version 1.01. Greenbuildingindex Sdn Bhd.
- Guo, H., Aviv, D., Loyola, M., Teitelbaum, E., Houchois, N., Meggers, F., 2019. On the understanding of the mean radiant temperature within both the indoor and outdoor environment, a critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 109207. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.014>
- Guo, H., Teitelbaum, E., Houchois, N., Bozlar, M., Meggers, F., 2018. Revisiting the use of globe thermometers to estimate radiant temperature in studies of heating and ventilation. *Energy and Buildings* 180, 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.029>
- Haapio, A., 2012. Towards sustainable urban communities. *Environmental Impact Assessment Review* 32, 165–169. <https://doi.org/10.1016/j.ciar.2011.08.002>
- Hatefnia, N., Barakati, A., Ghobad, M., Eslampanah, A., 2017a. Reliable methodology to monitor and assess radiant environments, in: *Passive Low Energy Architecture (PLEA)*.
- Hatefnia, N., Barakati, A., Ghobad, M., Panah, A.E., 2017b. Unified evaluation of total radiation in urban environments. *Architectural Science Review*.
- Hatefnia, N., Barakati, A., Ghobad, M., Panah, A.E., 2016. A Novel Methodology to Assess Mean Radiant Temperature in Complex Outdoor Spaces, in: *PLEA 2016 Los Angeles. 32th International Conference on Passive and Low Energy Architecture*.
- Hatefnia, N., Ghobad, M., 2018. Radiant image-based data post-processing and simulation, in: *Proceedings of the Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design. Society for Computer Simulation International*, pp. 1–8.

- Havenith, G., Fiala, D., Blazejczyk, K., Richards, M., Bröde, P., Holmér, I., Rintamaki, H., Benshabat, Y., Jendritzky, G., 2012. The UTCI-clothing model. *Int J Biometeorol* 56, 461–470. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0451-4>
- Hay, J.E., 1979. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces. *Solar Energy* 23, 301–307. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(79\)90123-3](https://doi.org/10.1016/0038-092X(79)90123-3)
- Hirashima, S.Q. da S., Assis, E.S. de, Nikolopoulou, M., 2016. Daytime thermal comfort in urban spaces: A field study in Brazil. *Building and Environment* 107, 245–253. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.006>
- HKGBC, 2016. BEAM Plus Neighbourhood Version 1.0. A rating tool for sustainable communities. Hong Kong Green Building Council.
- Honjo, T., 2009. Thermal comfort in outdoor environment. *Global environmental research* 13, 43–47.
- Höppe, P., 2002. Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and Buildings, Special Issue on Thermal Comfort Standards* 34, 661–665. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00017-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00017-8)
- Höppe, P., 1999. The physiological equivalent temperature—a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology* 43, 71–75.
- Höppe, P., 1992. Ein neues Verfahren zur Bestimmung der mittleren Strahlungstemperatur in Freien. A new measurement procedure to obtain the mean radiant temperature outdoors., in: *Wetter Und Leben*. pp. 147–151.
- Hottel, H.C., 1954. Radiant heat transmission. WH McAdams. Heat Transmission.
- Houghton, F.C., Yaglou, C.P., 1923. Determining Equal Comfort Lines. *Journal of the American Society of Heating and Ventilating Engineers* 29, 165–176.
- Huang, J., Cedeño-Laurent, J.G., Spengler, J.D., 2014. CityComfort+: A simulation-based method for predicting mean radiant temperature in dense urban areas. *Building and Environment* 80, 84–95. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.019>
- Humphreys, M.A., Rijal, H.B., Nicol, J.F., 2013. Updating the adaptive relation between climate and comfort indoors; new insights and an extended database. *Building and Environment* 63, 40–55. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.01.024>
- Hwang, R.-L., Lin, T.-P., Matzarakis, A., 2011. Seasonal effects of urban street shading on long-term outdoor thermal comfort. *Building and Environment* 46, 863–870. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.017>

- IGBC, 2010. IGBC Green Townships (For Townships and Large Developments) Rating System. Pilot version. Indian Green Building Council.
- ISO 7243, 2017. Ergonomie des ambiances thermiques — Estimation de la contrainte thermique basée sur l'indice WBGT (température humide et de globe noir).
- ISO 7726, 1998. Ergonomie des ambiances thermiques -- Appareils de mesure des grandeurs physiques.
- ISO 7730, 2005. Ergonomie des ambiances thermiques -- Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local.
- ISO 11855-1, 2012. Conception de l'environnement des bâtiments — Conception, dimensionnement, installation et contrôle des systèmes intégrés de chauffage et de refroidissement par rayonnement — Partie 1: Définition, symboles et critères de confort.
- Jégou, A., About de Chastenet, C., Augiseau, V., Guyot, C., Judéaux, C., Monaco, F.-X., Pech, P., 2012. L'évaluation par indicateurs : un outil nécessaire d'aménagement urbain durable ? *Cybergeo : European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.25600>
- Jendritzky, G., de Dear, R., Havenith, G., 2012. UTCI—Why another thermal index? *International journal of biometeorology* 56, 421–428.
- Jensen, J.O., 2014. Sustainability certification of neighbourhoods: Experience from DGNB New Urban Districts in Denmark. *Nordregio News* 1, 7–11.
- Johansson, E., Thorsson, S., Emmanuel, R., Krüger, E., 2014. Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies – The need for standardization. *Urban Climate* 10, Part 2, 346–366. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.12.002>
- Johansson, E., Yahia, M.W., 2011. Subjective thermal comfort in urban spaces in the warm-humid city of Guayaquil, Ecuador. Presented at the 27th International Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA), UCL Presses Universitaires de Louvain, pp. 577–582.
- Johansson, E., Yahia, M.W., Arroyo, I., Bengs, C., 2017. Outdoor thermal comfort in public space in warm-humid Guayaquil, Ecuador. *Int J Biometeorol* 1–13. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1329-x>
- Kántor, N., Chen, L., 2017. Comparison of popular measurement techniques in determining mean radiant temperature: a case study from Shanghai. Presented at the 21st international congress of biometeorology.
- Kántor, N., Kovács, A., Lin, T.-P., 2014. Looking for simple correction functions between the mean radiant temperature from the “standard black globe” and the “six-directional” techniques in Taiwan. *Theor Appl Climatol* 121, 99–111. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1211-2>

- Kántor, N., Kovács, A., Takács, Á., 2016a. Small-scale human-biometeorological impacts of shading by a large tree. *Open Geosciences* 8, 231–245. <https://doi.org/10.1515/geo-2016-0021>
- Kántor, N., Kovács, A., Takács, Á., 2016b. Seasonal differences in the subjective assessment of outdoor thermal conditions and the impact of analysis techniques on the obtained results. *Int J Biometeorol* 60, 1615–1635. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1151-x>
- Kántor, N., Unger, J., 2011. The most problematic variable in the course of human-biometeorological comfort assessment — the mean radiant temperature. *cent.eur.j.geo.* 3, 90–100. <https://doi.org/10.2478/s13533-011-0010-x>
- Karatas, A., El-Rayes, K., 2015. Evaluating the performance of sustainable development in urban neighborhoods based on the feedback of multiple stakeholders. *Sustainable Cities and Society* 14, 374–382. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.05.011>
- Karol, E., Brunner, J., 2009. Tools for Measuring Progress towards Sustainable Neighborhood Environments. *Sustainability* 1, 612–627. <https://doi.org/10.3390/su1030612>
- Kjaersgaard, J.H., Plauborg, F.L., Hansen, S., 2007. Comparison of models for calculating daytime long-wave irradiance using long term data set. *Agricultural and Forest Meteorology* 143, 49–63. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.11.007>
- Klucher, T.M., 1979. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar Energy* 23, 111–114. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(79\)90110-5](https://doi.org/10.1016/0038-092X(79)90110-5)
- Komeily, A., Srinivasan, R.S., 2015. A need for balanced approach to neighborhood sustainability assessments: A critical review and analysis. *Sustainable Cities and Society* 18, 32–43. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.05.004>
- Kruger, E., Bröde, P., Emmanuel, R., Fiala, D., 2012. Predicting outdoor thermal sensation from two field studies in Curitiba, Brazil and Glasgow, UK using the Universal Thermal Climate Index (UTCI), in: WINDSOR CONFERENCE 2012-The Changing Context of Comfort in an Unpredictable World.
- Krüger, E., Rossi, F., Drach, P., 2017. Calibration of the physiological equivalent temperature index for three different climatic regions. *Int J Biometeorol* 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1310-8>
- Kurzrock, F., Roussel, G., Liandrat, O., Boudreault, L.E., Cros, S., 2018. Cloud Base Height Retrieval from a Ground Based Thermal-Infrared All-Sky Imager. *AGU Fall Meeting Abstracts* 11.
- Kyrkou, D., Karthaus, R., 2011. Urban sustainability standards: predetermined checklists or adaptable frameworks? *Procedia Engineering*, 2011 International Conference on Green Buildings and Sustainable Cities 21, 204–211. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2005>

- Lai, A., Maing, M., Ng, E., 2017. Observational studies of mean radiant temperature across different outdoor spaces under shaded conditions in densely built environment. *Building and Environment* 114, 397–409. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.034>
- Lai, D., Guo, D., Hou, Y., Lin, C., Chen, Q., 2014. Studies of outdoor thermal comfort in northern China. *Building and Environment* 77, 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.026>
- Lam, C.K.C., Lau, K.K.-L., 2018. Effect of long-term acclimatization on summer thermal comfort in outdoor spaces: a comparative study between Melbourne and Hong Kong. *Int J Biometeorol* 62, 1311–1324. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1535-1>
- Lenoir, A., 2013. On Comfort in Tropical Climates. The Design and Operation of Net Zero Energy Buildings. Université de La Réunion.
- Leung, C., Ge, H., 2013. An infrared sphere method to measure mean radiant temperature. *ASHRAE Transactions* 119, 1F.
- Li, K., Zhang, Y., Zhao, L., 2016. Outdoor thermal comfort and activities in the urban residential community in a humid subtropical area of China. *Energy and Buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.013>
- Li, P.W., Chan, S.T., 2000. Application of a weather stress index for alerting the public to stressful weather in Hong Kong. *Meteorological Applications* 7, 369–375. <https://doi.org/10.1017/S1350482700001602>
- Liandrat, O., Cros, S., Braun, A., Saint-Antonin, L., Decroix, J., Schmutz, N., 2017. Cloud cover forecast from a ground-based all sky infrared thermal camera, in: *Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXII*. Presented at the Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXII, International Society for Optics and Photonics, p. 104240B. <https://doi.org/10.1117/12.2278636>
- Lin, T.-P., 2009. Thermal perception, adaptation and attendance in a public square in hot and humid regions. *Building and Environment* 44, 2017–2026. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.004>
- Lin, T.-P., Matzarakis, A., 2008. Tourism climate and thermal comfort in Sun Moon Lake, Taiwan. *International Journal of Biometeorology* 52, 281–290.
- 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. *Int J Biometeorol* 52, 697–713. <https://doi.org/10.1007/s00484-008-0162-7>
- Liu, B.Y., Jordan, R.C., 1960. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar energy* 4, 1–19.

- LPBS, Imageen, 2009. PERENE Réunion - PERformances ENergétiques des bâtiments à La Réunion. Règles de conception thermique et énergétique des bâtiments tertiaires et résidentiels adaptées aux zones climatiques de l'île de La Réunion.
- Luederitz, C., Lang, D.J., Von Wehrden, H., 2013. A systematic review of guiding principles for sustainable urban neighborhood development. *Landscape and Urban Planning* 118, 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.06.002>
- Makaremi, N., Salleh, E., Jaafar, M.Z., GhaffarianHoseini, A., 2012. Thermal comfort conditions of shaded outdoor spaces in hot and humid climate of Malaysia. *Building and Environment* 48, 7–14. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.024>
- Manavvi, S., Rajasekar, E., 2020. Estimating Outdoor Mean Radiant Temperature in a Humid Subtropical Climate. *Building and Environment* 106658. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106658>
- Marique, A.-F., Teller, J., 2014. Le référentiel quartiers durables : un nouvel outil d'aménagement durable en Wallonie. Presented at the 2èmes Rencontres de l'Urbanisme Durable.
- Masterson, J., Richardson, F.A., 1979. Humidex. A method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity. Environment Canada, Downsview.
- Matzarakis, A., Mayer, H., Iziomon, M.G., 1999. Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology* 43, 76–84.
- Matzarakis, A., Rutz, F., Mayer, H., 2009. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. *Int J Biometeorol* 54, 131–139. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0261-0>
- Matzarakis, A., Rutz, F., Mayer, H., 2006. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model. *Int J Biometeorol* 51, 323–334. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0061-8>
- McIntyre, D.A., 1980. Indoor Climate. Applied Science.
- Miguet, F., 2000. Paramètres physiques des ambiances architecturales (phdthesis). Université de Nantes.
- Missenard, F., 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, pp. 131–185.
- MLETR, CSTB, 2016. Campagne-test d'évaluation des EcoQuartiers labellisés: Méthodologie d'évaluation.

- Monteiro, L.M., 2013. THERMAL COMFORT INDEX FOR SUSTAINABLE URBAN SPACES. Presented at the Central Europe towards Sustainable Building 2013: Sustainable Building and Refurbishment for Next Generations.
- Naboni, E., Meloni, M., Mackey, C., Kaempf, J., 2019. The Simulation of Mean Radiant Temperature in Outdoor Conditions: A review of Software Tools Capabilities, in: International BPSA Conference.
- Nasir, R.A., Ahmad, S.S., Ahmed, A.Z., 2012. Psychological Adaptation of Outdoor Thermal Comfort in Shaded Green Spaces in Malaysia. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, AicE-Bs 2012 Cairo (Asia Pacific International Conference on Environment-Behaviour Studies), Mercure Le Sphinx Cairo Hotel, Giza, Egypt, 31 October - 2 November 2012 68, 865–878. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.12.273>
- NF EN 15251, 2007. Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique.
- Ng, E., 2012. Towards planning and practical understanding of the need for meteorological and climatic information in the design of high-density cities: A case-based study of Hong Kong. *Int. J. Climatol.* 32, 582–598. <https://doi.org/10.1002/joc.2292>
- Ng, E., 2009. Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities – air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong. *Building and Environment*, The 6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings (IAQVEC 2007), Sendai, Japan, 28-31 October, 2007 44, 1478–1488. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.013>
- Ng, E., Cheng, V., 2012. Urban human thermal comfort in hot and humid Hong Kong. *Energy and Buildings* 55, 51–65. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.025>
- Ng, E., Ren, C., 2015. *The Urban Climatic Map: A Methodology for Sustainable Urban Planning*. Routledge.
- Ng, E., Yuan, C., Chen, L., Ren, C., Fung, J.C.H., 2011. Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: A study in Hong Kong. *Landscape and Urban Planning* 101, 59–74. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.01.004>
- Nicol, F., Humphreys, M., 2010. Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251. *Building and Environment* 45, 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.12.013>
- Nicol, J.F., Humphreys, M.A., 2002. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and buildings* 34, 563–572.

- Nikolopoulou, M., Baker, N., Steemers, K., 2001. Thermal comfort in outdoor urban spaces: Understanding the Human parameter. *ResearchGate* 70, 227–235. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00093-1](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00093-1)
- Nikolopoulou, M., Lykoudis, S., 2006. Thermal comfort in outdoor urban spaces: Analysis across different European countries. *ResearchGate* 41, 1455–1470. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.031>
- Nikolopoulou, M., Steemers, K., 2003. Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings, Special issue on urban research* 35, 95–101. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00084-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00084-1)
- Niu, J., Liu, J., Lee, T., Lin, Z. (John), Mak, C., Tse, K.-T., Tang, B., Kwok, K.C.S., 2015. A new method to assess spatial variations of outdoor thermal comfort: Onsite monitoring results and implications for precinct planning. *Building and Environment, Fifty Year Anniversary for Building and Environment* 91, 263–270. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.017>
- Obi, A.N.I., 2014. The influence of vegetation on microclimate in hot humid tropical environment: a case of enugu urban. *International Journal of Energy and Environmental Research* 2, 1–11.
- OER, 2014. Bilan énergétique de La Réunion.
- OER, 2010. Consommations énergétiques des ménages réunionnais.
- Pantavou, K., Theoharatos, G., Santamouris, M., Asimakopoulos, D., 2013. Outdoor thermal sensation of pedestrians in a Mediterranean climate and a comparison with UTCI. *Building and Environment* 66, 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.02.014>
- Paquin, R.A., 1995. Properties of metals. *Handbook of optics* 2, 35–49.
- Parsons, K., 2006. Heat stress standard ISO 7243 and its global application. *Industrial health* 44, 368–379.
- PD CR 1752, 1999. Ventilation pour batiments. Critere de conception pour environnement d'intérieur - Ventilation for buildings. Design criteria for the indoor environment.
- Penwarden, A.D., 1973. Acceptable wind speeds in towns. *Building Science* 8, 259–267. [https://doi.org/10.1016/0007-3628\(73\)90008-X](https://doi.org/10.1016/0007-3628(73)90008-X)
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., Stewart, R., 1990. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy* 44, 271–289. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90055-H](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90055-H)
- Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R., Menicucci, D., 1987. A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Solar Energy* 39, 221–231. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(87\)80031-2](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(87)80031-2)

- PHILGBC, 2013. BERDE for NEW CONSTRUCTION, Building for Ecologically Responsive Design Excellence, Clustered Residential Development. Green Building Rating Scheme Version 1.1.0. Philippine Green Building Council.
- Pickup, J., De Dear, R., 2000. An outdoor thermal comfort index (OUT_SET*)-part I-the model and its assumptions, in: *Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millenium. Selected Papers from the Conference ICB-ICUC*. pp. 279–283.
- Reindl, D.T., Beckman, W.A., Duffie, J.A., 1990. Evaluation of hourly tilted surface radiation models. *Solar Energy* 45, 9–17. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90061-G](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90061-G)
- Reith, A., Orova, M., 2015. Do green neighbourhood ratings cover sustainability? *Ecological Indicators* 48, 660–672. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.09.005>
- Riera Pérez, M.G., Rey, E., 2013. A multi-criteria approach to compare urban renewal scenarios for an existing neighborhood. Case study in Lausanne (Switzerland). *Building and Environment* 65, 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.03.017>
- Robinson, D., Haldi, F., Leroux, P., Perez, D., Rasheed, A., Wilke, U., 2009. CitySim: Comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning, in: *Proceedings of the Eleventh International IBPSA Conference*. pp. 1083–1090.
- Robinson, D., Stone, A., 2005. A simplified radiosity algorithm for general urban radiation exchange. *Building Services Engineering Research and Technology* 26, 271–284. <https://doi.org/10.1191/0143624405bt133oa>
- Robinson, D., Stone, A., 2004. Solar radiation modelling in the urban context. *Solar Energy* 77, 295–309. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.05.010>
- Roth, M., 2007. Review of urban climate research in (sub)tropical regions. *Int. J. Climatol.* 27, 1859–1873. <https://doi.org/10.1002/joc.1591>
- Rothfus, L.P., 1990. The heat index equation (or, more than you ever wanted to know about heat index). Fort Worth, Texas: National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Office of Meteorology 9023.
- Roudsari, M.S., Pak, M., 2013. Ladybug: A parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design. Presented at the 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France.
- RT2ADOM - Décret n° 2009-424 et arrêtés du 17 avril 2009 et du 11 Janvier 2016 [WWW Document], 2009. URL <http://www.developpement-durable.gouv.fr/La-reglementation-thermique,12890.html> (accessed 2.20.16).

- Rupp, R.F., Vásquez, N.G., Lamberts, R., 2015. A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and Buildings* 105, 178–205. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.047>
- Rutty, M., Scott, D., 2015. Bioclimatic comfort and the thermal perceptions and preferences of beach tourists. *Int J Biometeorol* 59, 37–45. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0820-x>
- Sad de Assis, E., Barros Frota, A., 1999. Urban bioclimatic design strategies for a tropical city. *Atmospheric Environment* 33, 4135–4142. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00155-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00155-7)
- Salata, F., Golasi, I., de Lieto Vollaro, R., de Lieto Vollaro, A., 2016. Outdoor thermal comfort in the Mediterranean area. A transversal study in Rome, Italy. *Building and Environment* 96, 46–61. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.023>
- Saville-Smith, K., 2015. *Grounding the City in Neighbourhoods: Assessing the Sustainability of the Built Environment of Neighbourhoods*.
- Säynäjoki, E., Kyrö, R., Heinonen, J., Junnila, S., 2012. An assessment of the applicability of three international neighbourhood sustainability rating systems to diverse local conditions, with a focus on Nordic case areas. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development* 3, 96–104. <https://doi.org/10.1080/2093761X.2012.696319>
- Sharifi, A., Murayama, A., 2015. Viability of using global standards for neighbourhood sustainability assessment: insights from a comparative case study. *Journal of Environmental Planning and Management* 58, 1–23.
- Sharifi, A., Murayama, A., 2014. Neighborhood sustainability assessment in action: Cross-evaluation of three assessment systems and their cases from the US, the UK, and Japan. *Building and Environment* 72, 243–258. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.006>
- Sharifi, A., Murayama, A., 2013. A critical review of seven selected neighborhood sustainability assessment tools. *Environmental Impact Assessment Review* 38, 73–87. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2012.06.006>
- Sharifi, A., Murayama, A., 2012. The Potential of ‘CASBEE for Urban Development’ for Delivering Sustainable Communities: A Case Study from the ‘Koshigaya Lake Town’ Planning Experience, in: *International Symposium on Urban Planning*. pp. 703–13.
- Sharmin, T., Steemers, K., Matzarakis, A., 2015. Analysis of microclimatic diversity and outdoor thermal comfort perceptions in the tropical megacity Dhaka, Bangladesh. *Building and Environment* 94, Part 2, 734–750. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.10.007>
- Spagnolo, J., De Dear, R., 2003. A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia. *Building and environment* 38, 721–738.

- Staiger, H., Laschewski, G., Grätz, A., 2012. The perceived temperature—a versatile index for the assessment of the human thermal environment. Part A: scientific basics. *International journal of biometeorology* 56, 165–176.
- Steadman, R.G., 1984. A universal scale of apparent temperature. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23, 1674–1687.
- 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* 18, 861–873.
- Steenefeld, G.-J., Klompaker, J.O., Groen, R.J., Holtslag, A.A., 2016. An Urban Climate Assessment and Management tool for combined heat and air quality judgements 1 at neighbourhood scales 2.
- Swinbank, W.C., 1963. Long-wave radiation from clear skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 89, 339–348.
- Taleghani, M., Tenpierik, M., Kurvers, S., van den Dobbelsteen, A., 2013. A review into thermal comfort in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26, 201–215. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.050>
- Tan, C.L., Wong, N.H., Jusuf, S.K., 2013. Outdoor mean radiant temperature estimation in the tropical urban environment. *Building and Environment* 64, 118–129. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.03.012>
- Thani, S.K.S.O., Mohamad, N.H.N., Idilfitri, S., 2012. Modification of Urban Temperature in Hot-Humid Climate Through Landscape Design Approach: A Review. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 68, 439–450. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.12.240>
- Thom, E.C., 1959. The discomfort index. *Weatherwise* 12, 57–61.
- Thorsson, S., Lindberg, F., Eliasson, I., Holmer, B., 2007. Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International Journal of Climatology* 27, 1983–1993.
- Turcu, C., 2012. Local experiences of urban sustainability: Researching Housing Market Renewal interventions in three English neighbourhoods. *Progress in Planning* 78, 101–150. <https://doi.org/10.1016/j.progress.2012.04.002>
- VDI, 1998. Methods for the human-biometeorological assessment of climate and air hygiene for urban and regional planning. Part I: Climate. VDI 3787, Part 2:Beuth, Berlin.
- Vinet, J., 2000. Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs (phdthesis). Université de Nantes.

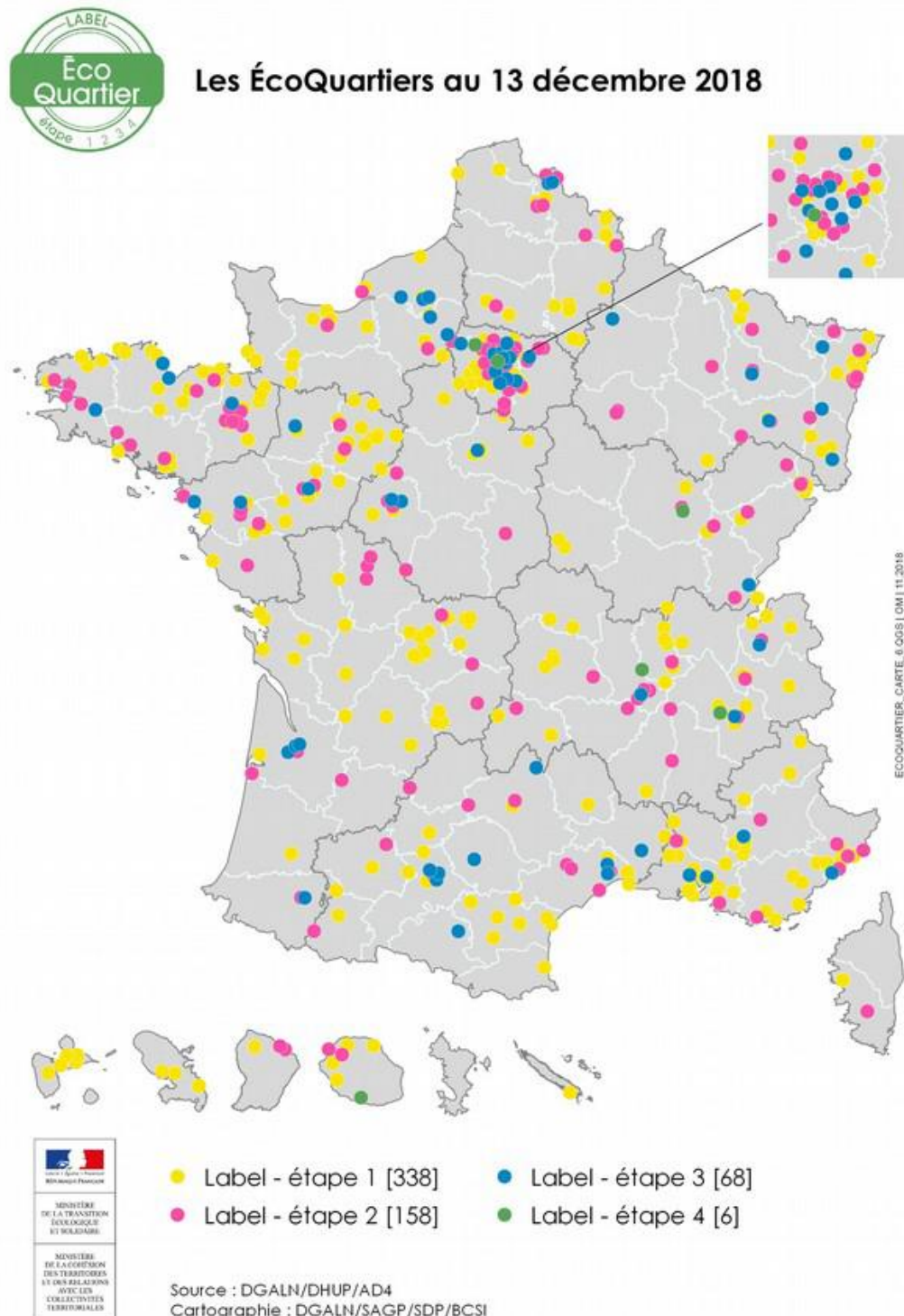
- Vollmer, M., Möllmann, K.-P., 2013. Infrared thermal imaging: Fundamentals, research and applications. <https://doi.org/10.1002/9783527693306>
- Waibel, C., Evins, R., Carmeliet, J., 2017. Efficient time-resolved 3D solar potential modelling. *Solar Energy* 158, 960–976. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.10.054>
- Walther, E., Goestchel, Q., 2018. The P.E.T. comfort index: Questioning the model. *Building and Environment* 137, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.054>
- Yahia, M.W., Johansson, E., 2013. Evaluating the behaviour of different thermal indices by investigating various outdoor urban environments in the hot dry city of Damascus, Syria. *Int J Biometeorol* 57, 615–630. <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0589-8>
- Yang, F., Chen, L., 2016. Developing a thermal atlas for climate-responsive urban design based on empirical modeling and urban morphological analysis. *Energy and Buildings* 111, 120–130. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.047>
- Yang, W., Wong, N.H., Jusuf, S.K., 2013. Thermal comfort in outdoor urban spaces in Singapore. *Building and Environment* 59, 426–435. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.09.008>
- Yang, X., Zhao, L., Bruse, M., Meng, Q., 2012. An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments. *Energy and Buildings* 54, 243–251. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.042>
- Yepez-Salmon, G., 2011. Construction d'un outil d'évaluation environnementale des écoquartiers: vers une méthode systémique de mise en oeuvre de la ville durable. Bordeaux 1.
- Yezioro, A., Shaviv, E., 1994. Shading: A design tool for analyzing mutual shading between buildings. *Solar Energy, Solar Buildings* 52, 27–37. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(94\)90078-G](https://doi.org/10.1016/0038-092X(94)90078-G)
- Zhao, L., Zhou, X., Li, L., He, S., Chen, R., 2016. Study on outdoor thermal comfort on a campus in a subtropical urban area in summer. *Sustainable Cities and Society* 22, 164–170. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.02.009>

Annexes

ANNEXE 1: LOCALISATION DES DIFFERENTS ECOQUARTIERS LABELLISES EN 2018.....	264
ANNEXE 2 : MODELE TYPE DE LA FICHE INDICATEUR SELON LAQUELLE CHAQUE INDICATEUR EST STRUCTURE (MLETR AND CSTB, 2016)	265
ANNEXE 3 : PRINCIPE DE REINSERTION DU QUARTIER DE LA RAVINE BLANCHE DANS LA TRAME URBAINE DU CENTRE-VILLE AVEC MISE EN PLACE D'UNE LIGNE DE TCSP.....	266
ANNEXE 4 : COMPARAISON ENTRE LA TRAME VIAIRE EXISTANTE AU DEPART DU PROJET (A) ET LA TRAME FINALE APRES RENOVATION URBAINE (B)	267
ANNEXE 5 : PRINCIPE DE CLARIFICATION DU PARCELLAIRE ET DES STATUTS FONCIERS.....	268
ANNEXE 6 : OBJECTIFS FIXES PAR LA MAIRIE DE SAINT-PIERRE EN ANNEXE DE LA CONVENTION DE RENOVATION URBAINE DU QUARTIER DE LA RAVINE BLANCHE EN LIEN AVEC LES ENGAGEMENTS EAU, ENERGIE ET DECHETS DE LA CEQ.....	269
ANNEXE 7 : RESULTATS DE LA CEQ OBTENUS POUR L'ENGAGEMENT 18 SUR LA THEMATIQUE DES DECHETS..	275
ANNEXE 8 : RESULTATS DE LA CEQ OBTENUS POUR L'ENGAGEMENT 19 SUR LA THEMATIQUE LIEE A L'EAU....	283
ANNEXE 9 : LISTE DES INDICATEURS PROPOSES PAR LA METHODE NATIONALE D'EVALUATION DES ECOQUARTIERS POUR LES ENGAGEMENT 17, 18 ET 19 ET ETUDE DE LA PERTINENCE ET DE LA FAISABILITE TECHNIQUE DES INDICATEURS POUR LE CAS D'ETUDE DE L'ECOQUARTIER DE LA RAVINE BLANCHE, A SAINT-PIERRE.....	292
ANNEXE 10: QUESTIONNAIRE REALISE POUR L'ETUDE DE CONFORT DANS LES LOGEMENTS.....	296
ANNEXE 11: METHODE DE MESURE DE LA TEMPERATURE MOYENNE DE RAYONNEMENT AVEC LE GLOBE NOIR SELON LA (ISO 7726, 1998)	298
ANNEXE 12: CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE LA CAMERA FLIR B60.....	300
ANNEXE 13 : IMAGES EXTRAITES DE RAYMAN POUR LE CALCUL DU SVF : (A) EN TOITURE ET (B) DANS LE CANYON URBAIN	301
ANNEXE 14: PROCEDURE DE TRANSFORMATION DES COORDONNEES POUR L'IMAGEUR ET CALCUL DE L'ANGLE SOLIDE	302
ANNEXE 15 : QUESTIONNAIRE UTILISE DURANT LES SESSIONS D'ENQUETE EN EXTERIEUR	306
ANNEXE 16: VALEURS UTILISEES POUR L'ACTIVITE METABOLIQUE ET L'ISOLATION PAR LES VETEMENTS.....	308
ANNEXE 17 : STATISTIQUES DETAILLEES DES VARIABLES MICROCLIMATIQUES MESUREES AVEC LA STATION MICROCLIMATIQUE MOBILE SELON LES JOURS D'ENQUETE.....	309
ANNEXE 18 : STATISTIQUES DETAILLEES POUR LA T_{MRT} CALCULEE EN FONCTION DES DIFFERENTES FORMULES UTILISEES ET SELON LES JOURS D'ENQUETE.....	310

Annexe 1: Localisation des différents EcoQuartiers labellisés en 2018

(Source : « Recueil des projets labellisés EcoQuartier de 2013 à 2018 », site: <http://www.ecoquartiers.logement.gouv.fr/>)



Annexe 2 : Modèle type de la fiche indicateur selon laquelle chaque indicateur est structuré (MLETR and CSTB, 2016)

	INTITULE [...]	
	TYPE	Indication s'il s'agit d'un indicateur «Recommandé» ou « Optionnel».
DESCRIPTIF	DESCRIPTION	- Indication des caractéristiques principales (valeurs primaires) et leur détail (valeurs secondaires) de l'EQ qualifiées par l'indicateur. - Définitions (si besoin) précisant les enjeux couverts par l'indicateur, les termes utilisés... - Intérêt pour le suivi des performances de l'EQ : acteur concerné (Etat, collectivité, gestionnaires, etc.) ; services de la collectivité à impliquer dans l'évaluation et susceptibles d'être intéressées aux résultats ; actions correctives possibles.
	PERIMETRE DE CALCUL	- Identification des échelles, des composantes de l'EQ concernées (« périmètre géographique », par exemple : espaces publics, bâtiments) ainsi que les thèmes pris en compte (« périmètre thématique », par exemple : précisions sur le type de compostage ou les catégories de déchets à prendre en compte) - Identification du périmètre de calcul recommandé et, le cas échéant d'un périmètre optionnel
	MODALITES D'ACQUISITION	- Identification des « degrés de flexibilité » / « marges de contextualisation » admis dans l'acquisition des données-sources par échantillonnage et par estimation. Précisions sur les informations pour lesquelles le recours à une acquisition in situ (mesure ou enquête) est recommandé. - Dès lors qu'aucune acquisition de données n'est requise pour le calcul de l'indicateur, indication qu'il s'agit d'un indicateur dont la valeur peut être déduite de celle d'autres indicateurs précédemment calculés.
ACQUISITION	SOURCES	- Identification (nominative ou générique) d'organismes producteurs et détenteurs (ex : données ADEME...ou exploitants des équipements, service VRD, etc.) - Type de documents dans lesquels les informations peuvent être présentes (ex Chiffres clés) - Autres sources : bases de données, observatoires (ex : Observatoire des bâtiments BBC)
	GRANDEURS ET CALCUL	- Grandeurs à partir desquelles l'indicateur est à calculer. - Indications sur le mode de calcul (formule à utiliser). - Unités de mesure à utiliser, exprimées en valeur absolue (par exemple : tonnes/an) et relative mobilisant des unités fonctionnelles appropriées (par exemple : kg/eq. hab /an).
	VALEURS CIBLE ET DE REFERENCE	Suggestion de valeurs nationales (moyennes, valeurs réglementaires) pouvant être utilisés pour formuler des valeurs cible et de références pour l'EQ
INTERPRETATION	FACTEURS EXPLICATIFS	- Identification d'exemples (liste non exhaustive) de facteurs à mobiliser dans l'argumentaire explicatif des résultats obtenus (valeurs calculées de l'indicateur pour l'EQ). - Ces facteurs sont organisés selon les catégories suivantes : contexte territorial ; moyens/conception et conduite du projet ; usages et pratiques ; modes de gestion et d'exploitation.
	FACTEURS DE QUALIFICATION	- Identification d'exemples (liste non exhaustive) de facteurs qui peuvent être mobilisés pour qualifier (bonus) les résultats obtenus (valeurs calculées de l'indicateur pour l'EQ). - Ces facteurs n'aident donc pas à expliquer directement les résultats mais apportent une information complémentaire permettant de rendre compte des efforts et des innovations mises en place.

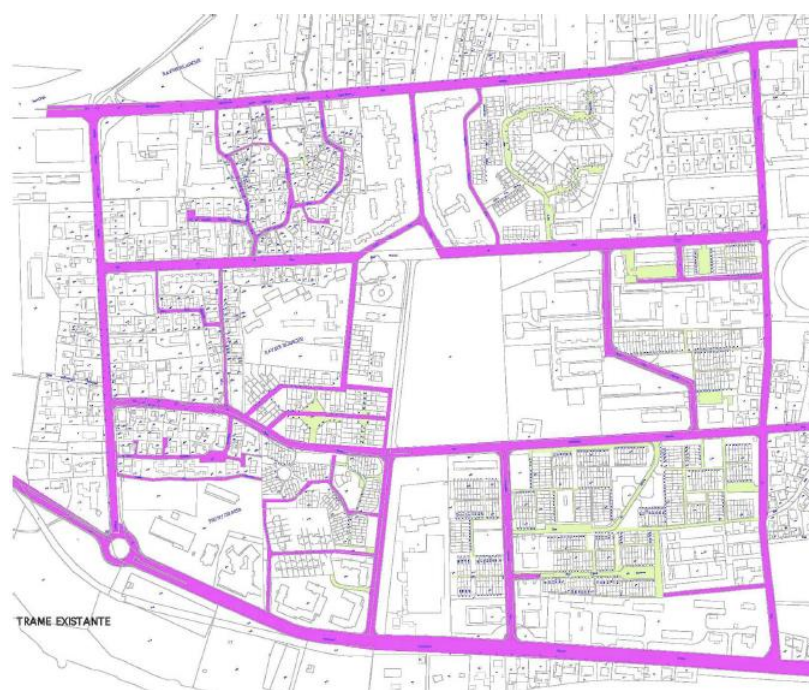
Annexe 3 : Principe de réinsertion du quartier de la Ravine Blanche dans la trame urbaine du centre-ville avec mise en place d'une ligne de TCSP

(Source : Mairie de Saint-Pierre)

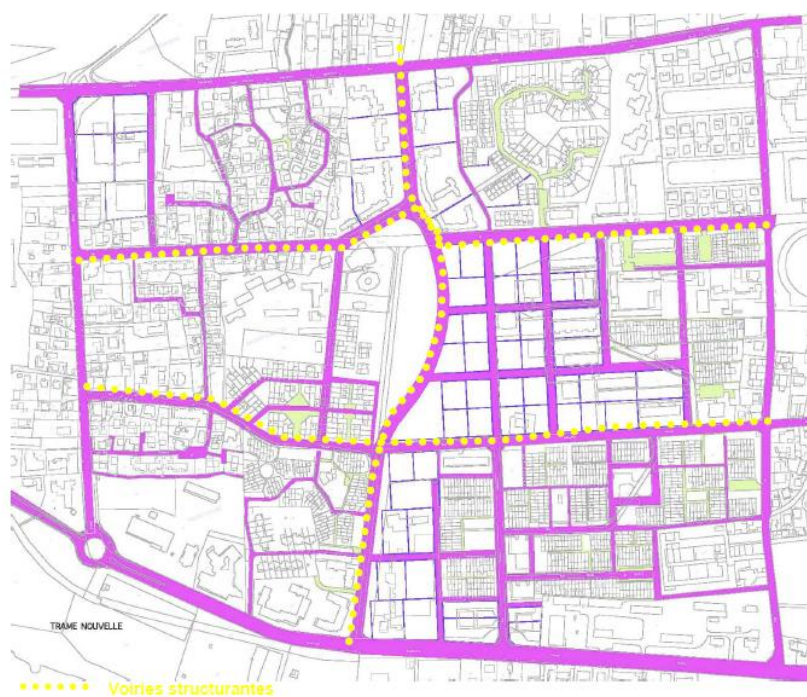


Annexe 4 : Comparaison entre la trame viaire existante au départ du projet (a) et la trame finale après rénovation urbaine (b)

(Source : Mairie de Saint-Pierre)



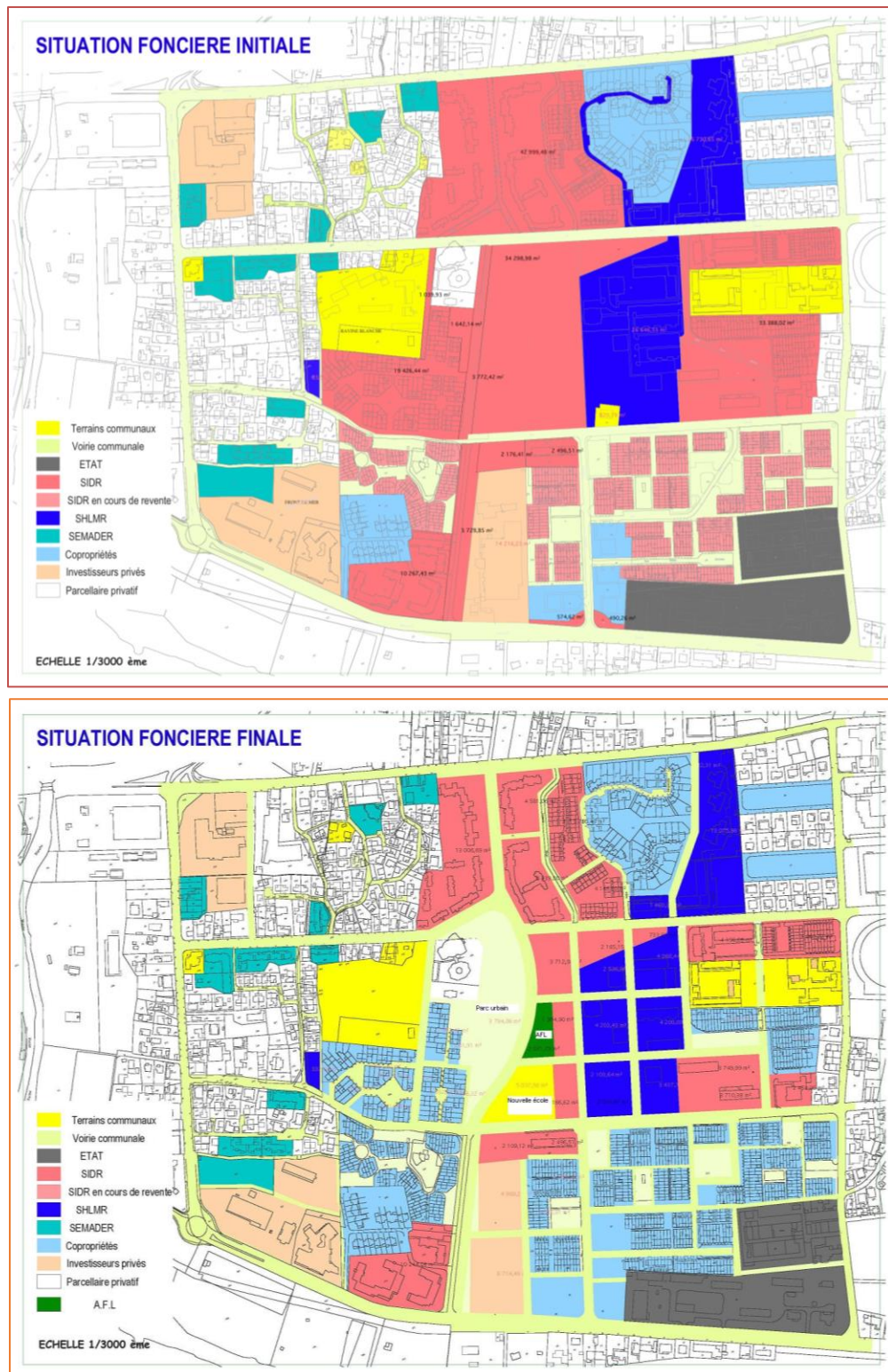
(a) Trame viaire avant rénovation urbaine



(b) Trame viaire après rénovation urbaine

Annexe 5 : Principe de clarification du parcellaire et des statuts fonciers

(Source : Mairie de Saint-Pierre)



Annexe 6 : Objectifs fixés par la Mairie de Saint-Pierre en annexe de la Convention de rénovation urbaine du quartier de la Ravine Blanche en lien avec les Engagements Eau, Energie et Déchets de la CEQ

I. Environnement et énergies

A) La valorisation et le traitement des déchets

Le Projet d'Aménagement et de Développement Durable (PADD) du PLU de Saint- Pierre préconise en matière de déchets « la mise en place d'une gestion et un traitement durable déchets et des autres rejets ».

Pour cela, il recommande de renforcer le réseau d'assainissement des eaux usées, de s'appuyer sur la compétence de la CIVIS pour développer un traitement durable des déchets (tri sélectif, incinération.), et de prévoir l'implantation de déchetteries pour favoriser les apports volontaires.

Pour traiter et valoriser des déchets, il est indispensable de les trier au préalable. Il existe un centre de tri à Saint-Pierre. En attendant la mise en place de mesures importantes de valorisation énergétique ou organique et la structuration des filières de recyclage, l'essentiel des déchets ménagers et assimilés (89 %) est actuellement stocké en centre de stockage des déchets ultimes (CSDU) ou composté.

Actuellement, il n'existe pas de plan intercommunal de traitement et de collecte des déchets concernant la commune de Saint-Pierre. Seule une carte de localisation des bornes à verre existe.

Objectifs poursuivis sur Ravine Blanche :

Pour les déchets ménagers :

- Un emplacement pour le tri des déchets dans la cuisine ou une pièce annexe,
- Un lieu de stockage des poubelles à l'extérieur,
- Une possibilité de valoriser dans le jardin les déchets végétaux en compost.

Pour les déchets de chantier :

- Réduction des nuisances sonores,
- Limitation des volumes et de la quantité des déchets,
- Réduction de la pollution des sols, des eaux et de l'air,
- Sécurisation des chantiers,
- Organiser la récupération et le tri des déchets solides et liquides sur le chantier

- Traiter et valoriser les déchets,
- Assurer une bonne communication de chantier.

Pour la valorisation des déchets sur Ravine Blanche, il est préconisé l'installation de bornes à verre et d'une case tri-tri, avec un accueil permanent qui récupérerait les emballages (métallique et cartons), les verres et plastiques sur le parking d'une grande surface comme Leader Price déjà implanté sur le site.

B) L'intégration des énergies renouvelables

Depuis plusieurs années, le développement des énergies renouvelables a permis de limiter l'augmentation de la consommation énergétique de l'île. L'Etat et notamment les collectivités locales (région principalement) ont favorisé le développement des technologies renouvelables en accordant des aides aux usagers. La loi d'orientation pour l'énergie a permis l'application d'un crédit d'impôt aussi bien pour les logements individuels que pour les logements sociaux.

1. Le Chauffe-Eau Solaire (CES)

Objectifs et préconisations pour le programme ANRU de Ravine Blanche

Pour l'existant : 50 % de l'eau chaude doit provenir du solaire (si capacité suffisante des toitures) pour les maisons individuelles et 75 % pour le collectif.

Pour les constructions neuves : 80 % de l'eau chaude doit provenir du solaire par bâtiment pour le collectif et l'individuel.

Dans le cadre du projet de rénovation du quartier de ravine Blanche, 846 logements vont bénéficier d'une installation de chauffe-eau solaire dans le cadre des réhabilitations.

2. Le photovoltaïque

Fortement ensoleillé, la Ravine Blanche est un site intéressant pour la pose de panneaux photovoltaïques.

Un projet est en cours de réalisation sur l'école Marie Curie. Le projet de rénovation urbaine offre l'occasion de développer des installations du même type, notamment sur les équipements publics qui seront réhabilités ou construits.

Objectifs :

Pour les constructions neuves : 100 % des bâtiments publics doivent avoir une installation photovoltaïque d'un minimum d'1 kW_c pour 10 m².

Pour les logements individuels : réaliser une étude de potentiel de production d'électricité photovoltaïque.

Pour les réhabilitations des ensembles collectifs : Réalisation d'une étude de potentiel et rendre obligatoire un diagnostic de performance énergétique.

C) La maîtrise des pollutions des eaux

1. La gestion des eaux pluviales

L'eau de pluie peut être stockée et trouver des usages dans un réseau secondaire et isolé du circuit de distribution de l'eau potable, notamment pour l'arrosage, le lavage...

Objectifs

Pour les logements neufs :

- Exiger que les robinets soient fermés les soirs (aucune fuite) lors des chantiers,
- Installer au total 100 % de mitigeurs thermostatiques,
- Installer au total 100 % de chasses d'eau à double commande,
- Installer une robinetterie à débit économe,
- Installer des gouttières à stockage d'eau de pluie pour l'arrosage des parties communes dans le collectif.

Pour l'existant :

- Installer au total 75 % de mitigeurs,
- Installer des gouttières à stockage d'eau de pluie pour l'individuel,
- Installer des chasses d'eau à double commande,

- Installer une robinetterie économe pour le collectif.

Pour les réhabilitations :

- Installer des chasses d'eau double commande,
- Installer des mitigeurs.

2. La gestion des eaux de ruissellement

Préalablement à chaque projet d'aménagement, il est devenu indispensable, selon les termes de la loi sur l'eau, d'établir un diagnostic préalable relatif à l'hydrologie naturelle, d'évaluer les impacts des aménagements susceptibles d'en modifier le fonctionnement et de mettre en œuvre les mesures compensatoires qui pourraient en atténuer les conséquences.

1. Les systèmes absorbants et drainants

Les systèmes absorbants limitent le ruissellement de surface, écrêtent les pics de ruissellement d'un évènement pluvieux et favorisent le rechargement de la nappe phréatique.

2. L'infiltration à la parcelle

A l'échelle du projet, lors de la création de nouvelles voies notamment, la maîtrise du ruissellement pluvial doit prendre en compte la nécessité de collecter et de traiter à la fois :

- Le ruissellement pluvial produit par l'ensemble des surfaces imperméabilisées du domaine public (Voirie, parking, trottoirs...),
- Les eaux ruisselées par les toitures ou autres surfaces imperméabilisées qui n'auraient pas pu être traitées à l'échelon de la parcelle.

Objectifs :

- Limiter les surfaces imperméabilisées et le ruissellement des eaux de pluie en favorisant leur infiltration (chaussées drainantes, fossés d'infiltration, etc.),
- Evacuer les eaux de ruissellement en créant des pentes et dénivelés entre 0,5 et 0,6 %,

- Choisir un revêtement non glissant,
- Assurer la maintenance des écoulements (revêtements poreux) en ne laissant pas se boucher les grilles.

3. La collecte et le traitement des eaux usées (EU)

La ville de Saint Pierre et le quartier de ravine Blanche sont couverts par un système d'assainissement collectif relié à plusieurs stations d'épuration. Ces stations sont toutefois déjà en limite de capacité et les réseaux sont parfois vétustes. Sur Ravine Blanche le réseau EU est mal en point et il se produit parfois des rejets accidentels d'origine industrielle.

Objectifs :

- Réfection des réseaux EU sur le quartier lors de la restructuration des voies existantes et lors de l'aménagements des espaces extérieurs des opérations Front de Mer I et II,
- Prévention des rejets industriels, artisanaux ou commerciaux dans le réseau existant,
- Réduction des boues d'épuration.

D) L'aménagement des espaces verts

Lorsque les caractéristiques de la construction et de la parcelle le permettent, il est important sur les plans urbanistiques, de favoriser la part du végétal dans les opérations. Ceci, avec pour objectif de favoriser des coulées vertes utiles à l'environnement social, la climatologie, la lutte contre le bruit ou encore la conservation de la biodiversité.

Objectifs

- Imposer le végétal dans l'aménagement urbain, notamment pour les parkings (1 arbre pour 10 places au minimum).
- Utiliser l'eau de pluie pour l'arrosage des espaces verts.
- Utilisation d'espèces adaptées au climat sec du secteur.
- Veiller à une bonne évacuation des eaux.
- Récupération et utilisation des composts.

II. Construction et habitat

Des outils à prendre en compte :

1. Le label Ecodom

Le label ECODOM est un label expérimental qui a accompagné le lancement de la réglementation thermique à La Réunion.

2. L'outil PERENE

L'outil PERENE (PERformance ENergétique des bâtiments à La Réunion) est une suite du label ECODOM et reprend quelques axes de la démarche HQE à la Réunion.

3. La CASA DD

La CASA DD (case adaptée au développement durable) est un concept élaboré pour que l'habitat réunionnais, notamment l'habitat individuel, s'adapte au développement durable.

Objectifs

- Utiliser PERENE systématiquement : 100 % des bâtiments publics neufs doivent être HQE ou au minimum PERENE.
- Pour l'individuel : 10 % doit être CASA DD. Pour le collectif, 100 % doit être PERENE.
- Pour les réhabilitations : Prendre en compte les préconisations de PERENE.

Annexe 7 : Résultats de la CEQ obtenus pour l'Engagement 18 sur la thématique des déchets

I. Critères d'évaluation et indicateurs

L'engagement 18 est décomposé en trois critères d'évaluation et 10 indicateurs comme le montre le Tableau A.7.1 ci-dessous. La majorité des indicateurs sont optionnels et seulement trois d'entre eux sont recommandés. La majorité des indicateurs nécessitent des informations dites quantitatives, à l'exception des deux derniers indicateurs 18.9 et 18.10 qui sont également des indicateurs recommandés.

Tableau A.7.1: Liste des critères d'évaluation et des indicateurs de l'Engagement 18 sur les déchets (MLETR and CSTB, 2016)

Engagement 18 : Limiter la production des déchets, développer et consolider des filières de valorisation et de recyclage dans une logique d'économie circulaire		
Critère d'évaluation	Indicateurs	Recommandé (R)/ Optionnel (O)
Prévention des déchets	18.1 Potentiel de prévention	O
	18.2 Biodéchets gérés en proximité	R
	18.3 Déchets réutilisés	O
	18.4 Matériaux réemployés	O
Consolidation et développement des filières de valorisation	18.5 Déchets collectés	O
	18.6 Part de déchets triés à la source	O
	18.7 Qualité du tri	O
	18.8 Gisement pour de nouvelles filières de valorisation	O
Incidence de la gestion des déchets sur la qualité urbaine et le fonctionnement de l'EQ	18.9 Qualité urbaine, paysagère et conditions d'usage des équipements de stockage et de pré-collecte des déchets	R
	18.10 Satisfaction et pratiques liées aux déchets	R

II. Application à l'EQ de la Ravine Blanche

a. Critère « Prévention des déchets »

L'indicateur 18.1 est optionnel et il n'a pas été pris en compte dans l'évaluation de l'EQ puisque ce dernier nécessite une campagne in situ (échantillonnage) suivant la méthode MODECOM™ de l'ADEME. La ville de Saint-Pierre et son EQ n'ont pas fait l'objet d'une telle campagne. Cet indicateur ne présentait pas un intérêt assez fort pour justifier le déploiement d'une telle campagne.

L'indicateur recommandé 18.2 représente un intérêt pour la collectivité puisqu'il permet d'identifier le gisement de déchets organiques, ainsi que le potentiel lié aux biodéchets dans le cadre d'actions envisagées en termes de compostage et d'utilisation du compost dans des projets de jardins collectifs par exemple. Il permet également d'évaluer la motivation des habitants et d'obtenir des valeurs de référence à l'échelle d'un écoquartier, afin d'améliorer les pratiques et de les exporter dans d'autres quartiers. Au moment de l'évaluation, aucun compostage collectif en pied d'immeuble ou en établissement n'est présent sur l'EQ. De plus, aucune donnée n'est disponible sur le nombre de composteurs individuels existants dans l'EQ et aucun suivi n'a été réalisé par la CIVIS sur les composteurs qui ont été distribués (lieu/nombre/bonne utilisation/ etc.). Pour répondre à cet indicateur, il aurait donc fallu réaliser une enquête de terrain auprès des habitants ou avoir recours à des estimations beaucoup moins précises. Ainsi, même si cet indicateur présente un intérêt, l'accès à la donnée représente une contrainte lorsque celle-ci n'est pas anticipée en amont du projet.

L'indicateur 18.3 représentait un intérêt pour l'EQ puisque deux bornes de tri des TLC (Textiles, Linge de maison et Chaussures) usagés sont installés sur le périmètre de l'EQ et gérés par une association. Cependant, aucune donnée n'est disponible sur le tonnage individuel des bornes puisque les camions ne sont pas équipés de la « pesée embarquée ».

Enfin, l'indicateur 18.4 n'est pas pertinent pour l'EQ puisque aucun réemploi n'est effectué sur le périmètre étudié au moment de l'évaluation.

b. Critère « Consolidation et développement des filières de valorisation »

Les quatre indicateurs de ce critère d'évaluation sont des indicateurs optionnels et quantitatifs :

- Indicateur 18.5 : quantité totale de déchets collectés dans le périmètre de l'EQ ;
- Indicateur 18.6 : part de déchets collectés séparément dans le périmètre de l'EQ (par le biais de la collecte porte-à-porte, des points d'apport volontaire) par rapport à la quantité totale de déchets collectés ;

- Indicateur 18.7 : quantité moyenne et part des déchets recyclables contenue dans la poubelle de collecte séparée ;
- Indicateur 18.8 : gisement (quantité et la qualité) de déchets en vue de l'introduction de nouvelles filières de valorisation.

Ces indicateurs reposent sur une réflexion souvent plus large que le périmètre seul d'un quartier, nécessitant une campagne d'échantillonnage souvent lourde à réaliser (méthode MODECOM™ de l'ADEME). De plus, les circuits de collecte sont réfléchis à une échelle plus grande que celle du périmètre de l'EQ seul comme le montre la Figure A.7.1 ci-dessous.

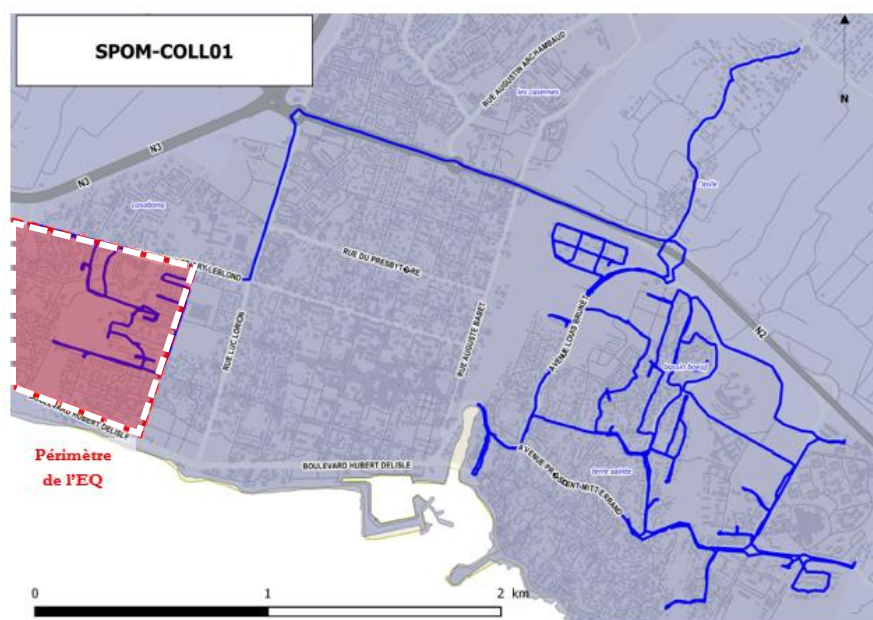


Figure A.7.1 : Exemple de circuit de collecte des OMR réalisé sur le secteur de Saint-Pierre comprenant le périmètre de l'EQ de Ravine Blanche

Un des principaux freins à leur calcul est donc la difficulté d'accès à la donnée. D'une manière plus générale, ces indicateurs ne sont pertinents que si une tarification incitative ou une sensibilisation spécifique au tri a été mise en place dans le cadre du projet d'EQ, ce qui n'est pas le cas de l'EQ de la Ravine Blanche. Ces indicateurs n'ont donc pas été pris en compte dans l'évaluation.

Cependant, une collecte spécifique a été mise en place, après négociation avec le prestataire en place, pour le tonnage des Ordures Ménagères (OMR) et des recyclables (RC) sur une collecte se limitant au périmètre de Ravine Blanche. Celle-ci a été organisée pour une seule collecte, sur un seul jour, à un moment 'T' de l'année. Cette méthode ne suit pas la méthode d'échantillonnage préconisée par la méthode d'évaluation du CSTB et donne une valeur plutôt échantillonnée que réelle et non représentative du tonnage des poubelles sur une année. Il aurait fallu réaliser cette collecte plusieurs fois à différents moments de l'année afin de prendre en compte la saisonnalité (notamment pour les

déchets verts). Cela a néanmoins permis de se rendre compte de la difficulté à mettre en place une telle collecte sur un périmètre physique bien différent de la logique globale des circuits de collecte.

c. Critère « Incidence de la gestion des déchets sur la qualité urbaine et le fonctionnement de l'EQ »

La question des déchets a été réfléchiée en amont du projet de l'ÉcoQuartier et ce n'est pas un paramètre qui a été intégré de manière isolée. En effet, les différentes parties prenantes se sont concertées pour obtenir un dispositif commun de pré-collecte autant sur l'espace public qu'au sein de résidences collectives neuves ou réhabilitées des bailleurs sociaux. Ainsi, dans le cadre du programme de rénovation urbaine du quartier de la Ravine Blanche, différents équipements de pré-collecte ont été installés que ce soit en pied d'immeubles collectifs (cf Figure A.7.2.a) ou sur le domaine public sous la forme de bornes (bornes à verre, à TLC, etc.) (voir Figure A.7.2.b).



(a)



(b)

Figure A.7.2: Exemple de dispositifs de pré-collecte installés dans l'EQ de la Ravine Blanche : (a) Système de trappes carrées couvertes derrière lesquelles se trouve un bac à roulettes (couleur verte pour les OMR et jaune pour les RC) installé au pied des immeubles Bons Enfants ; (b) Borne à TLC déployée par l'association TiTang Recup.

De plus, un principe innovant de placettes, caractérisé comme des points d'apport volontaire (PAV) pour les déchets verts (DV) et les encombrants (ENC) a été adopté dans le cadre de la rénovation urbaine. Elles sont au nombre de 16 et sont réparties dans le périmètre de l'EQ (cf Figure A.7.3).



Figure A.7.3: Point d'apport volontaire (PAV) mis en place dans le cadre du programme de rénovation du quartier de la Ravine Blanche. Le système se présente sous forme de placettes en béton avec une partie délimitée pour les déchets verts (DV) à gauche et une partie pour les encombrants (ENC) à droite.

Dans ce contexte précis, l'évaluation de l'Engagement « Déchets » a donc principalement portée sur les conditions d'usage et la satisfaction des habitants en termes de gestion des déchets et des équipements de pré-collecte sur le périmètre compris dans le dernier critère d'évaluation.

Les indicateurs 18.9 et 18.10 regroupent des appréciations qualitatives formulées sous forme de questions évaluatives.

Les principales notions étudiées ont été les suivantes :

- La propreté urbaine,
- L'impact des équipements de pré-collecte et leur intégration paysagère,
- La communication,
- Les pratiques relatives aux déchets,
- Les systèmes de collecte,
- La qualité de la collecte.

Afin de répondre à ces questions, différentes méthodologies et différents outils d'évaluation ont été développés tels que :

- Des repérages visuels et des prises d'informations (bailleurs, usagers, intercommunalité, etc.) ;
- Une évaluation visuelle du bon usage des équipements et de leur taux de remplissage ;
- La réalisation de questionnaires auprès des usagers (100 enquêtes habitants) ;
- Un outil de cartographie SIG pour la localisation des équipements et l'identification des zones desservies (cf Figure A.7.4) ;
- Une grille d'évaluation des Points d'Apport Volontaire (PAV) (cf Tableau A.7.2) réalisée par un étudiant en Licence 3 sur 1 mois avec relevés photographiques.

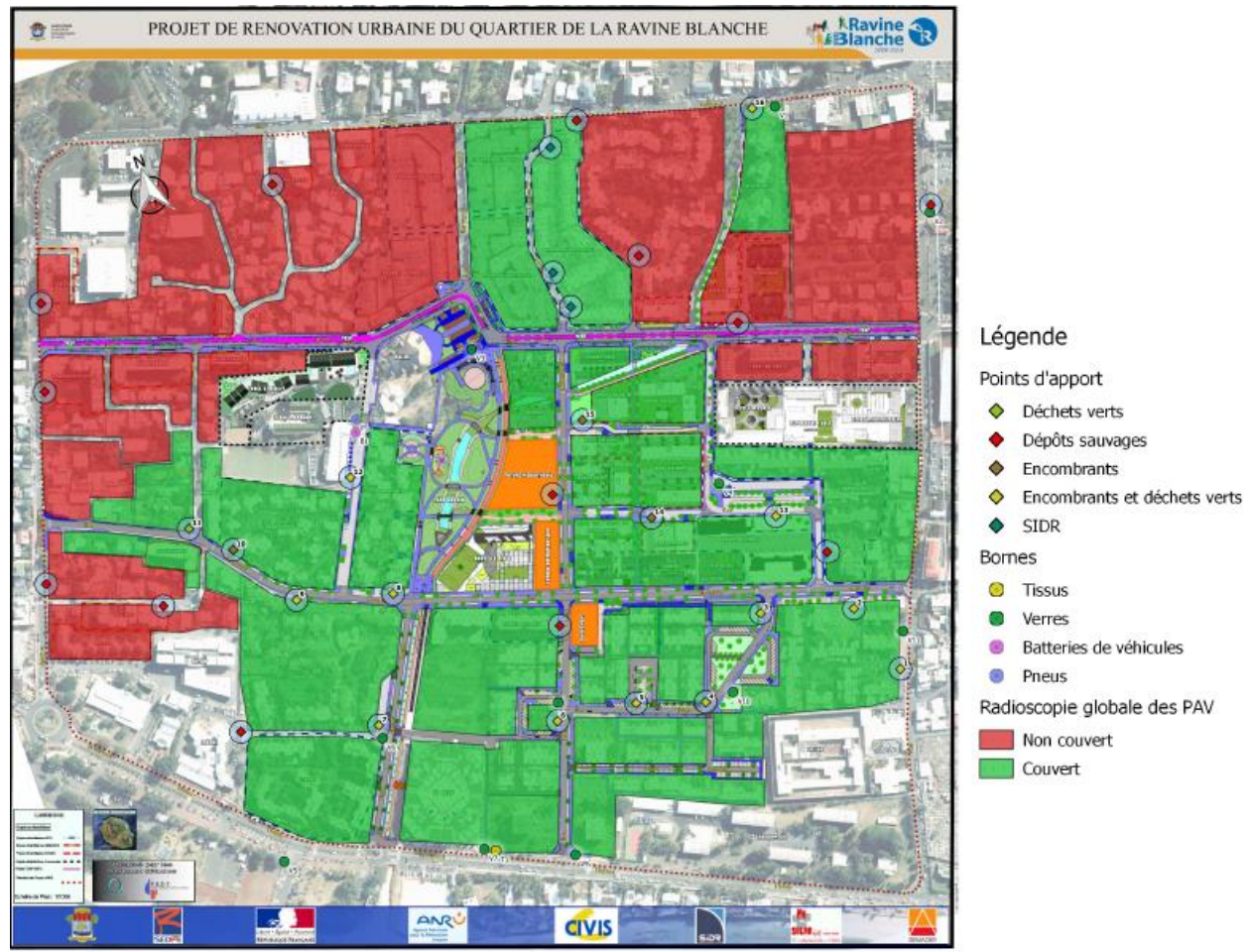


Figure A.7.4: Cartographie des zones de l'EQ non desservies par des points d'apport volontaire (PAV) réalisée sur outil SIG (Source : Kévin Fimourdin - Rapport de Stage de L3 SBE)

Il est ressorti de cette étude que l'EQ présente dans l'ensemble un taux satisfaisant et une qualité appréciée par les usagers du quartier des équipements de pré-collecte des déchets. Les PAV mis en place ont permis de créer des points de regroupement aménagés avec une signalétique claire et ainsi limiter la formation de dépôts sauvages. Ces derniers sont régulièrement utilisés par les habitants du quartier. Néanmoins, cette évaluation a permis de mettre en évidence les faiblesses des systèmes utilisés comme par exemple le manque de clarté dans les consignes de tri en pied d'immeuble où les déchets se retrouvent bien souvent mélangés. De plus, le tri n'est pas toujours respecté au niveau des PAV et le mélange des DV et ENC, ou la présence de déchets non pris en charge rend la tâche plus difficile au collecteur. Certains PAV sont déjà dégradés à cause des grappins des camions et certaines signalétiques ont été arrachées. La cartographie de la localisation a également montré que la partie haute du quartier se retrouve relativement dépourvue d'équipements.

Enfin, le système de PAV développé pour cet EQ n'existant pas aux alentours, il a été constaté que les PAV sont également utilisées par des personnes ne vivant pas dans le quartier, expliquant un taux de remplissage très important.

Tableau A.7.2: Grille d'évaluation créée pour l'analyse des PAV sur l'EQ de la Ravine Blanche (Source : Kévin Fimourdin - Rapport de Stage de L3 SBE)

Point d'apport volontaire		Rue de la Cayenne	Le Carré	Rue du Havre 1
Numéro du PAV		1	2	3
Type de PAV	2			
	ENC			
	DV			
Qualité du tri et du dépôt - Mélange	ENC			
	DV			
Qualité du tri et du dépôt - Efficience	ENC			
	DV			
Fréquence de la collecte par mois	ENC			
	DV			
Remplissage Volume estimé	ENC			
	DV			
Propreté sur 10 Aspect visuel	ENC			
	DV			
Types de déchets rencontrés				
Qualité de la collecte				

III. Synthèse

Les principaux retours d'expérience sur les indicateurs relatifs à la thématique déchets sont listés dans le Tableau A.7.3 suivant :

Tableau A.7.3: Points forts et points faibles identifiés lors de l'application de la méthode d'évaluation dans le contexte de l'EQ de la Ravine Blanche

 Points forts / Avantages	 Points faibles / Inconvénients
▪ Etude qualitative (Indicateurs 18.9 et 18.10) plus facile à reproduire et à limiter au périmètre d'étude du quartier pour cet Engagement. ▪ Des outils variés, accessibles à tous et transposables sur d'autres cas d'étude ont pu être développés. ▪ Ressources rapidement et facilement mobilisables : 2 étudiants en stage de Licence 3 (Parcours Génie Urbain/ Génie Civil).	▪ De nombreux acteurs à identifier et à mobiliser en amont du projet. ▪ Difficulté d'accès à la donnée pour de nombreux indicateurs quantitatifs : circuits de collecte non définis à l'échelle quartier mais réfléchis à l'échelle de la communauté d'agglomération ; campagne in situ (échantillonnage) suivant la méthode MODECOM™ de l'ADEME lourde à appliquer à l'échelle d'un quartier. ▪ Collectes spécifiques difficilement reproductibles, (changement de marché / budget alloué).

La collectivité a essayé de pousser l'évaluation sur cet engagement puisque la thématique des déchets a été traitée dans le projet de rénovation urbaine notamment afin de réduire les dépôts sauvages et d'améliorer les pratiques liées aux déchets. De nombreux dysfonctionnements avaient été constatés sur le quartier en matière de gestion des déchets et d'équipements, et des recommandations issues de l'atelier urbain participatif de 2009 avaient été préconisées. C'est pour cela que certains indicateurs « optionnels » ont été pris en compte malgré les difficultés d'accès à la donnée. Le principal problème étant que certaines méthodes utilisées ne seront peut-être pas reproductibles dans les années à venir, notamment pour la collecte spécifique limitée au périmètre seul de l'EQ. Il est très difficile d'avoir des données à l'échelle d'un quartier à La Réunion. Les circuits de collecte étant réalisés et réfléchis en termes d'effectif à l'échelle de l'intercommunalité, ces derniers combinent plusieurs quartiers. De plus, aucun des camions ne possédait de système de « pesée embarquée » au moment de l'étude.

Annexe 8 : Résultats de la CEQ obtenus pour l'Engagement 19 sur la thématique liée à l'eau

I. Critères d'évaluation et indicateurs

L'engagement 19 relatif à l'eau est décomposé en 4 critères d'évaluation et 9 indicateurs comme le montre le Tableau A.8. 1 ci-dessous. La majorité des indicateurs sont cette fois-ci recommandés alors que seulement deux d'entre eux sont optionnels et la plus grande partie d'entre eux nécessitent des informations dites quantitatives, à l'exception des trois premiers indicateurs 19.1, 19.2 et 19.3.

Tableau A.8. 1: Liste des critères d'évaluation et des indicateurs de l'Engagement 19 relatif à l'Eau.

Engagement 19 : Préserver la ressource en eau et en assurer une gestion qualitative et économe		
Critère d'évaluation	Indicateurs	Recommandé (R)/ Optionnel (O)
Intégration de l'eau dans l'aménagement et le fonctionnement	19.1 Qualité urbaine, paysagère et conditions d'usage des espaces liés à l'eau	R
	19.2 Satisfaction et pratiques des espaces liés à l'eau	R
Maîtrise des pollutions liées au ruissellement	19.3 Efficacité des équipements de dépollution	O
Sobriété et valorisation de la ressource en eau	19.4 Consommation en eau des bâtiments	R
	19.5 Consommation en eau potable pour les espaces publics	R
	19.6 Taux d'utilisation de sources alternatives à l'eau potable	R
	19.7 Part des surfaces construites valorisant les eaux usées pour la production d'énergie	O
Maîtrise de l'imperméabilisation, des débits d'eau pluviale et du ruissellement	19.8 Taux d'imperméabilisation	R
	19.9 Part de l'EQ ayant une gestion des eaux pluviales à la parcelle	R

Cette thématique est celle qui a été traitée de manière plus approfondie tant au niveau du programme de rénovation urbaine que de l'évaluation au vu du contexte du quartier. En effet, celui-ci est situé à proximité du lagon et traversé par un canal naturel. Le quartier est également situé en zone inondable. Le projet de rénovation urbaine ayant un impact direct sur le milieu aquatique, un dossier « Loi sur l'eau » a dû être soumis.

II. Application à l'EQ de la Ravine Blanche

a. Critère « Intégration de l'eau dans l'aménagement et le fonctionnement »

Ce critère est composé de deux indicateurs dits « qualitatifs » appréciés au travers de questions évaluatives. Le premier indicateur vise à qualifier « l'incidence des espaces liés à l'eau sur la qualité urbaine et paysagère et la contribution à la trame verte et bleue du territoire ». On cherche ici à savoir comment les espaces liés à l'eau s'articulent avec le territoire dans lequel l'EcoQuartier s'inscrit ou encore si leur aménagement permet une mise en valeur visuelle et leur permet d'être perçus par les usagers comme des espaces naturels ou semi-naturels. Le second indicateur permet d'apprécier les représentations, l'appropriation, les pratiques fonctionnelles ou sociales ou encore la satisfaction des habitants et usagers de l'EQ.

Afin d'évaluer ces deux indicateurs, différentes modalités d'acquisition ont été utilisées telles que des relevés photographiques, des visites de site, la mise en place de questionnaire, les documents de la maîtrise d'œuvre pour le parc urbain ou encore la carte trame verte et bleue.

Dans notre cas, les espaces liés à l'eau directement inclus dans le périmètre de l'EQ sont "temporaires". Ils comprennent principalement le canal naturel, ainsi que la réalisation d'aménagements et de dispositifs techniques tels que les noues et les bassins de rétentions du parc urbain où passe le canal (voir Figure A.8. 1). A proximité du périmètre EQ, il y a également le lagon auquel est directement connecté le canal naturel.



Figure A.8. 1 : Principe des bassins de rétention mis en œuvre dans le parc urbain du quartier de Ravine Blanche pour la gestion des eaux pluviales.

En termes de pratiques, aucun espace d'eau de loisir (jet d'eau, brumisateurs ou autres) n'a été installé sur le périmètre de l'écoquartier. De plus, les espaces liés à l'eau temporaire ont été réalisés afin de faire face aux risques d'inondations. Il n'y a pas eu d'objectifs de développer des pratiques liées à ces espaces. L'aménagement a néanmoins été réalisé afin que les dispositifs de maîtrise de l'eau pluviale s'insèrent dans le paysage et notamment dans le parc urbain. L'accent a donc été mis sur la conception et le traitement des espaces publics liés à l'eau. L'efficacité de ces dispositifs a d'ailleurs pu être constatée lors d'épisodes de fortes pluies. Le parc urbain est aussi un lieu de promenade au sein du quartier et de loisirs pour les enfants et leurs familles, leur permettant d'apprécier ce milieu naturel où de nombreuses espèces végétales et animales sont présentes. Le principal problème relevé est celui de la propreté et de l'entretien de ces espaces et du parc urbain. La difficulté d'entretien des espaces verts est d'ailleurs une problématique récurrente dans ce type d'opération à l'échelle de la commune et même du territoire.

b. Critère « Maîtrise des pollutions liées au ruissellement »

Composé d'un seul indicateur, ce critère évalue « la part d'équipements de dépollution des eaux de ruissellement dont le fonctionnement est satisfaisant et/ou innovant », en se basant sur des informations qualitatives relatives à l'efficacité technique des équipements présents et leur bonne gestion. Différents équipements de dépollution ont été installés sur le périmètre de l'EQ que ce soit sur le domaine public ou privé. Ainsi, en plus des noues et des bassins de rétention du parc urbain, on compte 5 décanteurs lamellaires répartis dans l'EQ et un drain installé en partie basse (SE) du quartier, depuis au moins 3 ans au moment de l'évaluation. Sur le domaine privé, des séparateurs hydrocarbures ont été installés au niveau d'un bâtiment de logements et commerces (Le Patio) et au niveau d'une

concession automobile (Renault), ainsi que des décanteurs lamellaires au niveau de l'EHPAD Père Favron. Cet indicateur est donc pertinent pour le contexte étudié même s'il est décrit comme optionnel.

En ce qui concerne les équipements situés sur le domaine privé, il est très difficile d'avoir un retour. Sur le domaine public, les équipements en surface à savoir les noues et bassins de rétention sont plus facilement observables. Des observations visuelles ont été menées afin d'apprécier leur efficacité réelle. Durant les dernières saisons de pluie, ces derniers ont très bien assuré leur rôle. Toute l'eau a été contenue et n'est restée en surface que quelques jours. Des photos ont été prises lors d'épisodes de fortes pluies antérieures à l'évaluation. Une observation plus détaillée pourrait être mise en place tels que des relevés photographiques sur plusieurs jours pour constater le niveau de l'eau et des prélèvements pour vérifier le niveau de pollution. Lors de la période d'évaluation, aucun épisode pluvieux de forte intensité ne s'est produit, rendant difficile l'évaluation. Néanmoins, visuellement, la présence de la faune (libellules, crapauds, etc.) et de la flore (l'état de pousse de la végétation, les couleurs) laissent à supposer du bon état de ces équipements.

Par contre, au niveau des équipements techniques placés sous le sol (drain et décanteurs lamellaires), aucun suivi ou entretien n'a été réalisé depuis leur installation alors qu'il est recommandé de les entretenir une à deux fois par an (vidange et curage). Les services en charge à la mairie ont précisé qu'aucun budget n'était alloué au suivi de ce type d'équipement. Il n'existe aucun cahier des charges ni protocoles d'entretien. Ces équipements sont installés dans le cadre de la Loi sur l'eau mais celle-ci n'oblige pas à en assurer le suivi au cours du temps. Cela représente un coût non négligeable qui devrait être prévu en amont des budgets prévisionnels. Lors des derniers événements pluvieux, il a été constaté que l'eau qui sortait au niveau de la partie basse du canal naturel était de couleur foncée (quasiment noire), laissant supposer une diminution de leur efficacité. Des tests de prélèvement devraient donc être réalisés afin de vérifier l'état de ces équipements.

Ainsi, le bilan sur les équipements de rétention et d'infiltration naturels en surface est plus que positif mais il est primordial vu le contexte climatique local et la situation du quartier en zone inondable, le passage du canal naturel et la proximité du lagon, que les autres équipements puissent fonctionner de manière optimale afin d'éviter une pollution des sols et du milieu naturel du lagon. Il est donc important de mener une réflexion à ce niveau au sein des services communaux concernés.

c. Critère « Sobriété et valorisation de la ressource en eau »

L'indicateur 19.4 représente la quantité d'eau totale consommée par l'ensemble des bâtiments composant l'EQ, en distinguant le recours à l'eau potable et à d'autres sources. Pour cet indicateur, un détail des consommations par catégorie de bâtiments (Résidentiel/privé, Résidentiel/social, Tertiaire/privé, Tertiaire/public ou administratif, Commercial, Equipement public, Equipement public/établissement scolaire, Autre) est demandé.

Cet indicateur est pertinent dans le contexte de l'EQ de Ravine Blanche puisque des recommandations avaient été préconisées dans le cahier de recommandations architecturales et urbaines établies par maîtrise d'œuvre environnementale dans le cadre de la réhabilitation des bâtiments en termes d'économies d'eau potable (robinets avec embouts brise-jets, chasse d'eau des toilettes 3/6 litres ; 1 disjoncteur d'eau par logement, réducteur de pression, etc.).

Pour cet indicateur, seule la consommation en eau potable est prise en compte puisqu'aucune autre source alternative n'existe dans le périmètre de l'EQ. Les consommations réelles tous usages (et non échantillonnées ou estimées) de chaque typologie de bâtiment ont pu être calculées sur une année puisque le détail des consommations a été fourni par le service de distribution des eaux de la Ville de Saint-Pierre en recoupant avec un fichier adresses correspondant au périmètre de l'EQ fourni par le service foncier de la Mairie. Ainsi, la consommation en eau potable totale du quartier après rénovation sur la période 2015 est de 419 751 m³/an soit une consommation d'environ 51,2 m³/éq.hab/an. La consommation en eau potable des surfaces résidentielles sociales et privées sont respectivement de 51,3 m³/éq.hab/an et 57,5 m³/éq.hab/an et sont donc proches de la moyenne de consommation globale du quartier avec une part plus importante dans le privé. La plus grande consommation en eau potable est atteinte par les surfaces tertiaires publiques ou administratives avec 79,0 m³/éq.hab/an. Bien que comprenant en grande partie des bureaux, ces surfaces tiennent compte également de la cuisine centrale qui fournit les écoles, très consommatrice en eau potable. La consommation en eau des bâtiments publics de la Mairie est régulièrement suivie par le service interne concerné.

Contrairement à d'autres indicateurs quantitatifs, le calcul de cet indicateur n'a pas posé de problème en termes d'accès à la donnée et a été facilité grâce aux divers échanges entrepris avec le fournisseur d'eau et à l'organisation de leur fichier de consommation qui a permis de délimiter rapidement les abonnés inclus dans le périmètre de l'EQ.

L'indicateur 19.5 quantifie la quantité totale d'eau consommée pour les espaces publics de l'EQ en distinguant l'eau potable d'une part, et l'eau provenant de sources alternatives à l'eau potable d'autre part. Dans notre cas, aucune source alternative n'est utilisée.

Les données réelles de consommation sont issues des factures pour les compteurs d'eau sur l'espace public géré par la collectivité pour l'année 2015. L'eau est utilisée pour l'entretien des espaces verts (noues, canal, arbres, parterres de fleurs, friches, placettes aménagées, etc.) et notamment le parc urbain soit une consommation après rénovation de 14 785.0 m³/an représentant 3 146 m³/ha/an. Le parc urbain seul consomme 10 090 m³/an soit 68% de la consommation globale en eau. Cet indicateur de suivi est facilement obtenu et permet d'assurer un suivi annuel des consommations publiques pour l'entretien des espaces verts.

L'indicateur 19.6 permet d'évaluer le taux d'utilisation de sources alternatives à l'eau potable. Dans notre contexte, sur le domaine public (commune et bailleurs) de l'EQ, il n'existe aucun procédé permettant l'utilisation de sources alternatives telle que l'eau de pluie bien que des réflexions soient

menées à ce sujet au niveau local. Pour le domaine privé, certains habitants ont peut-être un système à usage personnel mais aucune confirmation n'a été apportée. Le taux est donc nul et ce point pourrait faire l'objet d'une réflexion notamment dans les prochains projets de la Ville de Saint-Pierre.

La principale problématique des systèmes avec récupération d'eau de pluie en surface est d'ordre sanitaire avec la lutte contre les moustiques. L'eau de pluie doit donc être collectée et stockée dans une cuve avant d'être utilisée dans le quotidien (arrosage du jardin, lavage des voitures et du sol ou encore l'évacuation des toilettes) en vue de la réduction de la consommation en eau potable.

L'indicateur 19.7 calcule la part des surfaces construites valorisant les eaux usées pour la production d'énergie. Cet indicateur n'est pas pertinent dans notre contexte puisque les eaux usées ne sont pas valorisées pour la production d'énergie que ce soit sur le domaine public ou privé. La part de ces surfaces est donc nulle.

d. Critère « Maîtrise de l'imperméabilisation, des débits d'eau pluviale et du ruissellement »

Ce critère est évalué par deux indicateurs recommandés à savoir le taux d'imperméabilisation (19.8) et la part des surfaces de l'EQ ayant une gestion de l'eau pluviale à la parcelle (19.9). En effet, la réduction de l'imperméabilisation favorise la maîtrise des pollutions des eaux pluviales et les débits d'eau.

Le taux d'imperméabilisation correspond ici au taux effectif calculé lorsque les travaux de rénovation ont été achevés. Il tient compte de tout type de sols perméables et des toitures végétalisées. Une distinction peut être faite entre le domaine public, où les données réelles sont demandées et le domaine privé où des estimations peuvent être faites. Dans notre cas, comme il s'agit d'un projet de renouvellement urbain, la différence de ce taux avant et après projet est également demandée.

Cet indicateur présente un intérêt dans le contexte de l'EQ de la Ravine Blanche afin de mesurer l'impact du projet de RU avec toutes ses nouvelles constructions et réhabilitations, ainsi que les aménagements urbains réalisés. Des préconisations avaient été définies dans le cahier des recommandations architecturales et urbaines établi par la maîtrise d'œuvre environnementale en ce qui concerne la gestion des eaux pluviales et des risques d'inondations.

Le calcul du taux d'imperméabilisation tient compte de l'ensemble du périmètre de l'EQ (domaine public et privé), et des toitures végétalisées. Les surfaces perméables comprennent dans notre cas les espaces verts (parc urbain, friche, venelles en terre battue, placettes végétalisées, bande de fleurs, toitures végétalisées, noues, bassins de rétention, canal naturel, parking alvéolé, pieds d'immeubles végétalisés, etc.). Le calcul est réalisé à partir de données réelles pour le domaine public. En ce qui concerne le domaine des bailleurs sociaux et le domaine privé, les surfaces ont été calculées grâce à la combinaison de plans DOE, d'une photographie aérienne récente (prise en début 2016) et de l'outil

SIG. Les mesures réalisées ont, à chaque fois, été complétées de visites sur site lorsque l'accès était facile. Pour le résidentiel privé, une estimation a été faite à partir de l'outil SIG et de la visite de quelques cours privatives. Les différents outils utilisés ont permis de créer une cartographie des différents types de surfaces composant l'EQ comme le montre la Figure A.8. 2.



Figure A.8. 2: Cartographie des espaces de l'écoquartier permettant la maîtrise de l'imperméabilisation, des débits d'eau pluviale et du ruissellement

Le taux a été calculé selon la formule suivante :

$$\text{Taux imperméabilisation (\%)} \\ = 100 \times \frac{1 - (\sum(\text{surfaces perméables au sol}) + \sum(\text{surfaces végétalisées des toitures}))}{\sum(\text{surface totale des parcelles})}$$

Le taux d'imperméabilisation du projet est de 69,7% après rénovation avec un taux de 63% pour les parcelles publiques et de 73% pour les parcelles privées. Le taux d'imperméabilisation avant-projet avait été calculé par le chef de projet ANRU de Ravine Blanche selon une méthodologie similaire à celle appliquée mais avec plus d'estimations. Un taux proche de 60% avait été trouvé. Le taux d'imperméabilisation n'a donc pas été réduit, s'expliquant par un nombre important de nouvelles constructions et seule la nouvelle école présente une toiture végétalisée permettant de « compenser » les surfaces construites. On est également loin de la « valeur cible » de 40% (coefficient d'imperméabilisation de la parcelle) fixée par la Mairie de Saint-Pierre. Le taux d'imperméabilisation va d'ailleurs encore augmenter puisque de nouvelles constructions sont en cours.

En ce qui concerne la gestion de l'eau pluviale à la parcelle, les efforts se sont principalement portés sur le domaine public avec le parc urbain composé d'espaces végétalisés, de noues, de bassins de rétention et du canal naturel, ainsi que la nouvelle école comprenant une toiture végétalisée. Certaines réhabilitations du parc social sont également équipées de parkings alvéolés.

III. Synthèse

Les principaux retours d'expérience sur les indicateurs relatifs à la thématique de l'eau sont listés dans le Tableau A.8. 2 .

L'évaluation de cet engagement a été plus complète et plus facile à mener. La thématique de gestion de l'eau et maîtrise de l'eau pluviale a été intégrée de manière forte dès la phase étude du programme de rénovation urbaine au vu du contexte sensible du quartier. L'accès aux ressources humaines et matérielles a été facilité puisque la majorité des informations était disponible en interne et a permis de calculer les différents indicateurs quantitatifs. Le travail de récolte des données pour un EQ d'une superficie de 60 ha a été exhaustif et a demandé beaucoup de temps mais il a permis à la Mairie de disposer d'une cartographie et de données SIG sur l'ensemble des types de surfaces composant le périmètre de l'EQ.

Tableau A.8. 2: Points forts et points faibles identifiés lors de l'application de la méthode d'évaluation dans le contexte de l'EQ de la Ravine Blanche pour l'Engagement 19 relatif à l'eau.

 Points forts /Avantages	 Points faibles / Inconvénients
▪ Etude de faisabilité et identification des acteurs rapides et efficaces. ▪ Accès à la donnée plus simple pour les indicateurs quantitatifs : utilisation d'outils SIG pour cartographie et calculs des surfaces, informations disponibles en interne (Services techniques, urbanisme, etc.), données facilement mobilisables par le fournisseur d'accès à l'eau potable. ▪ Etude qualitative (Indicateurs 19.1 et 19.2) facile à reproduire et à limiter au périmètre d'étude du quartier : questionnaires, visites de site, documentation d'experts.	▪ Ressources humaines mobilisées plus importantes : 2 étudiants en stage de Licence 3 (Parcours Génie Urbain/ Génie Civil), 1 doctorante et le chef de projet ANRU. ▪ Travail de cartographie, recensement des surfaces et calculs détaillés par typologie de bâtiments et domanialité très consommateurs en temps.

Cette évaluation a montré d'une part que des efforts plus importants auraient pu être menés au niveau du taux d'imperméabilisation et de la gestion de l'eau pluviale à la parcelle et d'autre part, qu'un dysfonctionnement existe en termes de suivi et d'entretien des équipements de dépollution installés sur le quartier au sein même des services communaux. De plus, il est difficile d'évaluer l'efficacité des dispositifs installés dans les logements afin de réduire la consommation en eau puisqu'aucune donnée avant-projet n'est disponible. Enfin, l'aménagement du parc urbain et de ses espaces liés à l'eau a été réfléchi en termes d'intégration paysagère et d'efficacité mais pas en termes de pratiques sociales et le manque d'entretien ne favorise pas l'appropriation de ces espaces par les usagers du quartier.

Annexe 9 : Liste des indicateurs proposés par la méthode nationale d'évaluation des écoquartiers pour les Engagements 17, 18 et 19 et étude de la pertinence et de la faisabilité technique des indicateurs pour le cas d'étude de l'EcoQuartier de la Ravine Blanche, à Saint-Pierre

Indicateur	Intitulé	Pertinence	Faisabilité / Accès à la donnée	Intérêt de l'indicateur
Engagement 17 : Energie				
17.1	Consommation énergétique des bâtiments	Moyenne	Moyennement difficile	L'intérêt est faible pour le parc social des bailleurs et les écoles de l'EQ. Il peut représenter un intérêt pour les bureaux et commerces climatisés du secteur privé. Il n'y a pas eu d'actions de rénovation énergétique avec pour but d'améliorer la performance énergétique des logements, des écoles ou des bureaux. Les actions visaient l'amélioration du confort thermique.
17.2	Consommation énergétique de l'éclairage public	Elevée	Facile	Pour mesurer l'impact des actions mises en œuvre dans le cadre du projet ANRU, favoriser la transparence au sein de la collectivité et contribuer à l'amélioration de l'EP dans d'autres quartiers.
17.3	Consommation énergétique liée aux espaces publics	Moyenne	Moyennement difficile	Pour favoriser la transparence et améliorer les pratiques au sein des services communaux concernés puisque l'entretien des espaces publics n'est que très peu suivi alors que le parc urbain de 2ha nécessite un entretien conséquent.
17.4	Consommation énergétique liée aux services urbains	Nulle	-	Peu de services urbains énergivores identifiés dans le périmètre de l'EQ.
17.5	Production de chaleur renouvelable sur l'EQ	Elevée	Facile	Pour mesurer l'impact des actions mises en œuvre dans le cadre du projet ANRU sur l'accessibilité au solaire thermique et encourager cette pratique.

Indicateur	Intitulé	Pertinence	Faisabilité / Accès à la donnée	Intérêt de l'indicateur
Engagement 17 : Energie (Suite)				
17.6	Production d'électricité renouvelable sur l'EQ	Elevée	Facile	Pour connaître la part liée à la production en énergie renouvelable sur le quartier, deux installations PV ayant été installées dans le périmètre et encourager la production d'électricité à partir de sources renouvelables.
17.7	Part de chaleur d'origine renouvelable consommée provenant de l'EQ	Elevée	Moyennement Difficile	Pour avoir des valeurs de référence locales et pouvoir les appliquer dans le cadre des autres projets de la collectivité mais aussi vérifier que les besoins en eau chaude sont couverts par le solaire thermique mis en place.
17.8	Bilan énergétique de l'EQ	Elevée	Facile (Dédit)	Pour communiquer sur l'EcoQuartier et les efforts déployés dans le cadre du projet.

Indicateur	Intitulé	Pertinence	Faisabilité / Accès à la donnée	Justification
Engagement 18 : Déchets				
18.1	Potentiel de prévention	Faible	Difficile	Méthode MODECOM trop lourde à l'échelle du quartier seul. Il n'est pas prévu d'en organiser ni à échelle des EPCI ni à celle du département.
18.2	Biodéchets gérés en proximité	Faible	Moyennement difficile	Pas d'actions mises en place concernant les biodéchets mais permettrait de connaître le potentiel lié aux biodéchets, améliorer les pratiques et les exporter dans d'autres quartiers.
18.3	Déchets réutilisés	Elevée	Moyennement difficile	Evaluer les actions mises en œuvre dans le quartier. Connaître le potentiel lié aux déchets réutilisés, améliorer les pratiques et les exporter.
18.4	Matériaux réemployés	Nulle	-	Pas de réemploi sur le quartier (aucun dépôt-vente ou vide grenier). Axe à développer.
18.5	Déchets collectés	Faible	Difficile	Aucune tarification incitative appliquée au territoire et aucune information au niveau du périmètre de l'EQ seul.
18.6	Part de déchets triée à la source	Faible	Difficile	Aucune information au niveau du périmètre EQ seul.
18.7	Qualité du tri	Faible	Difficile	Méthode MODECOM trop lourde à l'échelle du quartier seul. Il n'est pas prévu d'en organiser ni à échelle des EPCI ni à celle du département.
18.8	Gisement pour des nouvelles filières de valorisation	Nulle	-	Aucune réflexion n'a été menée à ce niveau.
18.9	Qualité urbaine, paysagère et conditions d'usage des équipements de stockage et de pré-collecte	Elevée	Facile	Evaluer ce qui a été fait dans le cadre du projet ANRU et améliorer les pratiques pour ce quartier et les exporter dans d'autres projets.
18.10	Satisfaction et pratiques liées aux déchets	Elevée	Facile	Evaluer ce qui a été fait dans le cadre du projet ANRU et améliorer les pratiques pour ce quartier et les exporter dans d'autres projets.

Indicateur	Intitulé	Pertinence	Faisabilité	Justification
Engagement 19 : Eau				
19.1	Qualité urbaine, paysagère et conditions d'usage des espaces liés à l'eau	Elevée	Facile	Evaluer ce qui a été fait dans le cadre du projet ANRU et améliorer les pratiques pour ce quartier et les exporter dans d'autres projets.
19.2	Satisfaction et pratiques des espaces liés à l'eau	Elevée	Facile	Evaluer ce qui a été fait dans le cadre du projet ANRU et améliorer les pratiques pour ce quartier et les exporter dans d'autres projets.
19.3	Efficacité des équipements de dépollution	Elevée	Moyennement difficile	Evaluer ce qui a été fait dans le cadre du projet ANRU et favoriser la transparence. Une réflexion est à mener à ce niveau au sein des services communaux concernés.
19.4	Consommation en eau des bâtiments	Moyenne	Facile	Peu d'actions mises en place sur cet aspect mais présente un intérêt pour connaître la consommation des différentes typologies de bâtiment sur le territoire de Saint-Pierre et améliorer les pratiques.
19.5	Consommation en eau potable pour les espaces publics	Moyenne	Facile	Pas d'actions mises en place sur cet aspect mais permettrait de favoriser une transparence et procéder éventuellement à des actions afin d'économiser les ressources en eau.
19.6	Taux d'utilisation de sources alternatives à l'eau potable	Nulle	-	Il n'y a aucun procédé mis en place sur l'EQ permettant l'utilisation d'autres sources (eaux de pluie) bien que des réflexions soit menées à ce sujet au niveau local.
19.7	Part des surfaces construites valorisant les eaux usées pour la production d'énergie	Nulle	-	Il n'y a aucun procédé mis en place sur l'EQ à cet effet.
19.8	Taux d'imperméabilisation	Elevée	Facile	Evaluer l'impact du projet ANRU avec toutes ses nouvelles constructions et les aménagements urbains.
19.9	Part de l'EQ ayant une gestion des eaux pluviales à la parcelle	Elevée	Facile	Evaluer ce qui a été mis en œuvre dans le cadre du projet ANRU et améliorer les pratiques sur d'autres projets puisque la gestion des eaux de pluie est cruciale sur notre île (fortes pluies, cyclones, ravines, etc.)

Annexe 10: Questionnaire réalisé pour l'étude de confort dans les logements

Date : ____/____/____

Enquête de Satisfaction sur le confort dans les logements



INFORMATIONS LOGEMENT

- Bâtiment / Numéro Appt:.....
- Etage : ☐ RDC ☐ R+1 ☐ R+2 ☐ R+3 ☐ R+4
- Localisation : ☐ Pignon ☐ Centré ☐ Sous-toiture
- Depuis combien de temps occupez-vous cet appartement?
☐ Moins d'1 an ☐ 1- 5 ans ☐ 5- 10 ans ☐ Plus de 10 ans
- Type : ☐ T1 ☐ T2 ☐ T3 ☐ T4 ☐ T5 ou plus

EQUIPEMENTS : COMMENT LES UTILISEZ-VOUS ?

- Votre logement est-il équipé de :

	Oui	Non	Si oui, dans quelle(s) pièce(s) ?
Climatisation	☐	☐	☐ Chambre parents ☐ Chambres enfants ☐ Séjour
Brasseur d'air plafond	☐	☐	☐ Chambre parents ☐ Chambres enfants ☐ Séjour
Ventilateur sur pied	☐	☐	☐ Chambre parents ☐ Chambres enfants ☐ Séjour
- Cette saison chaude, avez-vous utilisé les équipements ci-dessus ? (en moy / jour type)
☐ Jamais ☐ Rarement/Ponctuellement ☐ Souvent ☐ Tout le temps
- Ouvrez-vous les fenêtres des pièces de vie principales pour aérer votre logement ?
En été ☐ oui ☐ non **En hiver** ☐ oui ☐ non
- A quel(s) moment(s) ?

En été	☐ Matin	☐ Après-midi	☐ Soirée	☐ Nuit
En hiver	☐ Matin	☐ Après-midi	☐ Soirée	☐ Nuit
- En été, à quelle fréquence ouvrez-vous les fenêtres de ? (ex sur une journée type)
Chambre(s) ☐ Jamais / Ponctuel ☐ Rarement ☐ Souvent ☐ Tout le temps
Séjour ☐ Jamais / Ponctuel ☐ Rarement ☐ Souvent ☐ Tout le temps
Cuisine ☐ Jamais / Ponctuel ☐ Rarement ☐ Souvent ☐ Tout le temps
- Pour quelle(s) raison(s), n'ouvrez-vous pas ?
☐ Trop de bruit ☐ Trop de vent ☐ Mauvaises odeurs ☐ Intimité ☐ Sécurité
☐ Poussière ☐ Climatisation allumée ☐ Moustiques ☐ Autres :
- Quel(s) moyen(s) avez-vous pour vous protéger du soleil ? (chambres / séjour)
☐ Aucun ☐ Stores ☐ Rideaux ☐ Volets projetables

- ☐ Casquettes ☐ Varangue ☐ Autre :

CONFORT THERMIQUE : COMBIEN FAIT-IL CHEZ VOUS ?

13. Comment vous sentez-vous dans votre logement en général ? (cochez une case)

	ETE							HIVER						
	Très	Assez	Peu	0	Peu	Assez	Très	Très	Assez	Peu	0	Peu	Assez	Très
Séjour	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
Chambre parents	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
Chambre enfants	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7

14. En général trouvez-vous les conditions dans votre logement ?

		Très	Assez	Peu	Peu	Assez	Très	
En été	Inconfortable	1	2	3	4	5	6	Confortable
En hiver		1	2	3	4	5	6	

15. Comment jugez-vous le « courant d'air » dans votre logement ?

		Très Assez Peu 0 Peu Assez Très							
Séjour	Faible	1	2	3	4	5	6	7	Fort
Chambre parents	Faible	1	2	3	4	5	6	7	Fort
Chambre enfants	Faible	1	2	3	4	5	6	7	Fort

16. Trouvez-vous que la ventilation naturelle de votre logement soit efficace ? ☐ oui ☐ non

CONFORT VISUEL: Y A-T-IL ASSEZ DE LUMIERE ?

16. Comment jugez-vous votre logement en termes de lumière naturelle ?

	Très	Assez	Peu	0	Peu	Assez	Très	
Sombre	1	2	3	4	5	6	7	Lumineux

18. A quel moment, votre logement reçoit-il le plus de lumière ?

- ☐ Le matin ☐ L'après-midi ☐ Toute la journée ☐ A aucun moment

CE QUESTIONNAIRE EST ANONYME. MERCI DE VOTRE PARTICIPATION !

Date : ____/____/____

Enquête de Satisfaction sur le confort dans les logements



CONFORT ACOUSTIQUE : Y A-T-IL TROP DE BRUITS ?

19. Comment jugez-vous votre logement face aux bruits ?

Très Silencieux

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

 Très Bruyant

20. Quelle est votre gêne globale face aux bruits présentés ci dessous selon l'échelle suivante ?

- 1** Vous ne les entendez pas
2 Vous les entendez mais ce n'est pas gênant
3 Vous les entendez, c'est un peu gênant
4 Vous les entendez, c'est assez gênant
5 Vous les entendez, c'est très gênant

Vos voisins qui parlent (dessus/dessous) chez eux
 Les gens qui parlent dans les parties communes
 Les bruits de pas dans les appartements voisins
 Les bruits de pas dans parties communes
 Les chutes d'objet / Meubles qui bougent
 Les bruits venants de l'extérieur, fenêtres fermées

1 2 3 4 5

21. Quel(s) type(s) de bruit vous gêne(nt) le plus ?

- ☐ Trafic routier ☐ Enfants qui jouent dehors ☐ Gens qui discutent ☐ Vibration des équipements
☐ Musique / télé ☐ Objets qui tombent ☐ Bruit de pas ☐ Autres :

BILAN : COMMENT JUGEZ-VOUS VOTRE LOGEMENT ?

22. D'une manière générale, trouvez-vous votre logement agréable ?

- ☐ oui ☐ non

23. Quelle note globale donneriez-vous à votre logement (sur 7 points) ?

Très Insatisfait

Température	1	2	3	4	5	6	7
Bruit	1	2	3	4	5	6	7
Luminosité	1	2	3	4	5	6	7
Odeurs	1	2	3	4	5	6	7

 Très satisfait

24. Sur quoi donne votre séjour :

votre chambre principale :

(Aide : Rue, Parking béton, Jardin, Gazon, Vis à vis bâtiment)

25. Comment trouvez-vous la vue extérieure ?

Séjour | Dégagée

1	2	3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7

 Bouchée / Fermée

26. Autour de votre bâtiment, vous trouvez que c'est ?

Minéral

1	2	3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7

 Végétal

27. Votre logement a-t-il été rénové ? ☐ oui ☐ non ☐ Je ne sais pas

Si oui, quelles différences avez-vous remarqué :

- ☐ + chaud ☐ Aucun changement ☐ - chaud ☐ + de bruit ☐ Aucun changement ☐ - de bruit

FICHE IDENTITE : QUI ETES-VOUS ?

28. Etes-vous ? ☐ Un homme ☐ Une femme29. Age: ☐ - 20 ans ☐ 20-30ans ☐ 30-40 ans ☐ 40-50 ans ☐ 50-60 ans ☐ + 60 ans

30. Quelle est votre catégorie professionnelle actuelle ?

- ☐ Actif ☐ En recherche d'emploi ☐ Etudiant ☐ Retraité ☐ Bénéficiaire AAH

31. Combien de personnes vivent actuellement dans le logement ?

32. A quel moment de la journée êtes-vous dans le logement :

	8h-12h	12h-14h	14h-18h	18h-20h	20h-8h
Lundi - Vendredi	☐	☐	☐	☐	☐
Week-end	☐	☐	☐	☐	☐

Commentaires

CE QUESTIONNAIRE EST ANONYME. MERCI DE VOTRE PARTICIPATION !

Annexe 11: Méthode de mesure de la température moyenne de rayonnement avec le globe noir selon la (ISO 7726, 1998)

Le bilan des échanges thermiques entre le globe et l'ambiance est donné par l'équation :

$$q_r + q_c = 0$$

Où :

- q_r représente les échanges de chaleur par rayonnement entre les parois de l'enceinte et le globe (W/m^2);
- q_c représente les échanges de chaleur par convection entre l'air et le globe (W/m^2).

La transmission thermique par rayonnement entre les parois de l'enceinte, caractérisée par la température moyenne de rayonnement et le globe est obtenue avec l'équation :

$$q_r = \varepsilon_g \times \sigma (T_r^4 - T_g^4)$$

Où :

- ε_g est l'émissivité du globe noir (sans dimension);
- σ est la constante de Stefan-Boltzman (W/m^2K^4) ;
- T_r est la température moyenne de rayonnement (K) ;
- T_g est la température de globe noir (K).

Les échanges par convection entre l'air contenu dans l'enceinte et le globe sont donnés par l'équation :

$$q_c = h_{cg} (T_a - T_g)$$

Où :

- h_{cg} est le coefficient de transfert thermique par convection au niveau du globe (W/m^2K) ;
- T_a est la température d'air (K).

Dans le cas de convection forcée,

$$h_{cg} = 6,3 \times V_a^{0,6} \times D^{0,4}$$

Où :

- D est le diamètre du globe (m) ;
- V_a est la vitesse de l'air au niveau du globe (m/s).

Le bilan thermique du globe noir s'écrit :

$$\varepsilon_g \times \sigma (T_r^4 - T_g^4) + h_{cg} (T_a - T_g) = 0$$

La température moyenne de rayonnement est donnée par l'équation suivante :

$$T_r = \sqrt[4]{T_g^4 + \frac{h_{cg}}{\varepsilon_g \times \sigma} (T_g - T_a)}$$

En régime de convection forcée, on obtient donc :

$$T_r = \left[(T_g + 273)^4 + \frac{1,1 \times 10^8 \times V_a^{0,6}}{\varepsilon_g \times D^{0,4}} (T_g - T_a) \right]^{1/4} - 273$$

Dans le cas du globe standard $D = 0,15$ m, $\varepsilon_g = 0,95$ (peinture noir mat).

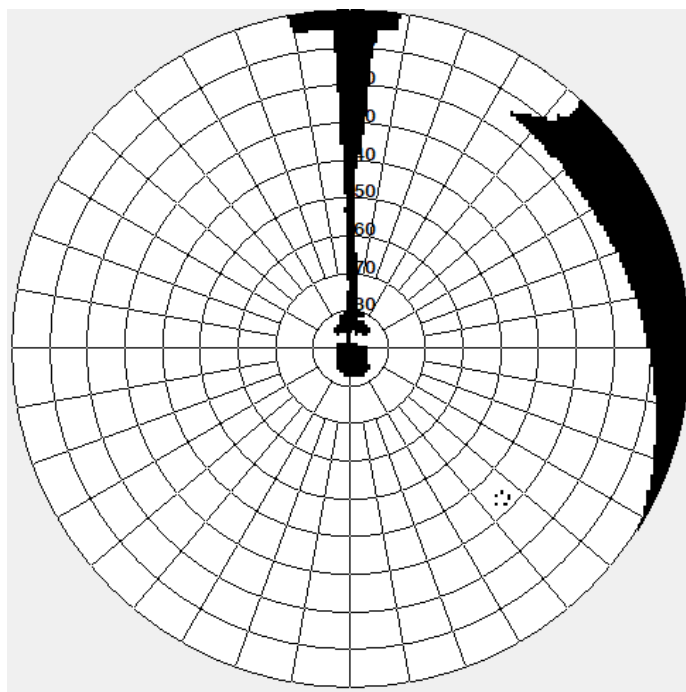
Soit, pour le globe standard :

$$T_r = \left[(T_g + 273)^4 + 2,5 \times 10^8 \times V_a^{0,6} (T_g - T_a) \right]^{1/4} - 273$$

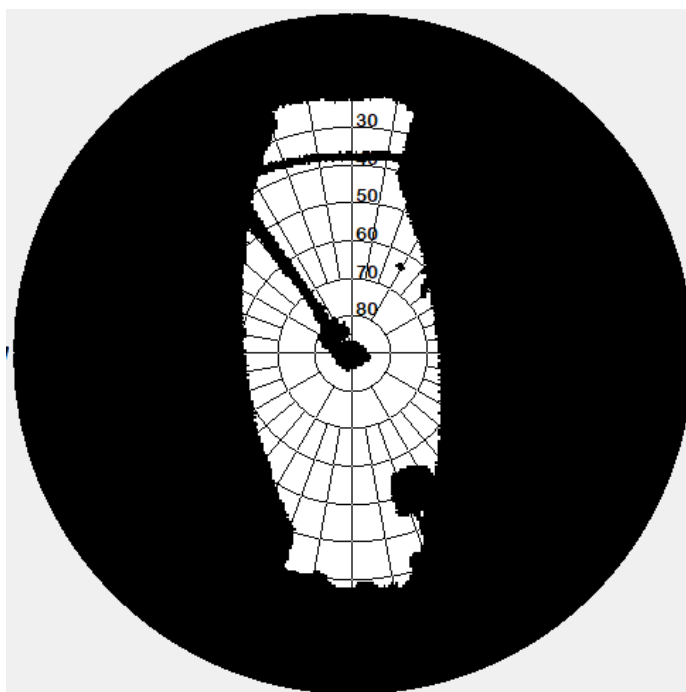
Annexe 12: Caractéristiques techniques de la caméra FLIR b60

Détecteur	Matrice à Plan Focal (FPA) – microbolomètre non refroidi
Bande spectrale	De 7,5 à 13 μm
Résolution image IR	180×180 pixels
Gamme de température de l'objet	De -20 °C à +120 °C
Précision	± 2 °C ou $\pm 2\%$ de la valeur affichée

Annexe 13 : Images extraites de RayMan pour le calcul du SVF : (a) en toiture et (b) dans le canyon urbain



(a)



(b)

Annexe 14: Procédure de transformation des coordonnées pour l'imageur et calcul de l'angle solide

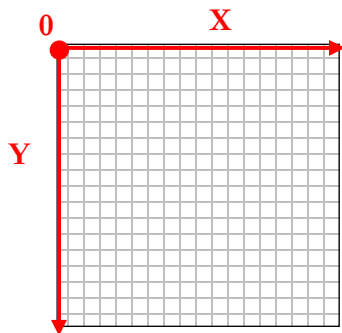
Source modifiée depuis la documentation technique « coordinate transforms » du Total Sky Imager (TSI)

A. Paramètres géométriques importants

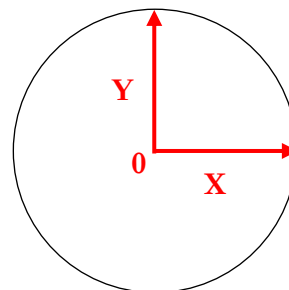
Paramètre	Abréviation	Valeur (unité)
Résolution CCD horizontale	ccdResX	288
Résolution CCD verticale	ccdResY	352
Centre de l'image selon l'horizontal	CenterX	144
Centre de l'image selon la verticale	CenterY	176
Taille du CCD selon l'horizontal	ccdWidth	3,6 (mm)
Taille du CCD selon la verticale	ccdHeight	4,576 (mm)
Distance focale	f	5,5 (mm)
Rayon de la sphère dans laquelle le miroir a été découpé	R	9 (inches)
Rayon de la coupe du miroir	r	7 (inches)
Distance entre le miroir et la caméra	d	0,35 (m)

B. Transformation des coordonnées du pixel vers les coordonnées de l'image

L'origine des coordonnées des pixels se situe sur le coin supérieur gauche de l'image. La valeur des coordonnées sur l'axe des X augmente vers la droite alors que celle des coordonnées suivant l'axe Y augmente en descendant. Les coordonnées de l'image ont, elles, leur origine au centre géométrique de l'image, soit le pixel le plus proche du point haut du miroir, comme le montre la figure suivante :



(a) Coordonnées des pixels



(b) Coordonnées de l'image

Les valeurs de l'abscisse augmentent vers la droite et celles des ordonnées vers le haut. Les fonctions de transformation sont les suivantes :

$$imageX = pixel\ X - CenterX \quad (1)$$

$$imageY = pixel\ Y - CenterY \quad (2)$$

C. Transformation des coordonnées de l'image vers celles de la caméra

Les coordonnées de la caméra se décomposent en deux paramètres : l'altitude et l'azimut.

Puisque la caméra est positionnée en fixant vers le bas, l'altitude est mesurée en dessous de l'horizon alors qu'elle correspond normalement au nombre de degrés au-dessus de l'horizon. Du point de vue de la caméra, l'angle zénithal correspond au déplacement angulaire entre le point observé et la direction fixée par la caméra. On l'appellera donc ici l'angle de vue pour éviter toute confusion.

L'altitude est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre depuis le haut de l'image (le Nord étant défini pour 0° et l'Est pour 90°).

La transformation des coordonnées repose ici sur le principe du modèle sténopé (« pinhole » en anglais), qui n'est pas un modèle précis à 100%.

La première étape consiste à déterminer la position physique du pixel tel qu'il est projeté sur le CCD, de la manière suivante :

$$ccdX = \frac{imageX}{ccdResX} \times ccdWidth \quad (3)$$

$$ccdY = \frac{imageY}{ccdResY} \times ccdHeight \quad (4)$$

Et l'azimut est alors défini par :

$$cameraAz = \tan^{-1}(ccdX/ccdY) \quad (5)$$

Si l'expression retournée est comprise entre $-\pi$ et π , celle-ci doit-être convertie en une valeur comprise entre 0 et 2π en ajoutant 2π aux valeurs négatives.

L'angle de vue est égal à :

$$cameraView = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{ccdX^2 + ccdY^2}}{f}\right) \quad (6)$$

L'altitude de la caméra est l'angle complémentaire, soit :

$$cameraAlt = \frac{\pi}{2} - cameraView \quad (7)$$

D. Calcul de l'angle solide et du poids à attribuer à chacun des pixels

Les coordonnées du ciel (ou coordonnées réelles) peuvent aussi se décomposer en deux paramètres : l'altitude et l'azimut.

L'azimut réel est le même que celui des coordonnées de la caméra :

$$skyAz = cameraAz \quad (8)$$

Pour le calcul de l'altitude, plusieurs étapes supplémentaires sont requises.

En raison de la symétrie existante, le problème peut être réduit à un problème en 2 dimensions.

Dans le système de coordonnées cartésien (x-y), le miroir se présente comme un cercle de rayon R, centré à l'origine. L'observateur est situé sur un point de l'axe des ordonnées au-dessus du cercle, au point y = H avec H = d + R.

L'angle de vue de la caméra, notée α , est l'angle entre l'axe des ordonnées et la ligne qui connecte l'observateur (au point y = H) au point sur le cercle dans la direction vue par la caméra. Ce point est nommé P₀ de coordonnées x₀ et y₀. La ligne est, quant à elle, définie par la droite d'équation suivante :

$$y = \frac{-x}{\tan \alpha} + H \quad (9)$$

L'équation du cercle est définie par :

$$x^2 + y^2 = R^2 \quad (10)$$

En combinant ces deux équations, on obtient l'équation suivante à résoudre :

$$y_0^2(\tan^2 \alpha + 1) - y_0(2H\tan^2 \alpha) + H^2\tan^2 \alpha - R^2 = 0 \quad (11)$$

On définit β comme l'angle entre l'axe des ordonnées et la ligne connectant le centre du cercle au point P₀. Celui-ci a pour valeur :

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{y_0}{R}\right) \quad (12)$$

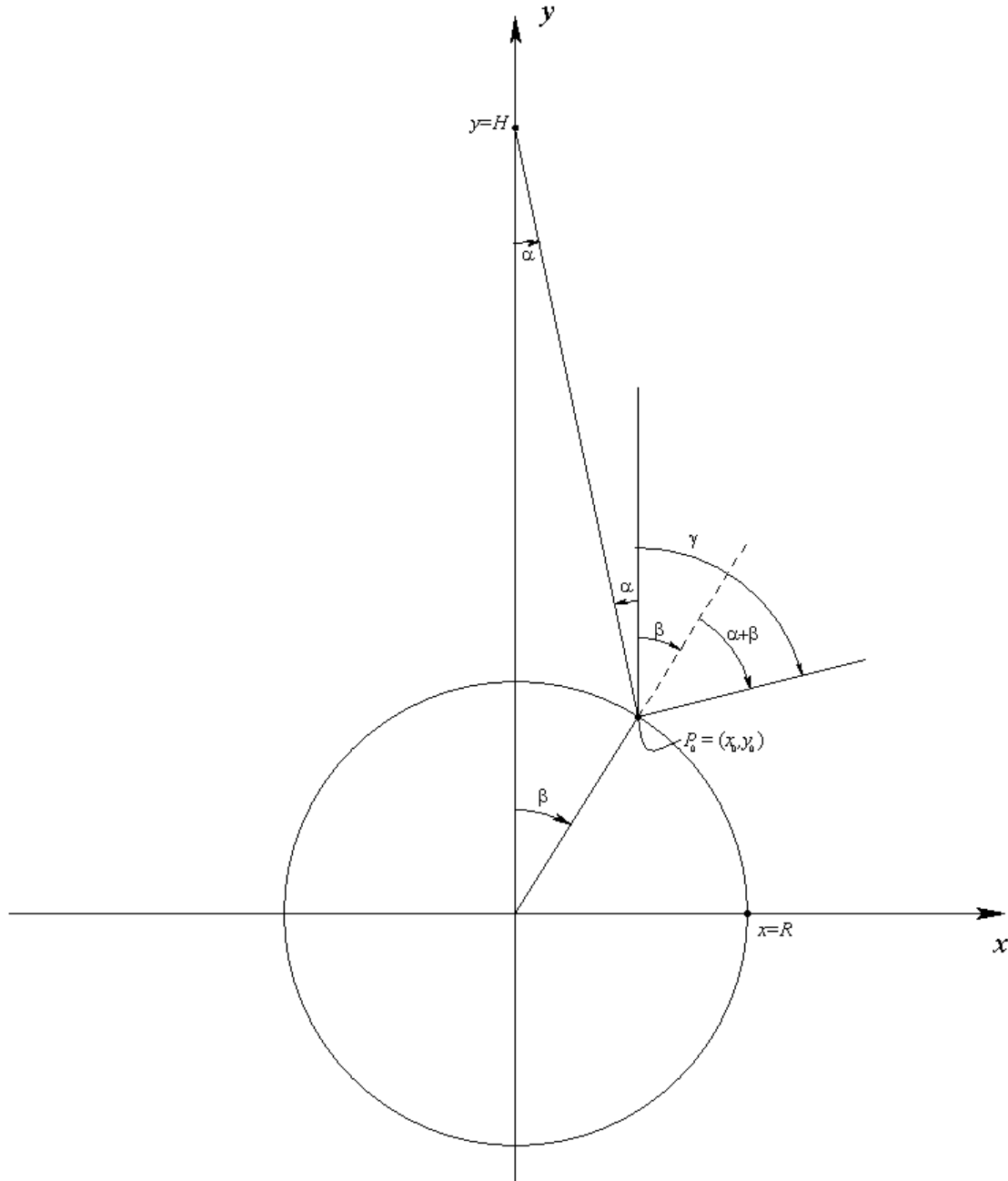
L'angle zénithale, γ , de la ligne résultant de celle décrite par l'équation (9) est alors défini par :

$$\gamma = 2\beta + \alpha \quad (13)$$

Le poids à attribuer à chaque pixel est alors calculé grâce à la formule suivante :

$$poids = 1/\cos \gamma \quad (14)$$

Le problème posé et les différents angles à calculer sont représentés dans la figure suivante :



Annexe 15 : Questionnaire utilisé durant les sessions d'enquête en extérieur

Enquêteur : _____

QUESTIONNAIRE D'ENQUETE SUR LA PERCEPTION DU CONFORT THERMIQUE DANS LES QUARTIERS

1. DATE: ____/____/____

2. HEURE DEBUT: ____/____

3. EXPOSITION : ☐ Plein soleil ☐ Entre les deux ☐ Très ombragée

4. Depuis combien de temps êtes-vous dehors?
☐ Moins de 15min ☐ 15min - 30min ☐ 30min - 1H ☐ Plus de 1 H

5. Combien de temps pensez-vous encore rester ?
☐ Moins de 15min ☐ 15min - 30min ☐ 30min - 1H ☐ Plus de 1 H

Température d'air : Est-ce qu'il fait chaud ?

6. En ce moment précis et à l'endroit précis où vous êtes, trouvez-vous qu'il fait ?
 Très froid 1 2 3 4 5 6 7 Très chaud 

7. Pour vous, cela correspond à quelle température ? °C

8. En ce moment, en termes de chaleur (ou de froid), trouvez-vous que c'est ?
 Confortable  Légèrement inconfortable  Inconfortable  Très inconfortable

9. En ce moment, préféreriez-vous avoir ?
 Beaucoup + froid 1 2 3 4 5 6 7 Beaucoup + chaud 

10. Selon vous, en ce moment, les conditions à l'extérieur (chaleur ou froid) sont-elles ?
 (entourez votre réponse sur l'échelle ci-dessous)
 -10  -1  +1  +10
 Tout à fait Inacceptable Tout juste Inacceptable Tout juste acceptable Tout à fait acceptable

Soleil : Est-ce que ça « tape » fort ?

11. A ce moment précis et à l'endroit précis où vous êtes, trouvez-vous que le soleil est ?
 1 2 3 4 5 6 7
 Très Faible 1 2 3 4 5 6 7 Très Fort

12. En ce moment même, préféreriez-vous ressentir ? (cochez une case svp)
 Moins de soleil 1 2 3 4 5 6 7 Plus de soleil

Vitesse du vent : Y-a-t-il assez de mouvements d'air ?

13. A ce moment précis et à l'endroit précis où vous êtes, trouvez-vous que le vent est ?
 Très Faible 1 2 3 4 5 6 7 Très Fort

14. En ce moment même, préféreriez-vous ressentir ? (cochez une case svp)
 Moins d'air 1 2 3 4 5 6 7 Plus d'air

Humidité : Est-ce qu'il « fait lourd » ?

15. En ce moment, trouvez-vous que l'air est ? (donner indications comme gorge sèche, difficile de respirer, etc.)
☐ Trop sec ☐ Ok (Ni trop sec, ni trop humide) ☐ Trop humide

16. Préféreriez-vous que l'air soit ? (cochez une case svp)
☐ Plus sec ☐ Aucun changement ☐ Plus humide

17. En ce moment, est-ce que votre peau est ?
☐ Très sèche ☐ Sèche ☐ Normal ☐ Moite ☐ Très humide

Espace urbain : Comment le qualifiez-vous ?

18. C'est un endroit que vous fréquentez ?
☐ Tous les jours ☐ Plusieurs fois / semaine ☐ 1 fois / semaine ☐ 1 fois / mois ☐ Jamais

19. Pour quelle(s) raison(s) fréquentez-vous cet endroit ?
☐ Manger/boire ☐ Se reposer / profiter ☐ École (enfants) ☐ Sur votre trajet
☐ Travaille à côté ☐ Papiers / démarches ☐ Commerces ☐ Autres :

20. Utilisez-vous les équipements présents ici en milieu de journée (aires de jeux, bancs, etc) ?
☐ oui ☐ non ☐ Pas concerné

CE QUESTIONNAIRE, REALISE DANS LE CADRE D'UNE THESE, EST ANONYME. MERCI DE VOTRE PARTICIPATION !

QUESTIONNAIRE D'ENQUETE SUR LA PERCEPTION DU CONFORT DANS LES QUARTIERS



21. Si non, pour quelle(s) raison(s) ? (plusieurs réponses possibles)
☐ Trop de vent ☐ Trop de soleil ☐ Mal fréquenté ☐ Autres :

22. Trouvez-vous que ce lieu est ?

A	Très	Assez	0	Assez	Très	Végéta
	1	2	3	4	5	

Minéral

Ensoleillé	1	2	3	4	5	Ombagé
------------	---	---	---	---	---	--------

Silencieux 1 2 3 4 5 **Bruyant**

Indiquez votre degré d'accord ou de désaccord par rapport aux affirmations suivantes :

23. Les équipements publics mis en place (bancs, murets, aire de jeux, etc.) sont adaptés à nos besoins pour profiter de ce lieu.
☐ Pas du tout d'accord ☐ Plutôt pas d'accord ☐ Plutôt d'accord ☐ Tout à fait d'accord

24. Pourriez-vous préciser?

25. Il y a assez d'ombre dans ce lieu.
☐ Pas du tout d'accord ☐ Plutôt pas d'accord ☐ Plutôt d'accord ☐ Tout à fait d'accord

26. Il y a suffisamment d'arbres dans ce lieu.
☐ Pas du tout d'accord ☐ Plutôt pas d'accord ☐ Plutôt d'accord ☐ Tout à fait d'accord

27. Aujourd'hui, c'est un jour particulièrement agréable pour être dehors dans cet endroit.
☐ Pas du tout d'accord ☐ Plutôt pas d'accord ☐ Plutôt d'accord ☐ Tout à fait d'accord

28. Appréciez-vous cet endroit ?
☐ Non pas du tout ☐ Plutôt non ☐ Plutôt oui ☐ Oui, tout à fait

29. Pourquoi ?

Commentaires libres / observations.

Contact : Virginie GROSDÉMOUGE - Doctorante CIFRE Mairie de St-Pierre/ Laboratoire PIMENT. Email : virginie.grosdemouge@gmail.com

Fiche identité : Qui êtes-vous?

30. Etes-vous ? ☐ Un homme ☐ Une femme

31. Quel est votre âge ? : ans
☐ - 20 ans ☐ 21-30 ans ☐ 31-40 ans ☐ 41-50 ans ☐ 51-60 ans ☐ + 60 ans

32. Depuis quand vivez-vous à la Réunion ?
☐ 0 à 6 mois (Touriste) ☐ 6 mois à 1 an ☐ 2 à 5 ans ☐ 6 à 10 ans ☐ Plus de 10 ans

33. Dans quelle ville habitez-vous :

34. Si St-Pierre, Habitez-vous dans le quartier? ☐ oui ☐ non

35. Si oui, depuis combien de temps ?
☐ Moins d'1 an ☐ entre 1 an - 5 ans ☐ entre 6 - 10 ans ☐ Plus de 10 ans

36. Quelle est votre catégorie professionnelle actuelle ?
☐ Actif ☐ En recherche d'emploi ☐ Etudiant ☐ Retraité ☐ Bénéficiaire AAH

37. Si Actif, travaillez-vous ? ☐ En intérieur ☐ En extérieur ☐ Les 2

38. Si en intérieur : le bureau est-il climatisé ? ☐ oui ☐ non

39. Quelle était votre niveau d'activité 30 min avant votre arrivée ?
☐ Sieste ☐ Repos-Assis ☐ Activité de bureau ☐ Marche ☐ Sport
☐ Conduite ☐ Restauration ☐ Ménage ☐ Autres - Précisez :

40. Avez-vous été dans une pièce climatisée 30 min avant votre arrivée? ☐ oui ☐ non

41. Position actuelle :
☐ Assis ☐ Debout

42. Quelle est votre taille ? cm

43. Quel est votre poids ? kg

44. Comment êtes-vous habillé(e) en ce moment même? (cochez les cases svp)

		Couleur
Haut	☐ Top / Débardeur ☐ Manches courtes ☐ Manches longues	
Bas	☐ Jupe courte/ short ☐ Jupe longue ☐ Pantalon léger	
	☐ Collants / leggings ☐ Jean	
Haut+ Bas	☐ Robe longue ☐ Robe courte ☐ Combinaison	
Chaussures	☐ Chaussettes ☐ Fermées ☐ Ouvertes	
Autres (veste, chapeau, voile, lunettes, etc)		

HEURE FIN : ____ / ____

Annexe 16: Valeurs utilisées pour l'activité métabolique et l'isolation par les vêtements

Tableau A.16.1: Liste des activités et valeur de l'activité métabolique associée

Activité	Activité métabolique (en met)	Activité	Activité métabolique (en met)
Sieste	0,8	Ménage	2,8
Repos-Assis	1,0	Cuisine	2,0
Activité de bureau	1,2	Marche lente	2,4
Debout	1,2	Vélo (peu intense)	4,0
Restauration	1,4	Course rapide	8,0
Conduite	1,4		

Tableau A.16.2: Liste des vêtements et valeur de l'isolation vestimentaire associée

Vêtements	I _{cl} (en clo)	Vêtements	I _{cl} (en clo)
Top / Débardeur	0,05	Combinaison	0,30
Manches courtes	0,08	Collants / leggings	0,15
Manches longues	0,15	Pantalon léger	0,15
Veste légère	0,30	Jean / pantalon épais	0,24
Robe courte	0,23	Voile	0,06
Robe longue	0,29	Chaussettes	0,02
Jupe courte/ short	0,10	Chaussures fermées	0,04
Jupe longue	0,15	Chaussures ouvertes / savates	0,02

Annexe 17 : Statistiques détaillées des variables microclimatiques mesurées avec la station microclimatique mobile selon les jours d'enquête

Date	Nombre de personnes interrogées	T _a (°C)				HR (%)				V _a (m/s)				T _g noir (°C)				T _g gris (°C)			
		moy.	SD	min.	max.	moy.	SD	min.	max.	moy.	SD	min.	max.	moy.	SD	min.	max.	moy.	SD	min.	max.
07/11/2017	9	26,6	0,3	26,0	27,1	58,6	1,0	56,0	61,1	1,0	0,5	0,3	2,4	34,2	4,1	29,4	40,8	30,8	1,8	27,8	33,8
10/11/2017	10	28,4	0,5	27,4	29,3	71,8	2,3	68,1	77,1	1,6	0,5	0,6	3,3	41,3	0,9	39,7	43,3	34,7	0,7	33,2	36,2
09/01/2018	6	30,0	0,3	29,6	30,6	79,5	0,9	77,0	82,4	0,7	0,3	0,2	2,1	36,7	3,2	33,7	43,2	33,1	1,4	31,4	36,9
20/01/2018	40	29,0	0,5	27,8	30,5	81,1	2,2	72,5	84,5	1,1	0,4	0,2	2,6	40,2	3,4	31,9	45,8	32,9	1,6	28,9	36,7
24/01/2018	4	29,3	0,3	28,7	30,1	80,2	1,7	75,8	83,6	1,2	0,5	0,3	2,9	36,1	2,2	33,0	41,7	32,4	1,2	30,5	36,0
27/01/2018	52	29,4	0,4	28,3	30,2	76,8	2,2	72,3	81,8	1,3	0,3	0,3	2,3	41,8	2,7	30,3	46,1	35,3	1,6	29,6	38,1
10/02/2018	66	26,7	0,2	26,3	27,1	95,2	1,2	92,7	98,2	3,2	0,8	0,3	5,2	28,2	0,5	27,2	29,2	27,5	0,4	26,8	28,3
03/03/2018	23	29,7	0,2	29,4	30,0	74,6	2,7	67,9	79,8	0,8	0,5	0,0	2,7	31,2	1,0	30,3	34,0	30,3	0,3	29,8	30,9
09/06/2018	79	24,8	0,8	23,1	25,6	83,3	2,4	78,5	88,2	1,1	0,5	0,2	2,4	26,2	1,3	23,7	27,8	25,8	1,0	23,5	27,1
06/10/2018	50	25,5	0,7	24,0	26,6	60,1	2,4	54,9	65,6	1,2	0,4	0,3	2,3	36,3	2,0	32,8	40,4	30,1	1,2	27,3	33,0
12/01/2019	31	30,3	0,4	29,5	31,3	73,9	1,1	71,5	76,7	1,1	0,4	0,2	2,3	32,3	0,5	31,3	33,4	31,5	0,5	30,4	32,7

Annexe 18 : Statistiques détaillées pour la T_{mrt} calculée en fonction des différentes formules utilisées et selon les jours d'enquête

Date	$T_{mrt_noir_ISO}$ (°C)				$T_{mrt_gris_ISO}$ (°C)				$T_{mrt_gris_Tan}$ (°C)			
	moy.	SD	min.	max.	moy.	SD	min.	max.	moy.	SD	min.	max.
07/11/2017	48,1	10,3	33,0	71,9	44,8	8,2	31,4	63,3	56,8	11,6	37,4	74,6
10/11/2017	70,7	5,1	57,3	84,5	60,5	4,6	49,9	71,4	72,9	2,3	66,7	78,6
09/01/2018	46,9	7,8	37,4	70,6	41,5	4,8	34,4	59,8	51,7	7,7	41,0	75,0
20/01/2018	61,6	10,2	36,4	78,4	46,7	6,1	30,4	60,3	57,4	8,3	34,3	75,6
24/01/2018	50,5	7,4	38,5	70,6	43,9	5,6	34,9	62,5	52,4	6,9	43,0	74,6
27/01/2018	66,4	7,8	33,9	81,7	56,3	5,9	32,8	68,1	70,1	8,1	38,4	83,0
10/02/2018	34,5	2,5	28,1	40,5	33,4	2,2	27,6	39,9	34,0	2,0	29,5	39,4
03/03/2018	33,8	2,6	30,5	41,9	32,2	0,9	30,1	34,4	34,5	1,3	30,1	37,6
09/06/2018	29,6	2,6	25,1	35,0	29,7	2,2	25,5	34,5	33,2	2,9	26,7	38,3
06/10/2018	58,3	7,0	43,0	70,9	47,1	3,9	36,3	57,1	59,5	4,6	50,2	71,2
12/01/2019	36,8	1,4	33,7	41,1	35,9	1,6	32,6	40,9	39,6	1,7	34,9	44,5

LETTRE D'ENGAGEMENT DE NON-PLAGIAT

Je, soussigné(e) **Virginie Grosdemouge** en ma qualité de doctorant(e) de l'Université de La Réunion, déclare être conscient(e) que le plagiat est un acte délictueux passible de sanctions disciplinaires. Aussi, dans le respect de la propriété intellectuelle et du droit d'auteur, je m'engage à systématiquement citer mes sources, quelle qu'en soit la forme (textes, images, audiovisuel, internet), dans le cadre de la rédaction de ma thèse et de toute autre production scientifique, sachant que l'établissement est susceptible de soumettre le texte de ma thèse à un logiciel anti-plagiat.

Fait à Saint-Denis le : 12/11/2020

Signature :



Extrait du Règlement intérieur de l'Université de La Réunion
(validé par le Conseil d'Administration en date du 11 décembre 2014)

Article 9. Protection de la propriété intellectuelle – Faux et usage de faux, contrefaçon, plagiat

L'utilisation des ressources informatiques de l'Université implique le respect de ses droits de propriété intellectuelle ainsi que ceux de ses partenaires et plus généralement, de tous tiers titulaires de ces droits.

En conséquence, chaque utilisateur doit :

- utiliser les logiciels dans les conditions de licences souscrites ;
- ne pas reproduire, copier, diffuser, modifier ou utiliser des logiciels, bases de données, pages Web, textes, images, photographies ou autres créations protégées par le droit d'auteur ou un droit privatif, sans avoir obtenu préalablement l'autorisation des titulaires de ces droits.

La contrefaçon et le faux

Conformément aux dispositions du code de la propriété intellectuelle, toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle d'une œuvre de l'esprit faite sans le consentement de son auteur est illicite et constitue un délit pénal.

L'article 444-1 du code pénal dispose : « Constitue un faux toute altération frauduleuse de la vérité, de nature à causer un préjudice et accomplie par quelque moyen que ce soit, dans un écrit ou tout autre support d'expression de la pensée qui a pour objet ou qui peut avoir pour effet d'établir la preuve d'un droit ou d'un fait ayant des conséquences juridiques ».

L'article L335_3 du code de la propriété intellectuelle précise que : « Est également un délit de contrefaçon toute reproduction, représentation ou diffusion, par quelque moyen que ce soit, d'une œuvre de l'esprit en violation des droits de l'auteur, tels qu'ils sont définis et réglementés par la loi. Est également un délit de contrefaçon la violation de l'un des droits de l'auteur d'un logiciel (...) ».

Le plagiat est constitué par la copie, totale ou partielle d'un travail réalisé par autrui, lorsque la source empruntée n'est pas citée, quel que soit le moyen utilisé. Le plagiat constitue une violation du droit d'auteur (au sens des articles L 335-2 et L 335-3 du code de la propriété intellectuelle). Il peut être assimilé à un délit de contrefaçon. C'est aussi une faute disciplinaire, susceptible d'entraîner une sanction.

Les sources et les références utilisées dans le cadre des travaux (préparations, devoirs, mémoires, thèses, rapports de stage...) doivent être clairement citées. Des citations intégrales peuvent figurer dans les documents rendus, si elles sont assorties de leur référence (nom d'auteur, publication, date, éditeur...) et identifiées comme telles par des guillemets ou des italiques.

Les délits de contrefaçon, de plagiat et d'usage de faux peuvent donner lieu à une sanction disciplinaire indépendante de la mise en œuvre de poursuites pénales.