



578.E

Projet Dimilot

Développement et évaluation de systèmes constructifs contribuant à la réduction des effets des îlots de chaleur

Rapport d'avancement - Octobre 2023

Auteurs :

Florence Bannier, CTICM
Bernard Barthou, CERIB
Amor Ben Larbi, CTICM
Marion Bonhomme, LMDC
Sylvain Boulet, FCBA
Madeline Delage, CTMNC
Jérôme Lozeille, CERIB
Salah-Eddine Ouldboukhitine, Institut Pascal
Daniel Palenzuela, CTMNC
Margot Ruiz, LMDC
Patrick Rougeau, CERIB

Auteurs :

Florence Bannier, CTICM

Bernard Barthou, CERIB

Amor Ben Larbi, CTICM

Marion Bonhomme, LMDC

Sylvain Boulet, FCBA

Madeline Delage, CTMNC

Jérôme Lozeille, CERIB

Salah-Eddine Ouldboukhitine, Institut Pascal

Daniel Palenzuela, CTMNC

Margot Ruiz, LMDC

Patrick Rougeau, CERIB



SOMMAIRE

1. Introduction	5
1.1 Contexte et enjeux sociétaux	5
1.2 Objectifs du projet DIMILOT	6
1.3 Organisation du projet DIMILOT et présentation du rapport final	7
2. Analyse du retour d'expérience	9
2.1 Introduction	9
2.2 Bibliographie sur les îlots de chaleur	9
2.2.1 Le phénomène « îlot de chaleur urbain »	9
2.2.2 Causes des îlots de chaleur urbains	10
2.2.3 Conséquences des îlots de chaleur urbains	10
2.2.4 Comment réduire les îlots de chaleur urbains : Retour d'expérience	11
2.2.5 Matériaux de surface et îlots de chaleur urbains	15
2.3 Évolution des conditions climatiques	18
2.4 Analyses contre-intuitives et points de vigilance	19
2.4.1 Densification urbaine et îlots de chaleur	19
2.4.2 Inertie thermique	20
2.4.3 Végétation urbaine	20
2.5 Positionnement des collectivités territoriales	22
2.6 Classification des îlots de chaleur	23
2.7 Conclusion	24
3. Modélisation des phénomènes liés aux îlots de chaleur	25
3.1 Introduction	25
3.2 La modélisation de l'îlot de chaleur urbain	25
3.2.1. Modélisation du bilan énergétique urbain	26
3.2.2 Modélisation CFD	27
3.2.3 Modélisation radiative	30
3.2.4 Modélisation énergétique des bâtiments	34
3.3 Les modèles de climat urbains	36
3.3.1 Les différentes échelles à considérer	36
3.3.2 Modèles microclimatiques	38
3.3.3 Modèles de bilan énergétique des surfaces	41
3.3.4 Couplage entre modèles complémentaires	44
3.3.5 Modèles très simplifiés	45
3.4 Les indicateurs pour la quantification de l'îlot de chaleur urbain	47

3.4.1	Les indicateurs de microclimat.....	47
3.4.2	Les indicateurs de confort thermique extérieur	48
3.4.3	Les consommations énergétiques des bâtiments	54
3.5	Données nécessaires à la modélisation de l'îlot de chaleur urbain	55
3.5.1	Introduction.....	55
3.5.2	Données météorologiques	55
3.5.3	Données sur l'occupation des sols	57
3.5.4	Données sur les propriétés physiques des matériaux.....	58
3.5.6	Exemples de données d'entrée pour TEB et Envimet	63
3.6	Conclusion.....	65
4.	Approches expérimentales.....	67
4.1	Propriétés physiques des matériaux et des surfaces et dispositifs expérimentaux associés	67
4.1.1	Albedo – réflectance solaire	67
4.1.2	Coefficient d'absorption solaire	67
4.1.3	Émissivité thermique.....	67
4.1.4	L'indice SRI.....	68
4.1.5	Conductivité.....	70
4.1.6	Capacité thermique	71
4.1.7	Diffusivité thermique.....	71
4.1.8	Effusivité thermique	71
4.1.9	Propriétés hydriques	71
4.2	Réalisation d'essais exploratoires à l'échelle matériau.....	74
4.2.1	Mesure des caractéristiques radiatives [CTMNC]	74
4.2.2	Mesure de la conductivité [CERIB]	76
4.2.3	Mesure des propriétés hydriques [FCBA].....	78
4.3	Expérimentation à l'échelle 1	80
4.3.1	Dalles de voirie rafraîchissantes, démonstrateur de la ville de Paris [CERIB]	80
4.3.2	Pavés rafraîchissants (partie piéton), ZAC Toulouse-Montaudran-Aerospace [LMDC]	91
4.4	Verrous scientifiques et techniques	96
5.	Conclusion - Perspectives	98

1. Introduction

1.1 Contexte et enjeux sociétaux

Partout dans le monde, les villes doivent se préparer à faire face aux effets du changement climatique afin d'accroître leur résilience à ces phénomènes. Les ouvrages et les systèmes constructifs doivent intégrer de nouveaux critères : capacité à emmagasiner de la chaleur ou non, capacité à infiltrer l'eau, capacité à consommer moins de ressources naturelles, réduction des émissions de gaz à effet de serre...

Les îlots de chaleur urbains figurent au premier plan des défis à relever. Ils correspondent à des élévations localisées de températures, particulièrement des températures maximales diurnes et nocturnes, enregistrées en milieu urbain par rapport aux zones rurales voisines ou par rapport aux températures moyennes régionales. Pour lutter contre les îlots de chaleur et réduire leur intensité, il apparaît nécessaire de faire évoluer nos modes constructifs (sols urbains, façades, toitures, terrasses) et les principes d'aménagement urbain.

Pour lutter de manière structurelle contre les îlots de chaleur urbains, le gouvernement a annoncé ce 14 juin 2022 un programme de renaturation urbaine afin d'accompagner les projets des collectivités. Porté par le CEREMA, l'ADEME ainsi que la Caisse des dépôts, il sera doté de 500 millions d'euros sous la forme de prêts.

Plusieurs initiatives en France comme à l'étranger, ont été mises en place ces dernières années pour réduire les îlots de chaleur en travaillant sur différents axes. En 2014, la plate-forme POPSU Europe¹ s'est intéressée aux stratégies des villes européennes face aux changements climatiques avec un focus sur les îlots de chaleur. L'ADEME a publié en 2017, un état de l'art sur le rafraîchissement urbain². En complément, le CEREMA développe des outils à destination des villes sur les îlots de chaleur urbain³ et il a créé l'Institut Carnot Clim'adapt⁴, pour déployer des solutions innovantes à l'échelle des territoires.

Le projet GROOVES⁵ (Green ROOfs Verified Ecosystem Services) mené depuis 2017 par l'Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France (ARB IdF) s'est focalisé sur l'impact des toitures végétalisées en zone urbaine dense en s'appuyant sur un échantillon de 31 toitures situées en Ile-de-France.

Comme le précise le rapport de l'Institut national de santé publique du Québec⁶, d'autres pistes existent pour réduire les phénomènes d'îlot de chaleur à l'échelle du bâtiment.

Les îlots de chaleur concernent la plupart des grandes villes et constituent une préoccupation croissante pour les collectivités. En témoigne par exemple l'initiative prise par la ville de Paris qui conduit le projet Oasis⁷ dédié notamment au bien être dans les cours des écoles. Des expérimentations sont menées en laboratoire et à l'échelle 1. Elles visent à préciser les choix à faire en termes d'investissements futurs à l'échelle des quartiers. Il est donc tout à fait essentiel que les organismes disposant de compétences sur les systèmes constructifs (bâtiment, mobilier urbain, voirie...) puissent contribuer à cette réflexion et au développement de nouvelles solutions.

¹<http://www.popsu.archi.fr/popsu-europe/themes/ilots-de-chaleur-urbains-strategies-des-villes-face-aux-changements-climatiques>

² <https://www.ademe.fr/rafraichissement-villes-connaissances-besoin>

³ <https://www.cerema.fr/fr/actualites/cerema-concoit-outil-aider-villes-s-adapter-aux-ilots>

⁴ https://www.cerema.fr/system/files/documents/2020/11/institut-carnot-climadapt_fr.pdf

⁵ <http://www.arb-idf.fr/article/toitures-vegetalisees-et-biodiversite-premiers-resultats-de-letude-grooves>

⁶ https://coeurdessciences.uqam.ca/upload/files/volet_scolaire_ressources/mesures_ilots_chaleur.pdf

⁷ <https://www.paris.fr/pages/les-cours-oasis-7389>

1.2 Objectifs du projet DIMILOT

Le projet DIMILOT vise à positionner MECD comme un contributeur sur la thématique des îlots de chaleur. Il s'agit à terme d'investiguer différentes pistes destinées à apporter une réponse globale et multi-matériaux à ces phénomènes pour les ouvrages neufs et existants.

L'objectif de DIMILOT est de développer une méthodologie MECD permettant d'évaluer les performances de systèmes constructifs multi-matériaux adaptés à l'échelle de la rue, au regard du phénomène d'îlot de chaleur. Cette méthodologie s'appuiera sur :

- > le développement d'un modèle spécifique incluant des exécutables accessibles aux membres MECD ;
- > une démarche expérimentale pour la quantification des données d'entrée du modèle ;
- > une démarche expérimentale à échelle intermédiaire pour le recalage du modèle ;
- > un protocole pour les mesures in-situ, en lien avec les données de sortie du modèle, permettant de calibrer le modèle.

Le projet Dimilot vise à permettre aux membres de l'Institut MECD :

- > de proposer des méthodes expérimentales et numériques permettant de quantifier l'apport des pistes de solutions recensées ;
- > d'accompagner le développement de matériaux, produits et systèmes constructifs adaptés à la lutte pour le rafraîchissement des villes, comme a pu le faire SOPREMA avec son système « Cool Roof »⁸.

DIMILOT doit à termes permettre de développer des systèmes constructifs multi-matériaux, horizontaux et verticaux, destinés aux ouvrages neufs et existants, conduisant à une réduction de l'intensité des îlots de chaleur. Ils seront basés notamment sur :

- > des surfaces à fort albédo ;
- > le potentiel d'évapotranspiration ;
- > la végétalisation des surfaces ;
- > l'inertie selon la période des sollicitations thermiques ;
- > ...

⁸ <https://www.soprema.fr/fr/article/dossier-thematique/le-cool-roof-c-est-quoi>

1.3 Organisation du projet DIMILOT et présentation du rapport final

Le projet DIMILOT s'est articulé autour de 5 tâches.

Tâche 1 : Coordination du projet

Tâche 2 : Analyse du retour d'expérience (chapitre 2 du présent rapport)

L'objectif de la tâche 2 a été de réaliser une synthèse sur les volets suivants :

- > bibliographie sur les îlots de chaleur : état des lieux et diagnostics, solutions investiguées à l'échelle des matériaux, produits, systèmes constructifs et des quartiers, définition d'objectifs potentiels au niveau des parois ou au niveau de l'ambiance extérieure... ;
- > analyse de l'évolution des conditions climatiques dans le futur et conséquences sur le phénomène des îlots de chaleur ;
- > identification des analyses contre-intuitives sur la phénoménologie des îlots de chaleur et l'importance de s'appuyer sur une analyse globale ;
- > positionnement des collectivités locales, entretiens (quelles sont les attentes des villes/usagers ?) Quatre échelles sont considérées : matériau, produit, système constructif, in-situ (quartier) ;
- > classification des îlots de chaleur en fonction de ses caractéristiques (amplitudes thermiques, fréquence d'occurrence, configuration du quartier/ville et son environnement...). L'objectif est d'identifier pour chaque typologie d'îlot de chaleur, les aménagements de la ville (mobiliers urbains, plantations, points d'eau, voirie...) les plus concernés en termes d'évolutions à anticiper dans le futur.

Tâche 3 : Réflexion prospective sur la modélisation (chapitre 3 du présent rapport)

La tâche 3 s'est donnée comme objectifs :

- > de réaliser une synthèse bibliographique sur la phénoménologie des îlots de chaleur en ciblant les phénomènes d'interface entre les systèmes constructifs (bâtiments, voiries, mobiliers urbains) et l'extérieur ; on s'intéresse aux propriétés surfaciques et volumiques des matériaux et aux caractéristiques des sollicitations thermiques climatiques ou humaines... ;
- > de recenser les approches en modélisation retenues dans les autres projets ;
- > de définir le cahier des charges d'un modèle.

Ces éléments sont utiles pour identifier les leviers technologiques à actionner et statuer sur le potentiel des solutions mixtes multi-matériaux (tâche 5).

Tâche 4 : Volet expérimentation - Étude de faisabilité (essais, systèmes constructifs) (chapitre 4 du présent rapport)

L'objectif de la tâche 4 est de réunir des éléments d'information d'ordre expérimental utiles à l'identification de pistes concernant des solutions constructives multi-matériaux permettant de diminuer l'intensité des îlots de chaleur (tâche 5).

Il s'agit :

- > de recenser les outils expérimentaux permettant d'évaluer l'apport d'un produit en considérant quatre échelles : matériau, produit, système constructif (mesures en laboratoire ou modélisation), in-situ (démonstrateur) ;
- > de réaliser des expérimentations exploratoires :
 - caractérisation de l'albédo et de l'émissivité des matériaux (terre cuite, béton, métal, bois) (toiture, éléments de façade, voirie) [Réalisation CTMNC],
 - réalisation d'essai de performance en laboratoire [Réalisations CERIB et FCBA],
 - réalisation d'expérimentations à l'échelle 1 (démonstrateurs) :

- développement de pavés rafraichissants (ZAC Montaudran, Toulouse) [Réalisation LMDC],
- développement de dalles de voirie (Paris, en lien avec le projet Oasis) [Réalisation CERIB],
- de définir le cas échéant le cahier des charges de nouveaux dispositifs et/ou protocoles expérimentaux.

Tâche 5 : Réflexion sur les perspectives (chapitre 5 du présent rapport)

Les objectifs de la tâche 5 ont été :

- > d'une part d'identifier des pistes concernant des solutions constructives multi-matériaux permettant de diminuer l'intensité des îlots de chaleur ;
- > et d'autre part de mener une réflexion prospective sur la suite du projet : modélisation, expérimental, développement de solutions constructives, démonstrateurs ;

2. Analyse du retour d'expérience

Auteurs : Amor Ben Larbi, Florence Bannier, Bernard Barthou, Marion Bonhomme, Sylvain Boulet, Jérôme Lozeille, Daniel Palenzuela

2.1 Introduction

Sujet d'actualité par excellence, les Îlots de Chaleur Urbains (ICU) occupent de plus en plus de place dans le domaine de la recherche et développement.

Plusieurs travaux de recherche et d'études sont consacrés à ce sujet en France, mais aussi dans beaucoup d'autres pays, notamment ceux confrontés à des épisodes caniculaires de plus en plus fréquent.

Le présent chapitre revient sur le phénomène d'ICU, notamment ses causes et ses conséquences. Le chapitre présente aussi un retour d'expérience, basé sur la littérature, sur les solutions permettant de réduire les ICU. Il présente aussi des prévisions sur l'évolutions des conditions climatiques dans les années à venir. Un paragraphe est consacré à l'influence des matériaux et de leurs propriétés thermiques et radiatives sur les ICU. Le paragraphe 4 présente une analyse contre-intuitive ainsi que les points de vigilance tenant compte de la complexité du phénomène et des interactions physiques complexes de plusieurs paramètres (propriétés des matériaux, flux d'air, végétalisation...).

2.2 Bibliographie sur les îlots de chaleur

2.2.1 Le phénomène « îlot de chaleur urbain »

L'expression « îlot de chaleur urbain » (ICU) a fait son apparition vers le milieu du XXe siècle. Elle fait référence à un phénomène d'élévation de température localisée en milieu urbain par rapport aux zones rurales voisines (cf. Figure 1). Ces îlots thermiques sont des microclimats artificiels provoqués par les activités humaines (centrales thermiques, échangeurs de chaleur...) et l'urbanisme (matériaux utilisés pour la chaussée et les façades absorbant la chaleur (couleur sombre), piégeage radiatif résultant de la géométrie des surfaces, rugosité aux vents (faible circulation d'air...)).

La différence de température entre un îlot de chaleur urbain et les secteurs environnants peut atteindre jusqu'à 12 °C. Un îlot de chaleur urbain peut être très local (à l'échelle d'un îlot urbain) ou un peu plus vaste (à l'échelle de la ville), sans pour autant dépasser l'échelle régionale.

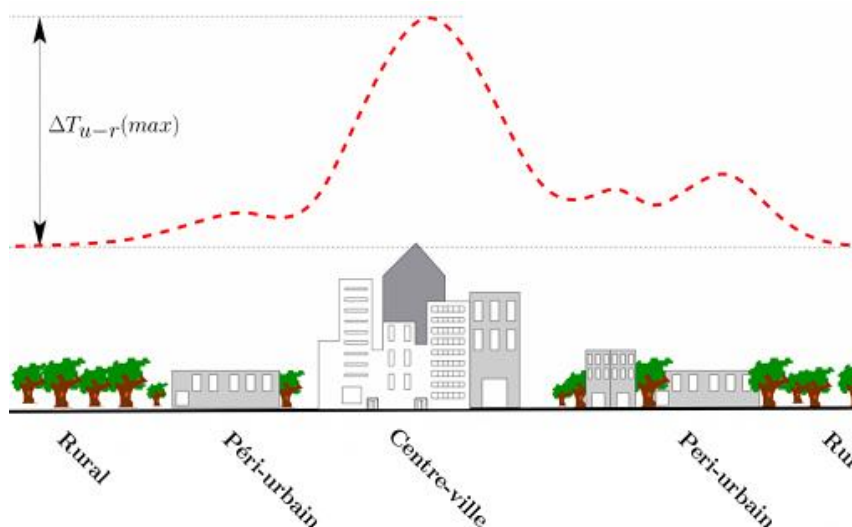


Figure 1 - Schématisation du phénomène des îlots de chaleur (Source : CEREMA)

Néanmoins, cette notion d'îlot de chaleur urbain traduit un phénomène homogène peu représentatif de la réalité. En effet, le climat urbain et plus particulièrement l'ICU s'apparente beaucoup plus à un archipel avec différents quartiers chauds plus qu'à une couche uniforme (ROSENZWEIG, C. et al. ⁹), ce qui est par ailleurs plus en accord avec la complexité et la diversité des environnements urbains¹⁰. Chaque ensemble de rues et de bâtiments forme ainsi un microclimat qui ne sera a priori pas identique à celui formé par un quartier voisin. Il est indispensable de ne pas négliger cet aspect dans l'interprétation des données météorologiques. La généralisation de mesures d'un site urbain à l'ensemble de la ville et les interprétations qui en découlent doivent être faites avec précaution. Ainsi, l'intensité de l'îlot de chaleur correspond à la différence de température entre le point le plus chaud de la ville et le milieu rural voisin⁴.

2.2.2 Causes des îlots de chaleur urbains

Une des principales causes de l'ICU est l'urbanisation (conception urbaine et matériaux). En période nocturne, la chaleur urbaine provient du bâti et du sol qui restituent la chaleur emmagasinée dans la journée. L'énergie solaire absorbée ou restituée varie selon l'albédo, l'inertie thermique du bâti, de la chaussée...

L'albédo désigne l'indice de réfléchissement d'une surface en fonction de sa couleur mais aussi de sa texture et porosité. C'est une valeur comprise entre 0 et 1. Un corps noir « parfait » a un albédo nul car il absorbe toute la lumière incidente. Par contre, un miroir 'parfait', a un albédo de 1 car il réfléchit toute la lumière incidente.

D'autres facteurs influent sur les ICU, notamment :

- > Les vents urbains et la rugosité : la circulation de l'air permet une diminution du réchauffement urbain alors qu'un vent nul ou faible, au contraire, va entraîner une stagnation de l'air et donc une absence de dispersion de la chaleur accumulée.
- > Les canyons urbains (resserrement du bâti trop important, rue étroite) participent à ce réchauffement en empêchant l'air de circuler mais ils permettent toutefois de créer des zones d'ombre en diminuant le facteur de vue du ciel.
- > Le dégagement de chaleur issu des activités humaines ou « chaleur anthropique » (climatisation, circulation de véhicules, industries...) augmente la température de l'air et a un impact sur la formation des ICU. La climatisation produit de la chaleur car elle rejette les calories extraites de l'intérieur du bâtiment vers l'extérieur.

2.2.3 Conséquences des îlots de chaleur urbains

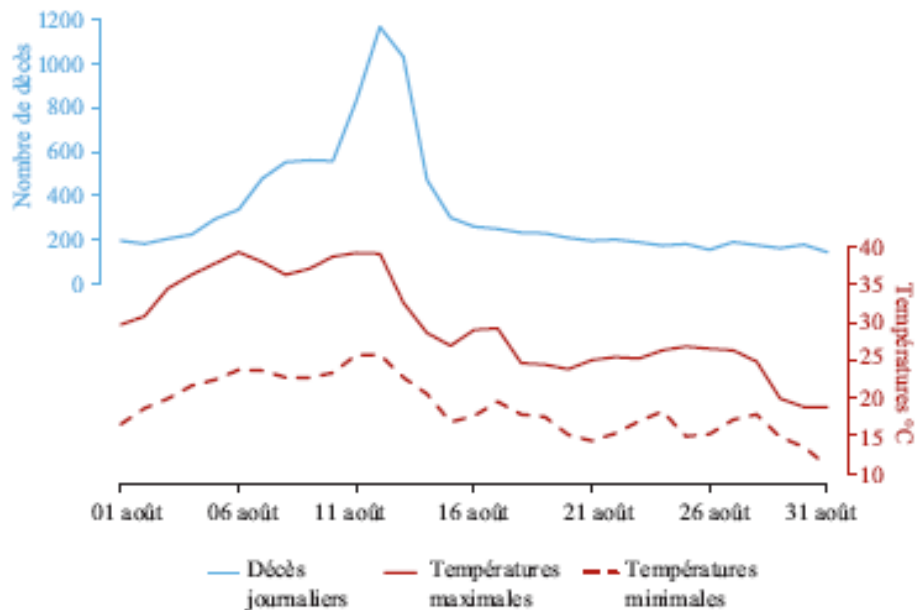
2.2.3.1 Confort et santé

Les îlots de chaleur urbains (ICU) ont un effet négatif sur le confort thermique urbain (effets d'inconfort des espaces publics et privés) et sont donc un risque pour la santé publique, pour les habitants des villes avec une augmentation des problèmes respiratoires et une surmortalité accrue notamment lorsqu'ils sont combinés à un épisode caniculaire. Épisodes qui devraient se multiplier avec la hausse des températures liée au changement climatique. Une étude de Météo France estime en effet qu'aux alentours de 2050, une canicule comme celle de 2003 se reproduira tous les 2 à 3 ans. Or, il est

⁹ C. Rosenzweig et al., Characterizing the urban heat island in current and future climates in New Jersey. *Environmental Hazards* 6(1):51-62. January 2005

¹⁰ COLOMBERT Morgane, Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville, Thèse de doctorat Génie urbain, Université Paris-Est, 2008

important de rappeler que la canicule de 2003 a été la cause d'environ 15 000 décès en France (cf. Figure 2).



Sources : Météo France, CépiDc, exploitation ORS Ile-de-France, 2009

Figure 2 - Décès journaliers et températures en Île-de-France en août 2003 (Source : ORS, 2009)

2.2.3.2 Consommation d'énergie et émissions de CO₂

Les ICU ont également un effet sur la consommation d'énergie. En été, les bâtiments climatisés ont une consommation énergétique importante et la climatisation des bâtiments rejette des calories à l'extérieur. Au contraire, en hiver, l'ICU permettrait de réduire les consommations d'énergie.

L'accentuation des phénomènes des ICU augmentera cette consommation d'énergie pour la climatisation. En fait, les ICU sont principalement observés la nuit où le refroidissement nocturne est moindre en ville que dans les zones rurales. Avec une conservation de la chaleur la nuit, la zone soumise à ICU reste donc également plus chaude la journée qui suit ce qui entraîne une augmentation du besoin de climatisation.

2.2.4 Comment réduire les îlots de chaleur urbains : Retour d'expérience

Il existe plusieurs variables sur lesquelles nous pouvons agir pour réduire les ICU :

- > la morphologie urbaine, les matériaux, la végétation, l'ombrage, la couleur des murs et des chaussées... ;
- > le bâtiment en lui-même : forme, enveloppe, couleur des façades... ;
- > la création des espaces verts et le développement des zones de fraîcheur ;
- > la place de l'eau en ville ;
- > des équipements techniques ou des lieux dédiés à la création d'îlots de fraîcheur (ombrières, brumisateurs, ventilateurs...);
- > le dégagement de chaleur anthropique (limitation et régulations de la circulation automobile...).

Plusieurs études se sont appuyées sur la modélisation de différentes stratégies pour diminuer l'intensité de l'îlot de chaleur dans plusieurs villes.

Rosenfeld et al.¹¹, et pour observer l'effet d'une diminution de l'albédo sur une ville entière, en l'occurrence ici Los Angeles (Etats-Unis), ont utilisé le modèle d'échelle méso « Colorado State University Mesoscale Model » (CSUMM). La ville a été découpée en plusieurs cellules selon un maillage de 5 x 5 km et des modifications d'albédo des toits plats ou inclinés et des routes ont été effectuées de façon à obtenir une augmentation moyenne de l'albédo pour chaque cellule de 0,13 (ce qui ne donne pas une ville blanche et aveuglante). Selon les conditions initiales choisies, le refroidissement le plus conséquent, qui arrive en début d'après-midi, est entre 2 et 4 °C. Les arbres sont bénéfiques du fait de l'ombre qu'ils procurent et de leur évapotranspiration. Les auteurs de cette étude propose une forme de programme, pour permettre une augmentation de l'albédo et une plantation plus conséquente d'arbres, qui comprend notamment la création de procédures de tests pour différents matériaux, des évaluations et des labels pour les matériaux « rafraichissants », la création d'une base de données sur les matériaux « rafraichissants », l'intégration de toits rafraichissants dans des programmes plus globaux sur la consommation énergétique et la qualité de l'air... La Figure 3, issue de l'étude de Rosenfeld et al.⁵, montre les différences de températures entre la température de surface et celle de l'air, à midi, pour différentes surfaces horizontales exposées au soleil (les conditions de vent, qui peuvent avoir une influence, ne sont pas précisées). Pour les surfaces à faible albédo, et donc qui absorbe fortement le rayonnement solaire, la différence de températures entre la surface et l'air ambiant peut atteindre 50 °C. Pour des surfaces moins absorbantes (fort albédo), comme celle recouverte de peinture blanche, la différence de température est d'environ 10 °C. L'albédo agit ainsi directement sur le refroidissement du bâti et sur l'utilisation d'air conditionné. On peut noter que la surface peinte en noir provoque une différence entre la température de surface et celle de l'air plus importante d'environ 40 °C que celle observée pour une surface peinte en blanc.

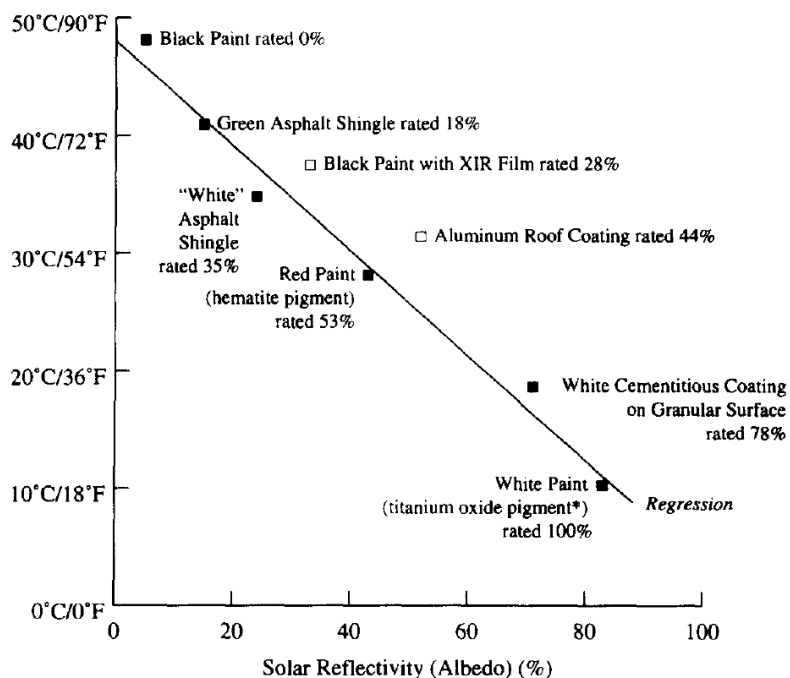


Figure 3 - Différence entre la température de surface et celle de l'air en fonction de l'albédo (Rosenfeld et al.⁵)

¹¹ ROSENFELD et al., Mitigation of urban heat island: materials, utility programs, updates. Energy and Buildings, n°22, 1995, p. 255-265

Taha¹² a modélisé les impacts de changement à grande échelle de l'albédo sur la température de l'air et la qualité de l'air (concentration en ozone). Ses modélisations ont concerné le bassin californien (SoCAB – California's South Coast Air Basin). Selon cette étude, une augmentation de l'albédo de la surface permet une diminution des températures de surface, ce qui, par voie de conséquence, diminue également la température de l'air dans les zones modifiées ou situées sous le vent de celles-ci. Pour son étude, Taha a utilisé une version du Colorado State University Mesoscale Model (CSUMM), un modèle atmosphérique, pour simuler la météorologie du bassin californien et sa sensibilité à des modifications de l'albédo des surfaces. Pour les conséquences de ces modifications météorologiques sur la qualité de l'air, le modèle Urban Airshed Model (UAM) a été utilisé. L'albédo moyen du bassin est de 0,14. Pour connaître la modification possible de l'albédo, Taha⁶ a distingué les espaces dont l'albédo est modifiable (zones résidentielles, zones de bureaux, commerces, parkings...) et les espaces sans modification possible (parc...). Pour chaque maille de 5 x 5 km, la fraction de ces deux types d'espaces a été déterminée pour pouvoir ensuite estimer l'augmentation possible de l'albédo. Pour les surfaces où l'albédo est modifiable, l'augmentation d'albédo a été fixée à 0,15 pour le cas modéré et à 0,30 pour le cas extrême. Les simulations, effectuées sur une journée d'août, suggèrent qu'une diminution de température allant jusqu'à 2 °C est possible dans certaines mailles dans le cas modéré. Dans ce cas, les diminutions les plus importantes ont lieu pour la plupart dans le centre du bassin, c'est-à-dire à Los-Angeles. Pour les alentours des diminutions de l'ordre de 1 °C sont observées. Dans le cas extrême, des diminutions de température de 4,5 °C ont lieu au centre du bassin, et pour les zones aux alentours la diminution est en moyenne de 2 °C.

Dans un livre publié en 1998, Givoni, B.¹³ signale que les surfaces ayant une couleur d'une teinte similaire (foncée comme claire) peuvent avoir un albédo différent et auront ainsi, pour des conditions identiques de température de l'air et de rayonnement solaire, des températures différentes. Givoni concède, cependant, que la couleur reste un indicateur souvent juste de la réflectivité d'une surface.

Dans un autre article, publié en 1997, Taha¹⁴ signale que les albédos des milieux urbains sont généralement compris entre 0,10 et 0,20, mais dans certaines villes ces valeurs peuvent être bien plus importantes. Les villes nord africaines en sont un bon exemple avec des albédos compris entre 0,30 et 0,45 alors que la plupart des villes américaines et européennes ont un albédo compris entre 0,15 et 0,20. Des campagnes de mesures récentes effectuées en Europe montrent également que l'albédo des surfaces urbaines européennes est remarquablement faible. Christen et al.¹⁵ estiment que l'albédo de Bâle (Suisse) est aux alentours de 0,10. Celui de Marseille est de 0,08 selon Roberts et al.¹⁶. Piringer et Joffre¹⁷ signalent que plus les bâtiments sont hauts et denses, plus l'albédo est faible. Des matériaux foncés et l'ombre dans les rues étroites diminue significativement l'albédo et suggèrent que les villes denses européennes sont de meilleurs absorbeurs que la plupart des surfaces des villes nord-

¹² TAHA, H., Modeling the impacts of large-scale albedo changes on ozone air quality in the south coast air basin. Atmospheric Environment, vol.31, n°11, 1997, p. 1667-1676

¹³ GIVONI, B. Climate considerations in building an Urban Design. John Wiley & Sons, 1998, 480 p

¹⁴ TAHA, H. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. Energy and Buildings. vol.25, n°2, 1997(a), p. 99-103

¹⁵ CHRISTEN, A. VOGT, R. ROTACH, M.W. Profile measurements of selected turbulence characteristics over different urban surfaces. In: Actes du 4th International Conference on Urban Air Quality, Prague, 25-27 mars 2003, p. 408-411

¹⁶ ROBERTS, Sarah M. OKE, TR. LEMONSU, A. GRIMMOND, CSB. JACKSON, P., Sensitivity of surface-atmosphere energy exchanges within urban areas derived from simulations. In: 84th AMS Annual Meeting: Symposium on planning, nowcasting, and forecasting in the urban zone, Seattle, Etat-Unis, 12-15, janvier 2004

¹⁷ PIRINGER, M. JOFFRE, S. (éds.). The urban surface energy budget and mixing height in European cities: data, models and challenges for urban meteorology and air quality. Final Report of Working Group 2 of Cost-715 Action, 2005, 198 p

américaines¹¹. Les chiffres de Sailor et Fan¹⁸ le confirment en estimant que l'albédo des villes nord-américaines est compris entre 0,15 et 0,20.

À l'échelle du bâtiment, la forme du bâtiment, son orientation, la prise en compte des aspects bioclimatiques, la couleur des murs, la taille et la localisation des fenêtres, l'isolation, la ventilation, la présence ou non de protection solaire sont autant de facteurs qui, directement ou indirectement, influencent le phénomène d'ICU et son impact sur le bâtiment. En jouant sur tous ces facteurs et en ayant une réflexion globale sur le bâtiment, on peut favoriser et assurer le confort thermique de l'habitant et si cela ne règle pas complètement le problème des ICU, cela permet néanmoins de limiter les impacts dus aux fortes chaleurs.

La végétalisation des toitures et des façades est une solution souvent mise en avant, et le développement de modèles de bâtiments couplés à l'ambiance thermique de la rue a permis de montrer le gain potentiel sur les besoins de climatisation, de l'ordre de 35 % en climat océanique et dans une configuration confinée de « rue canyon »¹⁹.

Dans un article publié en 2018 sur le site Construction21, Emmanuel Bozonnet de l'université de La Rochelle, revient sur les techniques passives de bâtiments pour rafraîchir les quartiers. Selon E. Bozonnet, les principales techniques de rafraîchissement passif applicables au bâtiment sont généralement aussi de bonnes solutions de rafraîchissement urbain (Figure 4).

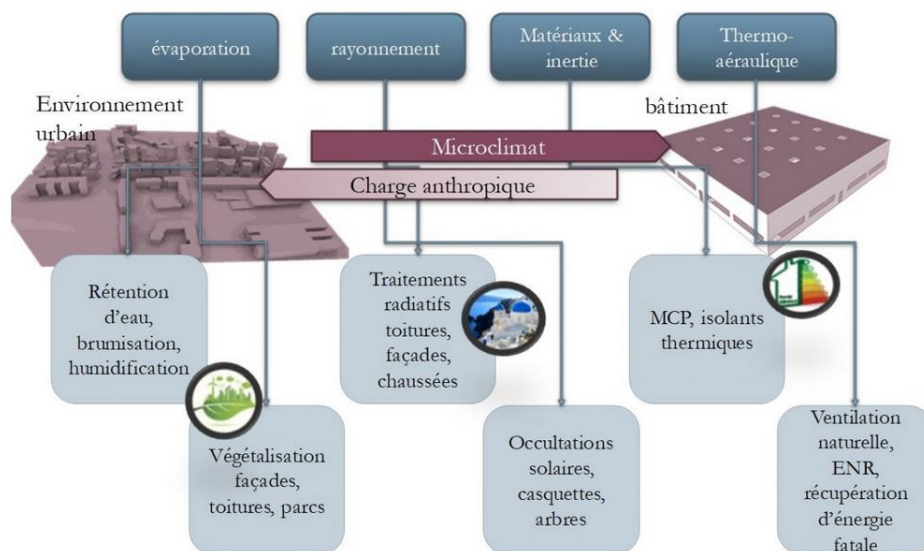


Figure 4 - Techniques de rafraîchissement passif des bâtiments et des îlots de chaleur urbains (ICU)

La végétalisation des toitures et des façades est une solution souvent mise en avant, et le développement de modèles de bâtiments couplés à l'ambiance thermique de la rue a permis de montrer le gain potentiel sur les besoins de climatisation, de l'ordre de 35 % en climat océanique et dans une configuration de confinée de « rue canyon »²⁰ (cf. Figure 5). Ces effets directs sur l'intérieur

¹⁸ SAILOR, D.J. FAN, H., Modeling the diurnal variability of effective albedo for cities. Atmospheric Environment, vol.36, n°4, 2002, p. 713-725

¹⁹ Escourrou, Gisele, La specificite du climat de l'agglomeration parisienne/The unique character of the Paris urbanarea'sclimate. Revue de Geographie de Lyon 65 (2): 85 89. 1990

²⁰ R. Djedjig, E. Bozonnet, R. Belarbi, Modeling green wall interactions with street canyons for building energy simulation in urban context, Urban Clim. 16 (2016) 75–85. doi:10.1016/j.uclim.2015.12.003

et indirects sur l'atténuation de l'îlot de chaleur local ont été également mesurés expérimentalement²¹ (cf. Figure 5). Les effets directs sur le bâtiment se traduisent par une baisse des températures de surfaces et une dissipation de l'énergie solaire absorbée par évapotranspiration. L'effet de surchauffe (lié au confinement thermique) mesuré sur la température moyenne de la rue est, ainsi, atténué de 33 % avec la façade végétale.

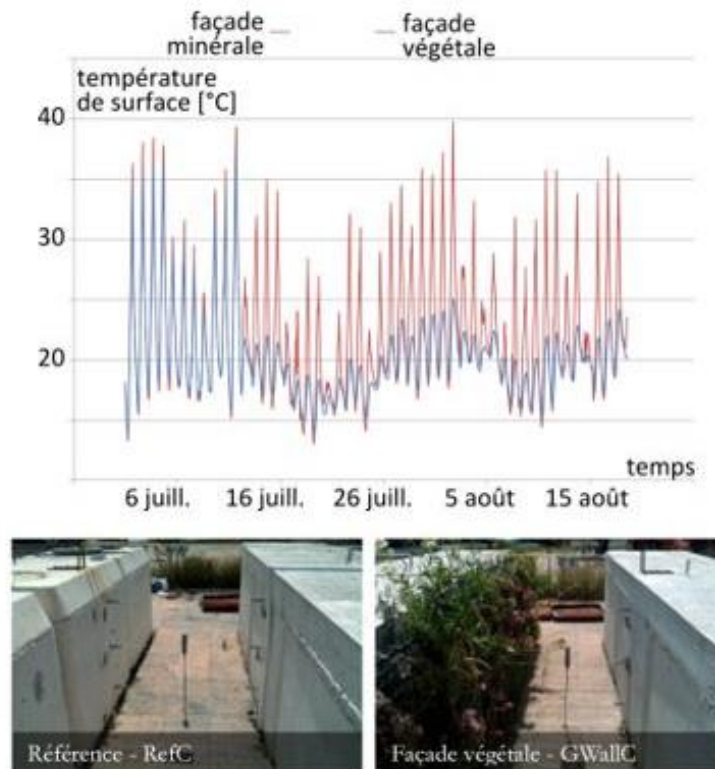


Figure 5 - Évolution de la température de façade avant et après mise en place de la façade végétale sur un modèle réduit de rue canyon (1/10^e)

2.2.5 Matériaux de surface et îlots de chaleur urbains

Les propriétés thermiques et radiatives des matériaux utilisés en milieu urbain ont une incidence importante sur les ICU. La réflectivité (ou albédo) des matériaux vis-à-vis du rayonnement solaire, tout comme leur émissivité, sont les paramètres radiatifs les plus importants.

L'utilisation de matériaux à fort albédo réduit la quantité de rayonnement solaire absorbé par l'enveloppe du bâtiment et la structure urbaine, ce qui permet de conserver leurs surfaces à une température plus fraîche. La diminution de la température de surface réduit également l'intensité du rayonnement infrarouge. Les températures de l'air ambiant, localement et sous le vent, sont alors moins importantes du fait de flux de chaleur convectifs plus faibles au-dessus de surfaces plus froides⁶.

Pomerantz et al.²² ont travaillé sur les effets des températures des chaussées sur la température de l'air dans les grandes villes, mettant ainsi en relation l'albédo des rues et la variation journalière de la température de l'air. Des mesures de l'albédo et de la température de surface de plusieurs chaussées

²¹ R. Djedjig, E. Bozonnet, R. Belarbi, Experimental study of the urban microclimate mitigation potential of green roofs and green walls in street canyons, *Int. J. Low-Carbon Technol.* 10 (2015) 34–44. doi:10.1093/ijlct/ctt019

²² POMERANTZ, M. PON, B. AKBARI, H. CHANG, S.-C. The Effect of Pavements' Temperatures On Air Temperatures in Large Cities [en ligne]. Avril 2000, [réf. du 10 octobre 2008], 22 p. Disponible sur: <http://eetd.lbl.gov/HeatIsland/PUBS/2000/43442rep.pdf>

en béton bitumineux ont été effectuées dans la baie de San Francisco (États-Unis). Les albédos dépendent de l'âge de la chaussée. Le choix des chaussées pour les mesures s'est fait sur deux critères. Le premier était d'obtenir un large éventail de chaussées en béton bitumineux avec l'objectif de s'intéresser aux albédos de chaussées existantes. Le second était de contrôler l'influence du vieillissement sur l'albédo des chaussées. Les chaussées en béton bitumineux sont composées d'asphalte et d'un agrégat minéral (granulats) dont la proportion (en volume) est d'environ 15 % et 85 %, respectivement. L'asphalte est noir, avec un albédo d'environ 0,05, et il recouvre les particules de l'agrégat (majoritairement de couleur claire) dans l'objectif de les lier ensemble. Une nouvelle chaussée est donc complètement noire, mais lorsque l'asphalte disparaît sous l'effet du roulement, l'agrégat fait surface, apparaît et l'albédo se rapproche de l'albédo de l'agrégat. De plus, l'asphalte lui-même devient plus clair du fait de l'oxydation. Les mesures indiquent qu'une chaussée avec un béton bitumineux frais a un albédo d'environ 0,04 à 0,05. Les chaussées qui ont plus de cinq ans ont un albédo moyen de $0,12 \pm 0,03$. Pomerantz et al.¹⁶ ont également mesuré la température de surface. La figure 6 montre les mesures horaires des températures de surface pour une chaussée ayant un albédo de 0,04 (courbe haute) et un de 0,16 (courbe basse). Les deux chaussées sont distantes de 2,6 km et les données ont été recueillies le 17 septembre 1998. L'écart entre les deux courbes est important et ne peut s'expliquer uniquement par la différence d'albédo entre les deux chaussées selon Pomerantz et al. (2000). Les conditions climatiques (vent, ombre...) devaient être légèrement différentes modifiant ainsi l'historique du réchauffement par le soleil et du refroidissement par le vent des deux chaussées.

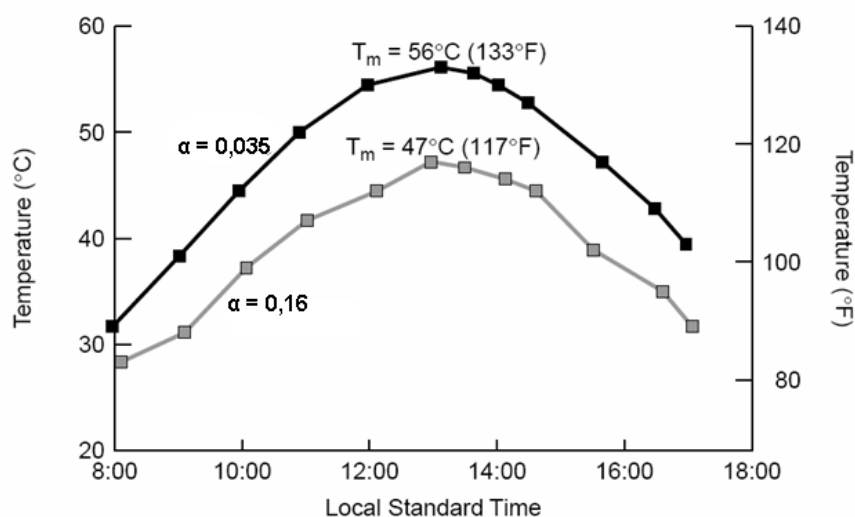


Figure 6 - Températures de surface de chaussées en béton bitumineux en fonction de l'heure pour deux albédos différents, Concord (Californie, États-Unis), le 17 septembre 1998 (Pomerantz et al.¹⁶)

En toiture de bâtiment, les revêtements d'étanchéité blanc dit « cool roof » sont de plus en plus utilisés. Leur réflectivité (ou albédo) assez élevée comparée à celle de revêtement traditionnel (sombre) permet une réduction assez importante de la température de surface (cf. Figure 7 et Figure 8).

Développer à l'origine pour pallier aux problèmes d'inconfort estival à l'intérieur du bâtiment, la technologie « cool roof » est de plus en plus recommander dans le traitement du phénomène ICU. Si elle commence à être connue en France, la technologie des « cool roof » est bien connue et assez utilisée dans plusieurs pays comme les États-Unis.

L'importance du recours à cette technologie c'est manifester récemment par la publication au journal officiel du 19 Juillet 2021 d'un arrêté qui permet de prendre en compte le « Solar reflectance index » des toitures dans l'obtention d'un certificat d'économie d'énergie (CEE). Le solar reflectance index tient compte de l'albédo et de l'émissivité de la toiture.

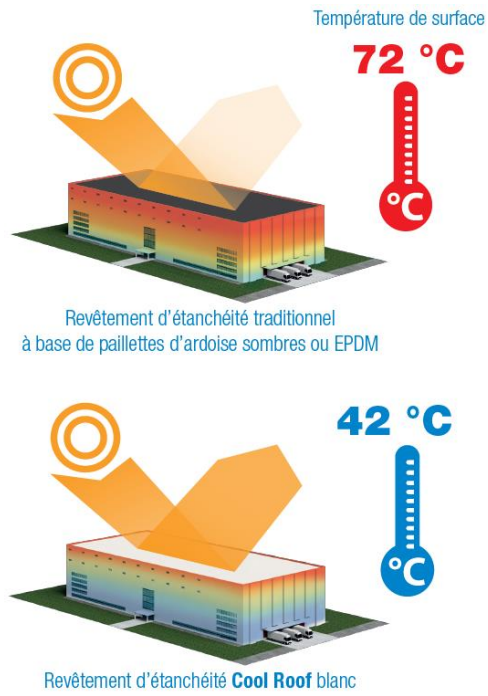


Figure 7 - Températures de surface d'une toiture avec un revêtement traditionnel sombre et avec un revêtement blanc « cool roof » (Figure SOPREMA)



Figure 8 - Thermographie infrarouge d'une toiture avec un revêtement d'étanchéité « cool roof » (Figure SOPREMA)

2.3 Évolution des conditions climatiques

Selon Météo-France, sur la base d'un recensement des vagues de chaleur depuis 1947 (cf. Figure 9), la fréquence et l'intensité des événements caniculaires a augmenté au cours des trente dernières années. Entre 1982 et 2016, les épisodes ont été sensiblement plus nombreux que ceux de la période 1947-1980, de durée équivalente. La canicule de l'été 2003 (du 2 au 17 août) est l'événement le plus intense que la France a connu depuis au moins 1947. D'ailleurs, c'est l'épisode caniculaire de 2003 qui est utilisé comme référence pour l'évaluation du confort d'été dans la réglementation RE 2020. Les deux épisodes de juin et juillet 2019 ont été aussi particulièrement marquants.

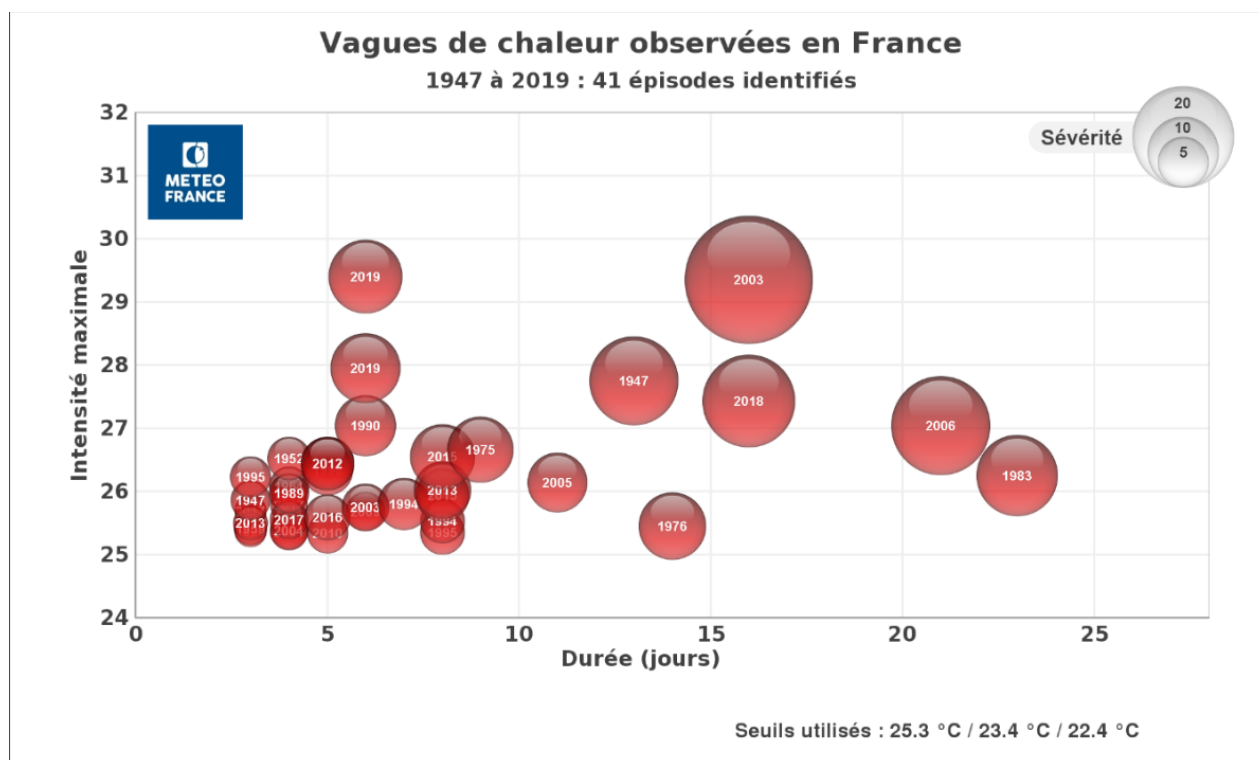


Figure 9 - Vague de chaleur observées en France de 1947 à 2019 (source : Météo-France)

La hausse des températures en France métropolitaine se poursuit au cours du XXI^e siècle, quel que soit le scénario considéré. Sans politique climatique, le réchauffement pourrait atteindre 4 °C à l'horizon 2071-2100 par rapport à la période 1976-2005.

En métropole dans un horizon proche (2021-2050) :

- > une hausse des températures moyennes entre 0,6 et 1,3 °C (plus forte dans le Sud-Est en été) ;
- > une augmentation du nombre de jours de vagues de chaleur en été, en particulier dans les régions du quart sud-est ;
- > une diminution du nombre de jours anormalement froids en hiver sur l'ensemble de la France métropolitaine, en particulier dans les régions du quart nord-est.

D'ici la fin du siècle (2071-2100), les tendances observées en début de siècle s'accroissent, avec notamment :

- > une forte hausse des températures moyennes pour certains scénarios : de 0,9 °C à 1,3 °C pour le scénario de plus faibles des émissions de gaz à effet de serre (RCP 2.6), mais pouvant atteindre de 2,6 °C à 5,3 °C en été pour le scénario de croissance continue des émissions (RCP 8.5) ;

- > un nombre de jours de vagues de chaleur qui pourrait dépasser les 20 jours au sud-est du territoire métropolitain pour le scénario RCP 8.5 ;
- > la poursuite de la diminution des extrêmes froids ;
- > des épisodes de sécheresse plus nombreux dans une large partie sud du pays, pouvant s'étendre à l'ensemble du pays ;
- > un renforcement des précipitations extrêmes sur une large partie du territoire, mais avec une forte variabilité des zones concernées.

Le dernier rapport du Groupe intergouvernemental sur le climat (GIEC) d'août 2021²³ est encore plus alarmant que ces prédécesseurs. Dans tous les scénarios envisagés, du plus optimiste au plus pessimiste, la température mondiale devrait atteindre + 1,5 °C, par rapport à l'ère pré-industrielle, autour de 2030, soit dix ans plus tôt que la précédente estimation du GIEC il y a trois ans. Le plus pessimiste des scénarios envisage un réchauffement compris entre 3,3 et 5,7 °C. Ce premier volet (sur trois) du sixième rapport d'évaluation du GIEC, dont les deux autres parties, portant sur les impacts et sur les solutions, ont été achevées en 2022, pointe du doigt l'impact de l'homme sur le changement climatique. Il devient indiscutable que les activités humaines sont à l'origine du changement climatique mondial avec l'effet réchauffant des gaz à effet de serre. Plus aucun doute non plus sur le fait que les activités humaines affectent de très nombreux événements météorologiques et climatiques extrêmes (vagues de chaleur, pluies torrentielles, sécheresses, cyclones tropicaux...), rendus plus fréquents et plus intenses. Certains événements récents, comme les vagues de chaleur de juin 2019 en France, auraient été très improbables sans l'influence de l'homme sur le climat. Cette tendance va se poursuivre au cours des prochaines décennies.

2.4 Analyses contre-intuitives et points de vigilance

Le climat urbain est dû à des interactions physiques complexes avec la contribution du bilan hydrique, des échanges thermo-radiatifs, des flux d'air...

Le traitement de l'îlot de chaleur urbain doit donc tenir compte de plusieurs paramètres simultanément.

2.4.1 Densification urbaine et îlots de chaleur

Alors que les développements urbains du siècle dernier ont favorisé un urbanisme fonctionnel où activités, logements et loisirs sont localisés dans des zones différentes et séparées, la densification permet d'implanter de nouvelles fonctions urbaines dans des quartiers monofonctionnels, sans augmenter l'emprise spatiale de la ville, et réduisant ainsi les déplacements et donc les nuisances qui leur sont attribués : consommation d'énergie, pollution, nuisances sonores...

Cependant, la forme urbaine, la hauteur des bâtiments, la largeur des rues..., influent sur la formation des îlots de chaleur urbains. Des études réalisées depuis les années 90, comme celle réalisée par G. Escourrou¹⁹ préconisaient plutôt un urbain diffus, où les bâtiments étaient disposés au milieu d'espaces verts, notamment pour éviter les contrastes thermiques. Les contrastes thermiques créent des brises (vents faibles se déplaçant des points froids vers les points chauds) qui favorisent la concentration des polluants vers les espaces qui se trouvent déjà être les plus chauds de la ville. De plus, les contrastes thermiques augmentent la sensation de mal-être lors des fortes chaleurs : comme

²³ Changement climatique 2021-2022. Groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat. <https://www.ipcc.ch/reports/>

le montre le projet «Formes urbaines, modes d'habiter et climat urbain dans le périurbain toulousain»²⁴.

Néanmoins, Il ne s'agit pas de nier la nécessité de densification et de lutte contre l'étalement urbain, mais de la pondérer en affirmant que la construction de la ville sur la ville doit se faire de manière raisonnée et modulée, et une attention particulière doit être accordée aux opérations de densifications dans les villes susceptibles d'avoir des îlots de chaleur.

2.4.2 Inertie thermique

Les matériaux généralement utilisés pour la chaussée et les façades urbaines apportent une inertie thermique significative. L'inertie thermique est la capacité d'un système à s'opposer à un changement, dans le cas présent une variation de température. Ce principe général est applicable aux ambiances intérieures des bâtiments mais également aux ambiances extérieures urbaines.

De façon simplifiée, le comportement inertiel d'un système thermique dépend essentiellement de trois paramètres :

- > la quantité de chaleur qui peut être stockée/déstockée ;
- > de la vitesse de stockage/déstockage (puissance) ;
- > des caractéristiques de la sollicitation (période en particulier).

Si l'inertie permet, dans les périodes de forte chaleur, d'éviter une élévation trop rapide des températures, pour être pleinement efficace, cela suppose cependant deux conditions :

- > la quantité de chaleur stockable et la vitesse de stockage doivent être correctement dimensionnés par rapport à l'amplitude et la durée de la sollicitation ;
- > si l'inertie thermique du système n'est pas suffisante par rapport à l'importance de la sollicitation, il est nécessaire de prévoir une capacité de décharge du système par exemple lorsque les fluctuations de la sollicitation le permettent.

Dans le cas des îlots de chaleurs urbains, cette analyse ouvre vers plusieurs pistes de principe :

- > réduction de l'inertie de la zone urbaine mais avec disposition de rafraîchissement permettant d'éviter une élévation trop rapide des températures au début de chaque cycle de sollicitation ;
- > augmentation de l'inertie thermique en regard de l'importance de la sollicitation (par exemple en France métropolitaine la température du sol est constante à environ 12 °C, toute l'année, entre 5 et 10 m de profondeur) ;
- > conservation d'une inertie moyenne à forte pour pouvoir amortir les sollicitations de courtes périodes (ou durées) mais avec disposition de rafraîchissement ou d'évacuation des puissances accumulées pour passer les sollicitations les plus importantes et longues.

2.4.3 Végétation urbaine

La végétation urbaine peut avoir des effets contre intuitifs sur le microclimat urbain.

2.4.3.1 Impact sur l'îlot de chaleur urbain

Globalement, l'impact de la végétation haute est tout à fait bénéfique pour atténuer l'effet d'îlot de chaleur urbain et améliorer le confort des piétons, notamment en raison de l'ombre qu'elle procure.

²⁴ Sinda Haouès-Jouve, Formes urbaines, modes d'habiter et climat urbain dans le périurbain toulousain. Rapport (halshs-01019268). 2010

Cependant, des précautions doivent être prises dans les choix de végétalisation de la ville afin de tenir compte du stress hydrique et du piégeage radiatif des arbres.

Dans un contexte de changement climatique, la fréquence et l'intensité des sécheresses devraient augmenter et la végétation urbaine pourrait être exposée à un stress hydrique croissant, exacerbé par l'îlot de chaleur urbain (David et al., 2017²⁵). Dans cette situation, les végétaux réduisent fortement leur évapotranspiration et contribuent moins à la réduction des températures d'air (De Munck, 2013²⁶). Par ailleurs, en cas de stress extrême, certaines espèces peuvent perdre leurs feuilles, ce qui limite également le blocage du rayonnement solaire.

Un autre phénomène à prendre en compte est le piégeage radiatif des arbres, qui peut conduire à des augmentations de température la nuit. En parallèle, les arbres vont réduire les vitesses de vent, ce qui à l'échelle de la ville peut conduire à limiter la dissipation de la chaleur. Plusieurs études ont ainsi montré que la canopée des arbres peut retenir de la chaleur (Taha et al., 1991²⁷ ; Souch et Souch, 1993²⁸ ; Liangmei et al., 2008²⁹ ; De Munck, 2013²⁵). Cet effet est accentué quand les arbres sont implantés au-dessus d'un sol minéral (Souch et Souch, 1993²⁷).

Le choix d'espèces, leur irrigation éventuelle et leur lieu d'implantation sont donc des critères à intégrer dans une stratégie de lutte contre l'îlot de chaleur urbain.

2.4.3.2 Pathologies de l'enveloppe et acceptabilité

La végétalisation des bâtiments pose aussi la question des pathologies qui peuvent impacter l'enveloppe du bâtiment, du fait de l'humidité et du poids supplémentaire. La conception et la maintenance des dispositifs sont essentielles.

L'acceptabilité de la végétation est aussi un facteur limitant. Il arrive que les habitants rechignent à l'implantation d'arbres devant leur logement, en raison de l'ombre trop importante qu'ils pourraient provoquer, ou encore de l'entretien contraignant qu'ils peuvent générer (taille, ramassage de feuilles...). Il peut également arriver que cette végétation et l'irrigation qui l'accompagne attirent des espèces animales invasives telles que les moustiques. Cependant, ce phénomène reste rare : dans la plupart des cas, le système d'irrigation est conçu de manière à ce qu'aucune eau stagnante ne puisse s'accumuler (Verhulst, 2020³⁰).

²⁵ David, A. J., Boura, A., Lata, J.-C., Rankovic, A., Kraepiel, Y. et al. (2017). Street trees in Paris are sensitive to spring and autumn precipitation and recent climate changes, *Urban Ecosystems*. Springer Verlag, 13 p. 10.1007/s11252-017-0704-z

²⁶ De Munck, Cécile. Modélisation de la végétation urbaine et des stratégies d'adaptation au changement climatique pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville. PhD, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2013

²⁷ Taha, H., H. Akbari et A. Rosenfeld. 1991, «Heat island and oasis effects of vegetative canopies : Micro-meteorological field-measurements», *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 44, no2, p. 123–138. Cited By (since 1996)38

²⁸ Souch, C. et C. Souch. 1993, «The effect of trees on summertime below canopy urban climates: a case study bloomington, indiana», *J. Arboricult.*, vol. 19, p. 303–312

²⁹ Liangmei, H., L. Jianlong, Z. Dehua et Z. Jiyu. 2008, «A fieldwork study on the diurnal changes of urban microclimate in four types of ground cover and urban heat island of nanjing, china», *Building and Environment*, vol. 43, no1, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.025, p. 7 – 17

³⁰ Verhulst, L., 03 décembre 2020, « Les façades vertes provoquent-elles l'invasion de moustiques? », *architectura.be*, <https://architectura.be/fr/dossiers/facades-vertes/50291/les-facades-vertes-provoquent-elles-linvasion-de-moustiques>

2.5 Positionnement des collectivités territoriales

Dans la lutte contre la formation des îlots de chaleur urbains, l'État tient un rôle à l'évidence important pour fixer les bases et les objectifs, mais l'échelon le plus approprié pour mettre en place des mesures concrètes s'avère plutôt être celui des collectivités territoriales (régions, communautés d'agglomération, communes...) qui peuvent traduire leurs ambitions dans des documents d'urbanisme comme les SCoT, les SRADT (schémas régionaux d'aménagement et de développement du territoire) ou dans des plans d'orientations.

Les collectivités territoriales sont de plus en plus demandeuses de nouvelles solutions pour adapter les territoires au changement climatique, notamment dans la lutte contre les îlots de chaleur urbains. Et elles ont aussi un besoin croissant d'outils d'aide à la décision.

Dans le cadre du réaménagement d'une place centrale de la ville (la place Delille), la Métropole de Clermont-Ferrand a voulu agir sur le phénomène d'ICU et le confort d'été au sein de l'espace public. Avec le CEREMA et l'agence d'urbanisme locale, la Métropole a entrepris de caractériser le phénomène par une instrumentation fixe et mobile sur la place et ses abords, pour relever les températures et l'hygrométrie (l'humidité) de jour comme de nuit, aussi bien en été qu'en hiver. Le projet combine des mesures avec le ressenti des habitants afin d'objectiver le phénomène d'ICU. Il est apparu que la place Delille est plus chaude la nuit, de 2 à 3 °C, que la périphérie, car la chaleur accumulée durant la journée est restituée la nuit. Les causes de ce phénomène d'ICU sont ensuite analysées, pour établir un référentiel qui servira de base à la mise en œuvre de la stratégie future. L'expérimentation menée à la place Delille sera ensuite étendue à d'autres communes.

Le CEREMA réalise aussi, avec la métropole du Grand Nancy, une étude de la vulnérabilité des quartiers aux îlots de chaleur urbains, en croisant des indicateurs socio-démographiques, de qualité constructives et énergétique du bâti, de manière à identifier des zones à enjeu et permettre la mise en œuvre d'actions d'adaptation via les documents d'urbanisme.

Pour la région parisienne, plusieurs travaux ont été menés sur le phénomène d'ICU, notamment depuis la canicule de 2003. Afin d'améliorer la connaissance de l'îlot de chaleur parisien, l'Apur a assisté Météo France et le CSTB de 2007 à 2012 dans le programme de recherche EPICEA (Étude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Échelle de l'Agglomération parisienne). L'Apur a, en complément de ce travail de recherche, réalisé des reportages thermographiques de l'espace public parisien afin de permettre au grand public une meilleure compréhension des phénomènes climatiques urbains.

À Marseille, et dans sept autres communes, la métropole a lancé, récemment, la première phase d'une étude visant à localiser les îlots de chaleur. L'objectif étant d'adapter la planification urbaine au changement climatique. Des capteurs seront pour cela installés dans 30 sites, situés dans des communes urbaines comme Marignane ou La Ciotat et d'autres plus petites comme Ensues ou Gémenos. Ciblés par satellite, ces points sont répartis en points chauds, intermédiaires et frais. Ils seront aussi complétés par des prises de température réalisées à vélo. La métropole espère ainsi sélectionner une quinzaine de sites qui feront l'objet d'une deuxième phase d'étude.

Toulouse Métropole déploie plusieurs dispositifs innovants de suivi et de lutte contre les îlots de chaleur urbain (ICU) sur son territoire. Ces actions s'inscrivent dans le volet Adaptation de son Plan Climat Air Énergie Territorial (PCAET). Les services du Développement durable de Toulouse Métropole ont profité de la proximité du Centre National de Recherche en Météorologie et de son équipe de climatologie urbaine pour créer un observatoire urbain et environnemental, et développer des projets de collaboration innovants. La mise en place du Monitoring des îlots de chaleur urbain représente l'un de ces projets : 20 stations météo connectées permettent depuis 2017 de réaliser ce monitoring,

40 nouvelles stations ont été installées depuis. L'analyse de ces données permettra de faire des préconisations en matière d'aménagement urbain, de végétalisation, d'irrigation et de réduction des risques pour la santé.

2.6 Classification des îlots de chaleur

Basé sur la méthode LCZ (Locale Climate Zones), développé par Stewart and Oke (Department of Geography, University of British Columbia, Vancouver, Canada) en 2012³¹, les îlots urbains sont décrits en 17 classes correspondant à des zones climatiques.

Les LCZ sont définies comme des entités spatiales homogènes dans leur distribution des températures de l'air et de surface comprise entre 100 et 1 000 mètres sur un plan horizontal. Chaque LCZ exprime une géométrie caractéristique et une occupation du sol qui génère un climat spécifique – une température de surface unique – par temps calme et ciel dégagé. Les zones sont différenciées par leurs propriétés de surface qui influencent directement la température de référence (1,5 à 2 m au-dessus du sol), telle que la part de végétalisation, la hauteur et l'espacement du bâti et des arbres (rugosité/compacité), l'humidité du sol et les flux de chaleur anthropogéniques. Selon ces différenciations, la classification aboutie à 17 zones climatiques : 10 de type « bâti » (« building ») et 7 de type « non bâti » (« land cover »).

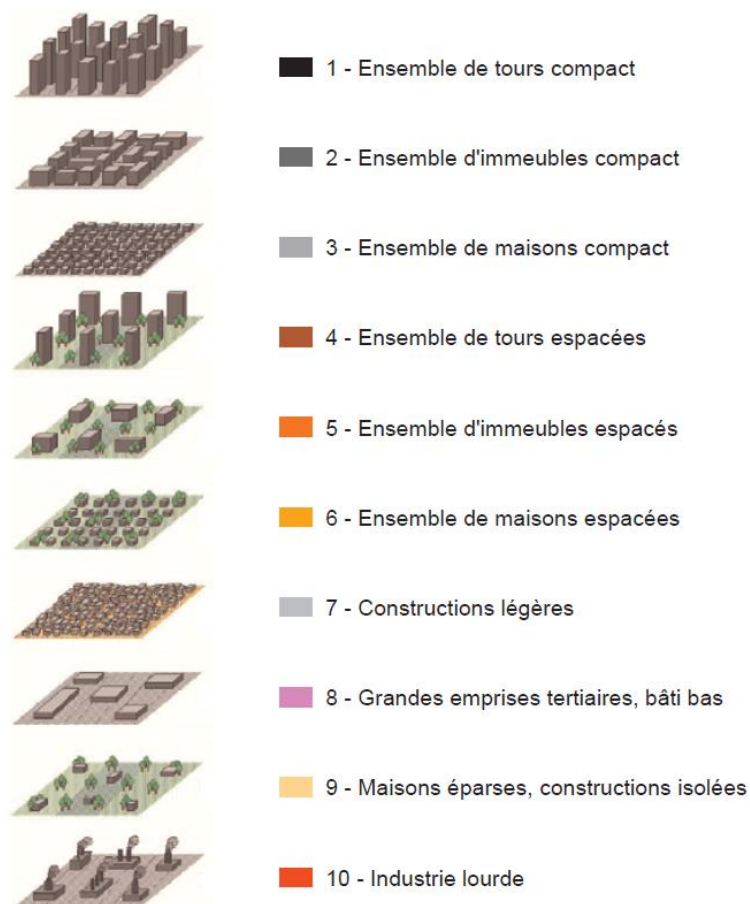


Figure 10 - Zones climatiques locales de type « bâti »

³¹ I.D. Stewart, T.R. Oke, Local climate zones for urban temperature studies. Bulletin of the American Meteorological Society, 93(12) (2012) - 1879-1900

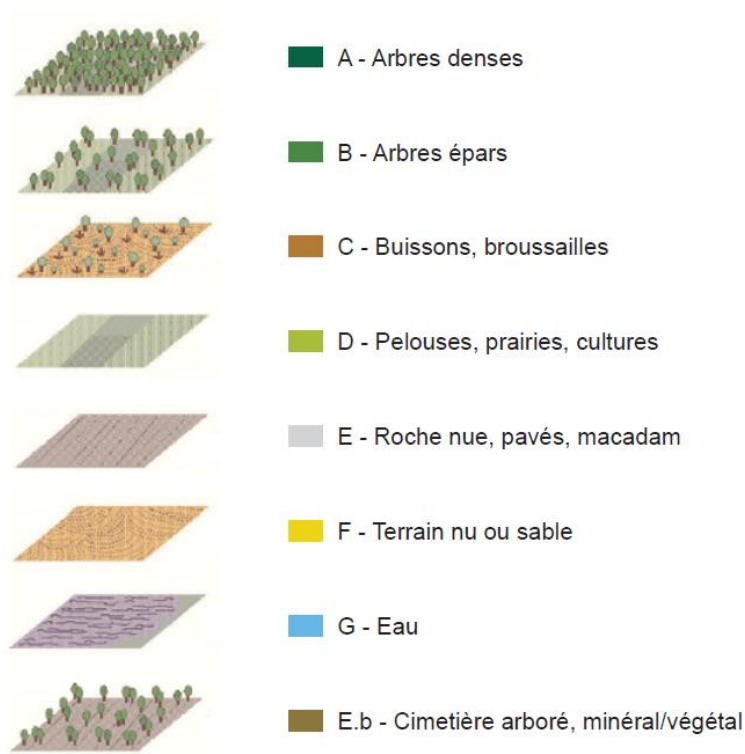


Figure 11 - Zones climatiques locales de type « non bâti »

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit le phénomène d'îlot de Chaleur Urbain (ICU) ainsi que ses principales causes, liées notamment à l'urbanisme (conception urbaine, choix des matériaux...). D'autres facteurs influent sur les ICU comme le vent, les canyons urbains ou encore le dégagement de chaleur issu des activités humaines ou « chaleur anthropique ». Les ICU peuvent affecter très significativement la qualité de vie dans les centres villes et engendré des problèmes de santé voire une surmortalité accrue notamment lorsqu'ils sont combinés à un épisode caniculaire. Les ICU ont également un effet sur la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ dû notamment à un recours accru à la climatisation en été.

Plusieurs travaux de recherche et des études sont consacrés à ce sujet en France et dans d'autres pays, notamment ceux confrontés à des épisodes caniculaires de plus en plus fréquent. Ce chapitre présente un panel de projets qui visaient la recherche de solutions pour réduire les ICU.

Les matériaux utilisés en milieu urbain ont une forte incidence sur les ICU. La réflectivité (ou albédo) des matériaux vis-à-vis du rayonnement solaire, tout comme leur émissivité, sont les paramètres radiatifs les plus importants. Néanmoins, les systèmes multi-matériaux ainsi que leurs performances au regard des ICU sont presque absent de la littérature spécialisée.

3. Modélisation des phénomènes liés aux îlots de chaleur

Auteurs : Marion Bonhomme, Bernard Barthou, Amor Ben Larbi, Sylvain Boulet, Salah-Eddine Ouldboukhitine, Daniel Palenzuela

3.1 Introduction

Nous avons pu décrire dans le chapitre précédent comment les matériaux urbains, les bâtiments, l'usage du sol et les activités humaines modifiaient le microclimat urbain et provoquaient une différence de température entre la ville et la campagne.

Ces phénomènes physiques ont été l'objet de nombreux travaux visant à modéliser l'îlot de chaleur urbain afin d'en mesurer les effets et d'évaluer les leviers d'action potentiels.

Ce chapitre présente les méthodes de modélisation des différents phénomènes physiques influant le microclimat urbain et les modèles numériques correspondants à ces méthodes. Nous verrons que selon les phénomènes étudiés, les échelles et résolutions spatiales et temporelles des modèles sont très différentes, ainsi que les entrées et sorties des modèles.

3.2 La modélisation de l'îlot de chaleur urbain

Dès 1977, Nunez et Oke ont proposé une formulation du bilan énergétique urbain intégrant l'absorption du rayonnement de grande et courte longueur d'onde, l'évaporation, les émissions de chaleur anthropique et le blocage du vent.

Toujours d'actualité aujourd'hui, ce bilan énergétique d'une surface urbaine exprime les quantités d'énergies échangées au sein de cette surface. Il peut s'écrire de la façon suivante³² :

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A$$

Où :

Q^* est le rayonnement net ,

Q_F le flux de chaleur artificiel (anthropique)

Q_H le flux de chaleur sensible,

Q_E le flux de chaleur latente,

ΔQ_S la variation de la quantité de chaleur stockée par la zone urbaine (ou, par raccourci, flux de chaleur stockée),

ΔQ_A le flux de chaleur advectif (transport horizontal).

Cette équation est complétée pour chaque face du volume de contrôle par ce bilan :

$$Q^* = Q_H + Q_E + Q_G$$

Où :

Q_G est le flux conductif à travers la face du volume de contrôle (principalement vers le sol)

De nombreux modèles mathématiques ont été développés pour résoudre ces équations et modéliser l'îlot de chaleur urbain à différentes échelles. Cependant, la multiplicité des phénomènes observés,

³² Christen, A., and R. Vogt, 2004: Energy and radiation balance of a central European city. *International Journal of Climatology*, 24, 1395-1421. DOI: 10.1002/joc.1074.

leur complexité, leurs interactions et la quantité de données à traiter nécessitent des simplifications importantes.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les différents modèles existants et les simplifications sous-jacentes de ces modèles.

3.2.1. Modélisation du bilan énergétique urbain

La méthode de bilan énergétique a initialement été proposée par Oke³³. Cette méthode est basée sur la conservation de l'énergie dans un volume de contrôle (voir équations précédentes).

Les phénomènes atmosphériques (turbulences, profil de vitesse du vent, flux de chaleur) sont pris en compte dans ce bilan de manière relativement simplifiée : sous forme d'équations empiriques ou analytiques.

Le choix de la surface ou du volume sur lequel est effectué le bilan énergétique est une hypothèse importante du modèle. Les modèles peuvent ainsi aller de l'échelle de la rue à l'échelle de la ville.

Nous distinguerons deux grandes familles de modèles de bilan énergétique :

- > Dans les modèles les plus simples, dits **bulk**, le bilan est effectué au niveau d'une surface horizontale fictive au-dessus du niveau des toits, délimitant un volume de contrôle sur lequel s'effectue un bilan d'énergie³⁴.

La portion de ville délimitée par le volume de contrôle est représentée par des propriétés aérodynamiques (longueur de rugosité), radiatives et thermiques moyennes. Les flux de chaleur sensible et de chaleur latente dépendent de la différence de température ou d'humidité entre la canopée et l'atmosphère et d'une résistance aérodynamique qui peut être fonction du vent et de la stabilité atmosphérique dans la couche de surface³⁵.

Il est possible dans ces modèles simples de distinguer différents types d'occupation du sol.

- > Dans les modèles dits de **canopée urbaine** (urban canopy model : UCM) le bilan est effectué au niveau de l'ensemble des surfaces en contact avec l'air extérieur (murs, toits et sols). Toutes les surfaces et les volumes de contrôle sont considérés comme des nœuds connectés les uns aux autres selon un modèle d'analogie électrique. L'équation (1) est ensuite appliquée à chaque nœud, pour obtenir les valeurs de température et d'humidité³⁶.

On distingue les modèles de canopée monocouche ou multicouche en fonction du nombre de nœuds utilisés. Dans le cas d'un modèle de canopée urbaine monocouche, les bâtiments sont décrits de manière simplifiée (rues canyons). Le vent au milieu du canyon est déterminé par des relations empiriques. Dans le cas des modèles multicouche, les flux sont calculés en différents points à l'intérieur de la canopée, ce qui nécessite de connaître les profils de vent et de température sur toute la hauteur du volume de contrôle.

³³ Oke TR, Cleugh HA. Urban heat storage derived as energy balance residuals. *Boundary-Layer Meteorology* 1987; 39:233-45.

³⁴ Hénon Aurélien. Températures Mesurées, Modélisées, Et Observées Par Télédétection Infrarouge, Dans La Canopée Urbaine: Modélisation Aéro-thermo-radiative Des Flux De Chaleur Urbains. 2008.

³⁵ Musy M. *Modélisation des interactions ville-climat-énergie*, Commissariat général au développement durable Références, septembre 2012.

³⁶ Parham A. Mirzaei, Fariborz Haghighat, Approaches to study Urban Heat Island – Abilities and limitations, *Building and Environment*, Volume 45, Issue 10, 2010, Pages 2192-2201, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.04.001>.

3.2.2 Modélisation CFD

La CFD (Computational Fluid Dynamics) est une technique largement utilisée pour résoudre les problèmes de mécanique des fluides en milieu urbain. (Toparlar et al. 2017)³⁷ recensent 183 études entre 1998 et 2015. La CFD permet de prendre en compte la complexité physique en couplant plusieurs phénomènes et en fournissant des résultats pour plusieurs grandeurs pour toutes les mailles du domaine discrétisé. Elle permet également la prise en compte de l'aspect multi-échelle du milieu urbain, en convenant aux études à l'échelle macro, méso, micro, mais également à l'échelle du bâtiment, de ces composants ou même à l'échelle humaine. Ainsi, de nombreux sujets sont traités en utilisant la CFD comme le confort des piétons, la propagation des polluants, la thermique urbaine, la ventilation naturelle en ville et les flux d'air intérieur. Les outils de CFD sont nombreux, parmi les plus utilisés on trouve : ANSYS Fluent, OpenFOAM, Code Saturne, COMSOL. Ils se différencient par l'algorithme de résolution utilisé, les méthodes de discrétisations (méthodes des différences finies, des volumes finis, des éléments finis ou encore méthode spectrale), les approches disponibles (LES, RANS, URANS, hybride) et également les modèles de turbulence. Cependant, ils possèdent tous le même inconvénient principal qui est le coût computationnel élevé induit par leur complexité. La méthode CFD s'appuie sur les lois de conservation dites lois de Navier-Stokes en mécanique des fluides. Le fluide est considéré comme un fluide « Newtonien » et incompressible.

- > Conservation de la masse (continuité) :

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

- > Seconde loi de Newton (bilan de la quantité de mouvement) :

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (2\nu s_{ij})$$

Ces deux équations peuvent être complétées par un bilan thermique et une équation sur le transfert de masse :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j c) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial c}{\partial x_j} \right)$$

Avec u_i , x_i , p , T et c les vecteurs instantanés de vitesse, de position, de pression, de température et de concentration, t le temps, ρ la densité, ν la viscosité cinématique moléculaire, c_p la capacité de chaleur spécifique, λ la conductivité thermique, D le coefficient de diffusion moléculaire et s_{ij} le tenseur des taux de déformation :

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

Généralement, une simulation numérique d'être envisagée, en milieu urbain, car son coût computationnel est trop élevé. De plus, elle consiste à résoudre l'ensemble des équations de Navier-Stokes à toutes les échelles spatiales et temporelles de l'écoulement, sans appliquer de modèle

³⁷ TOPARLAR, Y., BLOCKEN, B., MAIHEU, B. et VAN HEIJST, G. J. F., 2017. A review on the CFD analysis of urban microclimate. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews. 1 décembre 2017. Vol. 80, pp. 1613-1640. DOI 10.1016/j.rser.2017.05.248.

de turbulence et donc en représentant toutes les structures tourbillonnaires. Elle n'est donc pas adaptée, pour les écoulements aux nombres de Reynolds trop élevés comme ceux des écoulements autour des bâtiments (Re < 105, selon (Blocken et al. 2011)³⁸).

Les deux approches les plus populaires pour la CFD en milieu urbain sont :

- > LES (Large Eddy Simulation) ;
- > RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes).

L'approche LES consiste à différencier les grands tourbillons, qui sont principalement influencés par la géométrie étudiée, des petits tourbillons, qui ont tendance à être plus universels. Un filtre est alors appliqué et les grands tourbillons sont résolus directement, tandis que les petits tourbillons sont modélisés. Ainsi, les petites échelles nécessitent l'utilisation d'un modèle sous-maillé de turbulence, pour fermer le système d'équations.

Les équations de l'approche RANS sont obtenues en décomposant les variables solutions des équations de Navier-Stokes en une moyenne temporelle pour la résolution en régime permanent et une composante de fluctuations.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (2\nu \bar{s}_{ij}) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i' u_j'})$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_j' T'})$$

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j \bar{c}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_j' c'})$$

Seul le flux moyen est résolu. Des inconnues sont générées et les équations RANS ne forment donc pas un système fermé. La fermeture est obtenue en effectuant des approximations sur la turbulence, appelées modèle de turbulence.

Il faut distinguer deux systèmes de fermeture :

- > Les modèles de 1^{er} ordre sont basés sur l'hypothèse de Boussinesq, qui propose une relation entre la contrainte de Reynolds et le taux de déformation moyen.
- > Les modèles de 2nd ordre s'appuient sur la résolution d'équations de transport additionnelles pour les contraintes de Reynolds et les taux de dissipation turbulente (Modèle de Reynolds Stress RSM).

Les modèles de premier ordre sont les plus simples et les plus utilisés. Chaque modèle possède ses spécificités et il n'existe pas de règle universelle pour choisir le modèle de turbulence le mieux adapté (Blocken, Gualtieri 2012)³⁹. Néanmoins, le modèle k-ε standard compte parmi les plus utilisés (Toparlar

³⁸ BLOCKEN, Bert, STATHOPOULOS, Ted, CARMELIET, Jan et HENSEN, Jan, 2011. Application of computational fluid dynamics in building performance simulation for the outdoor environment: An overview. In: Journal of Building Performance Simulation. 1 juin 2011. Vol. 4, pp. 157-184. DOI 10.1080/19401493.2010.513740

³⁹ BLOCKEN, B. et GUALTIERI, C., 2012. Ten iterative steps for model development and evaluation applied to Computational Fluid Dynamics for Environmental Fluid Mechanics. In: Environmental Modelling & Software. 1 juillet 2012. Vol. 33, pp. 1-22. DOI 10.1016/j.envsoft.2012.02.001.

et al. 2017)⁴⁰. Ce modèle utilise deux équations pour décrire la turbulence : une traduit l'énergie cinétique turbulente (k) et l'autre concerne le taux de dissipation de cette énergie (ε).

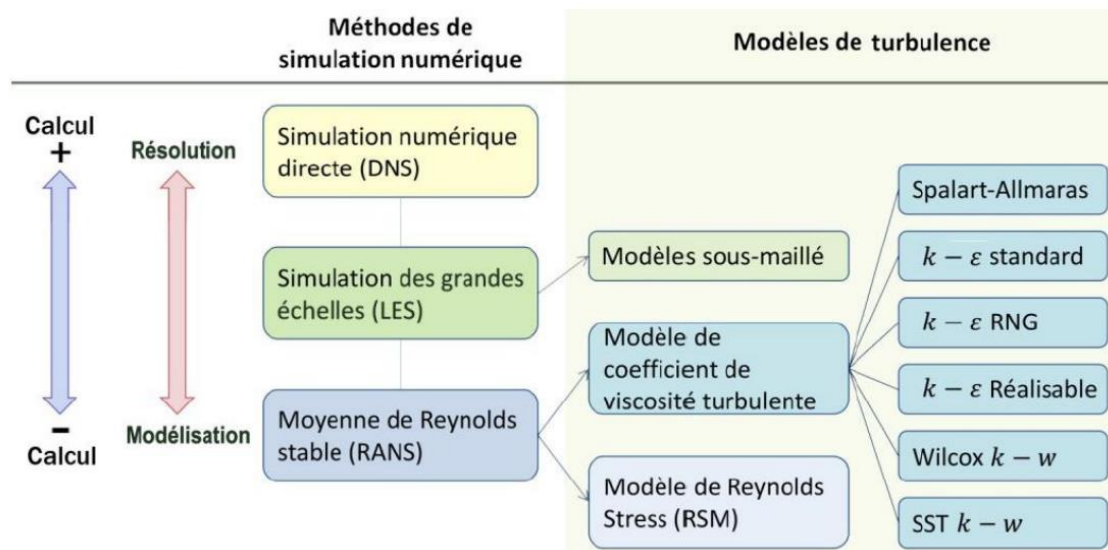


Figure 12 - Approches de simulation CFD et modèle de turbulence associés⁴¹

En conclusion, l'approche LES fournit des résultats plus précis et plus fiables pour la description de l'écoulement. Néanmoins la méthode RANS reste plus largement utilisée dans la recherche et l'ingénierie. En effet, 96 % des études recensées par (Toparlak et al. 2017)³⁹ utilisent l'approche RANS. Ce constat s'explique en partie par la complexité des simulations et le temps de calcul beaucoup plus élevé avec la méthode LES (Blocken 2018)⁴². De plus, la méthode RANS bénéficie d'une plus grande expérience, favorisant son utilisation.

Les simulations CFD sont très sensibles aux paramètres définis par l'utilisateur, comme la géométrie, la définition du domaine, le maillage, les conditions aux limites, les conditions initiales, le traitement du flux près des parois, le schéma de discrétisation, le modèle de turbulence ou encore les critères de convergence (Blocken 2018)⁴³. Dans la littérature, plusieurs publications proposent des lignes

⁴⁰ TOPARLAR, Y., BLOCKEN, B., MAIHEU, B. et VAN HEIJST, G. J. F., 2017. A review on the CFD analysis of urban microclimate. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1 décembre 2017. Vol. 80, pp. 1613-1640. DOI 10.1016/j.rser.2017.05.248.

⁴¹ WANG, Biao. "Les impacts de la morphologie urbaine sur le vent : performance d'énergie éolienne à l'échelle de quartier." (2015).

⁴² BLOCKEN, B., 2018. LES over RANS in building simulation for outdoor and indoor applications: A foregone conclusion? In: 2018. DOI 10.1007/S12273-018-0459-3.

⁴³ BLOCKEN, B., 2018. LES over RANS in building simulation for outdoor and indoor applications: A foregone conclusion? In: 2018. DOI 10.1007/S12273-018-0459-3.

directrices pour configurer les simulations CFD (Yoshie et al. 2007⁴⁴ ; Franke, Baklanov 2007⁴⁵ ; Tominaga et al. 2008⁴⁶ ; Tamura et al. 2008⁴⁷ ; Blocken 2015⁴⁸).

Malgré ces recommandations très complètes, il reste indispensable de valider les simulations CFD en les confrontant à des résultats expérimentaux issus d'essais en soufflerie ou alors de mesures in-situ (Blocken 2018)¹¹. Cependant, dans de nombreux cas, des données expérimentales ne sont pas disponibles pour la zone urbaine étudiée. Il est alors recommandé d'utiliser des données publiées disponibles en ligne, pour la validation du modèle (Blocken 2015)⁴⁷, par exemple celles de l'Institut Architectural du Japon (Yoshie et al. 2007).

Certains codes CFD sont développés dans le but spécifique d'étudier les écoulements en milieu urbain, ce qui est le cas de UrbaWind ou encore de CityFFD (Mortezazadeh 2019)⁴⁹.

3.2.3 Modélisation radiative

Les modèles radiatifs à l'échelle urbaine permettent la détermination des échanges radiatifs entre l'atmosphère et la ville, mais également au sein du milieu urbain. Les rayonnements étudiés sont les rayonnements à courte longueur d'onde (CLO) et à grande longueur d'onde (GLO). La répartition du rayonnement est impactée par la morphologie urbaine de la zone étudiée et de la végétation. Ces obstructions entraînent des ombres portées et des multiples de réflexions, qu'il convient de prendre pour évaluer précisément les flux radiatifs en ville. L'accès au rayonnement solaire est dépendant du facteur de vue du ciel et les échanges entre les surfaces urbaines sont déterminés en fonction des facteurs de vue entre chacune d'elles. De plus, il est également primordial de connaître les caractéristiques des matériaux urbains, pour évaluer les parts de rayonnement absorbé et réfléchis.

Les modèles permettent de prendre en compte des géométries plus ou moins complexes : des modèles bidimensionnels (hypothèse de rue canyon), des modèles tridimensionnels homogènes ou hétérogènes. De même, chaque modèle effectue des simplifications concernant le calcul des flux.

⁴⁴ YOSHIE, R., MOCHIDA, A., TOMINAGA, Y., KATAOKA, H., HARIMOTO, K., NOZU, T. et SHIRASAWA, T., 2007. Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1 octobre 2007. Vol. 95, n° 9, pp. 1551-1578. DOI 10.1016/j.jweia.2007.02.023

⁴⁵ FRANKE, Jörg et BAKLANOV, Alexander, 2007. Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment: COST Action 732 Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models.

⁴⁶ TOMINAGA, Yoshihide, MOCHIDA, Akashi, YOSHIE, Ryuichiro, KATAOKA, Hiroto, NOZU, Tsuyoshi, YOSHIKAWA, Masaru et SHIRASAWA, Taichi, 2008. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1 octobre 2008. Vol. 96, n° 10, pp. 1749-1761. DOI 10.1016/j.jweia.2008.02.058.

⁴⁷ TAMURA, Tetsuro, NOZAWA, Kojiro et KONDO, Koji, 2008. AIJ guide for numerical prediction of wind loads on buildings. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1 octobre 2008. Vol. 96, n° 10, pp. 1974-1984. DOI 10.1016/j.jweia.2008.02.020.

⁴⁸ BLOCKEN, B. B., 2015. Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. In: 2015. DOI 10.1016/J.BUILDENV.2015.02.015.

⁴⁹ MORTEZAZADEH, Mohammad, 2019. CityFFD – City Fast Fluid Dynamics Model for Urban Microclimate Simulations. S.l.: Concordia University.

3.2.3.1 Rayonnement solaire

La première étape consiste à modéliser le rayonnement solaire descendant du ciel et arrivant sur une surface. Le bilan radiatif sur une surface inclinée peut s'écrire ainsi :

$$I_{surf,total} = I_{surf,direct} + I_{surf,diffus} + I_{surf,réfléchis}$$

Avec $I_{surf,total}$ le rayonnement solaire total incident à une surface inclinée, $I_{surf,direct}$ le rayonnement solaire direct incident à une surface inclinée, $I_{surf,diffus}$ le rayonnement solaire diffus incident à une surface inclinée et $I_{surf,réfléchis}$ le rayonnement solaire réfléchi incident à une surface inclinée. Ces quatre termes s'expriment en $W \cdot m^{-2}$.

Le rayonnement solaire direct est calculé à partir de l'équation suivante :

$$I_{surf,direct} = I_{horiz,direct} \frac{\cos(\theta)}{\sin(h)}$$

Avec $I_{horiz,direct}$ le rayonnement direct mesuré au niveau d'une surface horizontale ($W \cdot m^{-2}$), θ angle d'incidence des rayons solaires ($^{\circ}$) et h l'élévation solaire ($^{\circ}$).

La modélisation du rayonnement diffus du ciel au niveau d'une surface inclinée est une tâche complexe, y compris en connaissant le rayonnement diffus sur une surface horizontale. (Gros et al. 2011)⁵⁰ présente les équations de six modèles de ciel et le modèle de Perez⁵¹ est un des modèles les plus détaillés. Il est anisotropique et comporte trois composantes : le rayonnement isotrope diffus, le rayonnement induit par la circonférence solaire et enfin le rayonnement provenant de l'horizon (voir la Figure ci-dessous).

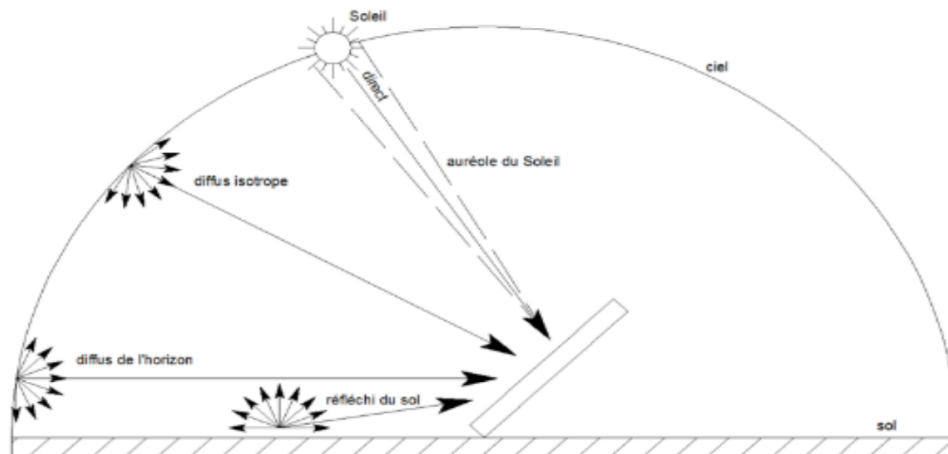


Figure 13 - Schéma des composantes du rayonnement solaire global⁵²

⁵⁰ GROS, Adrien, BOZONNET, Emmanuel et INARD, Christian, 2011. Modelling the radiative exchanges in urban areas: A review. In: *Advances in Building Energy Research*. juin 2011. Vol. 5, n° 1, pp. 163-206. DOI 10.1080/17512549.2011.582353.

⁵¹ PEREZ, Richard, SEALS, Robert, INEICHEN, Pierre, STEWART, Ronald et MENICUCCI, David, 1987. A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. In: *Solar Energy*. 1 janvier 1987. Vol. 39, n° 3, pp. 221-231. DOI 10.1016/S0038-092X(87)80031-2.

⁵² Duffie, J.A., Beckman, W.A., 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition*, Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>.

(Robinson, Stone 2004) ont montré que le modèle de Perez était le plus précis à plusieurs localisations. Ce modèle est notamment implémenté dans des logiciels de simulation de thermique dynamique des bâtiments, comme EnergyPlus. De plus, (Robinson, Stone 2004)⁵³ ont adapté les équations de ce modèle pour l'adapter au contexte urbain.

3.2.3.2 Rayonnement Grandes Longueurs d'Onde (GLO)

Les surfaces urbaines sont supposées être des corps gris, donc selon la loi de Stefan-Boltzmann, chacune émet un rayonnement GLO L :

$$L = \varepsilon \sigma T_s^4$$

Avec T_s la température de surface (K), ε le coefficient d'émission de la surface et σ la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 * 10^{-8} \text{ W. m}^{-2} .\text{K}^{-4}$).

Le ciel est assimilé à un corps noir. Ainsi selon la loi de Stefan-Boltzmann, le rayonnement GLO descendant du ciel peut s'écrire ainsi :

$$L_{\text{ciel}} = \sigma T_{\text{ciel}}^4$$

Avec L_{ciel} le rayonnement GLO émis par le ciel (W. m^{-2}), σ la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 * 10^{-8} \text{ W. m}^{-2} .\text{K}^{-4}$), T_{ciel} la température du ciel (K).

En ce qui concerne le rayonnement GLO descendant du ciel, (Culf, Gash 1993)⁵⁴ compare cinq modèles et conclue que la prise en compte de la variation de pression de vapeur d'eau est un critère primordial pour obtenir un modèle précis. Les autres paramètres indispensables sont la température de l'air et la couverture nuageuse, pour calculer le rayonnement GLO émis par un ciel nuageux. Plusieurs auteurs ont proposé une équation basée sur une quantité fictive, qui est l'émissivité du ciel $\varepsilon_{\text{ciel}}$.

$$L_{\text{ciel}} = \varepsilon_{\text{ciel}} \sigma T_{\text{air}}^4$$

Avec $\varepsilon_{\text{ciel}}$ l'émissivité du ciel et T_{air} la température sèche de l'air (K).

Ensuite, différentes corrélations entre l'émissivité du ciel en conditions claires et la température de rosée existent. La corrélation de (Martin, Berdahl 1984) est présentée ici :

$$\varepsilon_{\text{ciel,clair}} = 0,711 + 0,56 \left(\frac{T_{\text{rosée}}}{100} \right) + 0,73 \left(\frac{T_{\text{rosée}}}{100} \right)^2$$

Avec $\varepsilon_{\text{ciel,clair}}$ l'émissivité du ciel en conditions claires et $T_{\text{rosée}}$ la température de rosée ($^{\circ}\text{C}$).

À partir de cette émissivité par temps clair, il est possible de déduire l'émissivité pour toutes les conditions nuageuses, en appliquant la corrélation de (Walton 1980) :

$$\varepsilon_{\text{ciel}} = \varepsilon_{\text{ciel,clair}} (1 + 0,0224N - 0,0035N^2 + 0,00028N^3)$$

Avec N la couverture nuageuse.

⁵³ ROBINSON, Darren et STONE, Andrew, 2004. Solar radiation modelling in the urban context. In: *Solar energy*. 2004. Vol. 77, n° 3, pp. 295-309.

⁵⁴ CULF, Alistair D. et GASH, John H. C., 1993. Longwave Radiation from Clear Skies in Niger: A Comparison of Observations with Simple Formulas. In: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 1 mars 1993. Vol. 32, n° 3, pp. 539-547. DOI 10.1175/1520-0450(1993)032<0539:LRFCIS>2.0.CO;2.

Dans le cas où les conditions nuageuses ne sont pas connues, le modèle de (Kasten, Czeplak 1980)⁵⁵ donne une relation entre le rayonnement solaire et la couverture nuageuse :

$$I_t = I_{t,\text{clair}} \left(1 - 0,75 \left(\frac{N}{8} \right)^{3,4} \right)$$

Avec I_t le rayonnement solaire total dans les conditions étudiées (W. m⁻²) et $I_{t,\text{clair}}$ le rayonnement solaire total par temps clair (W. m⁻²).

Le rayonnement net GLO peut s'écrire comme (Noilhan 1981)⁵⁶ :

$$I_{\text{surf,net}} = \sum_{j=1}^{N_s} \varepsilon_i \sigma F_{ji} \varepsilon_j T_{s,j}^4 + \varepsilon_i F_{\text{ciel},i} L_{\text{ciel}} - \varepsilon_i \sigma T_{s,i}^4$$

Avec F_{ji} le facteur de vue de la surface i vers la surface j .

Cette équation traduit l'équilibre au niveau d'une surface en considérant le rayonnement reçu provenant des autres surfaces urbaines et du ciel, la part de ce rayonnement qui est réfléchi et enfin en soustrayant le rayonnement émis par la surface d'intérêt. Cette fonction ne permet pas de représenter les réflexions multiples du rayonnement GLO.

3.2.3.3 Réflexions multiples

Entre les surfaces urbaines, des réflexions multiples ont lieu. Elles concernent à la fois les rayonnements CLO et GLO. En fonction du degré de simplification, le modèle peut prendre en compte zéro, une ou cinquante réflexions.

La méthode la plus précise est la méthode des radiosités. Elle s'appuie sur les formules physiques de transfert radiatif et résout l'ensemble des équations d'échange entre les surfaces de la scène urbaine. Cette méthode est donc complexe et couteuse en temps de calcul, d'autant plus qu'elle nécessite le calcul de nombreux facteurs de vue. L'outil SOLENE (Groleau 2000)⁵⁷ utilise ce principe de radiosité pour le calcul des inter-réflexions solaires. De plus, dans cet outil, la représentation sous forme de facettes triangulaires planes associée au schéma de discrétisation permet la simulation radiative de géométrie urbaine complexe.

(Robinson, Stone 2005)⁵⁸ ont développé un algorithme simplifié des radiosités. Il a l'avantage d'être spécialement adapté à l'environnement urbain. Il est basé sur la description de l'environnement extérieur par deux hémisphères et discrétisé en un certain nombre d'éléments. Les échanges radiatifs sont ensuite résolus entre chaque surface urbaine et l'élément correspondant. Cet algorithme est implémenté dans CitySim (anciennement SUNTool)⁵⁹.

Une autre méthode utilisée pour étudier les réflexions multiples entre les surfaces est le programme de lancer de rayon avec Monte-Carlo. Cette solution est implémentée dans l'outil Radiance⁶⁰ et

⁵⁵ KASTEN, Fritz et CZEPLAK, Gerhard, 1980. Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud. In : *Solar Energy*. 1 janvier 1980. Vol. 24, n° 2, pp. 177-189. DOI 10.1016/0038-092X(80)90391-6.

⁵⁶ NOILHAN, Joël, 1981. A model for the net total radiation flux at the surfaces of a building. In : *Building and Environment*. 1 janvier 1981. Vol. 16, n° 4, pp. 259-266. DOI 10.1016/0360-1323(81)90004-4.

⁵⁷ GROLEAU, Dominique, 2000. SOLENE UN OUTIL DE SIMULATION DES ECLAIREMENTS SOLAIRES ET LUMINEUX DANS LES PROJETS ARCHITECTURAUX ET URBAINS. In: 2000. pp. 8.

⁵⁸ ROBINSON, Darren et STONE, Andrew, 2005. Holistic radiation modelling with a fast simplified radiosity algorithm. In: *Proc. Ninth Int. IBPSA Conf., Building Simulation*. S.l.: Citeseer. 2005.

⁵⁹ KÄMPF, Jérôme, 2009. On the modelling and optimisation of urban energy fluxes. S.l.: Lausanne, EPFL.

⁶⁰ COMPAGNON, Dr R, 2001. a simulation tool for daylighting systems. 2001. pp. 60.

également dans EnergyPlus, pour la prise en compte des inter-réflexions lors de la STD (Simulation Thermique Dynamique) d'un bâtiment.

3.2.3.4 Modèles thermiques

Un des intérêts principaux des calculs de rayonnement à l'échelle urbaine et l'obtention des températures de surface. En effet, la température de surface est une donnée importante pour le calcul de la température de l'air extérieur et pour l'estimation des besoins énergétiques des bâtiments. Cependant, les flux radiatifs ne sont pas les seuls facteurs influençant la température de surface. Le phénomène de convection avec l'air extérieur et la conduction à travers les parois sont également à prendre en compte. Pour cela, des modèles thermiques sont implémentés dans ces modèles radiatifs.

Dans le cas de CitySim, le modèle thermique des bâtiments est un modèle simplifié, basé sur l'analogie électrique. L'objectif de cet outil est une simulation rapide des consommations énergétiques à l'échelle d'un quartier ou d'une ville⁶¹. De même, SOLENE comprend un modèle de thermique des bâtiments simplifiés (parois modélisées par deux couches superposées).

3.2.3.5 Modèles radiatifs simplifiés

Le modèle SOLWEIG (Solar LongWave Environmental Irradiance Geometry model)⁶² permet d'approximer les températures de surface à partir de la température d'air et en fonction de l'exposition au soleil de la surface considérée. Il utilise la méthode DEM (Digital Elevation Model) qui permet de représenter à haute résolution la végétation et les bâtiments⁶³. Il permet de calculer la température moyenne radiante et permet d'étudier de larges espaces extérieurs.

Le modèle RayMan⁶⁴ est également un modèle simplifié, qui calcule la température moyenne radiante. Cet outil est spécifiquement conçu pour l'évaluation du rayonnement thermique du corps humain. Il permet également de calculer les effets des terrains, des bâtiments et également de la végétation, dans des environnements urbains complexes. Le modèle a l'avantage de nécessiter peu de données météorologiques ; la température, l'humidité de l'air et la vitesse du vent suffisent. De plus, SOLWEIG et RayMan prennent également en compte les effets radiatifs des végétaux, ce qui est également le cas de ENVI-Met, un modèle microclimatique⁶⁵, qui sera présenté dans la partie suivante.

3.2.4 Modélisation énergétique des bâtiments

Le bâti est la principale caractéristique des zones urbaines et interagit fortement avec son environnement extérieur. Il est indispensable de prendre en compte les effets du bâtiment lors du bilan énergétique urbain et doit donc être intégré dans les simulations du microclimat urbain.

⁶¹ ROBINSON, Darren, HALDI, Frédéric, LEROUX, Philippe, PEREZ, Diane, RASHEED, Adil et WILKE, Urs, 2009. CitySim: Comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning. In: *Proceedings of the Eleventh International IBPSA Conference*. 2009. pp. 1083-1090.

⁶² LINDBERG, Fredrik, HOLMER, Björn et THORSSON, Sofia, 2008. SOLWEIG 1.0 – Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. In: *International Journal of Biometeorology*. 2008. Vol. 52, n° 7, pp. 697-713. DOI 10.1007/s00484-008-0162-7.

⁶³ LINDBERG, Fredrik et GRIMMOND, C. S. B., 2011. The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: model development and evaluation. In: *Theoretical and Applied Climatology*. 1 octobre 2011. Vol. 105, n° 3, pp. 311-323. DOI 10.1007/s00704-010-0382-8.

⁶⁴ MATZARAKIS, Andreas, RUTZ, Frank et MAYER, Helmut, 2010. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. In: *International Journal of Biometeorology*. 1 mars 2010. Vol. 54, n° 2, pp. 131-139. DOI 10.1007/s00484-009-0261-0.

⁶⁵ HUTTNER, S, 2012. *Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met*. Dissertation. Johannes Gutenberg-University of Mainz (Germany).

Il existe de nombreux modèles énergétiques à l'échelle du bâtiment. Parmi les plus utilisés se trouvent EnergyPlus, IDA ICE, ESP-r, DOE-2 et TRNSYS. Les objectifs de ces modèles BES (Building Energy Simulation) sont de fournir les conditions thermiques détaillées à l'intérieur du bâtiment et d'estimer les besoins énergétiques. Ils sont généralement utilisés dans le but d'optimiser la consommation énergétique et donc d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.

Les principaux éléments à prendre en compte pour la modélisation des bâtiments sont⁶⁶ :

- > leur modèle thermique et leur géométrie ;
- > les sollicitations extérieures ;
- > les systèmes énergétiques ;
- > les occupants et les équipements.

Ainsi, les modèles BES se différencient par le niveau de précision pour la prise en compte des transferts par conduction à travers les parois, du zonage thermique, des gains internes, des gains solaires et également des systèmes de Chauffage Ventilation et Climatisation^{67,68}.

Pour effectuer des simulations énergétiques, il est compliqué de simuler chaque bâtiment individuellement, notamment car le coût computationnel et la quantité de paramètre d'entrée à définir seraient trop élevés. De ce fait, des outils adaptés pour les simulations énergétiques à l'échelle du quartier ou de la ville ont été développés, ils se nomment respectivement UBEM (Urban Building Energy Modelling) et CEM (City Energy Modelling).

Dans la littérature de nombreuses revues des modèles UBEM existent, elles distinguent différentes approches et les répartissent en différentes catégories en fonction des objectifs de chacun (Swan, Ugursal 2009⁶⁹ ; Allegrini, Orehounig, et al. 2015⁷⁰ ; Li et al. 2017⁷¹ ; Frayssinet et al. 2018⁷² ; Sola et al. 2018⁷³ ; Johari et al. 2020⁷⁴).

⁶⁶ GARREAU, Enora, 2021. Développement d'une méthodologie d'analyse de la parcimonie pour la simulation énergétique urbaine. Thèse. S.l.: Université Paris sciences et lettres.

⁶⁷ HARISH, V. S. K. V. et KUMAR, Arun, 2016. A review on modeling and simulation of building energy systems. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1 avril 2016. Vol. 56, pp. 1272-1292. DOI 10.1016/j.rser.2015.12.040.

⁶⁸ FOUCQUIER, Aurélie, ROBERT, Sylvain, SUARD, Frédéric, STÉPHAN, Louis et JAY, Arnaud, 2013. State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. juillet 2013. Vol. 23, pp. 272-288. DOI 10.1016/j.rser.2013.03.004.

⁶⁹ SWAN, Lukas G et UGURSAL, V Ismet, 2009. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. In: *Renewable and sustainable energy reviews*. 2009. Vol. 13, n° 8, pp. 1819-1835.

⁷⁰ ALLEGRINI, Jonas, OREHOUNIG, Kristina, MAVROMATIDIS, Georgios, RUESCH, Florian, DORER, Viktor et EVINS, Ralph, 2015. A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 52, pp. 1391-1404.

⁷¹ LI, Wenliang, ZHOU, Yuyu, CETIN, Kristen, EOM, Jiyong, WANG, Yu, CHEN, Gang et ZHANG, Xuesong, 2017. Modeling urban building energy use: A review of modeling approaches and procedures. In : *Energy*. décembre 2017. Vol. 141, pp. 2445-2457. DOI 10.1016/j.energy.2017.11.071.

⁷² FRAYSSINET, Loïc, MERLIER, Lucie, KUZNIK, Frédéric, HUBERT, Jean-Luc, MILLIEZ, Maya et ROUX, Jean-Jacques, 2018. Modeling the heating and cooling energy demand of urban buildings at city scale. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1 janvier 2018. Vol. 81, pp. 2318-2327. DOI 10.1016/j.rser.2017.06.040.

⁷³ SOLA, Alaia, CORCHERO, Cristina, SALOM, Jaume et SANMARTI, Manel, 2018. Simulation tools to build urban-scale energy models: A review. In: *Energies*. 2018. Vol. 11, n° 12, pp. 3269.

⁷⁴ JOHARI, F., PERONATO, G., SADEGHIAN, P., ZHAO, X. et WIDÉN, J., 2020. Urban building energy modeling: State of the art and future prospects. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1 août 2020. Vol. 128, pp. 109902. DOI 10.1016/j.rser.2020.109902.

La plupart des modèles UBEM, capitalisent sur les modèles BES déjà existants et validés. Ils se basent sur ces modèles à l'échelle du bâtiment pour les intégrer à l'échelle du quartier. Ainsi, ils écopent de la même lacune que les logiciels BES : les sollicitations extérieures de ces simulations sont généralement basées sur des fichiers météorologiques, qui contiennent des données souvent enregistrées dans des aéroports. Or ces données ne sont pas représentatives des conditions réelles du microclimat urbain et peuvent entraîner une mauvaise estimation des consommations énergétiques associées à l'usage de systèmes de CVC (Calice et al. 2017⁷⁵ ; Hong et al. 2019⁷⁶).

Pour une première approximation des conditions extérieures en milieu urbain, il est pertinent d'utiliser des générateurs de données météorologiques urbaines comme celui développé par (Bueno et al. 2013)⁷⁷ puis lors de la thèse de (Nakano 2015)⁷⁸, pour calculer les températures de l'air dans le canyon en tenant compte notamment du phénomène d'ICU.

3.3 Les modèles de climat urbains

3.3.1 Les différentes échelles à considérer

Les sections précédentes ont permis de présenter les éléments nécessaires à une modélisation du climat urbain, ainsi que les outils adaptés pour la représentation de chaque catégorie (aérodynamique, radiatif et énergétique). Une modélisation complète du climat urbain nécessite d'évaluer simultanément ces trois aspects. Ainsi, des outils ont été conçus pour représenter l'ensemble des interactions physiques à l'échelle urbaine.

Simuler avec précision tous les facteurs engendrerait un temps de calcul trop élevé. Des compromis doivent être réalisés, dans le but de trouver l'équilibre entre coûts computationnels et précision des modèles. Des hypothèses simplificatrices peuvent être effectuées au niveau des processus physiques et/ou de la géométrie étudiée.

Une autre option pour obtenir une simulation complète consiste à coupler plusieurs modèles, mais cette opération peut être complexe à mettre en œuvre et/ou engendrer un temps de calcul élevé.

De plus, il est difficile de réaliser en parallèle une simulation énergétique des bâtiments et une simulation microclimatique. Les deux raisons principales sont la différence dans les échelles spatiotemporelles étudiées et le fait que la zone urbaine est un système ouvert alors que le bâtiment est un système fermé.

Les outils se démarquent par leurs choix de simplification et également par leurs échelles et leurs résolutions spatiotemporelles. En effet, l'échelle temporelle varie beaucoup d'un outil à l'autre : certains permettent d'obtenir des résultats pour seulement une journée, alors que d'autres offrent la possibilité d'étudier plusieurs années.

⁷⁵ CALICE, Claudia, CLEMENTE, Carola, SALVATI, Agnese, PALME, Massimo et INOSTROZA, Luis, 2017. Urban Heat Island Effect on the Energy Consumption of Institutional Buildings in Rome. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. octobre 2017. Vol. 245, pp. 082015. DOI 10.1088/1757-899X/245/8/082015.

⁷⁶ HONG, Tianzhen, XU, Yujie, SUN, Kaiyu, ZHANG, Wannan et LUO, Xuan, 2019. Visualizing Urban Microclimate and Quantifying its Impact on Building Energy Use in San Francisco. In: *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Urban Building Energy Sensing, Controls, Big Data Analysis, and Visualization*. New York NY USA: ACM. 13 novembre 2019. pp. 1-5. ISBN 978-1-4503-7014-1.

⁷⁷ BUENO, Bruno, NORFORD, Leslie, HIDALGO, Julia et PIGEON, Grégoire, 2013. The urban weather generator. In: *Journal of Building Performance Simulation*. 1 juillet 2013. Vol. 6, n° 4, pp. 269-281. DOI 10.1080/19401493.2012.718797.

⁷⁸ NAKANO, Aiko, 2015. Urban weather generator user interface development: towards a usable tool for integrating urban heat island effect within urban design process. Thesis. S.I.: Massachusetts Institute of Technology.

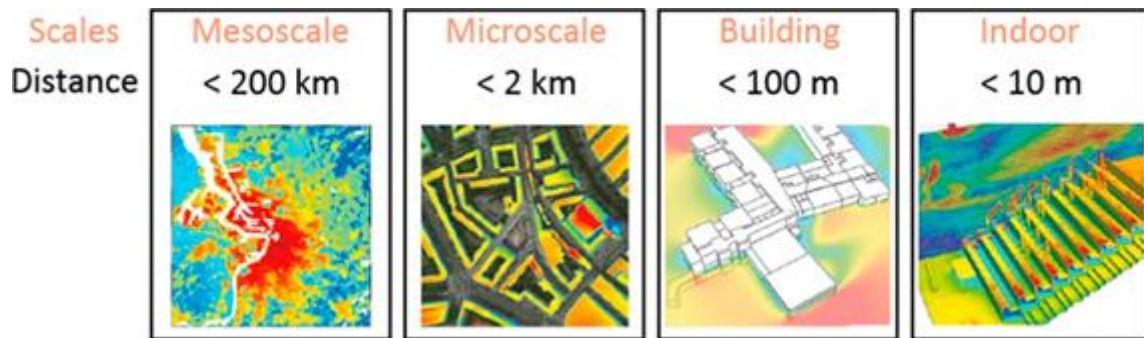


Figure 14 - Schéma des échelles spatiales et des distances associées⁷⁹

Concernant la taille du domaine, les outils permettent de réaliser des études allant de l'échelle micro à méso. Plusieurs outils permettent d'étudier les conditions microclimatiques d'un îlot urbain. En revanche, dans certains contextes, l'ensemble de la ville voire ses alentours doivent être représentés. Les modèles microclimatiques ne seront pas adaptés, car le temps de calcul nécessaire serait trop important. Des modèles à l'échelle méso existent et s'appuient généralement sur des hypothèses de simplifications géométriques comme le concept de rue canyon infinie pour représenter une partie de la zone urbaine. Cette section présente quelques outils parmi les plus largement utilisés dans la littérature, pour les deux échelles principales.

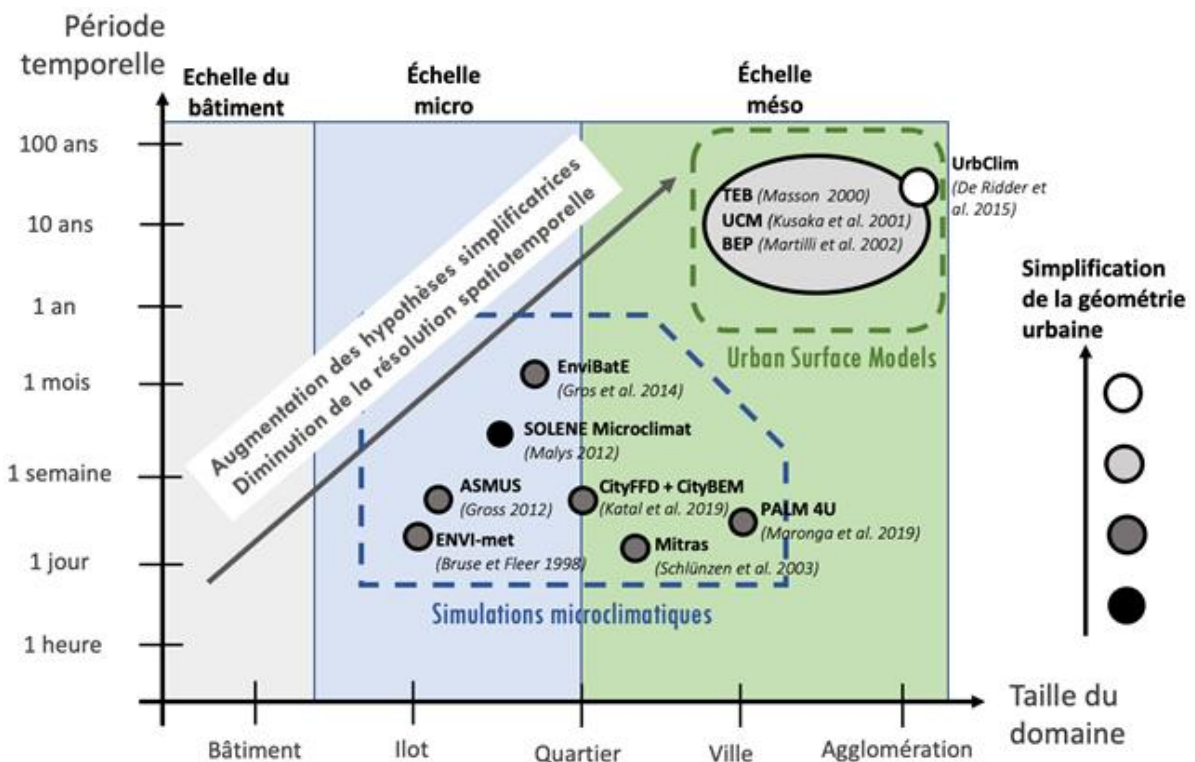


Figure 15 - Représentation d'outils permettant d'étudier le climat urbain, en fonction de leurs échelles spatiotemporelles (Margot Ruiz, 2021)

⁷⁹ TOPARLAR, Y., BLOCKEN, B., MAIHEU, B. et VAN HEIJST, G. J. F., 2017. A review on the CFD analysis of urban microclimate. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1 décembre 2017. Vol. 80, pp. 1613-1640. DOI 10.1016/j.rser.2017.05.248.

3.3.2 Modèles microclimatiques

3.3.2.1 Introduction

Il existe plusieurs modèles microclimatiques : ENVI-met⁸⁰, MITRAS^{81,82}, MUKLIMO_3⁸³, ASMUS⁸⁴, EnviBatE⁸⁵, SOLENE-microclimat⁸⁶ ou encore PALM 4U⁸⁷. Ces outils sont conçus pour simuler les conditions extérieures au niveau d'une rue, d'un îlot ou encore d'un quartier. Ils sont souvent utilisés dans l'évaluation de stratégies d'atténuation de l'ICU.

3.3.2.2 ENVI-met

ENVI-met figure parmi les outils les plus utilisés et intègre la majorité des phénomènes évoqués précédemment. Il a été créé dans le but de simuler les interactions entre les surfaces urbaines, l'air et les plantes. Sa résolution spatiotemporelle est de 0,5 à 10 m et de 1 à 5 secondes, pour une période allant de 24 à 48 heures. Il se compose de quatre sous-modèles :

- > modèle atmosphérique : champs du vent en 3D à partir de la CFD (RANS) ;
- > modèle du sol : température et teneur en eau du sol en surface et en profondeur ;
- > modèle de végétation : géométrie des plantes en 3D et échanges physiques avec leur environnement ;
- > modèle de l'environnement bâti : calcul des échanges thermiques au travers des parois à l'aide d'un modèle multi-nœud (Simon et al. 2017) et calcul dynamique de l'évolution de la température intérieure des bâtiments en fonction des flux entrant et sortant au niveau de l'enveloppe du bâti et en considérant les zones thermiques.

Il comprend également un couplage avec BioMet permettant d'évaluer des indices de confort thermique (Tmrt, PMV/PPD, PET ou encore UTCI).

⁸⁰ BRUSE, Michael et FLEER, Heribert, 1998. Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three-dimensional numerical model. In: *Environmental modelling & software*. 1998. Vol. 13, n° 3-4, pp. 373-384.

⁸¹ CHLÜNZEN, K. H., HINNEBURG, D., KNOTH, O., LAMBRECHT, M., LEITL, B., LÓPEZ, S., LÜPKES, C., PANSKUS, H., RENNER, E., SCHATZMANN, M., SCHOENEMEYER, T., TREPTE, S. et WOLKE, R., 2003. Flow and Transport in the Obstacle Layer: First Results of the Micro-Scale Model MITRAS. In: *Journal of Atmospheric Chemistry*. 1 février 2003. Vol. 44, n° 2, pp. 113-130. DOI 10.1023/A:1022420130032.

⁸² SALIM, Mohamed H., SCHLÜNZEN, K. Heinke, GRAWE, David, BOETTCHER, Marita, GIERISCH, Andrea M. U. et FOCK, Björn H., 2018. The microscale obstacle-resolving meteorological model MITRAS v2.0: model theory. In: *Geoscientific Model Development*. 24 août 2018. Vol. 11, n° 8, pp. 3427-3445. DOI 10.5194/gmd-11-3427-2018.

⁸³ FRÜH, Barbara, BECKER, Paul, DEUTSCHLÄNDER, Thomas, HESSEL, Johann-Dirk, KOSSMANN, Meinolf, MIESKES, Ingrid, NAMYSLO, Joachim, ROOS, Marita, SIEVERS, Uwe, STEIGERWALD, Thomas, TURAU, Heidelore et WIENERT, Uwe, 2011. Estimation of Climate-Change Impacts on the Urban Heat Load Using an Urban Climate Model and Regional Climate Projections. In: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 1 janvier 2011. Vol. 50, n° 1, pp. 167-184. DOI 10.1175/2010JAMC2377.1.

⁸⁴ GROSS, Günter, 2012. Effects of different vegetation on temperature in an urban building environment. Micro-scale numerical experiments. In: *Meteorologische Zeitschrift*. 1 août 2012. pp. 399-412. DOI 10.1127/0941-2948/2012/0363.

⁸⁵ GROS, Adrien, 2013. Modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l'échelle d'un quartier. PhD Thesis. S.I.: University of La Rochelle.

⁸⁶ MALYS, Laurent, MUSY, Marjorie et INARD, Christian, 2015. Microclimate and building energy consumption: Study of different coupling methods. In: *Advances in Building Energy Research*. 2015. Vol. 9, n° 2, pp. 151-174.

⁸⁷ MARONGA, Björn, GROSS, Günter, RAASCH, Siegfried, BANZHAF, Sabine, FORKEL, Renate, HELDENS, Wieke, KANANI-SÜHRING, Farah, MATZARAKIS, Andreas, MAUDER, Matthias, PAVLIK, Dirk, PFAFFEROTT, Jens, SCHUBERT, Sebastian, SECKMEYER, Gunther, SIEKER, Heiko et WINDERLICH, Kristina, 2019. Development of a new urban climate model based on the model PALM – Project overview, planned work, and first achievements. In: *Meteorologische Zeitschrift*. 1 juin 2019. Vol. 28, n° 2, pp. 105-119. DOI 10.1127/Metz/2019/0909.

La littérature souligne plusieurs points faibles de ce modèle, notamment au niveau du calcul des flux radiatifs, la tendance à surestimer la turbulence dans les zones de fortes accélérations, la non prise en compte de la pluie, les conditions nuageuses et de vent considérées constantes sur la période d'étude ou encore une simplification trop importante de la géométrie. Pour plus de détails, (Tsoka et al. 2018)⁸⁸ propose une revue des limites de ce logiciel et des résultats de 52 études utilisant ENVI-met.

Un autre inconvénient majeur de cet outil est associé au coût computationnel. Le temps moyen de calcul d'une journée type pour un quartier est de douze jours⁸⁹.

Par ailleurs, cet outil ne permet pas d'effectuer un réel bilan énergétique des bâtiments. Un couplage entre ENVI-met et EnergyPlus a permis de visualiser l'effet de l'environnement urbain sur la performance énergétique des bâtiments⁹⁰. La stratégie de couplage mise en place est relativement simple, car le couplage est unidirectionnel, c'est-à-dire que les données de sortie de ENVI-met sont utilisées en tant que conditions aux limites dans EnergyPlus.

3.3.2.3 SOLENE

SOLENE est un modèle thermo-radiatif de la scène urbaine. Il est développé depuis les années 1990 par des scientifiques du CERMA. Cet outil a été créé dans le but d'évaluer la pertinence des aménagements urbains. Il permet d'étudier des cycles journaliers avec un pas de temps variant entre 5 minutes et une heure, pour une zone urbaine allant d'un bâtiment à un quartier. Il a pour avantage de prendre en compte précisément des géométries urbaines complexes et de fournir une description détaillée des processus radiatifs, basé sur la méthode des radiosités. Le flux solaire est évalué en fonction du jour, de l'heure, de la latitude et de la couverture nuageuse. Le flux radiatif (GLO, CLO direct et diffus) atteignant chaque surface urbaine est calculé. SOLENE comporte également un modèle thermique des bâtiments. Il tient compte des transferts de chaleur par conduction à travers les parois et du stockage de chaleur en fonction de la capacité thermique des matériaux. Un bilan intérieur est également réalisé à partir des échanges au niveau des parois, des apports solaires, des apports liés à la ventilation ou encore à l'occupation et aux équipements (Bouyer 2009).

Malgré ces éléments, ce modèle énergétique des bâtiments est parfois considéré incomplet. En effet, il ne permet pas d'évaluer des changements locaux de matériaux, des défauts de structure, car les murs ne sont pas discrétisés dans le modèle thermique, alors que le modèle radiatif permet une description spatiale très précise des apports radiatifs au niveau des parois. Pour ces raisons, (Rodler et al. 2018)⁹¹ propose un couplage entre SOLENE et un outil de simulation énergétique des bâtiments DANA.

L'outil SOLENE seul n'intègre pas les aspects aérauliques, ni de bilan hydrique. Pour compléter l'outil sur ces points, des couplages avec des outils de CFD ont été mis en place :

⁸⁸ TSOKA, S., TSIKALOUAKI, A. et THEODOSIOU, T., 2018. Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications—A review. In: *Sustainable Cities and Society*. novembre 2018. Vol. 43, pp. 55-76. DOI 10.1016/j.scs.2018.08.009.

⁸⁹ FAHED, Jeff, 2018. Étude numérique du potentiel de rafraîchissement des techniques de réduction des îlots de chaleur urbain (ICU) sous climat méditerranéen. Thèse de doctorat. Toulouse, INSA.

⁹⁰ YANG, Xiaoshan, ZHAO, Lihua, BRUSE, Michael et MENG, Qinglin, 2012. An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments. In: *Energy and Buildings*. 1 novembre 2012. Vol. 54, pp. 243-251. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.07.042.

⁹¹ RODLER, Auline, GUERNOUTI, Sihem, MUSY, Marjorie et BOUYER, Julien, 2018. Thermal behaviour of a building in its environment: Modelling, experimentation, and comparison. In: *Energy and Buildings*. juin 2018. Vol. 168, pp. 19-34. DOI 10.1016/j.enbuild.2018.03.008.

- > SOLENE et Fluent pour prendre en compte les effets de l'écoulement du vent et des transferts de masse et de chaleur dans le sol^{92,93} ;
- > SOLENE-microclimat : couplage avec le code Saturne dans le but principal de modéliser et d'évaluer une enveloppe végétale⁹⁴ ;
- > EnviBatE : couplage avec Quic-urb qui permet de calculer le champ de vitesse du vent dans la scène urbaine⁹⁵.

3.3.2.4 PALM 4U

Dans le cadre du Urban Climate Under Change ([UC]²), le projet allemand MOSAIK (Model-based city planning and application in climate change) a pour mission de développer un nouveau modèle de climat urbain à haute résolution. Le détail des objectifs de ce nouvel outil est présenté dans (Maronga et al. 2019)⁹⁶.

Ce modèle est conçu dans le but d'être suffisamment rapide pour étudier de larges zones, typiquement de grandes villes. Il peut s'appliquer à des domaines allant jusqu'à 2000 km², avec une résolution classique de 10m. Le modèle est également capable de représenter à haute résolution des zones spécifiques d'intérêt (soit un domaine d'environ 1 km² avec une discrétisation de 1 m). Les périodes simulées pourront aller d'un cycle journalier à plusieurs jours, ce qui permettra d'étudier les conditions climatiques extrêmes comme les vagues de chaleur.

PALM 4U est basé sur le code de PALM (Parallelized Large-Eddy Simulation Model), un modèle qui traite les flux de la couche limite atmosphérique^{97,98}. Ainsi, pour la CFD, le mode principal est de type LES, mais un mode optionnel de type RANS est également disponible pour résoudre les écoulements en milieux urbains.

Concernant les aspects radiatifs, le schéma radiatif de PALM est récupéré et adapté aux contraintes de l'échelle urbaine. Ainsi, le modèle traite séparément la part de rayonnement solaire et celle de diffus et considère les effets de réflexions multiples entre les bâtiments et des ombres en fonction de la position du soleil. Les flux radiatifs incidents sont déterminés pour les différentes surfaces urbaines et

⁹² BOUYER, Julien, 2009. Modélisation et simulation des microclimats urbains : étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments. Thèse de doctorat. S.I.: Nantes.

⁹³ BOUYER, Julien, INARD, Christian et MUSY, Marjorie, 2011. Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context. In: *Energy and Buildings*. juillet 2011. Vol. 43, n° 7, pp. 1549-1559. DOI 10.1016/j.enbuild.2011.02.010.

⁹⁴ MALYS, Laurent, 2012. Évaluation des impacts directs et indirects des façades et des toitures végétales sur le comportement thermique des bâtiments. Thèse de doctorat. S.I.: École Centrale de Nantes.

⁹⁵ GROS, Adrien, 2013. Modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l'échelle d'un quartier. PhD Thesis. S.I.: University of La Rochelle.

⁹⁶ MARONGA, Björn, GROSS, Günter, RAASCH, Siegfried, BANZHAF, Sabine, FORKEL, Renate, HELDENS, Wieke, KANANI-SÜHRING, Farah, MATZARAKIS, Andreas, MAUDER, Matthias, PAVLIK, Dirk, PFAFFEROTT, Jens, SCHUBERT, Sebastian, SECKMEYER, Gunther, SIEKER, Heiko et WINDERLICH, Kristina, 2019. Development of a new urban climate model based on the model PALM – Project overview, planned work, and first achievements. In: *Meteorologische Zeitschrift*. 1 juin 2019. Vol. 28, n° 2, pp. 105-119. DOI 10.1127/Metz/2019/0909.

⁹⁷ RAASCH, Siegfried et SCH, Michael, 2001. PALM-A large-eddy simulation model performing on massively parallel computers. In: *Meteorol. Z.* 1 novembre 2001. Vol. 10, pp. 363-372. DOI 10.1127/0941-2948/2001/0010-0363.

⁹⁸ MARONGA, B., GRYSCHKA, M., HEINZE, R., HOFFMANN, F., KANANI-SÜHRING, F., KECK, M., KETELSEN, K., LETZEL, M. O., SÜHRING, M. et RAASCH, S., 2015. The Parallelized Large-Eddy Simulation Model (PALM) version 4.0 for atmospheric and oceanic flows: model formulation, recent developments, and future perspectives. In: *Geoscientific Model Development*. 13 août 2015. Vol. 8, n° 8, pp. 2515-2551. DOI 10.5194/gmd-8-2515-2015.

les propriétés radiatives des matériaux seront prises en compte. Les rayonnements à GLO sont calculés en fonction des températures de surface.

Le sol est représenté par un modèle multicouche tenant compte des transferts verticaux de chaleur et d'eau. Les différents processus physiques induits par le fonctionnement de la végétation sont considérés, de même que leurs impacts radiatifs et aérodynamiques.

PALM 4U comprend également un modèle de bâtiment, basé sur une approche holistique, qui calcule les conditions intérieures et des consommations énergétiques en fonction des transferts par conduction à travers l'enveloppe, de la ventilation, des gains internes et des apports solaires par les fenêtres⁹⁹.

Ce nouveau modèle de climat urbain intègre également des aspects socio-économiques et permet d'évaluer la dispersion des substances chimiques, polluants.

Un module de biométéorologie urbaine est également implémenté. Il est basé sur les modèles existants, RayMan¹⁰⁰ et SkyHelios¹⁰¹.

Finalement, ce projet attache une importance majeure à l'accessibilité de cet outil. En effet, il devrait devenir un logiciel gratuit ou open source. L'objectif est qu'il soit accessible pour des personnes qui ne sont pas expertes du domaine. Pour cela, un travail particulier est réalisé sur l'interface de l'outil, dans le but de la rendre le plus « user-friendly » possible. Pour vérifier sa praticabilité, une stratégie de Living-Lab a été directement intégrée dans son processus de développement^{102,103}.

3.3.3 Modèles de bilan énergétique des surfaces

3.3.3.1 Introduction

D'autres types d'outils permettant de représenter le climat urbain existent. Ils traduisent les échanges entre les zones urbanisées et l'atmosphère. Pour cela, ils peuvent être couplés à des modèles atmosphériques et doivent donc avoir un coût computationnel réduit. Leur objectif initial étant de quantifier les échanges énergétiques, radiatifs, thermiques et hydriques ainsi que les interactions aérodynamiques entre l'atmosphère et la canopée urbaine, le besoin de précision sur les conditions dans la rue est moins fort que dans les modèles microclimatiques. Ils font donc appel à des simplifications géométriques permettant de réduire le temps de calcul. La plupart des modèles méso effectuent l'hypothèse d'une rue canyon typique pour représenter un quartier.

⁹⁹ PFAFFEROTT, Jens, RISSMANN, Sascha, SÜHRING, Matthias, KANANI-SÜHRING, Farah et MARONGA, Björn, 2021. Building indoor model in PALM-4U: indoor climate, energy demand, and the interaction between buildings and the urban microclimate. In: *Geoscientific Model Development*. 10 juin 2021. Vol. 14, n° 6, pp. 3511-3519. DOI 10.5194/gmd-14-3511-2021.

¹⁰⁰ MATZARAKIS, Andreas, RUTZ, Frank et MAYER, Helmut, 2010. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. In: *International Journal of Biometeorology*. 1 mars 2010. Vol. 54, n° 2, pp. 131-139. DOI 10.1007/s00484-009-0261-0.

¹⁰¹ MATZARAKIS, Andreas et MATUSCHEK, Olaf, 2011. Sky view factor as a parameter in applied climatology - Rapid estimation by the SkyHelios model. In: *Meteorologische Zeitschrift*. 1 mars 2011. Vol. 20, pp. 39-45. DOI 10.1127/0941-2948/2011/0499.

¹⁰² WINKLER, Matthias, STEURI, Bettina, STALDER, Sebastian et ANTRETTTER, Florian, 2020. Evaluating the Practicability of the new Urban Climate Model PALM-4U using a Living-Lab Approach. In: *E3S Web of Conferences*. 1 janvier 2020. Vol. 172, pp. 11010. DOI 10.1051/e3sconf/202017211010.

¹⁰³ STEURI, Bettina, BENDER, Steffen et CORTEKAR, Jörg, 2020. Successful user-science interaction to co-develop the new urban climate model PALM-4U. In : *Urban Climate*. 1 juin 2020. Vol. 32, pp. 100630. DOI 10.1016/j.uclim.2020.100630.

Ce type de modèle permet également d'évaluer des scénarios d'aménagement, des mesures d'atténuation de l'ICU et des consommations énergétiques du bâtiment, à l'échelle d'une ville entière. On s'intéressera dans ce rapport aux modèles de Canopée urbaine tels que définis dans le chapitre 1.1. comme CLMU (Community Land Model Urban)¹⁰⁴, Single-layer Urban Canopy Model (SLUCM)¹⁰⁵, BEP (Building Effect Parameterization)¹⁰⁶ ou encore TEB¹⁰⁷.

3.3.3.2 TEB (Town Energy Balance)

TEB (Town Energy Balance) est le modèle de surfaces urbanisées de SURFEX¹⁰⁸. Il permet de paramétrer les échanges énergétiques, radiatifs, hydriques et turbulents entre les surfaces bâties et l'atmosphère. Il est basé sur le concept de rue canyon¹⁰⁹, c'est-à-dire que des zones urbaines sont représentées par un canyon urbain moyen de longueur infinie. Un quartier est donc considéré homogène et est décrit par rue moyenne composée d'une surface au sol entourée par deux bâtiments à toit plat. L'utilisateur doit fournir les caractéristiques moyennes représentant la forme urbaine et les couches de matériaux composant les différentes surfaces verticales et horizontales. Ces simplifications sont en accord avec l'objectif général du modèle. En effet, TEB est conçu pour être aussi simple que possible pour garantir un temps de calcul réduit, tout en étant représentatif des phénomènes physiques.

Les phénomènes pris en compte dans la version historique de TEB sont les flux associés aux toits et aux façades des bâtiments, aux sols ou encore aux rejets anthropiques induits par le trafic routier ou l'industrie. Les phénomènes de piégeage radiatif et d'ombrage sont également considérés dans TEB. Depuis la création de TEB en 2000, d'autres processus ont été paramétrés dans le but de mieux représenter le climat urbain, la consommation énergétique des bâtiments et certains aménagements envisageables pour l'adaptation des villes face au changement climatique.

¹⁰⁴ OLESON, K. W., BONAN, G. B., FEDDEMA, J. et VERTENSTEIN, M., 2008. An Urban Parameterization for a Global Climate Model. Part II: Sensitivity to Input Parameters and the Simulated Urban Heat Island in Offline Simulations. In: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 1 avril 2008. Vol. 47, n° 4, pp. 1061-1076. DOI 10.1175/2007JAMC1598.1.

¹⁰⁵ HUSZAR, P., HALENKA, T., BELDA, M., ZAK, M., SINDELAROVA, K. et MIKSOVSKY, J., 2014. Regional climate model assessment of the urban land-surface forcing over central Europe. In: *Atmospheric Chemistry and Physics*. 26 novembre 2014. Vol. 14, n° 22, pp. 12393-12413. DOI 10.5194/acp-14-12393-2014.

¹⁰⁶ MARTILLI, Alberto, CLAPPIER, Alain et ROTACH, Mathias W., 2002. An Urban Surface Exchange Parameterisation for Mesoscale Models. In: *Boundary-Layer Meteorology*. 1 août 2002. Vol. 104, n° 2, pp. 261-304. DOI 10.1023/A:1016099921195.

¹⁰⁷ HAMDJ, R. et MASSON, V., 2008. Inclusion of a Drag Approach in the Town Energy Balance (TEB) Scheme: Offline 1D Evaluation in a Street Canyon. In: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 1 octobre 2008. Vol. 47, n° 10, pp. 2627-2644. DOI 10.1175/2008JAMC1865.1.

¹⁰⁸ MASSON, Valéry, 2000. A Physically Based Scheme for The Urban Energy Budget in Atmospheric Models. In: *Boundary-Layer Meteorology*. mars 2000. Vol. 94, n° 3, pp. 357-397. DOI 10.1023/A:1002463829265.

¹⁰⁹ OKE, T. R., 1982. The energetic basis of the urban heat island. In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1982. Vol. 108, n° 455, pp. 1-24. DOI 10.1002/qj.49710845502.

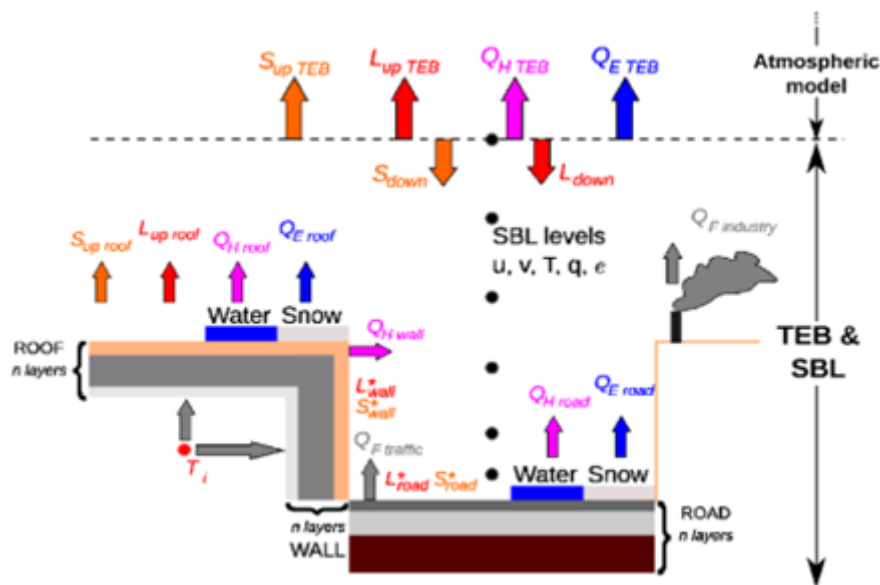


Figure 16 - Schéma d'une rue canyon typique et des principaux processus paramétrés dans TEB (Météo France)

TEB comprend un modèle thermique pour évaluer les transferts de chaleur par conduction à travers l'enveloppe du bâti. Les parois et les toits comportent plusieurs couches de matériaux dont le nombre et les caractéristiques sont définis par l'utilisateur. Au niveau de la surface extérieure, le bilan tient compte du phénomène de convection et des flux radiatifs à courtes et grandes longueurs d'onde. Au niveau de la surface intérieure, les échanges sont calculés à partir de la température intérieure.

Les profils verticaux de température et d'humidité sont influencés par les conditions de la route, des parois et des toits. Le principal avantage est la possibilité d'étudier le confort au niveau des piétons. En revanche, les parois urbaines ne sont pas discrétisées verticalement. Les échanges entre les parois et le canyon urbain sont donc toujours calculés à partir des conditions microclimatiques moyennes du canyon.

TEB a été amélioré dans le but de mieux décrire les processus physiques des bâtiments. Cette paramétrisation est appelée TEB-BEM (Building Energy Model) et a été développée par (Bueno et al. 2012)¹¹⁰, dans l'objectif double d'évaluer la demande énergétique des bâtiments et de quantifier les interactions entre le microclimat du canyon et le bâtiment. Ce développement a été conçu dans la continuité de TEB, en conservant des hypothèses physiques et géométriques simples. Les principales hypothèses simplificatrices effectuées sur le bâtiment sont les suivantes :

- > le bilan d'énergie interne du bâtiment est effectué pour une zone thermique unique ;
- > l'inertie thermique des matériaux est représentée par une masse thermique unique ;
- > le sol sous le bâtiment est considéré adiabatique ;
- > le pourcentage de surfaces vitrées est identique pour l'ensemble des façades.

Cette paramétrisation des bâtiments prend en compte :

- > les gains internes liés aux équipements ;
- > la pénétration du rayonnement dans le bâtiment à travers les vitrages ;
- > les échanges de chaleur sensible et latente engendrés par l'infiltration et la ventilation ;

¹¹⁰ BUENO, B., PIGEON, G., NORFORD, L. K., ZIBOUCHE, K. et MARCHADIER, C., 2012. Development and evaluation of a building energy model integrated in the TEB scheme. In : *Geoscientific Model Development*. 29 mars 2012. Vol. 5, n° 2, pp. 433-448. DOI 10.5194/gmd-5-433-2012.

- > le réchauffement ou rafraîchissement induit par les systèmes de chauffage et de climatisation en fonction des températures de consigne ;
- > les effets des méthodes passives comme la ventilation naturelle et des stores sur les fenêtres ;
- > le phénomène de convection au niveau de chaque surface intérieure.

Ainsi, TEB-BEM calcule l'évolution dynamique de la température de l'air intérieur ainsi que la demande énergétique liées aux systèmes de chauffage et ventilation, qui sera ensuite intégrée sur l'année. Cette paramétrisation permet également d'évaluer les rejets de chaleur sensible et latente de ces systèmes vers l'extérieur qui peuvent se faire au niveau des façades ou des toits. Ceci rend possible l'étude de l'impact des aménagements urbains sur la demande énergétique des bâtiments et les effets de rétroaction de l'usage du chauffage ou de la climatisation sur les conditions microclimatiques¹¹¹.

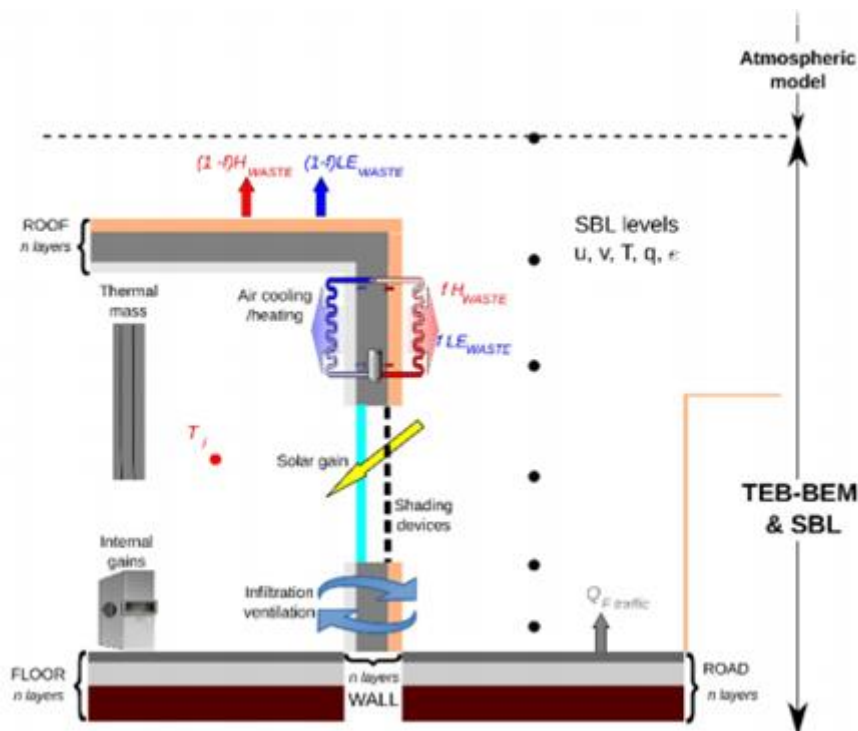


Figure 17 - Représentation schématique d'une rue canyon dans TEB en intégrant les principaux processus considérés par BEM (Météo France)

3.3.4 Couplage entre modèles complémentaires

Une autre possibilité pour étudier le microclimat est d'effectuer des couplages entre les outils CFD et des outils BES (Building Energy Simulation), qui permettent de calculer les échanges thermiques et radiatifs entre le bâtiment et son environnement, mais également d'effectuer un bilan énergétique du bâti. Ainsi les températures de surface sont calculées par les outils BES et la partie CFD les récupère pour calculer l'écoulement du vent dans l'environnement urbain.

(Zhai et al. 2002)¹¹² présente les différentes approches possibles pour effectuer ce type de couplage. Dans la littérature, de nombreuses études s'appuient sur des couplages de ce type, qui sont

¹¹¹ DE MUNCK, Cécile, 2013. Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville. Thèse de doctorat. Toulouse, INPT.

¹¹² ZHAI, Zhiqiang, CHEN, Qingyan, HAVES, Philip et KLEMS, Joseph H., 2002. On approaches to couple energy simulation and computational fluid dynamics programs. In: *Building and Environment*. 1 août 2002. Vol. 37, n° 8, pp. 857-864. DOI 10.1016/S0360-1323(02)00054-9.

particulièrement adaptés pour évaluer l'impact du microclimat urbain sur les consommations énergétiques. Pour citer quelques applications, (Allegrini et al. 2012)¹¹³ couple TRNSYS et ANSYS Fluent, dans le but d'étudier l'influence des coefficients de convection extérieurs sur les besoins en refroidissement. (Hadavi, Pasdarshahri 2021)¹¹⁴ propose un couplage entre EnergyPlus et OpenFoam, pour évaluer l'impact du microclimat sur l'efficacité des systèmes de refroidissement. Néanmoins, ces couplages sont généralement limités à de petits groupes de bâtiments.

L'outil CitySim, permet d'effectuer des simulations des flux énergétiques à l'échelle d'une ville entière et dispose d'un modèle radiatif détaillé. Son couplage avec un outil CFD comme OpenFOAM permet de visualiser l'impact de la morphologie urbaine sur le microclimat¹¹⁵.

Pour simuler les conditions microclimatiques locales, (Katal et al. 2019)¹¹⁶ s'appuie sur la combinaison de CityBEM (City Building Energy Model), un modèle énergétique des bâtiments à l'échelle urbaine et de CityFFD (City Fast Fluid Dynamics), un modèle rapide de fluide dynamique à l'échelle de la ville, qui est basé sur une méthode semi-Lagrangienne d'ordre élevé inconditionnellement stable¹¹⁷.

3.3.5 Modèles très simplifiés

Il existe un certain nombre de modèles qui ne cherchent pas à décrire les phénomènes physiques de l'îlot de chaleur urbain, mais à apporter une aide à la décision basée sur des règles de bonnes pratiques. Le modèle est alors extrêmement simplifié. L'objectif de ce type d'outil est de sensibiliser les acteurs opérationnels (architectes, urbanistes...) qui ne sont pas experts en modélisations microclimatiques ; mais qui ont cependant à intégrer cette question à leurs prises de décisions.

On peut citer par exemple le logiciel Score ICU. Basé sur une interface sous forme de plan, le logiciel Score ICU permet de définir les aménagements urbains existants ou projetés. Une des simplifications majeures est de ne considérer que les surfaces verticales. Dans un deuxième temps, la base de données de Score ICU permet d'associer à chaque type de revêtement un chiffre entre 1 et 9, correspondant à 9 tranches de chaleur, de la plus fraîche à la plus chaude. Par une moyenne surfacique, un score global est attribué à la zone urbaine étudiée. L'idée n'est pas de prédire une température, mais simplement de comparer des variantes de projets entre elles.

¹¹³ ALLEGRINI, Jonas, DORER, Viktor et CARMELIET, Jan, 2012. Analysis of convective heat transfer at building façades in street canyons and its influence on the predictions of space cooling demand in buildings. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1 mai 2012. Vol. 104-106, pp. 464-473. DOI 10.1016/j.jweia.2012.02.003.

¹¹⁴ HADAVI, Mohammad et PASDARSHAHRI, Hadi, 2021. Impacts of urban buildings on microclimate and cooling systems efficiency: Coupled CFD and BES simulations. In: *Sustainable Cities and Society*. 1 avril 2021. Vol. 67, pp. 102740. DOI 10.1016/j.scs.2021.102740.

¹¹⁵ ALLEGRINI, Jonas, DORER, Viktor et CARMELIET, Jan, 2015. Influence of morphologies on the microclimate in urban neighbourhoods. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. septembre 2015. Vol. 144, pp. 108-117. DOI 10.1016/j.jweia.2015.03.024.

¹¹⁶ KATAL, Ali, MORTEZAZADEH, Mohammad et WANG, Liangzhu (Leon), 2019. Modeling building resilience against extreme weather by integrated CityFFD and CityBEM simulations. In: *Applied Energy*. 15 septembre 2019. Vol. 250, pp. 1402-1417. DOI 10.1016/j.apenergy.2019.04.192.

¹¹⁷ MORTEZAZADEH, Mohammad et WANG, Liangzhu Leon, 2017. A high-order backward forward sweep interpolating algorithm for semi-Lagrangian method. In: *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 2017. Vol. 84, n° 10, pp. 584-597. DOI 10.1002/flid.4362.

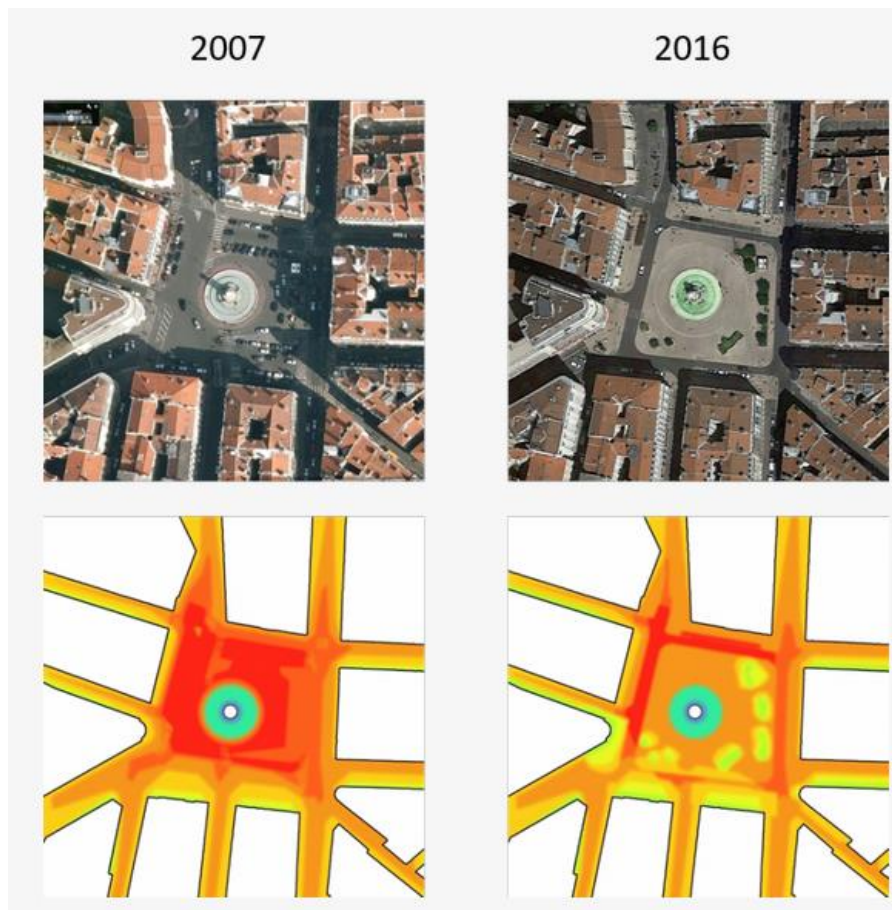


Figure 18 - Exemple des résultats de Score ICU¹¹⁸

On peut également citer un outil libre en cours de développement par les bureaux d'études Egis et Elioth : l'outil ICE. Basé sur un logiciel de SIG libre, QGIS, l'outil calcule la température de surface des sols à partir d'un bilan énergétique simplifié.

La méthode se décompose en 5 étapes :

1. Calcul des ombres des arbres et bâtiments (sur une journée pour un calcul rapide).
2. Choix des matériaux de sol depuis une base de données fournie en open source.
3. Maillage à partir duquel on teste à chaque heure de la journée si chaque point du maillage est à l'ombre ou pas.
4. Bilan énergétique des surfaces de sol pour obtenir les températures de surface.
5. Cartographie des résultats.

¹¹⁸ <http://www.e6-consulting.fr/ilots-de-chaleur-urbains-outil-score-icu/>

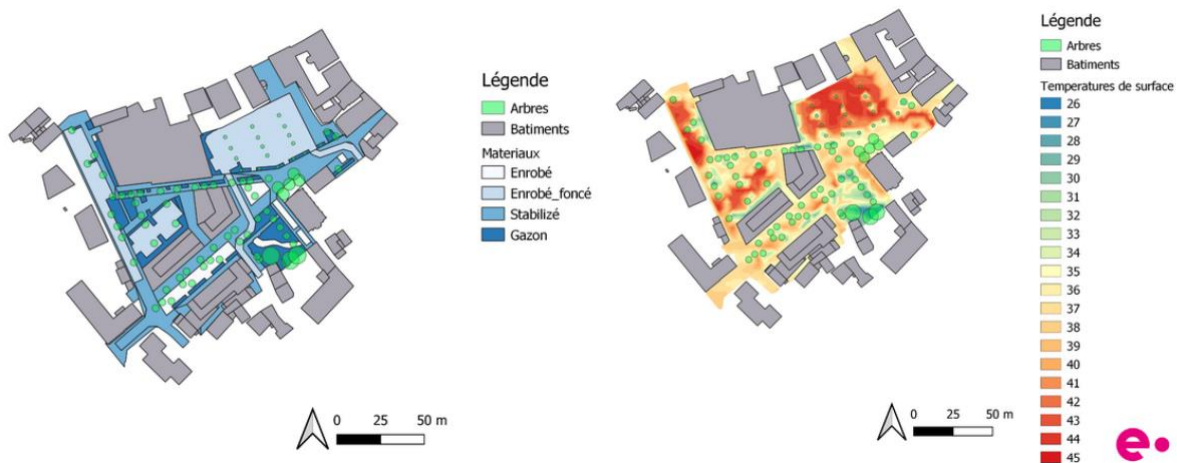


Figure 19 - Illustration des cartes produite par ICE¹¹⁹

3.4 Les indicateurs pour la quantification de l'îlot de chaleur urbain

3.4.1 Les indicateurs de microclimat

3.4.1.1 Introduction

Les indicateurs de microclimat permettent une interprétation physique des résultats de modélisation et une évaluation chiffrée des scénarios de réduction de l'îlot de chaleur urbain.

Selon la configuration étudiée, ils peuvent être spatialisés sous formes de cartes ou moyennés sur une zone donnée.

3.4.1.2 La température de l'air

La température de l'air est l'indicateur le plus fréquemment utilisé pour caractériser l'îlot de chaleur urbain. Rappelons que la définition même de l'îlot de chaleur urbain et la différence de température entre la ville est la campagne environnante.

Si cet indicateur peut paraître simple, il est important de préciser un certain nombre d'éléments :

- > la hauteur de la mesure ou de la modélisation (souvent à 1 ou 2 mètres du sol, afin de correspondre au ressenti des piétons) ;
- > l'heure et la date (on privilégie souvent une période de canicule, de jour et/ou de nuit ou encore sur un cycle journalier complet) ;
- > le lieu pris comme référence pour calculer la différence de température entre la zone étudiée et la campagne.

3.4.1.3 La température de surface

La température de surface est également souvent utilisée, notamment car elle est mesurable par télédétection ou imagerie infrarouge. On peut également la modéliser avec la plupart des modèles de microclimat urbain.

De la même manière que pour la température de surface, il faut préciser la ou les surfaces considérées et le moment de la modélisation.

¹¹⁹ <https://eliioth.com/ice-la-solution-pour-etudier-le-rafraichissement-de-vos-quartiers/>

3.4.1.4 Les autres paramètres climatiques

Il peut être utile de modéliser les autres paramètres permettant de caractériser le microclimat, en particulier :

- > pression partielle de vapeur d'eau (Pa) ou humidité relative (%) ;
- > vitesse (m/s) et direction du vent.

La multitude des indicateurs de microclimat urbain, si elle permet une description complète de l'ambiance extérieure, n'est pas toujours une aide à la prise de décision. D'une part, les décideurs n'ont pas toujours une idée des ordres de grandeurs visés. D'autre part, différentes solutions peuvent impacter sur des indicateurs différents, et il est alors difficile de pondérer les indicateurs les uns par rapport aux autres (par exemple un prospect élevé pourrait favoriser des températures de surfaces faibles mais conduire à des augmentations de température de l'air).

3.4.2 Les indicateurs de confort thermique extérieur

3.4.2.1 Introduction

Les indicateurs de confort permettent une approche très opérationnelle (impact sur les usagers), tout en agrégeant plusieurs paramètres de microclimat urbain. Ils permettent donc une analyse multicritère des leviers d'action sur l'îlot de chaleur urbain. Selon la configuration étudiée, ils peuvent être spatialisés sous formes de cartes ou moyennés sur une zone donnée. On peut également évaluer ces indicateurs de confort sur des « trajets types » traduisant les habitudes des usagers.

3.4.2.2 Température opérative

La température opérative est un indicateur qui considère que les échanges entre l'individu et son environnement se font essentiellement par convection et par rayonnement. Cet indice suppose que l'individu se trouve dans une enceinte isotherme dans laquelle l'air est à une température homogène et les surfaces ont toutes la même température. Il en découle un indicateur de confort simple, basé sur la moyenne pondérée de la température de l'air et de la température moyenne radiante.

$$T_{op} = \frac{h_c T_{air} + h_r T_{mrt}}{h_c + h_r}$$

Avec h_c et h_r les coefficients d'échange convectif et radiatif respectivement [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$].

Cet indice a l'avantage d'être facile à comprendre et à calculer, bien qu'il ne permette pas de prendre en compte l'ensemble des enjeux du confort thermique.

3.4.2.3 WBGT

L'indice WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) a été développé par le United States Marine Corps, pour évaluer les risques liés aux stress thermiques au travail¹²⁰. Il est depuis très reconnu et largement utilisé. Cet indice de confort intègre l'humidité, la température de l'air, la température de globe noir (NF EN ISO 7243 2017). Il se calcule selon deux formules en fonction de la prise en compte ou non du rayonnement solaire :

- > En tenant compte du rayonnement solaire :
$$WBGT = 0,7T_{hn} + 0,2T_{gn} + 0,1T_{air}$$
- > En conditions intérieures (donc sans rayonnement solaire) :

¹²⁰ YAGLOU, C. P. et MINAED, D., 1957. Control of Heat Casualties at Military Training Centers. In: *Arch. Indust. Health*. 1957. Vol. 16, n° 4, pp. 302-16.

$$WBGT = 0,7T_{hn} + 0,3T_{gn}$$

Avec T_{hn} la température humide naturelle (°C), T_{gn} la température du globe noir (°C) et T_{air} la température de l'air (°C). La température humide naturelle est mesurée à partir d'un capteur recouvert d'une mousseline mouillée.

Cet indice est limité par deux aspects principaux :

- > la durée d'exposition est fixée à huit heures et non modifiables ;
- > les mécanismes de thermorégulation ne sont pas pris en compte.

3.4.2.4 OUT_SET*

L'indice ET (Effective Temperature) a initialement été conçu pour évaluer le confort intérieur¹²¹. Ce premier indicateur prenait en compte la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse de l'air. Plusieurs améliorations successives ont été proposées, ce qui a donné lieu à l'indice ET* (new effective temperature)¹²², puis au SET* (standard effective temperature)¹²³. Ainsi, un bilan thermique sur l'individu et un modèle deux nœuds pour représenter le corps humain ont été implémentés. L'indice SET* compare les conditions étudiées à celle d'une pièce standardisée dans laquelle la température moyenne radiante est égale à la température de l'air et l'humidité relative est constante à 50 %. L'indice correspond à la température provoquant les mêmes échanges de chaleur dans l'environnement de référence, que dans les conditions étudiées.

Finalement, ce dernier a été repris et adapté à l'environnement extérieur¹²⁴. Ce nouvel indice se nomme OUT_SET* et a été amélioré de sorte à mieux représenter les rayonnements à courte et grande longueur d'onde.

3.4.2.5 PMV et PPD

L'indice PMV (Predicted Mean Vote ou vote prévisible moyen) permet d'évaluer statistiquement la sensation thermique, à partir des variables environnementales et individuelles^{125,126}. Cet indice se base sur une enquête statistique réalisée dans le début des années 1970 sur plus de 1 300 individus en chambre climatique. Cette étude a permis d'établir une correspondance entre le bilan thermique sur le corps humain et la sensation thermique moyenne des individus, ce qui a abouti à la relation empirique suivante :

$$PMV = (0,303 * \exp(-0,036 * Met) + 0,028) * S$$

Le PMV est une valeur comprise dans l'échelle de sensation thermique à sept points. Le terme de variation d'énergie dans le corps humain S est égal à $0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, lorsque l'équilibre thermique entre le corps et son environnement est atteint. Dans ce cas, le PMV est égal à 0, ce qui correspond à une

¹²¹ HOUGHTON, FC et YAGLOU, CP, 1923. Determining equal comfortlines. In: *J Am Soc Heat Vent Engrs*. 1923. Vol. 29, pp. 165-176.

¹²² GAGGE, A P, STOLWIJK, J A J et NISHI, Ysaunobu, 1971. An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response. In: 1971. pp. 17.

¹²³ GONZALEZ, R. R., NISHI, Y. et GAGGE, A. P., 1974. Experimental evaluation of standard effective temperature: a new biometeorological index of man's thermal discomfort. In: *International Journal of Biometeorology*. mars 1974. Vol. 18, n° 1, pp. 1-15. DOI 10.1007/BF01450660.

¹²⁴ DE DEAR, Richard et PICKUP, J, 2000a. An Outdoor Thermal Comfort Index (OUT_SET*) - Part II - Applications. In : . S.l. : s.n. pp. 284-290.

DE DEAR, Richard et PICKUP, J, 2000b. An outdoor thermal comfort index (Out_SET*)-Part 1-The model and its assumptions. In: S.l.: s.n. pp. 279-283.

¹²⁵ FANGER, P. O., 1970. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. [en ligne]. Copenhagen: Danish Technical Press.

¹²⁶ NF EN ISO 7730, 2006. 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. 2006.

situation neutre. De manière générale, sont considérés en situation d'inconfort les personnes dont le vote est supérieur à 1 ou inférieur à -1.

De cet indice découle directement un autre indice appelé pourcentage prévisible d'insatisfait (PPD). Il correspond au pourcentage d'individus se trouvant en situation d'inconfort dans une situation thermique donnée.

$$PPD = 100 - 95 * \exp(-(0,03353 * PMV^4 + 0,2179 * PMV^2))$$

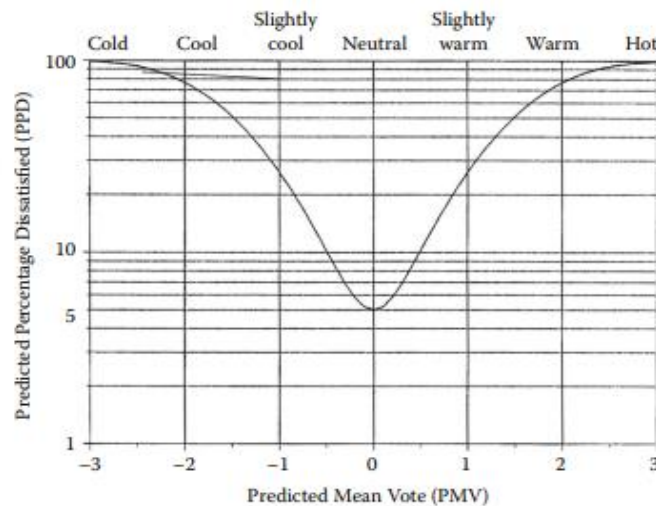


Figure 20 - Évolution du pourcentage prévisible d'insatisfait (PPD) en fonction du vote prévisible moyen (PMV) (Parsons 2002)

Le PPD est directement lié au PMV, cet indice permet d'évaluer un pourcentage d'individus qui se trouveraient en situation d'inconfort thermique. Le PPD est un pourcentage variant de 5 à 100 %, sachant que 5 % correspond à un PMV de 0. Pour qu'une ambiance soit confortable, la norme considère qu'au moins 90 % des individus doivent être satisfaits, ce qui correspond à un PPD inférieur à 10 % et un PMV compris entre -0,5 et + 0,5.

Initialement conçus pour évaluer le confort en intérieur, ces indices peuvent être appliqués seulement dans des conditions restreintes qui sont les suivantes¹²⁷ :

- > Met : 46 à 232 $W \cdot m^{-2}$;
- > T_{air} : 10 à 30 °C ;
- > V_{air} : 0 à 1 m/s ;
- > I_{cl} : 0 à 2 clo ;
- > T_{mrt} : 10 à 40 °C ;
- > P_{air} : 1 000 à 2 700 Pa.

De plus, le bilan thermique résolu à l'origine prend seulement en compte les variables suivantes : la température de l'air (°C), la température de rayonnement (°C), la vitesse de l'air (m/s), l'humidité relative (%), l'activité (met) et l'habillement (clo). Ainsi, le rayonnement solaire n'est pas pris en compte dans le PMV de Fanger.

Pour adapter ces indices au confort extérieur, (Jendritzky, Nübler 1981)¹²⁸ ont modifié les équations du PMV en paramétrant de manière plus complexe les flux radiatifs à ondes courtes et longues. Ce modèle est aussi connu sous le nom Klima-Michel Model (KMM).

¹²⁷ LAVOYE, Frédéric, BOEUF, Frédéric et THELLIER, Françoise, 2015. *Qualité des ambiances dans les bâtiments: Le confort thermique de l'Habitant*. 1^{re} édition. S.I. : Transvalor - Presses des mines. ISBN 978-2-35671-226-4.

¹²⁸ JENDRITZKY, G. et NÜBLER, W., 1981. A model analysing the urban thermal environment in physiologically significant terms. In: *Archives for meteorology, geophysics, and bioclimatology, Series B*. 1 décembre 1981. Vol. 29, n° 4, pp. 313-326. DOI 10.1007/BF02263308.

Par ailleurs, (Hodder, Parsons 2006)¹²⁹ étudie le lien entre l'indice PMV et rayonnement solaire. Leurs travaux ont mené à l'établissement d'une relation linéaire, permettant de calculer un PMV modifié.

$$PMV_{sol} = PMV + \frac{RAD}{200}$$

Avec PMV_{sol} le vote prévisible moyen prenant en compte les effets du rayonnement solaire (allant + 5 extrêmement chaud à -5 extrêmement froid), RAD le niveau de rayonnement solaire direct reçu par l'individu.

3.4.2.6 PET

Le PET (température physiologique équivalente) est un indicateur de confort thermique conçu pour l'évaluation des environnements extérieurs¹³⁰. Il tient compte de quatre variables météorologiques qui sont la température de l'air ambiant, la température moyenne radiante, la vitesse du vent et la pression de vapeur d'eau.

L'indice PET est défini comme la température de l'air équivalente dans un environnement intérieur typique (sans vent ni rayonnement solaire). De plus, cet indicateur est exprimé en degré (°C) ce qui le rend plus instinctif pour les usagers non familiers avec la biométéorologie.

Un des atouts de cet indice est qu'il prend en compte les processus de thermorégulation physiologique comme le taux de transpiration et la constriction ou la dilatation des vaisseaux sanguins. Pour cela, il se base sur le modèle MEMI (MunichEnergy-balance Model for Individuals)¹³¹. Le modèle MEMI comprend le bilan énergétique humain et des paramètres du modèle à deux nœuds de (Gagge et al. 1971)¹³².

Ce modèle repose sur la résolution d'un système de trois équations, dont les trois inconnues sont la température moyenne de surface des vêtements T_{hab} , la température moyenne de la peau T_{peau} et la température du noyau du corps T_{noy} .

Par ailleurs, une correspondance entre l'indice PET et l'échelle de stress physiologique a été développée¹³³. Ces valeurs sont basées sur des mesures in-situ, associées à une enquête auprès des piétons. Cette équivalence est établie pour un climat tempéré, un métabolisme de 80 W et une résistance vestimentaire de 0,9 clo. Dans ces circonstances, le confort est atteint pour un indice PET compris entre 18 et 23 °C.

¹²⁹ HODDER, Simon G. et PARSONS, Ken, 2006. The effects of solar radiation on thermal comfort. In: *International Journal of Biometeorology*. 19 décembre 2006. Vol. 51, n° 3, pp. 233-250. DOI 10.1007/s00484-006-0050-y.

¹³⁰ HÖPPE, P., 1999. The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. In: *International Journal of Biometeorology*. 1 octobre 1999. Vol. 43, n° 2, pp. 71-75. DOI 10.1007/s004840050118.

¹³¹ MAYER, H. et HÖPPE, P., 1987. Thermal comfort of man in different urban environments. In: *Theoretical and Applied Climatology*. 1 mars 1987. Vol. 38, n° 1, pp. 43-49. DOI 10.1007/BF00866252.

¹³² GAGGE, A P, STOLWIJK, J A J et NISHI, Ysaunobu, 1971. An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response. In: 1971. pp. 17.

¹³³ MATZARAKIS, Andreas et MAYER, Helmut, 1996. Another kind of environmental stress: Thermal stress. In: *WHO Collaborating Centre for Air Quality Management and Air Pollution Control*. 1 janvier 1996. Vol. 18, pp. 7-10.

Tableau 1 : Équivalence entre la température physiologique équivalente (PET) et les degrés de stress physiologique dans des conditions données

PET	Perception thermique	Degré de stress physiologique
4 °C	Très froid	Stress extrême dû au froid
	Froid	Stress fort dû au froid
8 °C	Frais	Stress modéré dû au froid
13 °C	Légèrement frais	Stress léger dû au frais
18 °C	Confort	Pas de stress thermique
23 °C	Légèrement tiède	Stress léger dû à la chaleur
29 °C	Tiède	Stress modéré dû à la chaleur
35 °C	Chaud	Stress fort dû à la chaleur
41 °C	Très chaud	Stress extrême dû à la chaleur

Une des limitations principales de cet outil est qu'il évalue le confort en régime permanent, ce qui suppose que les individus sont exposés durant de longues durées aux mêmes conditions climatiques extérieures et qu'elles atteignent l'équilibre thermique. En réalité, cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée.

3.4.2.7 UTCI

En réponse à cette problématique, l'indice instationnaire UTCI (Universal Thermal Comfort Index) a été développé dans le cadre du COST Action 730¹³⁴. Ainsi, plus de 45 scientifiques de 23 pays ont participé à l'élaboration de cet indice. Son objectif est de prédire le confort et la santé des individus à partir de données météo. Pour cela, il est basé sur le modèle dynamique à 340 nœuds de Fiala¹³⁵, permettant notamment de calculer l'état thermique de plusieurs segments du corps et d'évaluer leur réponse physiologique. Ce modèle permet d'évaluer les échanges thermiques internes au corps humain et également les échanges entre l'intérieur du corps humain et la surface de la peau, en considérant l'isolation due à l'habillement et les particularités anatomiques, thermiques et physiologiques. Par ailleurs, l'UTCI prend en compte la température de l'air, la température moyenne radiante, la vitesse de l'air et l'humidité. Il est également conçu pour être valide pour l'ensemble des climats, des saisons, des échelles spatiales et temporelles¹³⁶. En plus d'utiliser des données météorologiques et un modèle physiologique dynamique détaillé, cet indice comprend un modèle d'habillement adaptatif¹³⁷.

¹³⁴ JENDRITZKY, Gerd, WEIHS, Philipp, BATCHVAROVA, Ekaterina, HAVENITH, George et DE DEAR, Richard, 2008. The Universal Thermal Climate Index UTCI Goal and state of COST Action 730 and ISB Commission 6. In: *Air Conditioning and the Low Carbon Cooling Challenge*. London: s.n. 2008.

¹³⁵ FIALA, D., LOMAS, K. J. et STOHRER, M., 2001. Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. In: *International Journal of Biometeorology*. septembre 2001. Vol. 45, n° 3, pp. 143-159. DOI 10.1007/s004840100099.

¹³⁶ JENDRITZKY, Gerd, DE DEAR, Richard et HAVENITH, George, 2012. UTCI—Why another thermal index? In: *International Journal of Biometeorology*. 1 mai 2012. Vol. 56, n° 3, pp. 421-428. DOI 10.1007/s00484-011-0513-7.

¹³⁷ BRÖDE, Peter, JENDRITZKY, Gerd, FIALA, Dusan et HAVENITH, George, 2010. The Universal Thermal Climate Index UTCI in operational use. In: *Proceedings of Conference: Adapting to Change: New Thinking on Comfort Cumberland Lodge*. Windsor, UK: s.n. 1 janvier 2010.

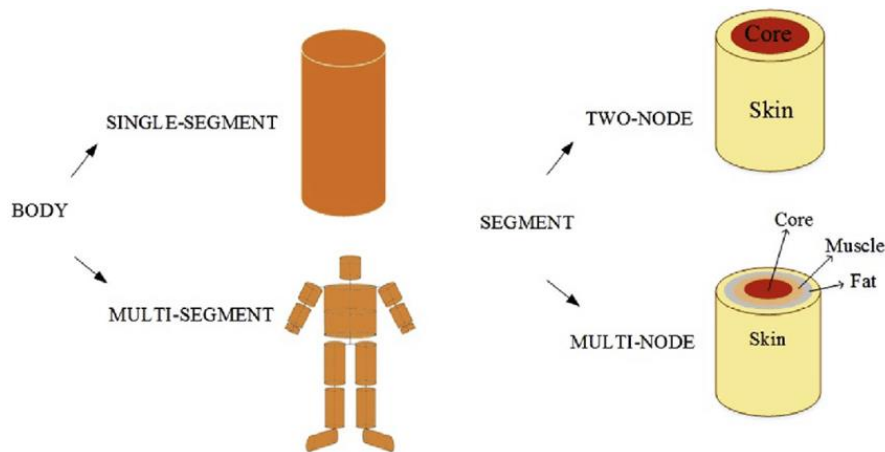


Figure 21 - Différentes simplifications pour modéliser le corps humain¹³⁸

La méthode de calcul de l'indice est ensuite basée sur un concept d'environnement « équivalent ». Cet environnement équivalent se caractérise par une humidité relative à 50 %, une pression de vapeur d'eau de 2 kPa, une vitesse d'air de l'ordre de 0,5 m/s et enfin une température de l'air égale à la température radiante. Dans ces conditions, l'activité de référence de l'individu est la marche à 4 km/h, qui équivaut à un métabolisme de $135 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Il est alors possible d'en déduire une température de référence qui provoquerait la même réponse physiologique dynamique et donc la même sensation de confort (ou d'inconfort) thermique que l'environnement étudié. L'échelle d'interprétation de cette température de référence est présentée dans la figure ci-après. Les conditions sont jugées confortables pour l'individu lorsque la température équivalente UTCI est comprise entre 9 et 26 °C.

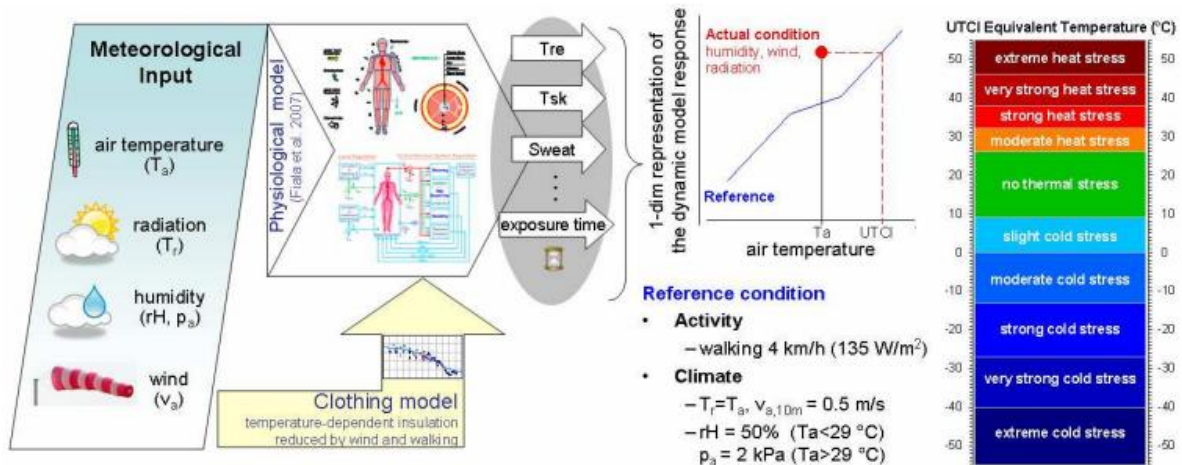


Figure 22 - Schéma représentant le concept du calcul de l'UTCI

3.4.2.8 ASV

L'ASV (Actual Sensation Vote) est un indice empirique¹³⁹. Il se base sur les résultats de sondages sur les sensations thermiques des individus couplés à l'enregistrement de données météorologiques

¹³⁸ KATIC, Katarina, LI, Rongling et ZEILER, Wim, 2016. Thermophysiological models and their applications: A review. In: *Building and Environment*. 1 juin 2016. Vol. 106. DOI 10.1016/j.buildenv.2016.06.031.

¹³⁹ NIKOLOPOULOU, Marialena, 2004. *Designing Open Spaces in the Urban Environment: a Bioclimatic Approach*. S.l.: s.n. ISBN 978-960-86907-2-1.

(température de l'air, rayonnement global, vitesse du vent et humidité relative). La spécificité de cette étude est qu'elle a été réalisée dans sept villes européennes (Athènes, Cambridge, Fribourg, Kassel, Milan, Sheffield et Thessaloniki), dans le cadre du projet RUROS (Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces). Ainsi, des corrélations entre les sensations thermiques des individus et les données climatiques ont pu être établies, ce qui a permis d'obtenir une équation pour chaque ville. Finalement, un modèle combiné a été obtenu pour l'évaluation de la sensation thermique en Europe :

$$ASV_{\text{Europe}} = 0,049 * T_{\text{air}} + 0,001 * \text{SOL} - 0,051 * V + 0,014 * \text{HR} - 2,079$$

Avec SOL le rayonnement solaire global (W/m²).

3.4.2.9 MOCI

Le MOCI (Mediterranean Outdoor Comfort Index) est un indice empirique, conçu pour évaluer les sensations thermiques des personnes en zone méditerranéenne¹⁴⁰. Il a été élaboré en s'appuyant sur les réponses au sondage de 941 personnes, décrivant leur sensation thermique par rapport à l'échelle à sept points de l'ASHRAE. D'autres questions du sondage concernaient l'âge, le genre, l'habillement, l'activité ou encore la durée d'exposition. En parallèle des mesures climatiques étaient réalisées, permettant de récupérer des données sur la température de l'air, l'humidité relative la vitesse de vent et le rayonnement global. Suite à l'analyse de ces facteurs individuels et climatiques, des corrélations ont été observées et la relation suivante a été obtenue :

$$\text{MOCI} = -4,068 - 0,272 * V + 0,005 * \text{HR} + 0,083 * T_{\text{mrt}} + 0,058 * T_{\text{air}} + 0,264 * I_{\text{cl}}$$

Avec V la vitesse du vent (m/s), HR l'humidité relative (%), T_{mrt} la température moyenne radiante (°C) et I_{cl} l'isolation de l'habillement (clo).

3.4.3 Les consommations énergétiques des bâtiments

Les équipements de chauffage et de climatisation contribuent à l'ilot de chaleur urbain. Pour l'ICU en saison chaude, une des principales problématiques est l'utilisation de la climatisation, qui engendre un phénomène d'auto-amplification. En effet, plus il fait chaud, plus les systèmes de climatisation sont utilisés et plus ils dégagent des charges thermiques à l'extérieur¹⁴¹.

Le phénomène d'ICU a également un impact sur les consommations énergétiques^{142,143}. Cependant, cet aspect est difficile à prévoir et dépend très largement du climat. En effet, l'impact de l'ICU est certes négatif en été, en augmentant les consommations liées à la climatisation, mais il est positif en hiver, puisque l'augmentation de la température de la ville entraîne une diminution des besoins en chauffage des habitants. Lors de l'étude d'une stratégie d'adaptation vis-à-vis de l'ICU, il est important de vérifier son impact saisonnier, pour s'assurer que la solution est pertinente en faisant un bilan global.

¹⁴⁰ SALATA, Ferdinando, GOLASI, Iacopo, DE LIETO VOLLARO, Roberto et DE LIETO VOLLARO, Andrea, 2016. Outdoor thermal comfort in the Mediterranean area. A transversal study in Rome, Italy. In: *Building and Environment*. 1 février 2016. Vol. 96, pp. 46-61. DOI 10.1016/j.buildenv.2015.11.023.

¹⁴¹ SANTAMOURIS, Matheos et ADNOT, Jérôme, 2004. *Cooling the cities : rafraîchir les villes*. S.l. : Presse des Mines. ISBN 978-2-911762-54-3.

¹⁴² ALLEGRI, Jonas, DORER, Viktor et CARMELIET, Jan, 2012. Influence of the urban microclimate in street canyons on the energy demand for space cooling and heating of buildings. In: *Energy and Buildings*. 2012. Vol. 55, pp. 823-832.

¹⁴³ CALICE, Claudia, CLEMENTE, Carola, SALVATI, Agnese, PALME, Massimo et INOSTROZA, Luis, 2017. Urban Heat Island Effect on the Energy Consumption of Institutional Buildings in Rome. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. octobre 2017. Vol. 245, pp. 082015. DOI 10.1088/1757-899X/245/8/082015.

Il est donc utile d'aborder une approche globale et d'évaluer l'impact des solutions mises en œuvre sur les indicateurs de consommations énergétique des bâtiments :

- > consommation de climatisation ;
- > consommation de chauffage ;
- > consommation d'éclairage ;
- > consommation de ventilation.

3.5 Données nécessaires à la modélisation de l'îlot de chaleur urbain

3.5.1 Introduction

Dans le cas général, les données suivantes sont nécessaires à la modélisation des îlots de chaleur. Selon les modèles, ces données devront être plus ou moins précises notamment en termes de distribution spatiale, temporelle ou encore spectrale pour les données relatives au rayonnement.

3.5.2 Données météorologiques

3.5.2.1 Rayonnement solaire (CLO)

La grandeur mesurée est en général l'irradiance qui correspond à la puissance du flux radiatif par unité de surface perpendiculaire à sa direction (densité surfacique exprimée en W/m^2). Afin de rendre compte du rayonnement solaire, il est nécessaire de déterminer les données suivantes :

- > **L'irradiance Normale Directe (DNI) qui** mesure l'irradiance du rayonnement solaire direct c'est-à-dire qui n'a rencontré aucun obstacle depuis le soleil ;
- > **L'irradiance Horizontale Diffuse (DHI) qui** mesure l'irradiance de tout le rayonnement venant du ciel sauf direct.

Ou directement :

- > L'irradiance Horizontale Globale (GHI).

$GHI = DHI \cos(\theta) + DNI$ ou θ est l'angle du rayonnement solaire par rapport à la normale du capteur.

Le rayonnement réfléchi (et donc le rayonnement absorbé) peut être déterminé grâce à l'albédo des surfaces recevant le rayonnement ou être directement mesuré.

Toutes ces grandeurs peuvent être mesurées. Elles sont obtenues par intégration de la radiance (fonction de base), sur la demi-sphère (irradiance spectrale) et sur le domaine spectral (Irradiance).

Ces grandeurs peuvent également être générées statistiquement à partir de données mesurées sous forme de climats types. Le logiciel meteonorm permet par exemple la génération de climats types selon différents paramètres (caractère extrême du climat, prévision sur des périodes futures...).

Tableau 2 : Exemple de donnée météorologiques générées avec le logiciel meteonorm (sous format .wac)

```

WUFI®_WAC_02
10      Line Offset to 'Number of Data Columns'
Nice

7.20    Longitude [°]; East is positive
43.67   Latitude [°]; North is positive
5       HeightAMSL [m]
1.0     Time Zone [h from UTC]; East is positive
1       Time Step [h]
8760    Number of DataLines
9       Number of DataColumns
ISGH    ISD      CI      TA      HREL    WS      WD      RN      ILAH
0       0       1.000  11.1   0.79    2.5     173    1.8    322.5
0       0       1.000  11.2   0.74    2.0     207    0.1    318.8
0       0       1.000  10.8   0.74    1.7     249    0.3    317.1
0       0       1.000  10.8   0.55    2.0     310    0.0    300.2
0       0       1.000  10.6   0.52    2.0     263    0.0    296.4
0       0       1.000  10.5   0.54    2.3     252    0.0    297.6
0       0       1.000  10.4   0.53    1.9     276    0.0    296.0
0       0       1.000  10.3   0.52    2.5     237    0.0    294.2
3       3       1.000  10.4   0.53    2.2     169    0.0    295.6
82      73      1.000  11.5   0.50    3.8     253    0.0    297.7
99      99      1.000  12.0   0.43    3.2     95     0.0    297.2
161     151     1.000  12.8   0.42    3.2     181    0.0    294.2
218     183     1.000  13.5   0.40    3.5     145    0.0    291.2
195     164     1.000  13.9   0.38    4.0     103    0.0    292.0
250     114     1.000  14.4   0.38    3.3     100    0.0    282.5
102     81      1.000  14.2   0.40    5.1     176    0.1    297.5

```

ISGH = Irradiance, Solar Global Horizontal (rayonnement CLO global)

ISD = Irradiance, Solar Diffuse (rayonnement CLO diffus)

CI = Cloud Index (nébulosité)

TA = Température d'air

HREL = Humidité relative

WS = wind speed (vitesse de l'air, scalaire)

WD = wind direction (direction de l'air, scalaire)

RN = normal rain (le volume de pluie reçu par une surface horizontale par unité de temps)

ILAH = Irradiance, Long-wave Atmospheric, Horizontal (rayonnement GLO atmosphere à Terre, voir ci-dessous)

D'autres données peuvent également être comprises dans ce type de fichiers parmi lesquelles la pression barométrique (au niveau de la mer ou de la station de mesure).

3.5.2.2 Rayonnement atmosphérique et autres rayonnements à grandes longueurs d'onde (GLO)

L'atmosphère (le ciel), la terre et tous les objets terrestres (constructions, végétaux...) émettent un rayonnement à courtes longueurs d'ondes qui participe au bilan énergétique.

Le rayonnement atmosphérique (atmosphère à Terre) et le rayonnement terrestre (Terre à atmosphère) peuvent être calculés tel que précisé dans la partie 1.3.2 mais peuvent également être des données météorologiques mesurées (climat réel) ou générées statistiquement (climat type).

3.5.2.3 Autres données

Parmi les autres données qui peuvent être utilisés dans la modélisation du microclimat urbain, on peut citer :

- > température de l'air ;
- > vitesse et direction de l'air ;
- > pression de vapeur/humidité relative ;
- > pression atmosphérique ;
- > couverture nuageuse (nébulosité) ;

- > la nébulosité indique le pourcentage de ciel couvert ;
- > précipitations (pluie, neige...).

Toutes ces données peuvent en principe être retrouvées dans des bases de données météorologiques avec plus ou moins de précision (pas de temps, distribution spatiale, hauteur...). Elles peuvent être issues de mesures (stations météo, bases de données Météo-France...) ou générées par des modèles stochastiques (logiciel meteonorm).

3.5.3 Données sur l'occupation des sols

3.5.3.1 Introduction

Les données sur l'occupation des sols concernent aussi bien les revêtements de sol que les végétaux ou les bâtiments.

3.5.3.2 Revêtements de sol

Les revêtements de sol peuvent être séparés en deux catégories : les couverts naturels (terre nue, herbe, cultures...) et artificiels.

Selon la précision du modèle, les sols peuvent être caractérisés par une ou plusieurs couches dont les propriétés physiques seront définies en entrée (voir chapitre 3.5.4 Données sur les propriétés physiques des matériaux).

En sus des propriétés thermiques et radiatives dont on connaît bien l'impact, la question de l'hydrologie dans ces couches est également centrale. En effet, la capacité d'un matériau de revêtement à laisser l'eau s'infiltrer vers le sous-sol, à la stocker en surface ou à la faire ruisseler directement vers un réseau de collecte d'eau pluviale ; va fortement influencer le microclimat. Certains modèles prennent également en compte la capacité des couches de sol inférieures à infiltrer l'eau. C'est le cas de TEB qui prend en compte la capacité de rétention et la capacité d'infiltration des revêtements de sol, le contenu en eau des couches inférieures de sol ainsi que les transferts d'eau entre et depuis ces couches de sol (transfert horizontal depuis d'autres mailles, transfert vers les réseaux de collectes, drainage vers les couches de sol plus profondes)¹⁴⁴.

Les coefficients de perméabilité des revêtements peuvent être estimés via des ordres de grandeur selon la nature du sol, ou bien déterminé par un essai de type Porchet ou Guelph comme indiqué dans les normes NF P 98-335 et NF DTU 64.1. Les données sur les propriétés hydrologiques des sols peuvent provenir de bases de données comme Harmonised World Soil Database¹⁴⁵, Topsoil¹⁴⁶ ou SoilGrids¹⁴⁷ qui sont disponibles à des résolutions de 1 km à 250 m en Europe.

¹⁴⁴ Bernard E, Chancibault C, K de M, Mosset A, Lemonsu A. Hydro-climatic response of Paris Metropolitan area through TEB-Hydro model simulation: multi-catchment calibration and model evaluation. Dans: 15th International Conference on Urban Drainage.; 2021

¹⁴⁵ FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC, 2012: Harmonized World Soil Database (version 1.2). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.

¹⁴⁶ Ballabio, C., Panagos, P., Montanarella, L., 2016: Mapping topsoil physical properties at European scale using the LUCAS database. *Geoderma*, 261, pp. 110-123.

¹⁴⁷ Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G. B.M., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M. et al., 2017: SoilGrids250m: global gridded soil information based on Machine Learning. *PLoS ONE* 12(2): e0169748.

3.5.3.2 Végétation

Le couvert végétal est une donnée d'entrée essentielle dans les modèles de microclimat. Dans les modèles les plus simples, seule la distinction entre végétation basse (gazon, prairie) et végétation haute (arbre, haies) sera demandée. Dans des modèles plus fins on pourra renseigner les essences de végétaux, leurs dimensions, les caractéristiques d'ombrage et d'évapotranspiration et les conditions d'irrigation de ce couvert végétal.

3.5.3.3 Géométrie des bâtiments

Le microclimat urbain est fortement influencé par la forme des bâtiments. Selon l'échelle de modélisation et la précision du modèle, les données nécessaires ne seront cependant pas les mêmes. Dans les modèles à l'échelle de la ville, la géométrie des bâtiments pourra être décrite de manière simplifiée. C'est le cas dans un modèle comme TEB : les bâtiments y sont représentés par une rue canyon en deux dimensions. Les informations nécessaires seront l'orientation, la hauteur et la distance entre bâtiments ainsi que la surface de murs et de toitures. Dans des outils CFD à l'échelle de la rue, les géométries plus précises pourront être modélisés, en particulier des pentes de toiture, des cours, des saillies...

3.5.4 Données sur les propriétés physiques des matériaux

3.5.4.1 Introduction

Le présent chapitre porte sur les données généralement utilisées dans les modèles. Des éléments complémentaires sont précisés au chapitre 4.1 qui traite du volet expérimental.

3.5.4.2 Propriétés radiatives

Albédo

Afin de déterminer le rayonnement solaire (CLO) réfléchi et absorbé par la surface exposée d'un matériau, il est nécessaire de connaître son albedo.

L'albédo est une propriété relative à la surface du matériau (à sa couleur) et n'est pas une propriété intrinsèque.

Émissivité

En ce qui concerne le rayonnement émis par l'atmosphère, la terre et les objets composant la scène urbaine (GLO) il est nécessaire de connaître l'émissivité de ces objets. Cette propriété n'est plus nécessaire dès lors que l'objet émetteur est considéré comme un corps noir, dont le rayonnement émis ne dépend que de sa température.

Comme indiqué précédemment, ces propriétés radiatives peuvent être considérées selon leurs distributions hémisphériques, leurs distributions spectrales ou de manière globale (par intégration sur la demi-sphère et sur l'ensemble du spectre). Dans le cadre de l'étude des ICU et à l'heure actuelle, il suffit, en général, de les considérer globalement.

Ces propriétés sont relatives aux surfaces (couleurs) réceptrices ou émettrices de rayonnements (et non pas intrinsèquement au matériau). Elles seront donc souvent associées aux revêtements appliqués aux différents éléments composant les espaces urbains (revêtements de sol, peintures des bâtiments...).

3.5.4.3 Propriétés hygrothermiques

Conductivité thermique

La conductivité thermique des matériaux est dépendante de leur température et de leur humidité. Ces dépendances sont plus ou moins fortes selon le type de matériau.

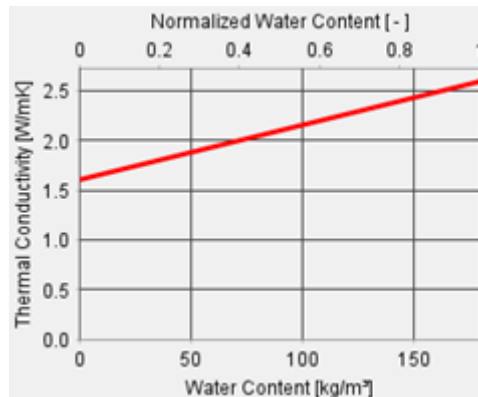


Figure 23 - Exemple de conductivité thermique dépendant de la teneur en eau (béton issu de la base de données du logiciel WUFI)

La conductivité thermique des matériaux rentre dans la détermination de la résistance thermique des parois d'un bâtiment.

Elle peut être mesurée par différentes méthodes (plaque chaude gardée, CT mètre). Il existe également différentes relations pour estimer l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la température et de l'humidité.

Capacité thermique

Comme indiqué dans la partie 1.2 il est nécessaire de connaître la capacité thermique massique à pression constante c_p . Cette grandeur peut présenter une dépendance à la température mais est souvent considérée constante pour les matériaux de construction.

Propriétés hydriques

Note sur la modélisation des transferts hygrothermiques dans les matériaux.

Afin de modéliser les transferts hygrothermiques (transferts couplés de chaleur et d'humidité), il existe un certain nombre d'outils intégrant des modèles de couplages hygrothermiques pouvant, éventuellement, être intégrés aux systèmes d'équations présentés dans les parties précédentes.

Le logiciel Wufi développé par le Fraunhofer Institute for Building Physics (IBP) est utilisé actuellement pour l'évaluation des transferts hygrothermiques dans les parois de bâtiment. Il intègre le modèle simplifié suivant développé par Künzle (1995)¹⁴⁸.

De manière analogue, la norme NF EN 15026¹⁴⁹ propose également un modèle de couplage hygrothermique.

Le logiciel COMSOL comprend également des modèles couplés transferts de chaleur/transferts d'humidité qui peuvent potentiellement être couplés avec les équations de la CFD.

¹⁴⁸ Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters, Künzle, H.M, 1995

¹⁴⁹ AFNOR. Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments - Évaluation du transfert d'humidité par simulation numérique. Avril 2008

Les différents paramètres utilisés dans ces équations permettent de caractériser le stockage et le transfert hydriques (vapeur et liquide) dans les matériaux. Ils sont présentés ci-dessous.

Humidité relative

L'humidité relative correspond au rapport de la pression de vapeur d'eau sur la pression de vapeur d'eau saturante à la même température (norme NF EN ISO 13788¹⁵⁰). L'humidité relative s'exprime en % et est généralement noté ϕ ou HR.

$$\phi = p/p_{sat}$$

avec :

p : pression de vapeur en Pascal ;

p_{sat} : pression de vapeur saturante en Pascal.

La pression partielle de la vapeur d'eau p est, par définition, la pression qu'aurait la vapeur d'eau si elle occupait à elle seule tout le volume du mélange.

La pression de vapeur saturante dépend principalement de la température de l'air. La formule simplifiée suivante est donnée par la norme.

$$p_{sat} = 610,5 * e^{\frac{17,269 * \theta}{237,3 + \theta}} \quad \text{pour } \theta \geq 0^\circ C$$

$$p_{sat} = 610,5 * e^{\frac{21,875 * \theta}{265,5 + \theta}} \quad \text{pour } \theta < 0^\circ C$$

Teneur en eau

La teneur en eau peut s'exprimer de trois manières :

(1) Teneur en eau massique u

La teneur en eau massique est le rapport entre la masse d'eau contenue dans le matériau (m_e) et la masse du matériau sec (m_s). Elle s'exprime en kg/kg :

$$u = \frac{m_e}{m_s}$$

(2) Teneur en eau par volume w

La teneur en humidité en masse par volume est le rapport de la masse d'eau sur le volume apparent du matériau. Il existe une relation entre la teneur en eau massique et la teneur en eau en masse par volume :

$$w = \rho_s u$$

où ρ_s est la masse volumique du matériau sec

(3) Teneur en eau volumique Ψ

La teneur en eau volumique est le rapport du volume d'eau sur le volume de matériau sec. Elle peut être déterminée, à partir de la teneur en eau massique, à l'aide de la formule suivante :

¹⁵⁰ AFNOR. NF EN ISO 13788 - Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments - Température superficielle intérieure permettant d'éviter l'humidité superficielle critique et la condensation dans la masse - Méthodes de calcul. Avril 2013

$$\psi = \frac{\rho_s}{\rho_w} u$$

où ρ_s est la masse volumique du matériau sec et ρ_w celle de l'eau

Perméabilité à la vapeur d'eau

La perméabilité d'un matériau δ_p définit sa capacité à se laisser traverser par un gaz sous l'action d'une différence de pression entre ses deux faces exposées. Pour la vapeur d'eau, il s'agit de la quantité de vapeur d'eau multipliée par l'épaisseur du matériau traversé, exprimé par unité de surface, de temps et par unité de pression de vapeur régnant de part et d'autre du matériau. Elle s'exprime donc en kg/(m.s.Pa).

Coefficient de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau

Dans le bâtiment, la perméabilité à la vapeur d'eau des matériaux est souvent exprimée par le facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau défini comme le rapport entre la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air et celle du matériau.

$$\mu = \frac{\delta_o}{\delta_p [-]}$$

La perméabilité à la vapeur d'eau de l'air peut être calculée à partir de la relation suivante.

$$\delta_o = 2.10^{-7} \frac{T^{0.81}}{p_o} \text{ [kg/(m.s.Pa)]}$$

où p_o est la pression de l'air ambiant et T la température en K.

Épaisseur d'air équivalente pour la diffusion de vapeur

Épaisseur d'une couche d'air ayant la même perméance qu'une couche de matériau d'épaisseur donnée. Elle peut être déterminée à partir du facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau et de l'épaisseur du matériau, à l'aide de la formule suivante :

$$S_d = \mu. e \text{ [m]}$$

Cette grandeur est souvent utilisée pour caractériser l'étanchéité à la vapeur d'eau des produits de constructions tels que les pare-vapeurs, les membranes d'étanchéité, les films de sous-toiture...

La perméabilité à la vapeur d'eau d'un matériau est en général dépendante de l'humidité relative. Une simplification souvent admise est de considérer 2 valeurs de perméabilités : « sèche » pour les humidités relative inférieures à 80 % et « humide » pour des humidités relatives supérieures (voir mesure selon norme NF EN ISO 12572¹⁵¹).

¹⁵¹ AFNOR. NF EN ISO 12572 - Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau - Méthode de la coupelle. Octobre 2006.

Coefficient d'absorption d'eau

La norme NF EN ISO 15148¹⁵² définit le coefficient d'absorption d'eau d'un matériau comme étant la masse d'eau absorbée par unité de surface et par la racine carrée du temps.

Coefficient de diffusion liquide

Le mécanisme de transport capillaire (transport d'eau liquide) dans les matériaux poreux peut, par simplification, être caractérisé par un coefficient de diffusion exprimé en m^2/s . Ce coefficient de diffusion est souvent inconnu pour beaucoup de matériaux mais peut être approximé à partir du coefficient d'absorption d'eau. Il est défini en succion (absorption) et en redistribution (séchage).

Le coefficient de diffusivité liquide est fortement dépendant de la teneur en eau. La figure suivante montre un exemple de coefficient de diffusion liquide.

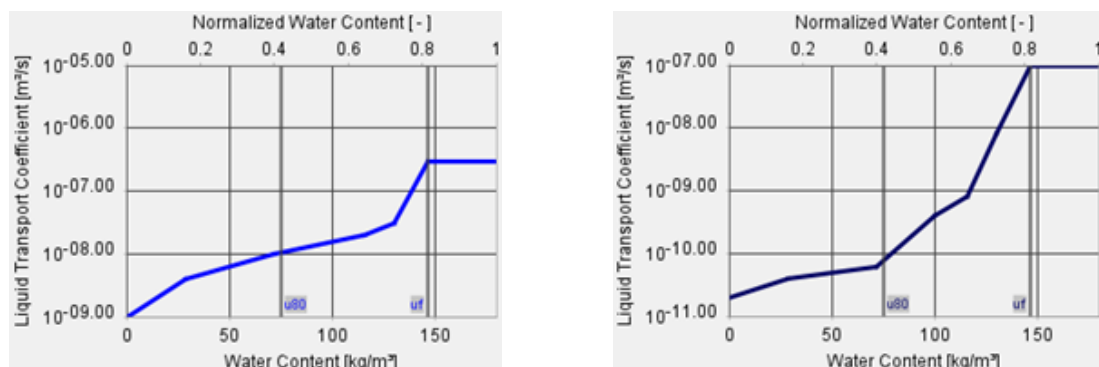


Figure 24 - Coefficient de diffusion liquide en succion (gauche) et redistribution (droite) pour un béton C35/45

Isotherme de sorption/désorption

Un matériau est dit hygroscopique s'il peut fixer une quantité mesurable d'humidité de l'air ambiant.

Exemple de matériau hygroscopique : béton, bois, terre cuite...

Exemple de matériau non hygroscopique : polystyrène, métaux...

Pour les matériaux hygroscopiques on définit une courbe isotherme de sorption/désorption qui traduit, à une température donnée, l'accroissement de la teneur en eau d'un matériau donné en fonction de l'humidité relative. La figure suivante en montre un exemple.

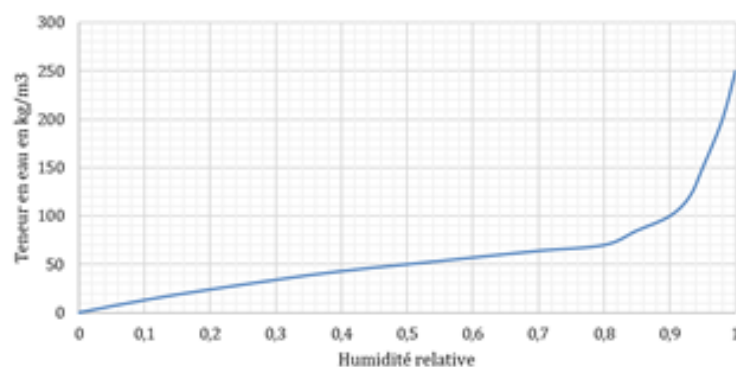


Figure 25 - Courbe de sorption Béton de granulats courant

¹⁵² AFNOR NF EN ISO 15148 Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination du coefficient d'absorption d'eau par immersion partielle octobre 2003.

3.5.4.4 Conclusion

Si ces propriétés physiques sont étudiées depuis de nombreuses années pour les matériaux de construction, la plupart des matériaux urbains demeurent insuffisamment caractérisés vis-à-vis des problématiques de microclimat urbain.

En particulier, l'évolution dans le temps de ces propriétés est peu étudiée et n'est donc prise en compte dans aucun modèle de climat urbain. On peut citer l'exemple de l'évolution de l'albédo en fonction du vieillissement ou de la teneur en eau ou encore la modification de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau d'un matériau

3.5.6 Exemples de données d'entrée pour TEB et Envimet

Afin d'illustrer les données nécessaires à la modélisation de l'îlot de chaleur urbain, nous avons choisi de récapituler les données d'entrée de TEB et d'Envimet, deux logiciels représentatifs des deux types de modèles étudiés (respectivement « Modèle microclimatique » et « Modèle de bilan énergétique »).

Tableau 3 : Données d'entrée de TEB

Paramètres		Symboles	Unités
Paramètres d'occupation du sol et géométriques	Fraction de recouvrement des bâtiments et des routes		-
	Densité surfacique des murs par rapport à la surface totale du sol		-
	Rapport d'aspect		-
	Hauteur moyenne des bâtiments	h	m
	Direction de la rue	dir	°
	Longueur de rugosité dynamique		m
Propriétés des matériaux	Albédo (toit, murs, route)		-
	Émissivité (toit, murs, routes)		-
	Conductivité thermique des matériaux (toit, murs, routes)		
	Capacité calorifique des matériaux (toit, murs, route)		
Variables de forçages atmosphériques	Pression atmosphérique		hPa
	Rayonnement solaire incident direct		
	Rayonnement solaire incident diffus		
	Rayonnement infrarouge incident		
	Taux de précipitation liquide		
	Taux de précipitation solide		
	Température de l'air		K
	Humidité spécifique de l'air		
	Vitesse du vent		
	Direction du vent		°

Tableau 4 : Données d'entrée de ENVImet v4

Paramètres		Symboles	Unités
Propriétés des matériaux constituant le sol	Réflexion		-
	Absorption		-
	Transmission		-
	Émissivité		-
	Longueur de rugosité associée la surface du sol		m
	Type de matériaux		
	Teneur en eau à saturation		
	Teneur en eau à capacité au champ		
	Teneur en eau au point de flétrissement		
	Potentiel matriciel		m
	Conductivité hydraulique		
	Capacité calorifique volumétrique		
	Constante de Clapp et Hornberger	n	-
	Conductivité thermique		
Propriétés des matériaux constituant l'enveloppe du bâti (toit et paroi)	Réflexion		-
	Absorption		-
	Transmission		-
	Émissivité		-
	Conductivité thermique des matériaux		
	Capacité calorifique des matériaux		
	Masse volumique		
Variables météorologiques	Rayonnement courte longueur d'onde direct		
	Rayonnement courte longueur d'onde diffus		
	Rayonnement grande longueur d'onde		
	Précipitations		
	Température de l'air		K
	Humidité relative		%
	Vitesse du vent		
	Direction du vent		°

Remarques :

- > dans ENVImet, le forçage météorologique doit être effectué avec un pas de temps de trente minutes ;
- > les flux radiatifs peuvent être remplacés par des couvertures nuageuses équivalentes (de 0 à 8 octas).

3.6 Conclusion

Les modèles du microclimat urbain sont nombreux et couvrent un large panel d'applications : modélisation des variations de température d'air et/ou de surface, du confort, ou encore des consommations d'énergies des bâtiments. Les échelles spatiales et temporelles varient également beaucoup, allant de l'échelle de la ville à celle du matériau. En conséquence, la quantité et les niveaux de détails des données d'entrée et de sortie sont hétérogènes. Les tableaux ci-après comparent les caractéristiques de six modèles microclimatiques courants et illustrent cette hétérogénéité.

Tableau 5 : Comparatifs de six modèles microclimatiques courants

Modèles	Phénomènes physiques modélisés										
	Rayonnement	Stockage et transferts thermiques	Végétation	Evapotranspiration	Environnement bâti	Humidité dans l'air	Humidité dans le sol	Forçage météorologique	Mouvement d'air	Conso. énergétiques bâtiments	Chaleur anthropique
Solweig	oui	oui	oui	non	Moyen	oui	non	non	non	non	non
Solène microclimat	oui	oui	Détaillé	oui	Détaillé	oui	non	oui	oui (CFD)	oui	oui
Envimet	oui	oui	Détaillé	Détaillé	Détaillé	oui	oui	oui	oui (CFD)	non	non
TEB - BEM	oui	oui	Simplifié	oui	Simplifié	oui	oui	oui	oui	oui	oui
ANSYS FLUENT	oui	oui	Simplifié	oui	Détaillé	oui	oui	oui	oui (CFD)	non	oui
COMSOL	oui	oui	Simplifié	non	Détaillé	oui	oui	oui	oui (CFD)	non	non

Modèles	Données de sortie													
	Température de l'air	Températures de surface	Température radiative moyenne	Humidité relative	Vitesse du vent	Direction du vent	Rayonnement	Indices de confort	Indices de confort					
									PMV	PET	UTCI	SET	PT	mPET
Solweig			X				X							
Solène microclimat	X	X		X	X	X	X	X			X			
Envimet	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
TEB - BEM	X	X	X	X	X		X	X			X			
ANSYS FLUENT	X	X		X	X	X	X							
COMSOL	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Modèles	Échelle	Résolut°	Échelle	Résolut°	Temps simulation
	temporelle		spatiale		
Solweig	15 min	1 jour à quelques mois	1 à 10 m	Quartier	Moyen
Solène microclimat	1 h et moins (jusqu'à 5 min)	15 jours	1 à 10 m	Quartier - Rue	Élevé
Envimet	quelques jours	30 min	0,5 à 10 m	Quartier	Élevé
TEB - BEM	5 min à 1 heures	10 jours à plusieurs années	100 à 500 m	Ville	Moyen
ANSYS FLUENT	1 heure	1 jour	3 à 20 cm	Rue	Élevé
COMSOL	5 min à 1 heures	1 jour	cm	Rue - Élément	Élevé

Comme on peut le voir dans les tableaux ci-dessus, il n'existe pas actuellement de modèle permettant de caractériser finement l'impact des matériaux à l'échelle du piéton en intégrant la totalité des phénomènes qui influence l'ICU. Il est donc nécessaire de développer un modèle spécifique à cette problématique.

Une autre problématique provient du fait que les données d'entrée pour caractériser le comportement d'un matériau dans un modèle ne sont pas toujours connues. C'est particulièrement le cas pour l'albédo et le comportement hygrothermique. Par ailleurs, l'évolution dans le temps des matériaux n'est prise en compte dans aucun modèle (modification de la couleur avec le vieillissement ou avec le taux d'humidité par exemple). Des caractérisations en laboratoire des matériaux urbains seraient un apport essentiel à leur meilleure prise en compte dans les modèles.

4. Approches expérimentales

Auteurs : Sylvain Boulet, Bernard Barthou, Amor Ben Larbi, Marion Bonhomme, Jérôme Lozeille, Salah-Eddine Oulboukhitine, Daniel Palenzuela

4.1 Propriétés physiques des matériaux et des surfaces et dispositifs expérimentaux associés

Le présent chapitre prolonge et complète les éléments présentés au chapitre 3.5.4. Il présente de façon pédagogique et vulgarisée, les définitions de quelques grandeurs physiques en relation avec les ICU. Pour plus de précision et de complément se reporter aux normes EN ISO 7345, EN ISO 9288 et EN ISO 9346.

4.1.1 Albedo – réflectance solaire

L'albédo est le facteur de réflexion énergétique d'une surface soumise au rayonnement solaire. Ce coefficient est sans dimension et représente la capacité d'une surface à réfléchir le rayonnement solaire. Une surface sera perçue comme blanche si l'albédo est proche de 1. Au contraire, elle sera perçue comme noire si l'albédo est proche de 0. Le terme « réflectance solaire » et le terme « albedo » sont équivalents. Le terme « albedo » est le plus souvent utilisé en climatologie. Le terme « réflectance solaire » est le plus souvent utilisé en thermique du bâtiment.

La mesure de réflectance solaire est le plus souvent réalisée à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Vis-NIR muni d'une sphère d'intégration.

La mesure du coefficient de réflectance solaire est réalisée en réflexion sur une large gamme de longueurs d'onde allant du spectre UV au proche infrarouge (280 à 2500 nm pour le spectrophotomètre du CTMNC).

En s'appuyant sur la norme *NF EN 410*¹⁵³, le coefficient d'absorption solaire est calculé à l'aide de la formule ci-dessous :

$$\alpha = \frac{hc \int_0^{\infty} \frac{\alpha(\lambda, T)}{\lambda} d\lambda}{hc \int_0^{\infty} \frac{1}{\lambda} d\lambda}$$

Où, α est le coefficient d'absorption solaire compris entre 0 et 1 ; $\alpha(\lambda, T)$, l'absorption du matériau à une longueur d'onde donnée comprise entre 0 et 1 ; E , l'énergie du rayonnement électromagnétique (en J) et λ , la longueur d'onde du rayonnement (en m).

Le coefficient de réflectance solaire est calculé en soustrayant à 1, la valeur du coefficient d'absorption solaire déterminé, par mesure, ci-dessus.

4.1.2 Coefficient d'absorption solaire

Le coefficient d'absorption solaire est le complément à 1 de la réflectance solaire.

4.1.3 Émissivité thermique

L'émissivité thermique ou l'émission infrarouge ou l'émittance thermique est la capacité d'une surface à dissiper l'énergie thermique emmagasinée par la structure sous forme d'échanges radiatifs, dans le

¹⁵³ NF EN 410 - Verre dans la construction - Détermination des caractéristiques lumineuses et solaires des vitrages – AFNOR – Edition Paris – 2011 et sur le rapport technique de la Commission Internationale de l'Eclairage – CIE 085 1989 – Technical report – Solar spectral irradiance – 1989

spectre des grandes longueurs d'onde, avec son environnement. Elle représente le rapport entre l'énergie radiante dans l'infrarouge et l'émissivité thermique maximale (corps noir) à la même température pour une surface donnée.

Cette grandeur est exprimée par la relation suivante :

$$\varepsilon = \frac{\text{Flux émis par un corps réel}}{\text{Flux émis par un corps noir}}$$

Ce paramètre dépend du matériau, de son état de surface, de la température appliquée, de la longueur d'onde du rayonnement. Il est compris entre 0 (pour un réflecteur parfait tel un miroir) et 1 (pour un émetteur parfait tel un corps noir).

L'émissivité thermique est une grandeur faisant intervenir le flux de chaleur émis par la surface d'un matériau pour une température donnée. À partir de la mesure de ce flux de chaleur, il est possible de déterminer le coefficient d'émissivité thermique compris entre 0 et 1.

Si le matériau émet un flux de chaleur élevé pour une faible température, ce coefficient sera proche de 1 et de ce fait, le matériau aura la propriété de restituer une grande partie de son énergie thermique. Au contraire, si le flux de chaleur est faible pour une température élevée, le coefficient d'émissivité sera proche de 0, ce qui signifie que le matériau ne restituera que peu d'énergie thermique emmagasinée.

Définition de l'émissivité dans la norme NF EN 12898¹⁵⁴ : Rapport de l'énergie émise par une surface donnée à une température donnée par rapport à celle d'un émetteur parfait (corps noir avec émissivité à incidence normale et l'émissivité corrigée = 1,0) à la même température.

- > l'émissivité thermique peut être mesurée au moyen de plusieurs types d'appareils :
Spectrophotomètres infrarouges ;
- > émissomètres portables ;
- > émissomètre calorimétrique.

Voir la référence suivante pour de plus amples informations :

Tahar Kateb et Jean-Luc Chevalier, OPTORA et les techniques de mesure de l'émissivité : l'émissomètre calorimétrique de référence, Cahiers de CSTB, Livraison 323, octobre 1991, cahier 2524.

Le CTMNC mesure l'émissivité thermique à l'aide d'une caméra thermique calibrée à l'aide d'un thermocouple de contact. L'éprouvette est disposée sur une plaque chauffante. Le focus de la caméra thermique est réalisé à une position centrale de l'éprouvette. La température de l'éprouvette, à ce point donné, est mesurée à l'aide d'un thermocouple. Après acquisition de cette donnée par le logiciel de la caméra thermique, l'émissivité thermique de l'éprouvette en ce point est calculée.

4.1.4 L'indice SRI

L'indice de réflectance solaire (SRI) est un paramètre du matériau ou du revêtement qui met en rapport la quantité d'énergie thermique émise par une surface donnée avec la fraction de radiation solaire réfléchi par cette même surface. Ainsi, ce paramètre renseigne sur la capacité d'un matériau ou d'un revêtement à réfléchir la chaleur en faisant preuve d'une faible augmentation de température lorsqu'il est exposé au rayonnement solaire. Cet indice permet donc de classer les matériaux ou les revêtements en fonction de leur capacité à ne pas s'échauffer sous un rayonnement solaire donné.

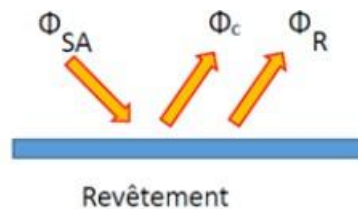
¹⁵⁴ NF EN 12898 - Verre dans la construction – Détermination de l'émissivité

Cet indice, présent dans la NF 17190¹⁵⁵, est une combinaison, par calcul, des grandeurs de réflectance solaire et d'émissivité thermique. Il est calculé selon le protocole décrit dans la norme ASTM E-1980¹⁵⁶ pour trois conditions de vent (faible, moyen et fort). Sa valeur est comprise entre 0 et 100. La valeur 0 est attribuée à un matériau très peu réfléchissant, incapable d'émettre la chaleur absorbée (corps noir) et la valeur de 100 à un matériau très réfléchissant, capable d'émettre le peu de chaleur emmagasinée.

En complément, cet indice permet d'estimer la température de surface d'un matériau ou d'un revêtement (température d'échauffement) soumis à un rayonnement solaire donné.

Cet indice concerne initialement les surfaces opaques horizontales ou à faible pente mais s'étend dorénavant à l'ensemble des produits apparents ou d'enveloppe utilisés en construction, voirie, urbanisme...

Afin de mener à bien le calcul de l'indice SRI, la norme ASTM E-1980 considère que la surface du matériau ou du revêtement échange de l'énergie avec l'environnement de la façon suivante :



De ce fait, la surface absorbe une partie du flux solaire égale à :

$$\Phi_{SA} = \alpha * \Phi_S$$

Où :

Φ_{SA} : flux solaire absorbé par unité de surface (en W/m²)

Φ_S : flux solaire total par unité de surface (en W/m²)

Φ_C : flux échangé par convection avec l'air ambiant en W/m²

Φ_R : flux échangé par rayonnement avec l'environnement en W/m²

α : coefficient d'absorption solaire, complémentaire à 1 du coefficient de réflectance solaire (albédo)

La surface échange par convection avec l'air ambiant selon l'équation suivante :

$$\Phi_C = h_c * (T_S - T_A)$$

Où : T_S est la température de surface du produit ou du revêtement

T_A est la température de l'air ambiant

h_c le coefficient d'échange convectif (en W/K/m²)

L'indice SRI se calculant pour trois conditions de vent, cela conduit à trois valeurs de h_c différentes. Les résultats des calculs doivent être fournis pour les trois conditions de vent, l'indice SRI variant peu, en fonction du vent, pour des matériaux ou des revêtements ayant une forte émissivité thermique.

Les échanges radiatifs sont déduits de la loi de Stefan-Boltzmann :

$$\Phi_R = \varepsilon * \sigma * (T_S^4 - T_{ciel}^4)$$

Où :

σ : constante de Stefan-Boltzmann

¹⁵⁵ NF 17190 - Feuilles souples d'étanchéité - Indice de Réflectance Solaire

¹⁵⁶ ASTM E-1980 - Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces

ε : émissivité thermique du matériau ou du revêtement

La température de la surface du matériau ou du revêtement est obtenue en résolvant l'équation ci-dessous :

$$\Phi_{SA} = \Phi_C + \Phi_R$$

Après calcul de la température de la surface du matériau ou du revêtement considéré et de la température de la surface étalon noir et blanc (T_B et T_W), l'indice SRI est déduit grâce à la relation suivante :

$$SRI \text{ (pour une condition de vent)} = \frac{T_B - T_S}{T_B - T_W}$$

Afin de mener ces calculs dans des conditions expérimentales comparables, l'ASTM E-1980 définit les caractéristiques et spécificités suivantes :

- > température de l'air ambiant : 310 K soit 36,85 °C ;
- > température de rayonnement du ciel () : 300 K soit 26,85 °C ;
- > flux solaire : 1 000 W/m² ;
- > constante de Stefan-Boltzmann : 5,67.10⁻⁸ W/m²K⁴ ;
- > réflectance solaire de la surface étalon noir : 0,05 ;
- > réflectance solaire de la surface étalon blanc : 0,80 ;
- > émissivité thermique de la surface étalon noir : 0,9 ;
- > émissivité thermique de la surface étalon blanche : 0,9 ;
- > coefficient d'échange convectif selon les conditions de vent :

Vitesse du vent	0 à 2 m/s	2 à 6 m/s	6 à 10 m/s
h_c (W/K/m ²)	5	12	30

4.1.5 Conductivité

La conductivité thermique correspond à la capacité d'un matériau à diffuser la chaleur dans un sens déplacement macroscopique de matière. Il s'agit de la quantité de chaleur traversant unidirectionnellement 1m d'épaisseur de matériaux homogène, sur une surface de 1 m², pendant 1 seconde et avec un écart de température de 1 °C entre les 2 faces, La conductivité thermique est exprimée en W/(m.K) et déterminée selon l'expression suivante :

$$\lambda = \frac{\phi * e}{S * \Delta T}$$

Où :

λ : conductivité thermique (W/m.K)

ϕ : énergie thermique par unité de temps (W)

e : épaisseur du matériau (m)

S : surface du matériau (m²)

ΔT : gradient de température (K)

La conductivité thermique dépend du degré d'humidité, de la température et de la composition du matériau. Elle dépend aussi de l'état de la matière du matériau (solide, liquide, gazeuse) et de l'orientation des fibres ou cristaux dans les corps anisotropes (bois, plastiques laminés). Elle intervient dans le calcul de la diffusivité thermique et de l'effusivité thermique.

Plus la conductivité thermique est faible, plus le matériau peut être dit « isolant ».

4.1.6 Capacité thermique

Il s'agit de la quantité de chaleur pouvant être stockée dans 1 m³ de matériaux (capacité thermique volumique) ou 1 kg (capacité thermique massique) lorsque sa température est élevée de 1 °C. La capacité thermique est alors respectivement exprimée en kJ/(m³.K) ou en kJ/(kg.K).

La capacité thermique intervient dans les calculs des deux grandeurs essentielles pour quantifier l'inertie thermique qui sont : la diffusivité thermique et l'effusivité thermique.

4.1.7 Diffusivité thermique

C'est une grandeur qui caractérise la capacité d'un matériau à transférer la chaleur d'un point à un autre. Avec une faible diffusivité, les transferts de chaleur à travers un matériau sont donc fortement retardés. La diffusivité thermique dépend de la conductivité thermique et la capacité thermique spécifique à pression constante. Son expression est donnée ci-dessous :

$$\kappa = \frac{\lambda}{\rho * C_p}$$

Où :

κ : diffusivité thermique du matériau (m²/s)

λ : est la conductivité thermique du matériau (W/m .K)

ρ : sa masse volumique (kg/m³),

C_p : sa capacité thermique massique à pression constante (J/kg.K)

4.1.8 Effusivité thermique

Comme la diffusivité thermique, l'effusivité thermique est aussi une grandeur essentielle pour quantifier l'inertie thermique d'un matériau. Elle exprime la capacité d'un matériau à échanger de l'énergie thermique avec son environnement, à absorber ou restituer la chaleur en tenant compte de la vitesse à laquelle la température change à la surface du matériau. Tout comme la diffusivité, elle utilise la capacité thermique et la conductivité thermique du matériau pour son calcul et son expression est donnée par la formule suivante :

$$E = \sqrt{\lambda * \rho * C_p}$$

Où :

E : Effusivité thermique du matériau J/(K.m².s^{1/2})

λ : conductivité thermique du matériau (W/m.K)

ρ : masse volumique du matériau (kg/m³)

C_p : capacité thermique massique du matériau (J/kg.K)

Plus l'effusivité d'un matériau est élevée, plus les flux thermiques sont transportés rapidement et conduits vers la quantité de matière qui le compose sans que la température ne s'élève notablement. Au contraire plus elle est faible et plus le matériau monte vite en température pour s'équilibrer avec celle de la surface de contact. Les matériaux faiblement effusifs donnent une impression de chaleur : ils sont subjectivement chauds. Ils adapteront leur température instantanément avec celle de la surface voisine et s'harmoniseront avec la température de l'environnement.

4.1.9 Propriétés hydriques

Teneur en eau

La teneur en eau massique d'un matériau est le rapport de la masse d'eau contenue dans le matériau sur la masse du matériau sec. Elle est exprimée en kg/kg.

$$u = \frac{m_e}{m_s}$$

Où m_e est la masse d'eau contenue dans le matériau et m_s la masse du matériau à l'état sec. La teneur en humidité en masse par volume est le rapport de la masse d'eau sur le volume du matériau sec. Elle est exprimée en kg/m^3 .

$$w = \rho_0 u$$

Où ρ_0 est la masse volumique du matériau sec.

Courbe isotherme de sorption

Il s'agit de la courbe traduisant l'accroissement de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative pour un matériau donné à une température donnée.

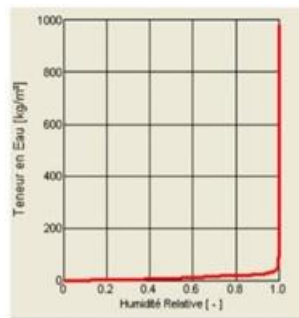


Figure 26 - Courbe de sorption de la fibre de bois

Perméabilité à la vapeur d'eau

La perméabilité d'un matériau δ_p définit sa capacité à se laisser traverser par un fluide sous l'action d'une pression entre ses deux faces opposées. Il s'agit du rapport de la quantité de vapeur d'eau traversant un matériau par unité d'épaisseur, de temps et par unité de différence de pression de vapeur régnant de part et d'autre du matériau. Cette grandeur dépend des caractéristiques physiques du matériau telles que le diamètre des pores, la géométrie des vides, l'épaisseur...

Coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau

On définit le facteur de résistance à la diffusion d'un matériau comme le rapport de la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air sur sa propre perméabilité.

$$\mu = \frac{\delta_o}{\delta_p} [-]$$

Où δ_o représente la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air. Elle est exprimée en $\text{kg}/(\text{m.s.Pa})$:

$$\delta_o = 2 * 10^{-7} \frac{T^{0.81}}{p_0}$$

Où p_0 est la pression atmosphérique en Pa.

Épaisseur de couche d'air de diffusion équivalente

Il s'agit de l'épaisseur d'une couche d'air telle qu'elle ait la même perméance qu'une couche de matériau d'épaisseur d donnée. Elle est exprimée en mètres.

$$s_d = \mu.d$$

En se basant sur la norme de mesure : NF EN ISO 12571¹⁵⁷, il existe deux méthodes de détermination des propriétés de sorption hygroscopique des matériaux et produits poreux utilisés dans le bâtiment :

- > méthode utilisant des dessiccateurs et des coupelles de pesée ;
- > méthode utilisant une chambre climatique.

Lien avec ICU : Le bilan hydrique entre une zone urbaine et son environnement va avoir un impact sur le phénomène d'ICU, placer des matériaux (que ce soit au niveau des infrastructures ou des bâtiments) possédant des propriétés hydriques adéquates au bon endroit permettra de favoriser le pouvoir rafraichissant de la zone. Le pouvoir rafraichissant des matériaux urbains peut-être évalué à travers l'évaporation et l'évapotranspiration.

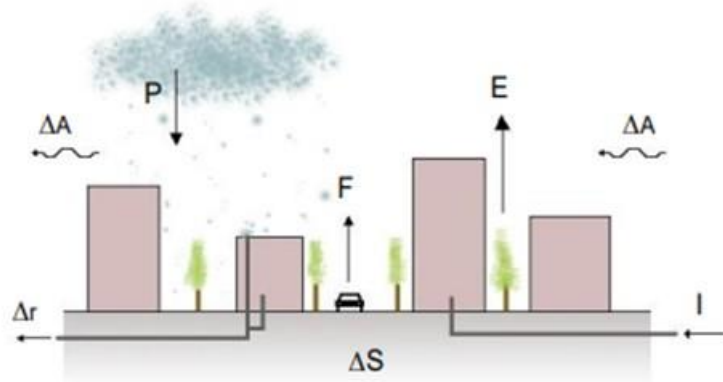


Figure 27 - Schéma descriptif du bilan hydrique d'une zone urbaine – Institut d'aménagement et d'urbanisme d'Ile de France¹⁵⁸

P : Précipitations ; F : vapeur d'eau provenant des processus de combustion ; I : eau apportée artificiellement par les canalisations ; E : vapeur d'eau des processus d'évaporation, d'évapotranspiration et de condensation ; Δr : ruissellement et évacuation ; ΔS : emmagasinement dans la ville ; ΔA : vapeur d'eau transportée par advection (déplacement horizontal des masses d'air).

¹⁵⁷ NF EN ISO 12571 - 2013 - Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de sorption hygroscopique

¹⁵⁸ IAU Institut d'aménagement et d'urbanisme, Région Ile de France : "Les îlots de chaleur urbains – Répertoire de fiches connaissance". Novembre 2010.

4.2 Réalisation d'essais exploratoires à l'échelle matériau

4.2.1 Mesure des caractéristiques radiatives [CTMNC]

4.2.1.1 Présentation des essais et des équipements

Les grandeurs mesurées ainsi que les équipements utilisés sont les suivants :

- > Albedo – Réflectance solaire : spectrophotomètre UV-Vis-NIR ;
- > Coefficient d'absorption solaire : spectrophotomètre UV-Vis-NIR ;
- > Émissivité thermique : caméra thermique.

Les dimensions des échantillons sont :

- > carrés de 40 mm x 40 mm ou disques de 46 mm de diamètre ;
- > épaisseur ≈10 mm.

La nature et le nombre d'échantillons sont les suivants :

- > terre cuite : carreaux et tuiles de différentes couleurs. 6 x 3 x 6 = 108 échantillons ;
- > bardage bois : épicéa, pin, avec ou sans nœud, brut ou peint (de couleur claire ou foncée) 6 échantillons ;
- > béton : plusieurs formulations de béton fabriquées en démoulage différé ou en démoulage immédiat. 5 x 6 = 30 échantillons.

4.2.1.2 Résultats des essais

Les résultats des essais sont présentés dans les tableaux ci-après.

Tableau 6 : Terre cuite, coefficients d'absorption solaire, réflectance solaire, émissivité thermique

Terre cuite	Coefficient d'absorption solaire (valeur moyenne)	Réflectance solaire – albédo (valeur moyenne)	Émissivité thermique (valeur moyenne)
Carreaux C1 « Blanc »	0,25	0,75	0,97
Carreaux C2 « Rouge Vérone »	0,55	0,45	0,99
Carreaux C3 « Brun »	0,79	0,21	0,98
Tuiles T1 « Rouge »	0,63	0,37	0,97
Tuiles T2 « Rouge vieilli »	0,73	0,27	0,97
Tuiles T3 « Ardoise irisé »	0,83	0,17	0,97

L'albedo (réflectance solaire) est plus élevé pour les échantillons présentant des couleurs claires.

L'albedo moyen des échantillon C1 « blanc » est ainsi égal à 0,75 alors que l'albedo moyen des échantillons C3 « brun » est égal à 0,21. En effet les surfaces foncées absorbent plus de rayonnement solaire que les surfaces claires.

L'émissivité thermique des échantillons de terre cuite ne dépend pas de la couleur et du type de produit. Les valeurs sont comprises entre 0,97 et 0,99.

Tableau 7 : Béton, coefficients d'absorption solaire, réflectance solaire, émissivité thermique

Béton	Coefficient d'absorption solaire (valeur moyenne)	Réflectance solaire - albédo (valeur moyenne)	Émissivité thermique (valeur moyenne)
Série 1	0,46	0,54	0,99
Série 2	0,28	0,72	0,99
Série 3	0,70	0,30	0,98
Série 4	0,60	0,40	0,99
Série 5	0,80	0,20	0,99

Tableau 8 : Bois, coefficients d'absorption solaire, réflectance solaire, émissivité thermique

Bois	Coefficient d'absorption solaire	Réflectance solaire – albédo	Émissivité thermique
Bardage brut Épicéa avec nœud	0,56	0,44	0,97
Bardage brut Épicéa sans nœud	0,50	0,50	0,97
Bardage brut Pin avec nœud	0,69	0,31	0,96
Bardage brut Pin sans nœud	0,63	0,37	0,96
Bardage peint « foncé »	0,73	0,27	0,97
Bardage peint « clair »	0,51	0,49	0,97

Pour les échantillons d'essence brutes, l'épicéa présente un albédo plus élevé que les échantillons d'essences de pin.

Sur les 2 essences considérées, la présence d'un nœud dans l'échantillon de bois diminue la valeur de l'albedo.

Il n'y a pas d'influence du type d'essence ou de la teinte de l'échantillon sur les valeurs d'émissivité qui se sont comprises entre 0,96 et 0,97.

Tableau 9 : Terre cuite, indice SRI

Terre cuite	Vent faible	Vent moyen	Vent fort
Carreaux C1 « Blanc »	94	94	94
Carreaux C2 « Rouge Vérone »	54	55	55
Carreaux C3 « Brun »	24	24	23
Tuiles T1 « Rouge »	43	44	44
Tuiles T2 « Rouge vieilli »	31	31	31
Tuiles T3 « Ardoise irisé »	19	19	18

Tableau 10 : Béton, indice SRI

Béton	Vent faible	Vent moyen	Vent fort
Série 1	66	67	67
Série 2	90	91	90
Série 3	35	35	35
Série 4	48	48	48
Série 5	24	23	22

Tableau 11 : Bois, indice SRI

Bois	Vent faible	Vent moyen	Vent fort
Bardage brut Épicéa avec nœud	52	53	53
Bardage brut Épicéa sans nœud	60	61	61
Bardage brut Pin avec nœud	35	36	36
Bardage brut Pin sans nœud	42	43	44
Bardage peint « foncé »	31	31	3
Bardage peint « clair »	58	59	60

4.2.2 Mesure de la conductivité [CERIB]

4.2.2.1 Présentation des essais et des équipements

Différents équipements peuvent être utilisés pour mesurer la conductivité thermique [W/(m.K)] : plaque chaude gardée, fluxmètre, fil chaud, bande chaude...

Les mesures sont ici réalisées avec un appareil dénommé CT-Mètre utilisant la méthode du fil chaud. On dispose un fil résistif entre deux plaques d'un même échantillon, de grande longueur et d'épaisseur supposée infinie. L'échantillon, initialement isotherme, est soumis à un flux de chaleur délivré sous forme d'effet Joule par le fil résistif. Si le fil est supposé infiniment long et de rayon négligeable, le transfert de chaleur est alors radial et la conductivité thermique peut être déterminée à partir de l'évolution de la température en un point donné se trouvant à proximité du fil résistif.

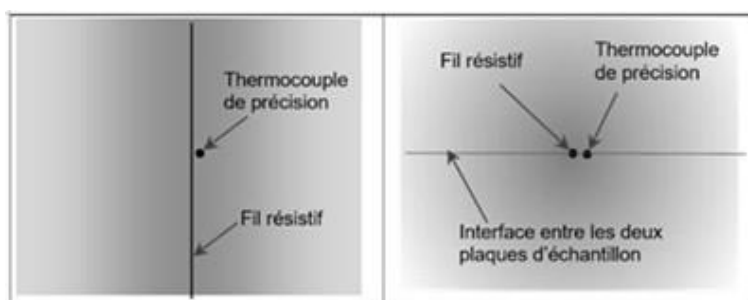


Figure 28 - Principe de fonctionnement d'une sonde (vue du dessus et vue en coupe)

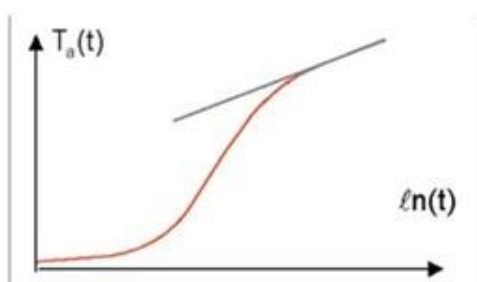
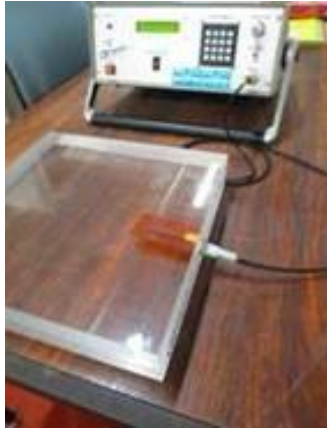


Figure 29 - Profil de l'élévation de température d'un matériau en fonction logarithme du temps

Après une première phase, l'élévation de température mesurée devient asymptotique. La conductivité thermique est alors déterminée à partir de la pente de cette asymptote.



À noter que la précision de la méthode du fil chaud (Ct-Mètre) est optimale sur des matériaux homogènes et isotropes.

Les dimensions des échantillons sont :

- > carré de 150 mm x 150 mm minimum ;
- > épaisseur minimale : 30 mm ;
- > forme parallélépipédique mais peut être cylindrique.

La nature et le nombre d'échantillons sont les suivants :

- > béton de pavé poreux en granulats courants – 1 échantillon étuvé à 105 °C jusqu'à masse constante ;
- > bois : essence de Pin – 1 échantillon Immergé dans l'eau pendant plusieurs jours.

4.2.2.2 Résultats des essais

Les résultats des essais sont les suivants :

- > béton de pavé poreux en granulats courants ;
- > masse volumique mesurée : 1 922 kg/m³ ;
- > conductivité thermique mesurée : 1,33 W/(m.K).
- > bois (Pin) ;
- > masse volumique mesurée : 603 kg/m³ ;
- > conductivité thermique mesurée : 0,45 W/(m.K).

4.2.3 Mesure des propriétés hydriques [FCBA]

4.2.3.1 Présentation des essais et des équipements

Les grandeurs mesurées ainsi que les équipements utilisés sont les suivants :

- > facteur de diffusion à la vapeur d'eau : perspiromètre ;
- > épaisseur de couche d'air de diffusion équivalente : perspiromètre.



Les échantillons sont testés pour un essai en « coupelle sèche » $23\text{ °C} - 0/50\%$ HR et pour un essai en « coupelle humide » $23\text{ °C} - 50/93\%$ HR. Les éprouvettes avant l'essai sont placées dans une enceinte climatique à une température de $23\text{ °C} \pm 5$ et une humidité relative de $50\% \pm 5$ jusqu'à stabilisation de leur masse. La stabilisation des éprouvettes est atteinte lorsque trois déterminations quotidiennes successives de leur poids ne divergent pas de plus de 5 %.

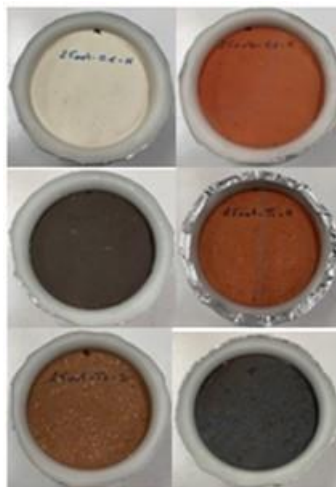
Les éprouvettes sont disposées dans des coupelles, la partie inférieure de la coupelle contient, soit un dessicatif pour maintenir un état sec (condition d'essai $23\text{ °C} - 0\%$ HR) soit une solution aqueuse pour maintenir un état humide (condition d'essai $23\text{ °C} - 93\%$ HR).

Les dimensions des échantillons sont :

- > diamètre $\approx 90\text{ mm}$;
- > épaisseur max. : 45 mm ;
- > poids max. : 420 g .

La nature et le nombre d'échantillons sont les suivants :

- > terre cuite : 3 carreaux en terre cuite et 3 tuiles en terre cuite.



- > bardage bois : 2 échantillons d'épicéa brut (avec et sans nœud), 2 échantillons de pin brut (avec et sans nœud) et 1 échantillon d'épicéa peint.



- > béton : 2 formulations de béton fabriquées en démoulage différé et 3 formulations de béton fabriquées en démoulage immédiat.



4.2.3.2 Résultats des essais

Les résultats des essais sont donnés dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 12 : Terre cuite, propriétés hydriques

	Sd coupelle humide [m]	Équilibre	Sd coupelle sèche [m]	Équilibre
C1	2,823	Non	4,523	Non
C2	4,440	Oui	6,691	Non
C3	6,316	Non	12,580	Non
T1	0,671	Oui	0,901	Oui
T2	1,613	Oui	1,844	Oui
T3	2,256	Non	3,688	Non

Tableau 13 : Bois, propriétés hydriques

	Sd coupelle humide [m]	Équilibre	Sd coupelle sèche [m]	Équilibre
Épicéa 1	0,217	Non	-	-
Épicéa 2	0,098	Oui	-	-
Épicéa 3	0,402	Non	-	-
Pin 1	0,489	Oui	-	-
Pin 2	0,319	Oui	-	-

Tableau 14 : Béton, propriétés hydriques

	Sd coupelle humide [m]	Équilibre	Sd coupelle sèche [m]	Équilibre
B1	7,95	-	12,07	-
B2	2,86	-	3,78	-
B3	8,62	-	24,12	-
B4	6,08	-	24,12	-
B5	0,88	-	1,52	-

Concernant les échantillons de terre cuite, les résultats montrent que la valeur Sd dépend de la nature du tesson de terre cuite. Les échantillons de carreaux C1, C2 et C3 sont de même épaisseur et ils sont issus du même fabricant. On aurait pu s'attendre à obtenir la même perméabilité à la vapeur d'eau. Ce n'est pas le cas ici. La couleur différente de ces échantillons est liée au processus de fabrication de la matière. Elle n'est pas obtenue par un revêtement de surface.

Concernant les échantillons de béton, les résultats confirment la porosité attendue pour des formulations de produits poreux fabriqués en démoulage immédiat (B1, B3 et B4) par rapport à des formulations de béton fabriquées en démoulage différée (B2 et B5).

Concernant les échantillons de bardage bois, les résultats montrent que la présence d'irrégularités dans le bois de type nœud rend l'échantillon plus perméable à la vapeur d'eau. En effet la comparaison des échantillons Épicéa 1 (sans nœud) et Épicéa 2 (avec nœud) ainsi que Pin 1 (sans nœud) et Pin 2 (avec nœud) montre une diminution de la valeur de Sd mesurée. La comparaison des résultats entre les échantillons d'Épicéa 1 (bois brut) et Épicéa 3 (bois avec peinture) montre que la présence d'une finition permet d'obtenir une perméabilité plus importante.

4.3 Expérimentation à l'échelle 1

Ce chapitre présente certains travaux expérimentaux qui ont pour vocation la mise en œuvre de systèmes dans des démonstrateurs à l'échelle 1 permettant l'atténuation des îlots de chaleurs urbains dans les espaces publics.

4.3.1 Dalles de voirie rafraichissantes, démonstrateur de la ville de Paris [CERIB]

4.3.1.1 Description du démonstrateur

La division Matériaux de Voirie au sein du Laboratoire Espace Public de la Ville de Paris expérimente sur sa plateforme d'essai de Bonneuil sur Marne différents revêtements afin de répondre à la problématique des îlots de chaleur.

Dans un contexte d'urbanisme dense, un des enjeux de la ville est de répondre à l'urgence climatique. Face aux aléas climatiques (canicules, inondations, vents violents), la ville doit s'adapter et devenir résiliente à ces conditions et continuer d'offrir à ses habitants les ressources et protections dont ils ont besoin. La résilience urbaine est la capacité d'un territoire à anticiper, survivre et se développer quel que soit les chocs, qu'ils soient climatiques ou autres (terrorisme, crises migratoires...).

La ville de Paris planifie les orientations et les règles locales avec notamment son futur Plan Local d'Urbanisme Bioclimatique qui renforcera les enjeux « énergie-climat » ainsi que la végétalisation dans la ville. La notion d'îlots de fraîcheur est définie comme des lieux privilégiés ouverts au public de jour comme de nuit où il fait plus frais que dans l'environnement proche. Ce peut être des espaces verts ouverts 24 h/24 h, des salles rafraichies comme des halls de mairies d'arrondissements, des stations de métro, des musées ou des lieux de culte ou des centres commerciaux.

À terme, il est souhaité qu'aucun parisien ne soit à plus de 7 minutes de marche d'un îlot de fraîcheur. La ville de Paris a l'objectif que 300 îlots de fraîcheur et parcours de fraîcheur d'ici à 2030 soient accessibles au public.

Afin d'améliorer le confort du piéton circulant sur un trottoir, l'enjeu consiste à limiter les phénomènes de radiativité en journée et de convection à la surface du revêtement qui tendent à chauffer l'air ambiant en période de canicule.

La sélection d'une formulation béton est effectuée par des mesures thermo-physiques sur matériaux inspirées de programmes d'expérience développés par les travaux de thèse de S. PARISON¹⁵⁹ encadrés par la Ville de Paris et le Laboratoire Interdisciplinaire des Énergies de Demain (LIED) situé à l'université Paris Cité. L'albedo, la conductivité, la capacité thermique, l'émissivité et l'effusivité ont permis de sélectionner deux formulations de béton.

Le cahier des charges du service du patrimoine de voirie de la ville de Paris pour la fourniture du produit en béton définit un produit modulaire conforme à sa norme produit et accessible aux marchés publics. Dans une démarche de réduction de l'effet de l'îlot de chaleur urbain, il disposera d'un albedo d'au moins 0,30 et une forte effusivité du support. Dans sa conception, il proposera une solution bas carbone, c'est-à-dire qui présentera une empreinte carbone inférieure aux produits dont le liant est à base de 100 % ciment Portland.

Dans le cadre de ces essais, des pavés de dimensions 30 x 30 x 10 cm sont fabriqués en démoulage différé avec une matrice en fond de moule pour former la surface anti-dérapante. Le démoulage différé permet la disponibilité des produits fabriqués le jour suivant leur fabrication et reproduit un mode de fabrication industriel.

La solution « bas carbone » proposée vise à réduire l'empreinte environnementale du principe actif « hydraulique » nécessaire au développement des résistances mécaniques du matériau béton : le ciment. Pour cela, l'utilisation de matériaux finement broyés permet de réduire en proportion la quantité de ciment Portland dans le béton.

Il a été montré que l'utilisation de laitier de haut fourneau en substitution du ciment Portland dans le béton permet d'accroître l'albédo pour des produits de voirie en béton^{160,161}. Le second intérêt du laitier concerne son empreinte carbone par rapport à celle du ciment. En effet, la fabrication d'une tonne de ciment portland CEM I (à base de 95 % de clinker) génère 765 kg éq. CO₂¹⁶², quand celle d'une tonne de laitier de haut fourneau génère entre 20 et 170 kg éq. CO₂. De fait, la réduction de l'empreinte carbone d'un béton intégrant du laitier de haut fourneau à la place de ciment Portland est significative.

4.3.1.2 Caractérisations à l'échelle du matériau

Six bétons avec différents taux de substitution de clinker ont été fabriqués afin d'évaluer leurs propriétés thermo-physiques. Pour cela un ciment CEM III/C disponible sur le marché est également utilisé. La fiche technique produit renseigne la proportion des constituants principaux (hors sulfate de calcium et autres constituants) : 15 % de clinker et 85 % de laitier de haut fourneau.

Les dosages suivants sont utilisés pour 1 m³ de béton :

¹⁵⁹ Thèse Sophie Parison : <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-03163752>.

¹⁶⁰ M.A. Sanjuán, A. Morales and A. Zaragoza: Effect of Precast Concrete Pavement Albedo on the Climate Change Mitigation in Spain, <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/20/11448>

¹⁶¹ Marceau, M.L.; VanGeem, M.G. Solar Reflectance of Concretes for LEED Sustainable Sites Credit: Heat Island Effect. SN2982; Portland Cement Association: Skokie, IL, USA, 2007; pp. 1–22.

¹⁶² <https://www.infociments.fr/ciments/ciments-declaration-environnementale-inventaire-analyse-du-cycle-de-vie>.

- > deux formules à base de CEM III/C dosées à 250 (pavé 1) et à 400 kg/m³ (pavé 2) ;
- > utilisation de pigment noir avec un dosage de 400 kg/m³ de CEM III/C pour 2 formules avec deux dosages de pigment noir (pavé 3 et 4) ;
- > une formule à base de 400 kg/m³ de laitier de haut fourneau activé (pavé 5) ;
- > une formule sans laitier dosée à 400 kg/m³ d'un liant constitué à 35 % de ciment CEM I et 65 % d'additions calcaires (pavé 6).



Figure 30 - Présentation des teintes des 6 formulations employées (pavé 1 à gauche à pavé 6 à droite)

La teinte des différentes formulations est observée sur les prises de vue datant de quelques semaines après la fabrication des pavés. Les mesures colorimétriques sont effectuées sur les différents supports 7 semaines après leur fabrication. Le facteur de clarté L* dans l'espace colorimétrique de représentation L*a*b* est mesuré. Cette représentation recommandée par la CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) est celle qui correspond plus précisément à la vision humaine des couleurs, de la perception et à l'interprétation des différences de couleur. La valeur de clarté L* est comprise entre 0 et 100. La valeur basse correspond au noir, la valeur maximale correspond au blanc de référence. Les mesures sur chaque pavé sont reportées dans le graphique ci-dessous pour l'illuminant normalisé D65 et un observateur de référence 2°.

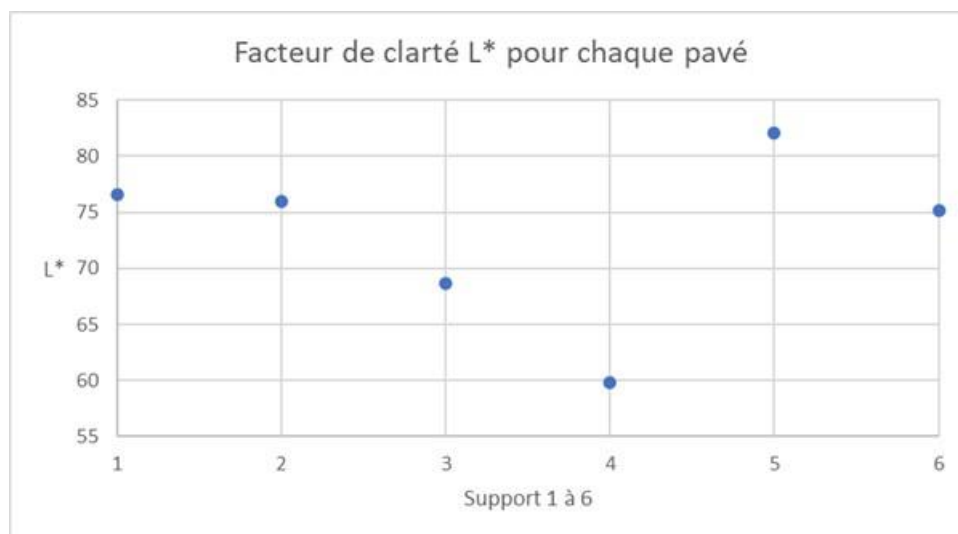


Figure 31 - Facteur de clarté L* pour les différents pavés

La proportion de laitier dans le liant total influence la clarté du pavé. Le pavé 5 à base de 100 % laitier est le pavé le plus clair. Les pavés 1, 2 et 6 ont un facteur de clarté très proche malgré l'absence de laitier dans le liant du pavé 6. L'ajout de pigment noir diminue le facteur de clarté pour les pavés 3 et 4 en fonction de la teneur en pigment dans le mélange.

4.3.1.3 Caractérisation thermo-physique des produits de voirie

> Mesure de l'albedo

La détermination de l'albedo est effectuée selon la norme ASTM E903 au spectrophotomètre. Les mesures effectuées au LIED sont reportées pour les 6 formulations de pavés fabriquées. L'albedo (α) de la face d'usage du pavé est calculé à partir de mesures de réflectivité dans le spectre solaire compilées dans le graphique ci-dessous.

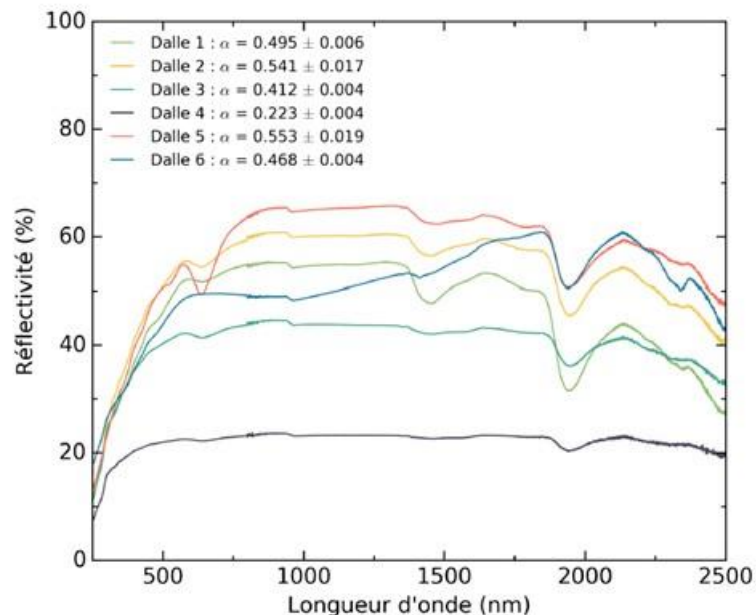


Figure 32 - Diagramme de réflectivité sur la face du pavé et albedo correspondant

Une relation entre l'albedo et la teneur en laitier de haut fourneau dans la formulation est observé : les formulations contenant le plus de laitier dans leur formulation sont les pavés avec l'albedo le plus élevé. Seul le béton avec le liant composé d'additions calcaires a un albedo qui s'intercale entre les formulations de laitier avec et sans pigment noir (pavé 6, $\alpha = 0,468$).

En complément, la mesure de l'albedo et du facteur de clarté L^* est donné dans le graphe suivant pour chaque support.

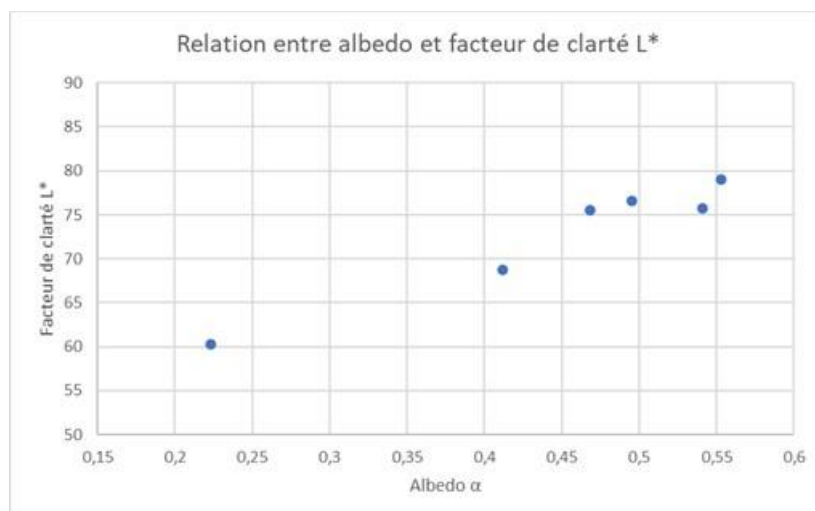


Figure 33 - Mesure du facteur de clarté et de l'albedo pour les différents pavés

> Conductivité thermique

La conductivité thermique λ est évaluée selon le protocole suivant¹⁶³. Un support est soumis au flux radiatif constant d'une lampe IR. Afin de normaliser les propriétés radiatives de chaque matériau, la surface est recouverte d'une peinture noire mate de forte absorption (95 %). Un flux mètre et un thermocouple sont disposés de chaque côté du support. Au cours du temps, les mesures simultanées du flux de chaleur et de la température sont effectuées pour les 2 faces du matériau. L'analyse de ces mesures renseigne sur la capacité thermique du produit à conduire la chaleur mais aussi sur la quantité de chaleur que le matériau est capable d'absorber par rapport à sa masse, on parle de capacité thermique massique, c_p .

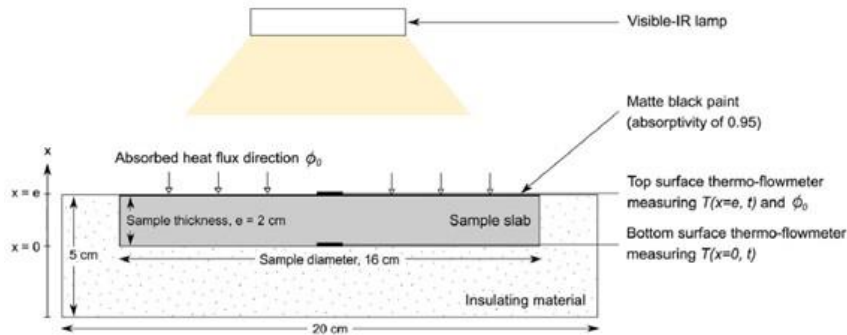


Figure 34 - Principe expérimental de mesure de la conductivité thermique

La diffusivité thermique « α » correspond à la « vitesse » de transmission de la chaleur au sein du matériau et l'effusivité thermique E correspond à la capacité d'échange d'énergie thermique entre le matériau et l'environnement. Ces 2 grandeurs sont déduites des équations suivantes :

$$\alpha = \lambda / (\rho \cdot c_p)$$

et

$$E = (\lambda \cdot \rho \cdot c_p)^{1/2}$$

Où :

- α est la diffusivité thermique exprimée en $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,
- E est l'effusivité thermique exprimée en $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{1/2}$
- avec
- λ est la conductivité thermique exprimée en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,
- ρ est la masse volumique exprimée en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,
- c_p est la capacité thermique massique exprimée en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Les mesures expérimentales sont reportées dans les tableaux 5 et 6 ci-dessous (avec σ l'écart type entre différents jeux de mesure).

Tableau 15 : Caractérisation thermo-physique des produits de voirie (conductivité, capacité thermique massique)

Dalle	Masse volumique ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Conductivité λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	σ	Capacité thermique massique c_p ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	σ
1	2 386	1,53	0,12	875	49
2	2 369	1,28	0,08	878	50
3	2 340	1,89	0,18	931	52
4	2 391	1,29	0,08	905	51
5	2 302	1,18	0,07	1 076	59
6	2 329	1,31	0,09	808	47

¹⁶³ S. Parison, M. Hendel, A. Grados, K. Jurski et L Royon, A radiative technique for measuring the thermal properties of road and urban materials.

Les grandeurs calculées à partir des équations présentées précédemment sont reportées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 16 : Caractérisation thermo-physique des produits de voirie (diffusivité, effusivité, capacité thermique volumique)

Dalle	Diffusivité α (mm ² .s ⁻¹)	σ	Effusivité E (J.m ⁻² .K ⁻¹ .s ^{-1/2})	σ	Capacité thermique volumique $\rho.c_p$ (MJ.m ⁻³ .K ⁻¹)	σ
1	0,73	0,08	1 785	97	2,09	0,16
2	0,62	0,06	1 634	80	2,08	0,16
3	0,87	0,11	2 029	123	2,18	0,16
4	0,60	0,06	1 671	81	2,16	0,16
5	0,48	0,05	1 710	81	2,48	0,18
6	0,70	0,07	1 572	81	1,88	0,14

Les supports présentant la meilleure capacité d'échange d'énergie thermique entre le matériau et l'environnement (soit l'effusivité thermique E) et le matériau ayant le meilleur pouvoir réfléchissant du rayonnement solaire (soit l'albedo α) sont observés qualitativement en effectuant le produit $E.\alpha$.

Les supports présentant la meilleure absorption d'énergie lors de l'augmentation de température pour un volume du support (soit la capacité thermique volumique $\rho.c_p$) et le matériau ayant le meilleur pouvoir réfléchissant du rayonnement solaire (soit l'albedo α) sont observés en effectuant le produit $\rho.c_p.\alpha$.

Les calculs sont reportés ci-dessous pour les 2 produits.

Tableau 17 : Données des calculs pour les produits de voirie

Dalle	$E.\alpha$	σ	$\rho.c_p.\alpha$	σ
1	883	49	1,03	0,08
2	884	44	1,12	0,09
3	836	51	0,90	0,07
4	372	20	0,48	0,04
5	945	55	1,37	0,11
6	735	38	0,88	0,07

En tenant compte des 2 critères énoncés ci-dessus, on constate que le pavé 5 à base de 100 % de laitier et du pavé 2 à base de CEM III/C présentent les meilleures valeurs. Ces 2 formulations seront testées en place dans le démonstrateur de Bonneuil sur Marne.

On notera également la faible dispersion de valeur entre le pavé 1 et 2 malgré l'écart de dosage en liant dans la formulation béton (250 kg/m³ de CEMIII/C pour le pavé 1 et 400 kg/m³ de CEM III/C pour le pavé 2).

La fabrication des produits nécessaires au remplissage des 2 alvéoles du démonstrateur est effectuée au CERIB à Épernon. Plusieurs fabrications ont été nécessaires pour compléter la surface du fait de la capacité du malaxeur.

4.3.1.4 Caractérisation à l'échelle du revêtement :

Les pavés fabriqués sont testés en conditions naturelles dans une alvéole de surface de 4 m x 4 m et de 30 cm de profondeur. Une centrale d'acquisition de données enregistre les grandeurs suivantes :

- > les conditions climatiques (vitesse du vent, température de l'air sous abri, humidité relative) ;
- > le rayonnement solaire S : visible et proche infrarouge (0,3 – 3 μm) ;
- > le rayonnement solaire infrarouge L (3 – 100 μm) ;
- > la mesure du flux thermique de surface et en profondeur.

Les pavés béton sont comparés avec des dalles rustiques perméables (pierre naturelle) et une dalle béton coulée en place. Les produits préfabriqués (pavés béton et dalles rustiques) sont posés sur lit de sable et GNTP (grave non traitée poreuse à base de granulats de béton recyclé), le béton coulé en place est posé sur GR1 (matériaux pour remblais et couche de forme, granularité maximale 0/80 mm).

Au cours de la pose, des capteurs de flux thermique sont installés aux interfaces de produits et à 25 cm par rapport à la surface.

Les positions des capteurs de flux sont indiquées à droite du système constructif considéré. Les différents supports sont rappelés ci-dessous :

- > les pavés à base de laitier activé sont disposés dans l'alvéole #5 ;
- > la dalle en béton prêt à l'emploi est fabriquée avec un ciment CEM II/A-LL est disposé dans l'alvéole #12 ;
- > les pavés à base de ciment au laitier (CEM III/C) sont disposés dans l'alvéole #13 ;
- > les dalles rustiques sont disposées dans l'alvéole #14.

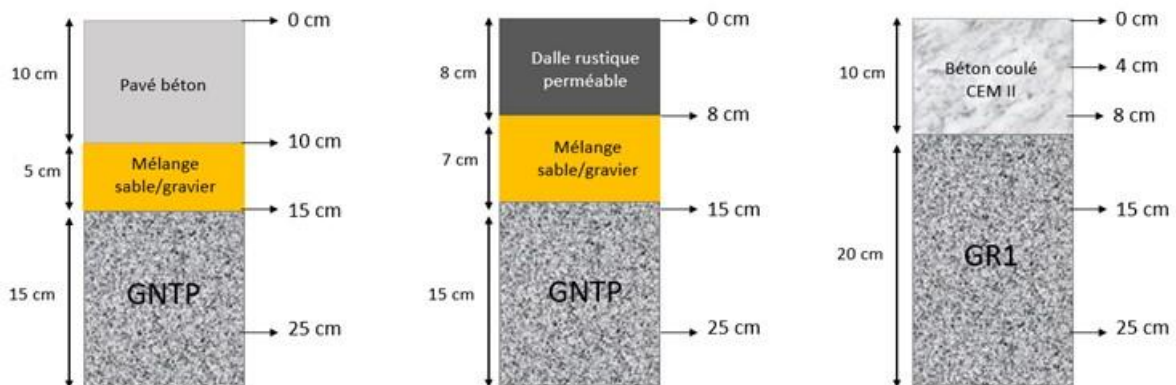


Figure 35 - Structures des différentes alvéoles pour les pavés, la dalle rustique et le béton coulé en place

Le bilan thermique de la surface du produit permet d'évaluer le flux de chaleur émis par la surface du support vers le piéton par différents modes (convection et rayonnement notamment).

Pour une surface sèche, les rayonnements solaire (S) et infrarouge (L) apportent un flux de chaleur dans le matériau, on parle de l'irradiance. Ces rayonnements sont réfléchis par le support vers l'atmosphère, on parle de la radiosité ($S_{up} + L_{up}$)

Pour le matériau « irradié », la chaleur transmise se dissipe soit dans l'air (convection H) soit dans le sol (conduction V_0), ou bien est rayonnée par la surface (radiosité). Dans le cas présent la surface est considérée sèche, donc l'évaporation d'eau présente dans le support est nulle et ne permet pas d'observer de flux rafraichissant ($F = 0$).

Le rayonnement net R_n est défini comme la quantité d'énergie transmise au support par l'irradiance ($S + L$) ôtée du rayonnement réfléchi/émis (radiosité), où :

$$R_n = S + L - (S_{up} + L_{up})$$

Du bilan thermique effectué sur le support, cette énergie nette emmagasinée par la surface est transmise dans l'air et le sol, d'où la relation suivante :

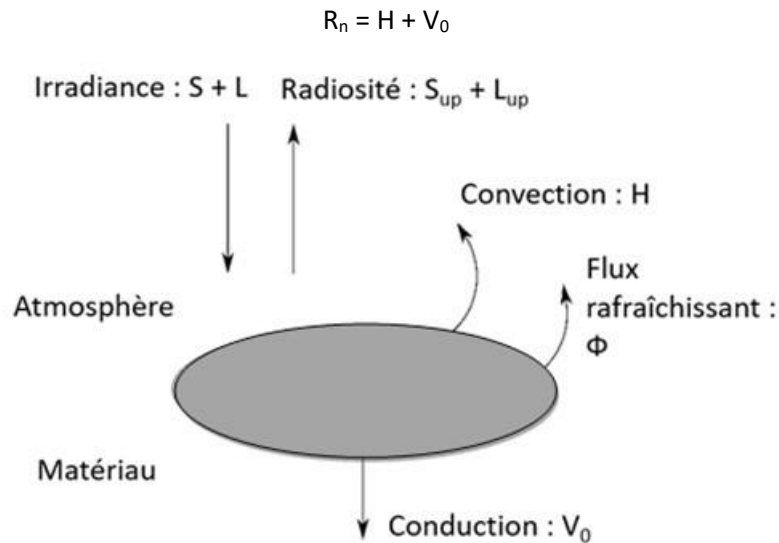


Figure 36 - Bilan thermique sur la surface soumise aux rayonnements (détails dans le texte)

A exposition climatique identique (irradiance, $S + L$), le bilan thermique que ressent le piéton est dépendant de la radiosité ($S_{up} + L_{up}$) et de la convection H du support, principalement. Les résultats préliminaires de mesures de surface permettent d'estimer les effets du support sur le piéton en déplacement sur une surface considérée. Ces résultats sont présentés pour des mesures effectuées entre le 18 et le 22 juillet 2021.

Sur la période indiquée, les données climatiques du rayonnement solaire et infrarouge et les variations de la température et de l'humidité relative sur la même période sont reportées dans les graphiques ci-dessous.

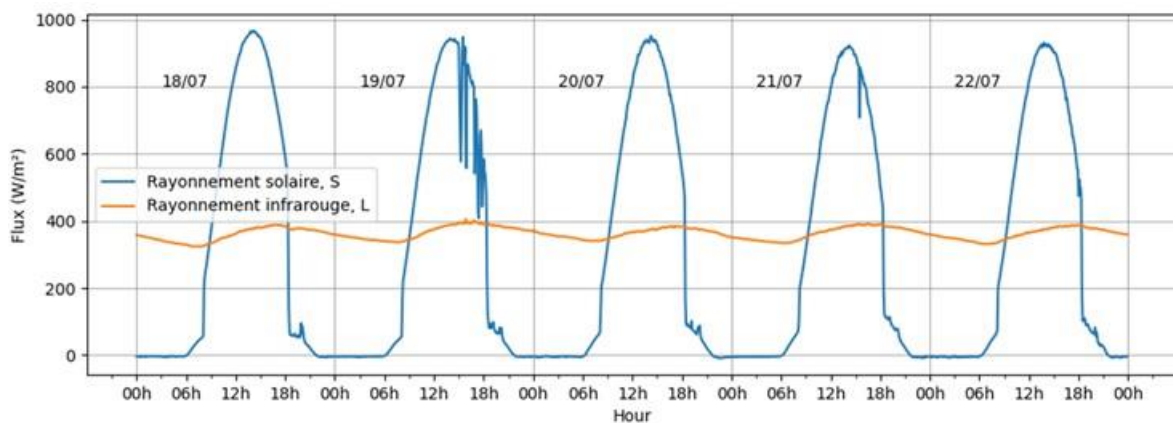


Figure 37 - Rayonnements solaire S et infrarouge L enregistrés du 18 juillet au 22 juillet 2021 enregistrées sur le démonstrateur

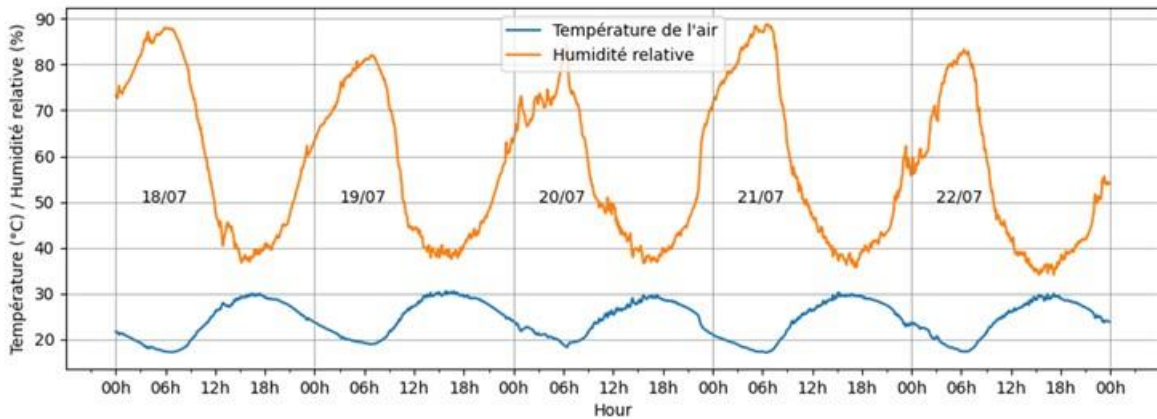


Figure 38 - Température et humidité relative enregistrées du 18 juillet au 22 juillet 2022 sur le démonstrateur

Des variations d'une dizaine de degrés mesurés dans l'air entre le jour et la nuit sont observées sur la période considérée. Cette période de mesure hors canicule permet d'évaluer le comportement des différents supports sur cinq jours consécutifs par rapport aux conditions climatiques. Il s'agit des jours les plus chauds observés sur la période d'exposition des supports.

La mesure des températures de surface est présentée dans le graphique ci-dessous. Le décrochage observé sur l'alvéole #5 à partir de 15 h 30 correspond à l'ombrage d'un arbre sur l'alvéole.

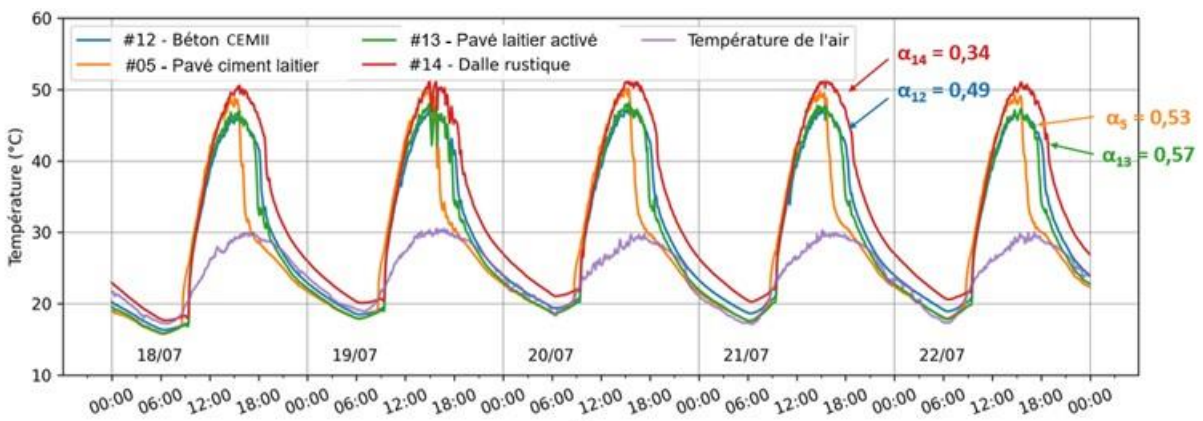


Figure 39 - Températures de surface mesurées sur les 4 supports et température de l'air
(À noter la chute de température sur l'alvéole #5 liée à un ombrage de la dalle)

Le rayonnement net est mesuré à l'aide des capteurs mesurant l'irradiance et la radiosité. Le rayonnement net sur le support est principalement piloté par l'albédo ici. Plus le matériau réfléchira la lumière (albédo élevé), moins de chaleur sera transmise à l'intérieur du support.

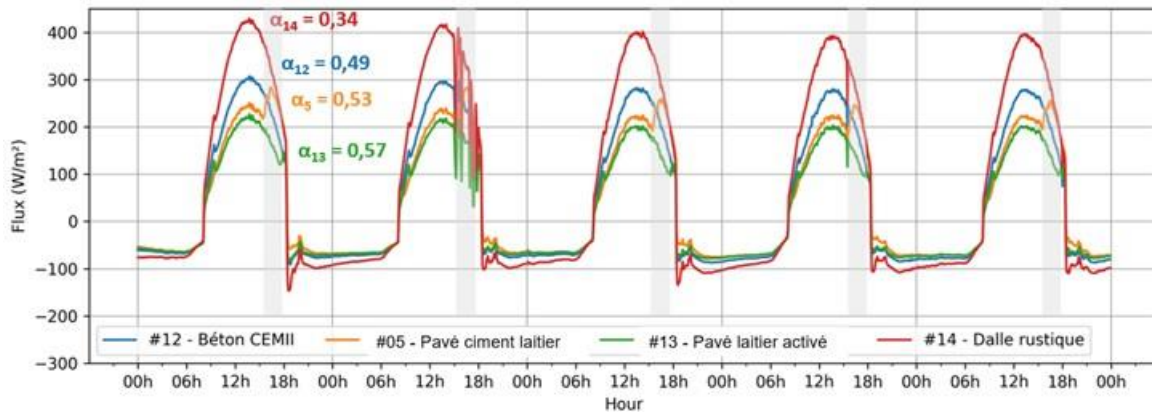


Figure 40 - Rayonnement net soumis sur le support : $R_n = S + L - S_{up} - L_{up}$

La convection H est proportionnelle à la différence de température entre le sol T_s et l'air T_a selon la relation suivante :

$$H = h (T_s - T_a)$$

Afin de déterminer le coefficient de proportionnalité h pour chaque support. La mesure du flux thermique sur le support permet de tracer la convection H par rapport à $(T_s - T_a)$ et d'en déduire h. La convection H est représentée sur le graphique ci-dessous.

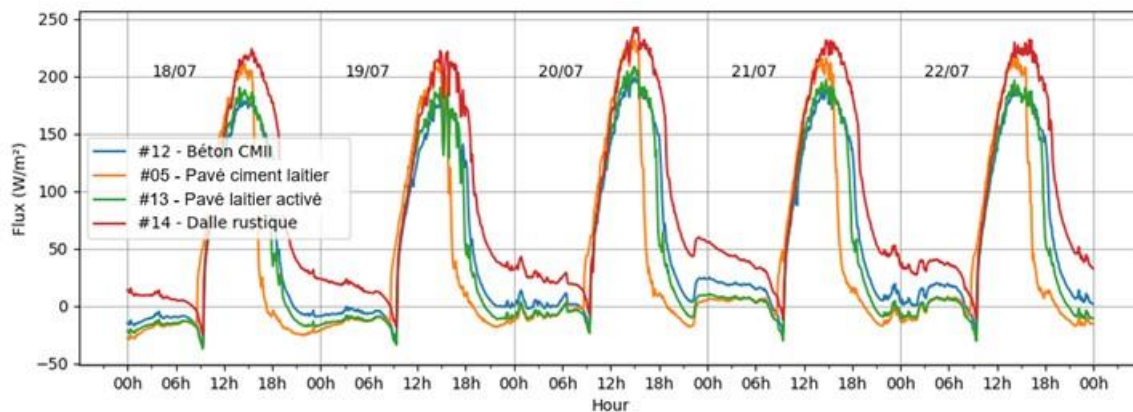


Figure 41 - La convection H déduite pour chaque support

Il reste à définir la part de rayonnement réfléchi par le support. Par définition, les relations entre le rayonnement radiant et irradiant sont rappelées :

$$S_{up} = \alpha.S$$

où α est l'albedo.

$$L_{up} = (1 - \epsilon).L + s.\epsilon.T_s^4$$

où ϵ est l'émissivité et s est la constante de Stefan-Boltzmann.

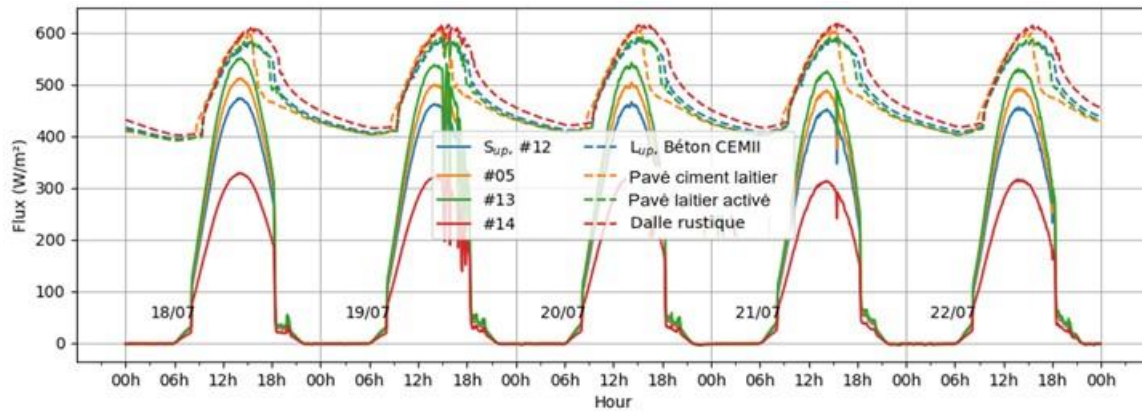


Figure 42 - Radiosité S_{up} et L_{up} pour chaque support

Si on considère à présent le bilan des flux thermiques ressentis par un piéton évoluant sur une surface constituée des supports étudiés, on comptabilise la radiosité ($S_{up} + L_{up}$) et la convection H en direction du piéton, ces deux termes lui étant favorables. Cet effet correspond à la somme algébrique des graphes ci-dessus représentée dans le graphique ci-dessous.

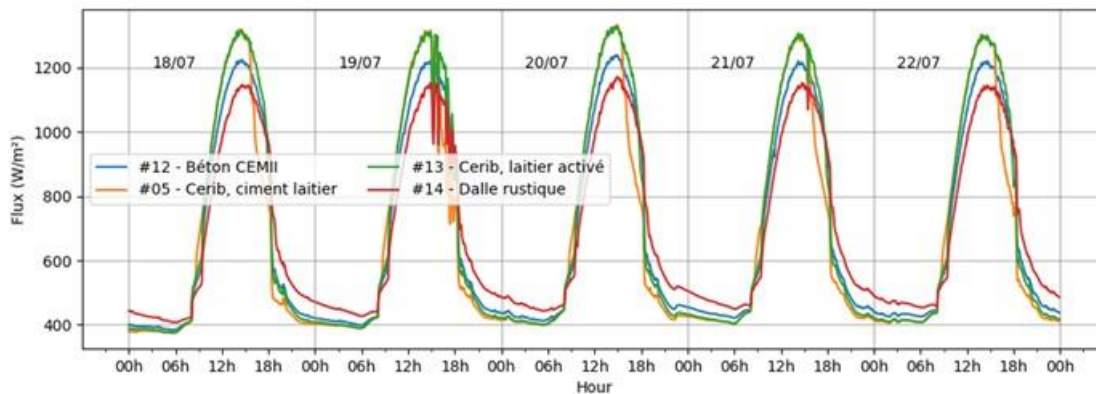


Figure 43 - Bilan des flux en direction du piéton : Radiosité ($S_{up} + L_{up}$) + convection H

Le bilan thermique vis-à-vis du piéton peut être effectué en fonction du moment de la journée. Le jour, le revêtement avec l'albédo le plus élevé réfléchit le rayonnement visible et proche infrarouge vers le piéton. La contribution liée à la convection H est considérée de moindre importance ici, de par sa faible amplitude par rapport à la radiosité en journée.

La nuit, le revêtement avec l'albédo le moins élevé est celui qui restitue le flux thermique emmagasiné dans le support au cours du jour. En l'absence d'irradiance, le piéton perçoit un flux thermique issu du support lié à $L_{up} + H$.

Les grandeurs physiques sont mesurées dans les conditions définies plus haut. Le ressenti de chaleur perçu par le piéton est plus compliqué à définir. La tenue vestimentaire, le vent, l'état de santé, l'âge sont quelques critères qui peuvent avoir une incidence sur le ressenti du piéton mais il en existe d'autres. On constate que le support ayant un albédo élevé est celui qui permettra d'avoir un support plus frais la nuit mais aussi de transmettre l'équivalent d'un double ensoleillement pour un piéton présent sur le revêtement.

4.3.2 Pavés rafraîchissants (partie piéton), ZAC Toulouse-Montaudran-Aerospace [LMDC]

4.3.2.1 Description du démonstrateur

Ce chapitre se concentre sur le remplacement de pavés imperméables par des pavés rafraîchissants afin d'atténuer l'ICU. Les travaux présentés dans ce rapport font partie d'une thèse en cours menée par Youssef Wardeh au sein du LMDC.

Le présent chapitre présentera les matériaux utilisés, leur formulation et les essais expérimentaux effectués. Le travail réalisé se concentre sur la masse d'eau évaporée par pavé. Suite aux résultats obtenus, il sera possible de choisir le pavé le plus efficace pour limiter la température surfacique des pavés rafraîchissants et à son tour la température de l'air.

4.3.2.2 Éprouvettes testées

Le projet s'appuie sur 21 éprouvettes en béton (10 cm x 10 cm x 4.5 cm). La première catégorie comporte 8 pavés à base de sable recyclé formés par des matériaux hydrophiles :

Tableau 18 : Données sur les compositions des pavés

Code pavé	Composition
SR0	Sable recyclé
SRF0.1	Sable recyclé + Fibre de chanvre (0,1 %)
SRG1	Sable recyclé + Chènevottes (1 %)
SRG1F0.1	Sable recyclé + Chènevottes (1 %) + Fibre de chanvre (0,1 %)
P10	Poraver (10 %)
P20	Poraver (20 %)
AE40	Argile expansée (40 %)
AE60	Argile expansée (60 %)

La deuxième catégorie comporte 13 pavés du commerce, dont 4 pavés drainants (pavés 6 à 9). Le schéma ci-dessous présente la composition et la formulation des échantillons ou éprouvettes à tester.



Figure 44 - Schéma de la formulation/composition des éprouvettes à tester

4.3.2.3 Démarche expérimentale

La démarche expérimentale appliquée aux 21 éprouvettes comporte une phase de saturation sous vide et une phase de conservation en enceinte climatique durant laquelle sont effectués un suivi massique de chaque éprouvette ainsi que des mesures de la température surfacique toutes les demi-heures durant 9 heures.

> Saturation sous-vide

L'objectif de cet essai est de remplacer l'air par de l'eau dans les pores ouverts des pavés rafraîchissants. En d'autres termes, voir la quantité d'eau qui peut être retenue par chaque pavé. De là, il sera possible d'évaluer la masse d'eau évaporée des éprouvettes et choisir le pavé le plus convenable.

Premièrement, il faut placer les pavés dans un dessiccateur et maintenir le vide pendant quatre heures. Deuxièmement, il faut introduire progressivement l'eau d'immersion jusqu'à ce que tous les pavés soient couverts par de l'eau.

Finalement, il faut maintenir le vide dans le dessiccateur en conservant l'aspiration de la pompe. Pour aboutir à la réussite de cet essai, il faut compter au moins deux jours pour assurer la quantité d'eau suffisante pour remplacer l'air dans les pores ouverts des pavés. La figure ci-dessous permet de visualiser les différents outils pour la réalisation de la saturation sous vide.



Figure 45 - Différents outils pour la saturation sous vide

> Conservation en enceinte climatique

Après avoir saturé tous les pavés et remplacé l'air par de l'eau dans leurs pores ouverts, les échantillons sont placés dans une enceinte climatique. Cela permet de mesurer la perte de masse par évaporation ainsi que la température surfacique de chaque pavé dans des conditions climatiques contrôlées : 45 °C et 35 % d'humidité relative.

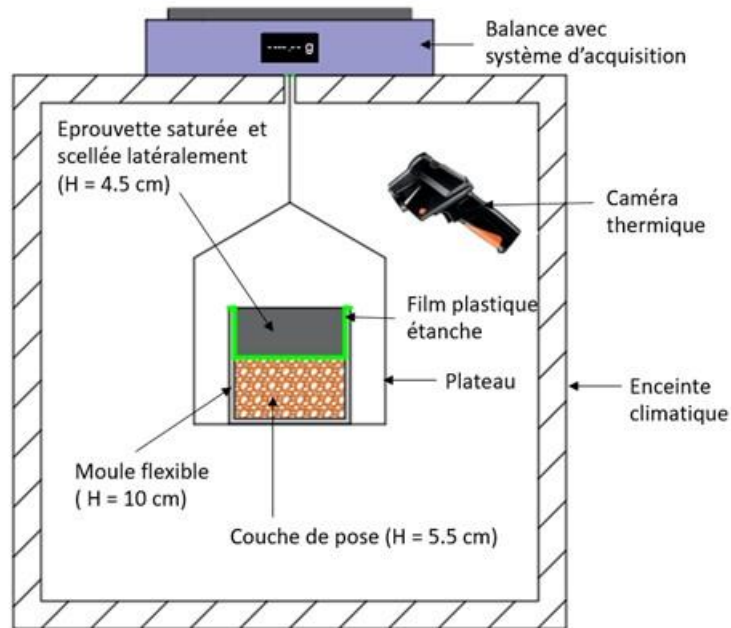


Figure 46 - Mesure de la masse et de la température surfacique des pavés dans l'enceinte climatique

Au cours de cet essai, un problème a été détecté : un courant d'air à l'intérieur de l'enceinte empêchait la stabilisation de la pesée mis en place. Ainsi, au lieu de surveiller la masse des échantillons à travers une balance reliée à un système d'acquisition, la mesure s'est déroulée manuellement toutes les 30 minutes durant 9 heures. La porte de l'enceinte climatique a donc été ouverte, ce qui a généré des variations de la température de l'air. Notons que la température à l'intérieur de l'enceinte a été contrôlée à travers une sonde thermique par un système d'acquisition qui a enregistré les températures de l'air toute les minutes. Nous avons ainsi pu vérifier que ces variations étaient négligeables (voir figure ci-dessous).

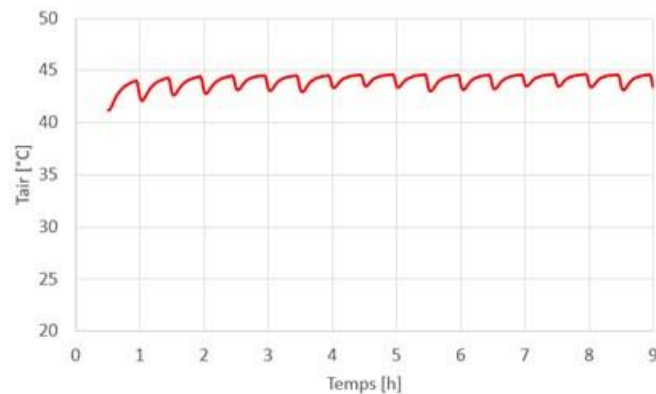


Figure 47 - Variation de la température de l'air dans l'enceinte



Figure 48 - Trois pavés en cours de mesure dans l'enceinte climatique

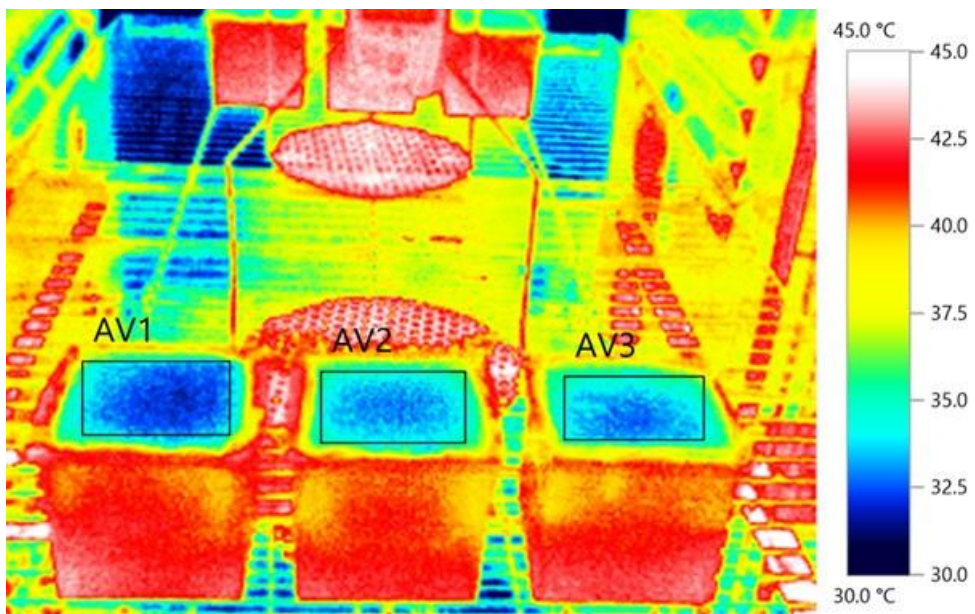


Figure 49 - Température superficielle des échantillons prise par caméra thermique

4.3.2.4 Résultats des essais

Le graphique représenté ci-dessous permet de visualiser la perte massique en grammes d'eau de chaque pavé au cours du temps.

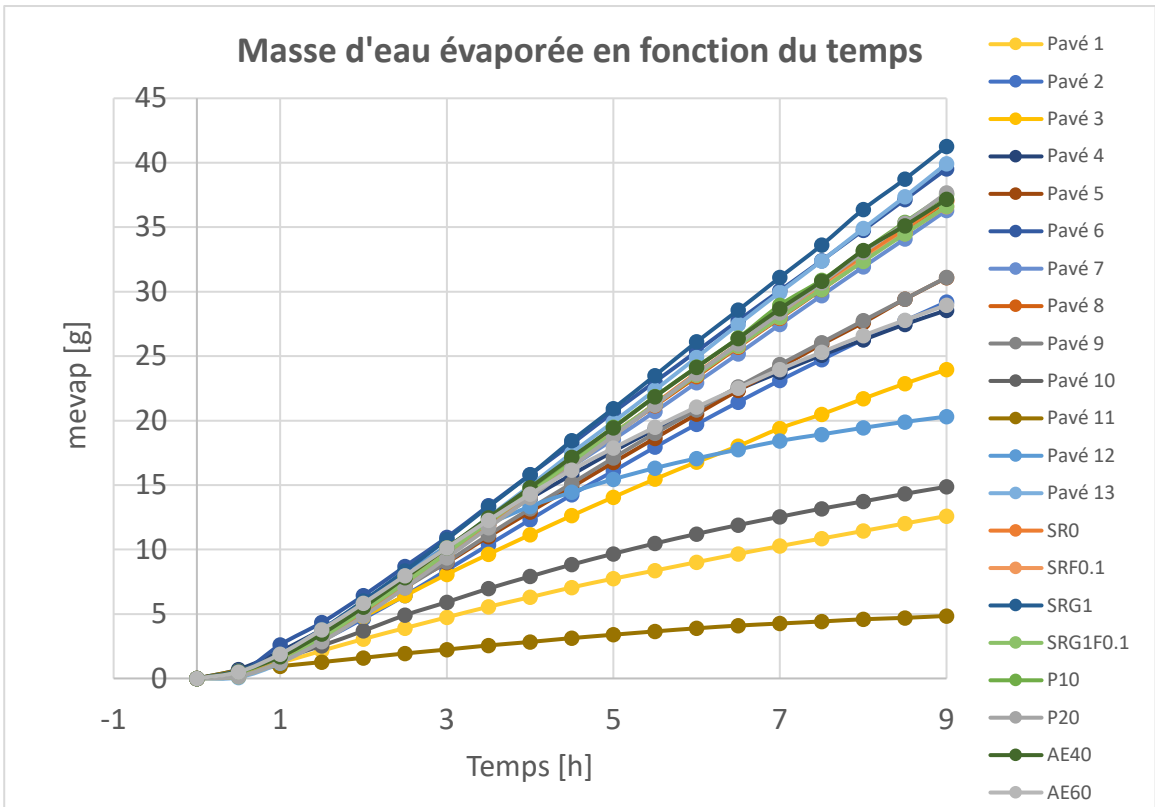


Figure 50 - Variation de la perte massique (g) des pavés rafraîchissants en fonction du temps

Nous avons utilisé ces données de perte massique pour déterminer un taux d'évaporation (dépendant de la quantité d'eau absorbée par le pavé au moment de la saturation).

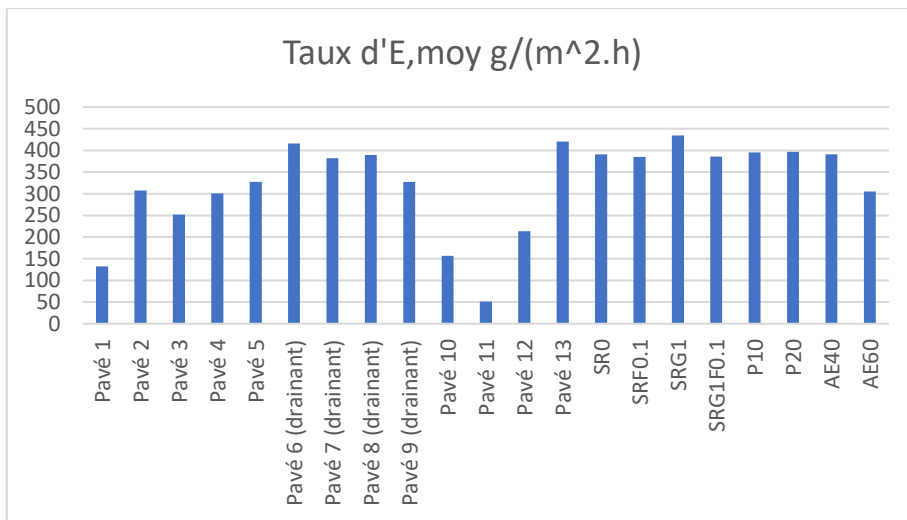


Figure 51 - Taux d'évaporation moyen des pavés (moyenné sur les 9 h de mesure)

Le graphique représenté ci-dessous permet de visualiser la corrélation entre le taux d'évaporation moyen et la température de surface moyenne des pavés (moyennes calculées sur les 9 heures de mesure). On observe des écarts de températures de surface moyennes atteignant presque 10° entre certains pavés.

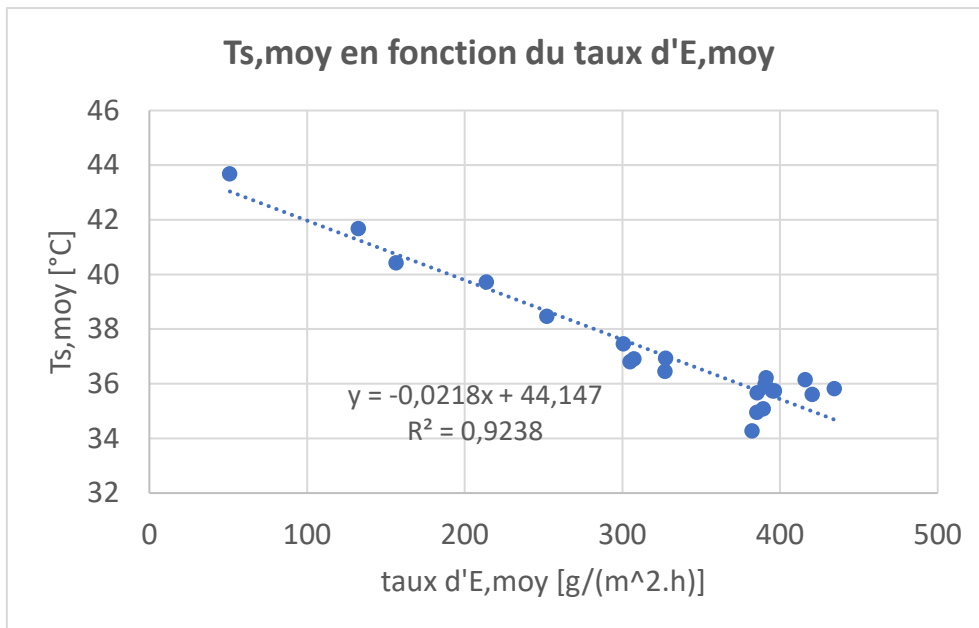


Figure 52 - Corrélation entre le taux d'évaporation moyen et la température de surface moyenne des pavés

On observe globalement que, plus les pavés évaporent, plus ils se rafraichissent. Un pavé avec un taux d'évaporation élevé tel que l'échantillon SRG1 (Sable recyclé + Chènevottes (1 %)) semblerait donc répondre aux objectifs fixés.

4.3.2.5 Conclusion

Les résultats obtenus nous amènent à penser que des pavés formulés à partir de matériaux hydrophiles permettraient de stoker et d'évaporer de plus grandes quantités d'eau. Ainsi, leurs températures de surfaces seraient diminuées.

Le travail de thèse de Youssef Wardeh se poursuit pour étudier plus finement les mécanismes agissant sur la température de surface des pavés rafraichissant, notamment l'albédo.

En parallèle, une expérimentation in-situ a été mise en œuvre sur le site de la ZAC Toulouse-Montaudran-Aerospace. Bien que des problèmes techniques aient rendu impossible l'exploitation des mesures in-situ jusqu'à présent, cela permettra peut-être à l'avenir de faire un lien entre évaporation, albédo, température de surface, température de l'air et confort des usagers.

4.4 Verrous scientifiques et techniques

Le présent rapport a permis, dans un premier temps, de lister et présenter des dispositifs expérimentaux permettant d'obtenir les caractéristiques des matériaux nécessaires à la bonne connaissance du phénomène d'îlot de chaleur urbain, dans un second temps plusieurs essais exploratoires ont été menés sur des échantillons préalablement sélectionnés par chaque centre technique dans l'objectif de tirer certains enseignements propres à chaque matériau (influence de la présence de nœud dans le bois, de la formulation des bétons, de la couleur de carreaux ou tuiles par exemple). Enfin, 2 expérimentations ayant pour vocation la mise en place de systèmes permettant l'atténuation du phénomène d'ICU sur site réel ont été présentées.

Ces premiers travaux ont permis de mettre en avant des pistes d'améliorations qui seront explorées dans un futur projet. L'objectif ensuite sera de développer une méthodologie MECD permettant

d'évaluer les performances de systèmes constructifs multi-matériaux adaptés à l'échelle de la rue, au regard du phénomène d'îlot de chaleur.

Les résultats issus de la tâche 4 seront utiles pour le développement d'une démarche expérimentale pour la quantification des données d'entrée du modèle qui sera un des objectifs majeurs pour la suite.

Exemple d'enseignements en rapport avec la mesure des propriétés hydriques :

La mesure au perspiromètre a permis la caractérisation de l'épaisseur de couche d'air de diffusion équivalente S_d . La mise en place de la campagne de mesures sur les échantillons en béton a mis en avant les limites de la mesure en termes de pesée pour les éprouvettes testées, en effet le dispositif expérimental n'est pas adapté pour des masses d'échantillons supérieures à 420 g. Un protocole en chambre climatique a alors été développé, la mesure se déroule dans une enceinte régulée à 23 °C/50 % HR (conditions identiques à celle du perspiromètre), le principe et le protocole restent les mêmes, les échantillons sont placés dans un volume régulé plus important et les pesées sont réalisées « à la main » à l'aide d'une balance externe.

De plus, même si la mesure du S_d donne une première information sur la capacité des matériaux à laisser plus ou moins passer la vapeur d'eau et donc d'être en capacité à échanger avec le milieu extérieur, il semble judicieux de pouvoir réaliser une mesure des isothermes de sorption afin d'avoir une information plus précise sur les propriétés hydriques des matériaux testés et donc du pouvoir d'évapotranspiration de ces derniers. L'obtention de ces isothermes peuvent être longs à obtenir à l'aide d'un appareil de type perspiromètre, notamment pour les matériaux très hygroscopiques, il pourrait être intéressant de développer un protocole simplifié en chambre climatique permettant d'obtenir plus rapidement ces caractéristiques.

Afin de compléter les connaissances des caractéristiques hydriques des matériaux, une détermination du comportement des matériaux de l'enveloppe au contact de l'eau liquide devrait être menée, une mesure des coefficients d'absorption d'eau et de diffusivité liquide semble pertinente.

5. Conclusion - Perspectives

Le projet Dimilot était centré sur l'acquisition de connaissances à travers une étude bibliographique détaillée, la réalisation d'un retour d'expérience et des essais exploratoires. Il a permis aux membres de l'Institut MECD d'identifier des pistes de progrès pour :

- > proposer des méthodes expérimentales et numériques permettant de quantifier l'apport des pistes de solutions recensées ;
- > accompagner le développement de matériaux, produits et systèmes constructifs adaptés à la lutte contre les îlots de chaleur, comme a pu le faire SOPREMA avec son système « Cool Roof¹⁶⁴ ».

Il apparaît que les principaux phénomènes et solutions associées auxquels il convient de s'intéresser dans la perspective d'évaluer la contribution d'un système constructif à la diminution de l'intensité des îlots de chaleur sont les suivants :

- > la réduction de la charge thermique par l'albedo/émissivité ;
- > l'évapotranspiration en surface (végétalisation, systèmes drainants...) ;
- > l'utilisation de volumes d'eau stockés en profondeur ;
- > l'apport de systèmes d'échanges thermique entre la surface et le sol en profondeur ;
- > l'influence de la surface des bâtiments (bardage ventilé ou autre, toiture ventilée, végétalisée ou autre, isolation extérieure...) ;
- > les circulations d'air à l'échelle de la rue ;
- > l'ombrage naturel ou apporté par des systèmes constructifs.

Le projet DIMILOT a permis aux membres de l'Institut MECD de monter en compétences les sur les îlots de chaleur, d'identifier les leviers technologiques pertinents à développer et les organismes qu'il conviendrait d'avoir comme partenaires pour la suite du projet.

La réflexion prospective mener au sein du projet DIMILOT a permis d'identifier comment une méthodologie MECD pourrait être développer in fine afin d'évaluer les performances de systèmes constructifs multi-matériaux adaptés à l'échelle de la rue, au regard du phénomène d'îlot de chaleur.

Cette méthodologie s'appuiera sur :

- > le développement d'un modèle spécifique incluant des exécutable accessibles aux membres MECD ;
- > une démarche expérimentale pour la quantification des données d'entrée du modèle ;
- > une démarche expérimentale à échelle intermédiaire pour le recalage du modèle ;
- > un protocole pour les mesures in-situ, en lien avec les données de sortie du modèle, permettant de calibrer le modèle.

¹⁶⁴ <https://www.soprema.fr/fr/article/dossier-thematique/le-cool-roof-c-est-quoi>

© 2018 CERIB – CS 10010 – 28233 Epernon Cedex

ISSN 0249-6224 – EAN 9782857553595

578.E – août 2023

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction
par tous procédés réservés pour tous pays.

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de son article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (article L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon exposant son auteur à des poursuites en dommages et intérêts ainsi qu'aux sanctions pénales prévues à l'article L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle.

Projet Dimilot

Développement et évaluation de systèmes constructifs contribuant à la réduction des effets des îlots de chaleur

Les îlots de chaleur urbains figurent au premier plan des défis à relever. Ils correspondent à des élévations localisées de températures, particulièrement des températures maximales diurnes et nocturnes, enregistrées en milieu urbain par rapport aux zones rurales voisines ou par rapport aux températures moyennes régionales. Pour lutter contre les îlots de chaleur et réduire leur intensité, il apparaît nécessaire de faire évoluer nos modes constructifs (sols urbains, façades, toitures, terrasses) et les principes d'aménagement urbain.

Le projet DIMILOT vise à positionner MECD comme un contributeur sur la thématique des îlots de chaleur. Il s'agit à terme d'investiguer différentes pistes destinées à apporter une réponse globale et multi-matériaux à ces phénomènes pour les ouvrages neufs et existants.

L'objectif du projet DIMILOT est de développer une méthodologie MECD permettant d'évaluer les performances de systèmes constructifs multi-matériaux adaptés à l'échelle de la rue, au regard du phénomène des îlots de chaleur.

Cette méthodologie s'appuiera sur :

- > Le développement d'un modèle spécifique incluant des exécutable accessibles aux membres MECD ;
- > Une démarche expérimentale pour la quantification des données d'entrée du modèle ;
- > Une démarche expérimentale à échelle intermédiaire pour le recalage du modèle ;
- > Un protocole pour les mesures in-situ, en lien avec les données de sortie du modèle, permettant de calibrer le modèle.