

Îlot de chaleur urbain et application territoriale en France : revue des méthodes de simulation numérique

Magalie Técher^{1*}, Hassan Ait Haddou^{1,2}, Rahim Aguejda^{1,3}

¹ LIFAM, ENSAM, 34090 Montpellier, France

² EVCAU, ENSAPVS, 75013 Paris, France

³ UMR TETIS, CNRS, Maison de la Télédétection, 34000 Montpellier, France

Résumé – Cet article a pour objectif de faire l'état des recherches récentes sur l'évaluation du phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU), des stratégies d'adaptation et des applications territoriales pour l'aménagement opérationnel et la planification réglementaire en France. Les méthodes d'évaluation par simulation numérique sont prometteuses, car elles permettent de tester et vérifier des solutions d'aménagement et de planification variées ; toutefois, elles sont peu exploitées par les acteurs de l'urbanisme. Cet article fait la revue critique des différentes études ayant évalué l'ICU par simulation numérique en France afin d'identifier les principales applications et limites de ce type d'approche pour la planification urbaine et l'aménagement opérationnel en France. Des recommandations sont proposées afin de parvenir à des mises en œuvre et des intégrations efficaces dans les politiques et plans de développement urbain. Les recommandations regroupent quatre aspects : 1) compréhension des besoins des acteurs de l'urbanisme ; 2) choix de l'outil de simulation ; 3) développement des outils et accompagnement des acteurs ; 4) développement des liens entre recherche et planification urbaine. Plus précisément, il s'agit tout d'abord de mieux tenir compte des motivations et besoins des différents acteurs et des caractéristiques du territoire afin de sélectionner l'outil d'évaluation le plus adapté. Enfin, il s'agit pour la recherche de développer des outils et des méthodes permettant une meilleure traduction des connaissances en climatologie vers le langage des acteurs de l'urbanisme.

Mots-clés : Îlot de Chaleur Urbain (ICU), modélisation numérique, simulation microclimatique, modèles, solutions d'adaptation, planification urbaine, aménagement opérationnel.

Abstract – Urban Heat Island and territorial application in France: numerical simulation methods review.

This article aims to review recent research on Urban Heat Island (UHI) assessment, adaptation strategies and territorial application for operational layout and urban planning in France. Numerical simulation methods are promising because they allow to verify multiple urban and planning solutions, however, they are little used by stakeholders. This paper critically reviews the different studies that assessed UHI by numerical simulation in France to identify main applications and limits of this approach for urban planning and operational layout in France. Recommendations are proposed to achieve effective implementations and integrations in urban policies and plans. The recommendations cover four aspects: 1) understanding the needs of urban stakeholders; 2) choice of simulation tool; 3) development of tools and support; 4) development of links between research and urban planning. More specifically, the first step is to better consider motivations and needs of the different stakeholders and characteristics of the territories to select the most suitable evaluation tool. Finally for the research, it is a question to develop tools and methods allowing a better translation of climatology knowledge into urban stakeholder's language.

Keywords: Urban Heat Island (UHI), numerical modelling, microclimatic simulation, models, adaptation strategies, urban planning, regulatory urbanism, operational urbanism.

* Auteure de correspondance : magalie.techer.au@gmail.com

Introduction

L'îlot de chaleur urbain (ICU), caractérisé par une augmentation des températures urbaines est un

phénomène microclimatique qui impacte de plus en plus intensément les milieux urbains (Oke, 1982 ; Arnfield, 2003). En effet, selon les prévisions du GIEC (Revi *et al.*, 2014 ; IPCC, 2022), les températures en

ville vont augmenter sous les effets du changement climatique. Cela va donc entraîner différents enjeux qui concernent le devenir des milieux urbains : santé et vulnérabilité des populations, augmentation des consommations énergétiques ou encore, détérioration des conditions de confort thermique (Akbari et Kolokotsa, 2016 ; Buchin *et al.*, 2016 ; Santamouris, 2020 ; Nieuwenhuijsen, 2021). De nombreuses études ont commenté les causes des effets de l'ICU : 1) augmentation des espaces imperméabilisés, 2) disparition des espaces naturels, 3) perturbation de la ventilation, 4) perturbation des échanges radiatifs et 5) génération de chaleur anthropique (Hulley, 2012 ; Tzavali *et al.*, 2015 ; Imran *et al.*, 2021). Une étude portant sur plusieurs villes européennes a ainsi montré que l'intensité de l'ICU de canopée pouvait aller jusqu'à 10°C au sein des villes (Santamouris, 2016). Le développement urbain et les politiques de planification affectent ces causes en ville et ont un impact sur l'apparition, le développement et l'intensification de l'ICU (Lin *et al.*, 2017 ; Kardinal *et al.*, 2019). Ainsi, confronter les choix d'urbanisation d'un territoire à ses impacts sur les effets de l'ICU devient un enjeu de durabilité pour les acteurs urbains (Hurlimann *et al.*, 2020 ; Kwak *et al.*, 2020).

Afin de diagnostiquer ce phénomène, de nombreuses méthodes ont été développées ces dernières années (Stewart, 2011 ; Mauree *et al.*, 2019 ; Santamouris, 2020) et présentées dans de nombreuses revues de littérature. Celles-ci peuvent être regroupées en quatre catégories : télédétection, mesures *in situ*, géoclassification et simulation numérique (Mauree *et al.*, 2019). Les revues portant sur cette dernière catégorie sont encore peu répandues (Parsae *et al.*, 2019 ; Imran *et al.*, 2021) tandis que leurs utilisations au sein des études de cas se multiplient. En effet, les approches par simulation numérique possèdent plusieurs avantages. Elles permettent de simuler et de comparer différentes stratégies et leurs influences sur l'intensité de l'ICU tout en les intégrant dans un contexte urbain réaliste (Mirzaei, 2015).

En France, le développement urbain des territoires est géré par deux catégories d'outils : d'une part, les outils de planification urbaine tels que les Schémas de Cohérence Territoriaux (SCOT) ou les Plans Locaux de l'Urbanisme (PLU) et

d'autre part, les outils de l'aménagement opérationnel tels que les Zones d'Aménagement Concertées (ZAC) ou lotissement. Les acteurs de ces deux catégories s'intéressent de plus en plus à la prise en compte du phénomène d'ICU sur leur territoire (Struillou, 2012 ; Hidalgo, 2014), ce qui fait de la France un cas d'étude idéal. À cet effet, des revues de littérature sur les méthodes de diagnostic de l'ICU et des différentes solutions de rafraîchissement ont été publiées à destination des acteurs de l'urbanisme en France, afin qu'ils se saisissent de cette problématique au sein de leur pratique (ADEME, 2011 ; ADEME, 2017 ; Bernard *et al.*, 2020).

L'objectif de ce travail se trouve dans cette continuité et est de dresser un inventaire des études évaluant l'intensité de l'ICU en France par une approche de simulation numérique. Cet article vise à orienter les futurs utilisateurs des méthodes de simulation numérique à faire un choix de modèle approprié pour l'évaluation de l'ICU. Dans un premier temps, nous avons identifié les différents modèles de simulation numérique applicables de l'échelle méso à l'échelle du bâtiment. Puis, nous avons dressé un inventaire non exhaustif des différentes études ayant appliqué un modèle de simulation numérique pour évaluer l'ICU en France. De cet inventaire, nous extrayons les caractéristiques des études afin de déterminer les cadres dans lesquels ces recherches s'inscrivent et qui peuvent être adaptés aux besoins des acteurs de l'aménagement opérationnel et de la planification urbaine en France. Dans une dernière partie, nous identifions les challenges qui limitent l'application des méthodes par simulation numérique et dressons une liste de recommandations visant à permettre une meilleure application au sein des territoires en France.

1. Point de vue général sur les méthodes d'évaluation de l'ICU par une approche de simulation numérique

1.1. Les approches similaires

La majorité des études ayant fait l'inventaire et l'état de l'art des différents outils de simulation numérique est orientée vers la description technique des approches et modèles (Al-Yahyai *et al.*, 2010 ;

Abbasabadi et Ashayeri, 2019 ; Mauree *et al.*, 2019 ; Bahi *et al.*, 2020 ; Ameer et Krarti, 2022). Néanmoins, le tableau 1 présente des revues de littérature récentes publiées sur la période 2015-2021, qui tentent d'aborder les apports de ces modèles pour la planification urbaine et l'aménagement. Ces revues dressent un portrait des différentes méthodes de

simulation numérique de l'ICU. Elles présentent les caractéristiques des études ayant recours à ce type de méthodes et les principaux apports pour l'urbanisme. Tout en tenant compte des limites et des difficultés qui restreignent leur utilisation, ces études, dont fait partie ce travail, formulent des recommandations pour en améliorer les applications pour l'urbanisme.

Tableau 1. Revues de littérature récentes présentant les méthodes d'évaluation par simulation de l'ICU (sources : Mirzaei, 2015 ; Parsaee *et al.*, 2019 ; Bherwani *et al.*, 2020 ; Imran *et al.*, 2021 ; Tian *et al.*, 2021). *Recent literature reviews presenting UHI simulation assessment methods.*

Référence	Titre	Objectifs de l'étude	Contexte	Observations et apports
Mirzaei (2015)	<i>Recent Challenges in modeling of urban heat island</i>	Revue des méthodes d'évaluation par simulation des îlots de chaleur urbain en cohérence avec les objectifs et les échelles spatiales des études sur l'ICU.	International	<ul style="list-style-type: none"> Différents objectifs de modélisation des effets de l'ICU (1) Ventilation urbaine et altération des matériaux (2) Étude du confort (3) Variation spatio-temporelle de l'ICU (4) Évaluation et validation de l'outil de simulation (5) Prévission des températures futures Recherches à mener sur le développement d'outils efficaces pour simuler les nombreuses échelles spatiales d'études de l'ICU
Parsaee et al. (2019)	<i>Urban heat island, urban climate maps and urban development policies and action plans</i>	Revue des méthodes d'évaluation des îlots de chaleur urbain et stratégies pour leurs intégrations au sein des cartes climatiques urbaines et aux plans de développement urbain.	International	<ul style="list-style-type: none"> Trois lacunes identifiées : (1) intégration faible des stratégies de mitigation aux politiques et plan de de développement urbain (2) meilleure définition du rôle de la gouvernance urbaine (3) l'engagement et la participation du public qui doit être renforcée Limites techniques aux études sur l'ICU.
Bherwani et al (2020)	<i>Assessment methods of urban microclimate and its parameters: A critical review to take the research from lab to land</i>	Revue des différentes méthodes d'évaluation des îlots de chaleur urbain et des différents paramètres influençant le microclimat urbain	International	<ul style="list-style-type: none"> Deux raisons à la faible application des recherches sur le microclimat : (1) Manque d'analyse intégré et simultanée de l'ensemble des facteurs (2) Manque de visé claire quant à l'utilisation des résultats de la recherche sur les applications pour le développement du territoire. Les auteurs proposent les cinq stratégies suivantes : (1) Compréhension du besoin des villes et des acteurs de l'urbanisme (2) Analyse intégré de l'ensemble des facteurs connus (3) Définition de document guide pour les acteurs (4) Développement d'outils de simulation simple (5) Analyse des coûts-bénéfices des stratégies mises en place
Imran et al. (2021)	<i>Causes, Modeling and Mitigation of Urban Heat Island: a Review</i>	Revue des causes, méthodes d'évaluation par simulation et stratégies de mitigation des îlots de chaleur urbain.	International	<ul style="list-style-type: none"> Outils de modélisation qui présentent des limites (1) Complexité de modéliser des détails urbains (2) Coût de calcul et compétences requises élevés Le couplage de modèle serait intéressant pour combler les lacunes d'échelles et de résolution Analyse du cout-avantage des différentes stratégies de mitigation à long terme et doivent être adaptées au contexte local.
Tian et al. (2021)	<i>Review on Urban Heat Island in China: Methods, Its Impact on Buildings Energy Demand and Mitigation Strategies</i>	Revue des méthodes d'évaluation des îlots de chaleur urbain et de leurs impacts sur la consommation énergétique des bâtiments, et les techniques de mitigation pour lutter contre les effets de l'ICU en Chine.	Chine	<ul style="list-style-type: none"> Effets de surchauffe qui peuvent être évités grâce aux solutions de mitigation Solutions de mitigation à implémenter dès les premières phases de conception du projet d'urbanisme Informations pratiques pour les approches de lutte contre les ICU pour les acteurs de l'urbanisme et les responsables en santé publique en Chine.

Toutefois, les auteurs de la majorité des revues présentées dans le tableau 1 préfèrent le contexte international pour effectuer l'inventaire de ces méthodes et de leurs applications. En effet, le domaine de la climatologie urbaine et les connaissances acquises sur le fonctionnement de l'ICU sont complexes à retranscrire pour les acteurs de l'urbanisme (Ng et Ren, 2015). De plus, en








France, les documents de planification urbaine et d'aménagement sont caractérisés par différentes échelles, administratives, spatiales et temporelles (Hamman, 2011) et aussi une pluralité d'acteurs : institutionnels à travers notamment les collectivités territoriales, associatifs, l'État français, etc. (Douay, 2013). Pour ces raisons, il est complexe d'appliquer en l'état, les conclusions des études présentées dans

le tableau 1 et adaptées à des stratégies globales, au cas particulier des outils de planification urbaine et d'aménagement français. Aussi, cet article vise à apporter des conclusions adaptées à ces différentes particularités.

1.2. Inventaire des méthodes par simulation numérique identifiées au sein de la littérature

Au sein de la littérature scientifique citée précédemment, plusieurs méthodes de simulation de l'ICU ont été identifiées et sont catégorisées en fonction de l'échelle spatiale d'application : de l'échelle méso à l'échelle du bâtiment (Bherwani *et al.*, 2020). Le tableau 2 synthétise les principaux avantages, faiblesses et caractéristiques de ces différentes catégories de modèles.

Tableau 2. Les différents types de modèles de simulation numérique de l'ICU identifiés (sources : Mirzaei, 2015 ; Parsaee *et al.*, 2019 ; Bherwani *et al.*, 2020 ; Imran *et al.*, 2021 ; Tian *et al.*, 2021). *Different types of UHI numerical simulation identified.*

Modèles	Avantages	Faiblesses	Échelle spatiale	Résolution spatiale	Échelle temporelle	BLUHI	CLUHI	SUHI	Énergie	Confort thermique	Outils
 Modèles de prédiction du temps / du climat	<ul style="list-style-type: none"> • Large zone urbaine couverte • Cas réel ou simulé, recherche ou opération de prédiction 	<ul style="list-style-type: none"> • Résolution grossière • Hypothèses et simplification pour prendre en compte les phénomènes physiques ayant lieu à la micro-échelle 	Méso	1km	Heure - journée	X	-	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> • WRF /ARW • MMM • RAMS • Meso-NH • ARPS • Metras
 Modèles de canopée urbaine	<ul style="list-style-type: none"> • Prédiction de la température de l'air, de surface des bâtiments et du pavement • Calcul rapide car il approxime les bâtiments avec des nœuds limités 	<ul style="list-style-type: none"> • Simplifie le modèle de comportement des fluides et du transfert convectif de chaleur. • Résolution faible du modèle de géométrie et détail flux d'air autour du bâtiment 	Micro	1m	Seconde - heure	X	X	X	-	X	<ul style="list-style-type: none"> • UHSM • TEB • Solweig • Rayman • UWG • SOLENE • BRAMS
 Modèles d'énergie du bâtiment	<ul style="list-style-type: none"> • Outil 3D multizone transitoire pour un seul bâtiment • Calcul de l'énergie totale dégagée par un bâtiment • Couramment utilisé pour prédire les besoins en refroidissement et chauffage du bâtiment 	<ul style="list-style-type: none"> • Modèles simplifiés en représentation de l'impact mutuel du bâtiment sur le contexte environnant. • Ignore les impacts de l'environnement et du voisinage à moins d'être couplé à d'autres modèles • Nécessite des données d'entrées pour les paramètres extérieurs tels que la température de l'air, l'humidité, etc. 	Bâtiment / Micro	0.01m	Seconde - heure	-	-	X	X	X	<ul style="list-style-type: none"> • EnerWin • Energy Plus • TRNSYS • Dymola • TAS • IDA ICE • CitySim
 Modèles de dynamique des fluides	<ul style="list-style-type: none"> • Réalise des simulations comptant la vélocité et les températures et avec l'addition de l'humidité relative et des polluants • Comportement des flux et des transferts de chaleur convectifs des surfaces de bâtiment très détaillés 	<ul style="list-style-type: none"> • Domaine de taille limitée dû à des coûts de calcul (temps) élevés • Précision des résultats qui dépend fortement de la limite et des paramètres initiaux • Représentation à haute résolution de la géométrie urbaine 	Méso /Micro	0.01-1km	Seconde - heure	X	X	X	-	X	<ul style="list-style-type: none"> • ANSYS Fluent • ANSYS CFX • OpenFoam • Mitrax • Envi-met • FLUENT
 Modèle de milieu urbain poreux	<ul style="list-style-type: none"> • Plus facile et rapide à implémenter que les modèles CFD standard pour prendre en compte les flux d'air • Utilisable à des stades de conception initiaux car permet de faire des simulations de circulation d'air rapide pour orienter la prise de décision 	<ul style="list-style-type: none"> • Incapable de démontrer les caractéristiques microscopiques détaillées du flux et des températures autour du bâtiment • Stade de recherche encore récent • Technique du volume moyen utilisé pour représenter les bâtiments • Informations sur le comportement à l'échelle micro sont négligés tels que la porosité et l'anisotropie 	Méso /Micro	0.01-1km	Seconde - heure	X	X	X	-	X	<ul style="list-style-type: none"> • ANSYS Fluent
 Modèles statistiques	<ul style="list-style-type: none"> • Applicable pour des objectifs de prédiction et la prévision • Simple et rapide pour prédire et prévoir • Corrélations entre les caractéristiques différentes et multi-aspect de la ville pour l'analyse de l'ICU 	<ul style="list-style-type: none"> • Valide pour une location particulière et inapplicable dans d'autres contextes • Précision des résultats qui dépend de la validité de la donnée d'entrée du au processus conduit par la donnée. • Résolution spatiale faible 	Multiples	Quelques mètres	Heure - journée	-	X	X	-	-	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse de régression • Réseaux de neurones artificiels
 Modèles couplés / intégrés	<ul style="list-style-type: none"> • Permet d'adapter le choix et l'utilisation des modèles aux objectifs de la recherche et non l'inverse • Simuler les différentes échelles d'études de l'ICU • Résolution spatiale et temporelle variées 	<ul style="list-style-type: none"> • Selon les modèles utilisés, peut avoir des coûts computationnels non négligeables • Expertise pour comprendre l'ensemble des phénomènes physiques régissant l'ensemble des modèles • Compétences dans la compréhension du couplage et de l'interrelation entre modèles 	Multiples	0.01-1km	Seconde - heure - journée	X	X	X	X	X	<ul style="list-style-type: none"> • Meso-nh + TEB • WRF + Rayman • WRF + Envi-met • TEB + EnergyPlus • UWG + TRNSYS • WRF + Envi-met + BEM

Définition d'après Parsaee *et al.* (2019) et Tian *et al.* (2021)

BLUHI *Ilot de chaleur urbain de la couche limite* : mesuré à partir de la toiture des constructions jusqu'à l'atmosphère: estimation de la température de l'air à l'échelle méso

CLUHI *Ilot de chaleur urbain de la couche de canopée* : mesuré entre le sol et les toitures des constructions : estimation de la température de l'air, adapté à l'échelle micro

SUHI *Ilot de chaleur urbain de surface* : mesuré sur les surfaces horizontales et verticales: estimation de la température de surface à l'échelle méso ou micro

(1) Les modèles à l'échelle méso, de la région à la ville, sont des modèles atmosphériques dont les plus répandus sont les modèles de prédiction du temps et du climat. Ceux-ci simulent les phénomènes atmosphériques au-dessus de la couche de canopée, incluant la physique pour des prédictions météorologiques numériques (Oke, 1976 ; Dudhia, 2014 ; Parsaee *et al.*, 2019 ; Kwok et Ng, 2021).

(2) Les modèles à l'échelle micro, du quartier à la rue, sont des modèles thermoradiatifs fondés sur les échanges radiatifs et thermiques entre l'atmosphère et la forme urbaine (Oke, 1976 ; Arnfield, 2003). Les plus connus sont les modèles de canopée urbaine (UCM) qui modélisent les interactions bâtiment-environnement en calculant le bilan énergétique d'une couche de canopée urbaine (Masson, 2000). Ces modèles simulent l'intensité de l'ICU à l'échelle micro ou encore le confort thermique du piéton (Mirzaei et Haghighat, 2010).

(3) Les modèles à l'échelle du bâtiment résolvent des équations de balance énergétique afin de modéliser les composants du bâtiment pour prédire les comportements du bâtiment tels que la consommation énergétique ou le confort intérieur (Abbasabadi et Ashayeri, 2019).

(4) Les modèles à échelles multiples regroupent trois types de modèles : les modèles de dynamique des fluides (CFD), les modèles statistiques et les modèles couplés (Parsaee *et al.*, 2019).

Les modèles CFD sont utilisés pour étudier l'impact de la ventilation urbaine, de la dispersion des polluants dans l'air ou encore de l'impact de la végétation à l'échelle micro et macro (Toparlar *et al.*, 2015 et 2017 ; Allegrini et Carmeliet, 2018 ; Brozovsky *et al.*, 2022). Plus récemment, les modèles de milieux poreux ont été introduits au sein des simulations CFD (Hu *et al.*, 2012) afin de réduire la demande de temps de calcul, en étant jusqu'à 60 % plus rapide (Ming *et al.*, 2021), de matériel et de compétences techniques (Wang et Li, 2016).

De plus, il existe des modèles statistiques, pour prédire l'évolution de l'îlot de chaleur urbain ou prévoir les températures urbaines (Lee *et al.*, 2016). Ils sont largement implémentés pour corrélérer les caractéristiques urbaines de natures complexes et d'échelles variées (Tian *et al.*, 2021).

Enfin, les modèles couplés ou intégrés sont

formés à partir de l'intégration de plusieurs types de modèles, afin de couvrir les lacunes et les écarts de représentation, de résolution et de précision de chacun (Mirzaei, 2015). Ces modèles permettent de répondre de manière adaptée aux besoins des utilisateurs en utilisant les modèles qui simulent les indicateurs de l'ICU recherché (Chen *et al.*, 2004 ; Salamanca *et al.*, 2009 ; Allegrini et Carmeliet, 2017 ; Parsaee *et al.*, 2019 ; Aghamolaei *et al.*, 2021).

1.3. Identification et sélection des études appliquées en France

Afin d'inventorier les études ayant évalué l'ICU en France par une simulation numérique, nous avons réalisé une revue de littérature fondée sur trois étapes suivant la méthode PRISMA (Page *et al.*, 2021) : 1) l'identification, 2) la sélection et l'admissibilité et 3) l'inclusion (figure 1). Nous avons effectué en juillet 2022 une recherche non exhaustive, d'études publiées entre 2010 et 2022, sur la base de données Science Direct complétée par le moteur de recherche Google Scholar. Pour cela, nous avons utilisé les mots-clés *Îlot de Chaleur Urbain, surchauffe urbaine, Urban Heat Island, urban overheating, évaluation, assessment et France*. Nous avons retiré de l'identification, les doublons et les articles dont les titres et résumés ne correspondaient pas à l'objectif de ce travail ; à la fin de cette étape, 398 articles étaient potentiellement éligibles. Afin d'évaluer leur éligibilité, les articles devaient respecter les critères suivants : avoir été publiés dans des revues à comité de lecture ; porter sur l'évaluation du phénomène d'ICU ; utiliser une méthode par simulation numérique ; porter sur une/des zones en France.

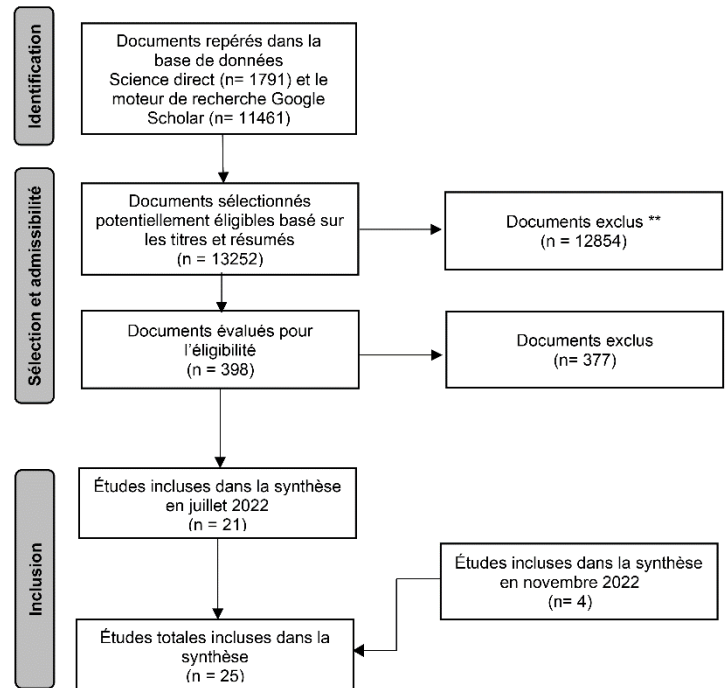
La définition de ces critères a permis de cibler 21 articles ayant mis en place une méthode par simulation numérique pour évaluer le phénomène d'ICU sur une zone en France. Ces critères ne constituaient pas une évaluation, mais une sélection non exhaustive des articles. Ainsi, une grande majorité des études identifiées ne répondaient pas aux critères et 377 documents ont été exclus de la sélection, car ils étaient valables pour d'autres objectifs de recherche et pour investiguer l'état des connaissances sur d'autres territoires et approches d'évaluation de l'ICU. Quatre études ont ensuite été ajoutées en novembre 2022 à la liste des recherches

éligibles, portant ainsi le nombre total d'études incluses dans la synthèse à 25.

À partir de l'analyse du contenu des articles, nous extrayons certaines caractéristiques : la localisation géographique du cas d'étude, les objectifs, les solutions de rafraîchissement, les

conséquences et l'évaluation de l'intensité de l'ICU. Les limites de l'application de chaque type de méthodes d'évaluation sont ensuite identifiées tandis que des recommandations pour en améliorer la mise en application au sein de l'urbanisme français sont formulées.

Figure 1. Méthode utilisée pour identifier, sélectionner et évaluer l'éligibilité des études ayant évalué l'ICU par une simulation numérique en France (source : auteur d'après la méthode PRISMA ; Page *et al.*, 2021).
Method used to identify, select and assess the eligibility of studies that have assessed UHI by numerical simulation in France.



2. Les études sur l'évaluation des ICU par simulation numérique en France

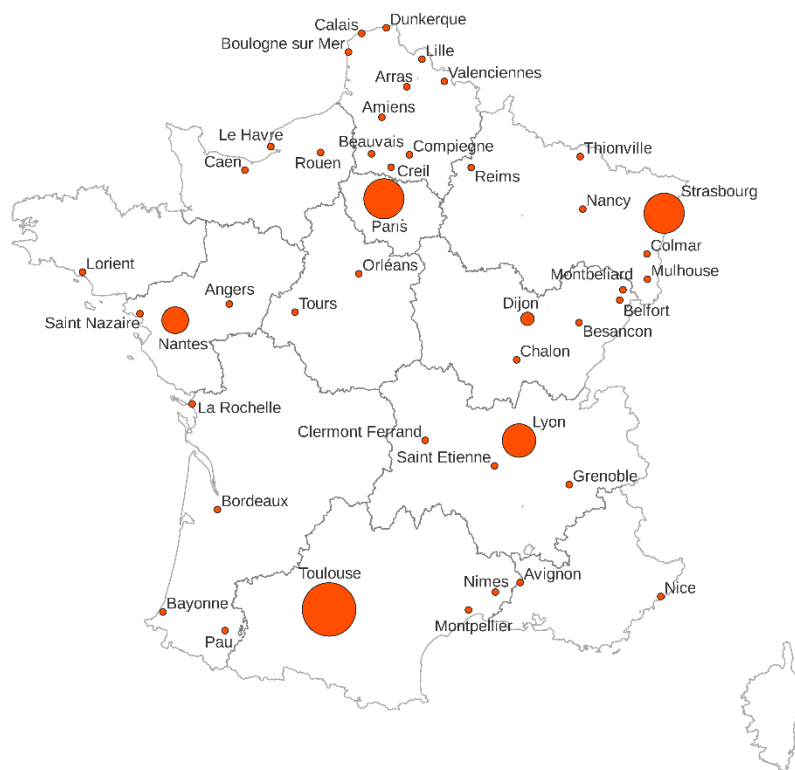
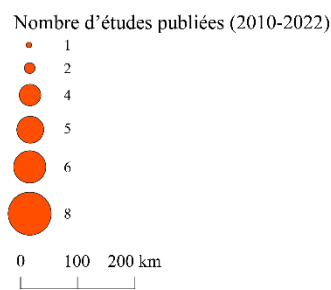
2.1. La diversité des approches d'évaluation par simulation numérique

La figure 2 localise les territoires étudiés en rapport avec le nombre d'études réalisées. Toulouse, Paris et Strasbourg sont particulièrement représentées. En effet, ces villes ont fait l'objet de campagnes de mesures telles que CAPITOUL pour Toulouse (Masson *et al.*, 2008), ce qui permet de valider les résultats des simulations numériques par confrontation à des mesures *in situ*.

Le tableau 3 présente les caractéristiques des études retenues durant la phase d'éligibilité. Les intensités de l'ICU simulées varient entre les territoires du fait de contextes particuliers (topographie, proximité à l'océan, etc.) et de climats différents (Gardes *et al.*, 2020). En France, il existe 10 types de climats, toutefois les climats Cfb (climat

océanique), Cfa (climat subtropical humide) et Csa (climat méditerranéen chaud) (Dubreuil, 2022) sont les plus évalués. Les résultats des simulations varient également du fait de la diversité des périodes de simulation. Il est établi que l'ICU nocturne est davantage marqué que l'ICU diurne (Arnfield, 2003). Ainsi, un certain nombre d'études vont se concentrer sur la variation et la comparaison de l'ICU diurne et nocturne (Kastendeuch *et al.*, 2010 ; Lemonsu *et al.*, 2015). D'autres études vont privilégier l'évaluation des ICU sur une période de l'année correspondant aux trois mois les plus chauds (en été) en relation avec des périodes de canicule notamment. Enfin, d'autres études vont effectuer des simulations annuelles (Kohler *et al.*, 2017 ; Nogueira *et al.*, 2022) ou comparer les intensités pour les saisons chaudes et froides (été/hiver) (Reder *et al.*, 2018). Enfin, pour une même ville, les résultats d'intensité d'ICU simulés varient et semblent dépendants des outils de simulation, de leur type de paramétrisation et de résolution.

Figure 2. Localisation des études récentes (2010-2022) ayant évalué l'ICU par une approche de simulation numérique en France. *Location of recent studies (2010-2022) assessing UHI using a numerical simulation approach in France.*



2.2. Les applications et objectifs des études

Les résultats des études dépendent des types d'ICU étudiés. Près de 70 % des études évaluent l'ICU de canopée (CLUHI), tandis que 15 % des études évaluent celui de surface (SUHI). Ainsi, les méthodes par simulation semblent davantage dédiées à l'étude des températures de l'air, tandis que les températures de surface semblent étudiées par d'autres approches telles que la télédétection (Bherwani *et al.*, 2020) non analysées dans ce travail. Les résultats dépendent également des objectifs de recherche classés en quatre grands types d'application :

1) L'analyse de la variabilité spatio-temporelle de l'ICU constitue une des applications majeures des études analysées. En effectuant un diagnostic du territoire, elles étudient les liens entre la structure, la morphologie et les caractéristiques du territoire telles que la topographie ou la présence d'eau, ainsi que l'intensité, le comportement et l'étendue de l'ICU.

2) 46 % des études ont pour objectif d'évaluer l'impact de différentes mesures et orientations d'aménagement et de rafraîchissement sur la réduction des ICU. L'étude des solutions d'adaptation est peu répandue en France en

comparaison avec la littérature scientifique internationale qui abonde sur ce sujet (Fallmann *et al.*, 2014 ; Akbari *et al.*, 2016 ; Aleksandrowicz *et al.*, 2017 ; Grafakos *et al.*, 2020 ; Tsoka *et al.*, 2020 ; Marando *et al.*, 2022). Les études en France analysent davantage, selon la classification réalisée par l'ADEME, les solutions vertes, bleues et grises (Bernard *et al.*, 2020). D'une part, les solutions vertes et bleues étudiées sont relatives à l'impact du verdissement, de la végétalisation ou de la gestion de l'eau (Lemonsu *et al.*, 2015 ; Martins *et al.*, 2016 ; Morille et Musy, 2017 ; Alonso et Renard, 2020). D'autre part, les solutions grises consistent à évaluer l'impact de la structure, la morphologie et les matériaux urbains (Masson *et al.*, 2014 ; Kohler *et al.*, 2017 ; Reder *et al.*, 2018).

3) Près de 58 % des études effectuent des simulations numériques de l'ICU en utilisant de nouveaux outils développés, couplés ou non validés. Leur objectif est d'évaluer la capacité d'un modèle à simuler plus précisément le phénomène d'ICU. Elles portent particulièrement sur le couplage ou l'intégration de modèles qui permettent de produire des résultats avec une meilleure résolution, à prendre en compte davantage d'indicateurs ou de simuler l'ICU à différentes échelles (Bueno *et al.*, 2011 ; Kastendeuch et Najjar, 2015 ; Lemonsu *et al.*, 2015 ; Le Mentec, 2022).

Tableau 3. Les applications récentes (2010-2022) des études ayant évalué l'ICU par une approche de simulation numérique. *Recent applications (2010-2022) of studies assessing UHI using a numerical simulation approach.*

Ville	Climat	Échelle spatiale	Modèle	Outils	Période	Type d'ICU	Intensité (°C)		Impact (°C)	Conséquences				Autres indicateurs	Références
Lyon	Cfa	Micro	MC	SOLENE – FLUENT	Annuel	SUHI		X				X			Bouyer et al (2011)
	Cfa	Méso	MPC	MesoNH	Printemps	SUHI					X				Diadlio Dudek et al (2015)
	Cfa	Micro	MC	SOLENE – Code Saturne	Été	CLUH		X		X			X		Morille et Musy (2017)
	Cfa	Multiples	MS	Trois types de regression	Été	CLUHI		X			X				Alonso et Renard (2020)
Nantes	Cfb	Micro	MCU	TEB	Annuel	CLUHI						X	X		Benzerzour et al (2011)
	Cfb	Micro	MC	Envi-Bath	Été	SUHI, CLUHI		X	-10°C sur la Tsurf	X	X	X			Gros et al (2014)
	Cfb	Micro	MC	SOLENE – Code Saturne	Été	CLUHI		X				X			Morille et al (2016)
Paris	Cfb	Méso	MPC	ARPS	Été	BLUHI	6.1°C (N)					X			Wouters et al (2013)
	Cfb	Méso	MC	MesoNH + TEB	Été	CLUHI	2.5-3°C (N) et 1-1.5°C (J)	X	-1.08°C (N) et 0.61°C (J)			X	X		Lemons et al (2015)
	Cfb	Méso	MC	SEBM – ABLM	Été	SUHI, CLUHI						X			De Ridder et al (2017)
	Cfb	Méso	MC	SURFEX – TEB	Annuel	SUHI, CLUHI	3-6°C (SUHI) ; 0.6-0.25°C (CLUHI)					X			Nogucira (2022)
	Cfb	Méso	MPC	WRF	Annuel	CLUHI								X	Steensen et al (2022)
Strasbourg	Cfb	Méso	MC	MesoNH + TEB	Été	CLUHI	4°C (N)						X		Kastendeuch et al (2010)
	Cfb	Micro	MCU	LASER/F	Été	SUHI						X			Lee et al (2013)
	Cfb	Multiples	MC	MesoNH + SURFEX – LASER/F	Été	CLUHI						X			Kastendeuch et Najjar (2015)
	Cfb	Méso	MC	WRF + BEM	Annuel	CLUHI	0.62°C (A)	X					X		Kohler et al (2017)
	Cfb	Micro	MC	TEB + SurIatm	Annuel	CLUHI						X		X	Le Mentec (2022)
Toulouse	Csa	Méso	MC	TEB + Energy Plus	Été	SUHI, CLUHI		X			X	X			Bueno et al (2011)
	Csa	Méso	MCU	UWG	Annuel	CLUHI						X			Bueno et al (2013)
	Csa	Méso	MC	MesoNh + TEB + UWG – BEM	Annuel	CLUHI		X				X			Masson et al (2014)
	Csa	Micro	MDF	ENVI-met	Été	CLUHI		X	2°C		X		X		Martins et al (2016)
	Csa	Micro	MDF	Code Saturne	Annuel	CLUHI					X			X	Gao et al (2018)
	Csa	Méso	MCU	TEB 1D	Été / hiver	CLUHI	1.5-2.5°C (H) et 1.2-3.6°C (E)	X							Reeder et al (2018)
Toulouse et Dijon	Csa et Cfb	Méso	MC	MesoNH + TEB	Été	CLUHI					X	X			Schoetter et al (2020)
42 villes	Varié	Méso	MC	MesoNh + TEB + Random Forest	Annuel	CLUHI	0.26-1.72°C (N)	X	0.2°C			X		X	Gardes et al (2020)

Contenu de l'étude



Potentiel de rafraîchissement de solutions de mitigation



Évaluation et validation de l'outil



Évaluation du confort thermique



Évaluation des besoins énergétiques urbains

Modèles utilisés

MPC Modèle de prédiction du climat
MCU Modèle de canopée urbaine
MDF Modèle de dynamique des fluides
MS Modèle statistique
MC Modèles couplés / intégrés

Définition d'après Parsaee et al. (2019) et Tian et al. (2021)

BLUHI Ilot de chaleur urbain de la couche limite
CLUHI Ilot de chaleur urbain de la couche de canopée
SUHI Ilot de chaleur urbain de surface

Soixante deux pourcents des études utilisent un ensemble de plusieurs modèles, par l'intégration de modèles d'énergie du bâtiment (ex : TEB) afin de paramétrer les modèles de prédiction du climat d'échelle méso comme par exemple Méso-NH, WRF, etc. (Lemonsu *et al.*, 2015 ; Kohler *et al.*, 2017 ; Nogueira *et al.*, 2022). Certaines études vont coupler des modèles de canopée urbaine (ex : Solene-Microclimat) et de dynamique des fluides (ex : code saturne, Fluent) à l'échelle micro afin de tenir compte des flux d'air dans le calcul de l'intensité de l'ICU (Bouyer *et al.*, 2011 ; Morille *et al.*, 2016 ; Morille et Musy, 2017).

4) Enfin, une dernière application consiste à analyser, parallèlement à l'ICU, le confort thermique : indice UTCI (Bröde *et al.*, 2013), indice PET (Höppe, 1999), etc. (Martins *et al.*, 2016 ; Morille et Musy, 2017) ou les besoins énergétiques (besoins en refroidissement et en chauffage, consommation globale, etc. ; Gros *et al.*, 2014 ; Morille *et al.*, 2016 ; Kohler *et al.*, 2017).

En outre, plus de la moitié des recherches simulent le comportement de l'ICU à l'échelle méso de la ville ou d'une zone métropolitaine. Ces études sont marquées par une grande diversité de calcul de l'intensité de l'ICU. En effet, d'une étude à l'autre, les formules varient (Memon *et al.*, 2009 ; Schwarz *et al.*, 2011 ; De Groot-Reichwein *et al.*, 2015). Les études de la catégorie (1) effectuent la comparaison des températures non urbaines et urbaines pour caractériser l'ICU tandis que les études de la catégorie (2) vont le plus souvent comparer les températures urbaines avant et après la mise en place d'une solution ; celles de la catégorie (3) vont davantage s'intéresser à la comparaison des températures mesurées *in situ* aux températures simulées. La représentation des résultats est également diversifiée. Les études à l'échelle méso vont souvent privilégier une représentation sous forme de cartographie 2D globale du territoire tandis que les autres études à l'échelle micro vont le plus souvent présenter des courbes ou des tableaux de températures, voire des rendus 3D avec spatialisation des températures.

2.3. Les portées opérationnelle et réglementaire des études

Il apparaît que peu de recherches ont une portée opérationnelle et aucune réglementaire. En effet,

certain résultats (quatre études) ont permis d'améliorer des projets d'aménagements voire de trouver des solutions qui améliorent le confort thermique extérieur et contribuent à la lutte contre les ICU. C'est le cas du projet de la ZAC Montaudran à Toulouse qui a été simulé dans le modèle de dynamique des fluides Envi-met (Martins *et al.*, 2016). Les résultats ont amené à la réalisation d'un aménagement doté de systèmes de rétention d'eau avec une végétalisation des abords, un espace public doté de matériaux perméables et de bassin d'eau, ce qui contribue à améliorer les températures extérieures de l'air de 2°C.

3. Recommandations pour une meilleure application des évaluations par simulation numérique

Les méthodes d'évaluation l'ICU se développent de plus en plus rapidement et notamment, les méthodes par simulation du fait de l'amélioration des différents outils (Bherwani *et al.*, 2020 ; Imran *et al.*, 2021). Cet article fait l'état des méthodes de simulation numérique des ICU et de leur application en France. À partir de l'analyse d'articles, des challenges pouvant limiter leurs applications ont été relevés et sont résumés dans la section suivante. Puis, des recommandations sont émises pour tenter de les surmonter et le tableau 4 présente les principales applications spatiales et objectifs auxquels peuvent répondre les différents modèles de simulation numérique de l'ICU, en facilitant le choix d'une méthode pour l'aménagement opérationnel et la planification urbaine en France.

3.1. Les limites à la prise en compte des évaluations par simulation numérique de l'ICU

À travers un état de l'art, il ressort diverses problématiques liées à la réalisation des études sur l'ICU. La littérature scientifique internationale est fournie sur les études portant sur le potentiel des solutions d'adaptation et divers états de l'art ont été publiés (Kardinal *et al.*, 2019 ; Grafakos *et al.*, 2020 ; Tsoka *et al.*, 2020 ; Neij et Heiskanen, 2021). Toutefois, en France, les études portant sur l'ICU visent davantage à caractériser et étudier les variations temporelles et spatiales de l'ICU ou à effectuer la

validation d'une approche pour diagnostiquer avec fiabilité l'intensité de l'ICU. Ainsi, il apparaît un

manque d'études sur l'application de solutions de rafraîchissement en France.

Tableau 4. Comparaison et sélection d'une méthode de simulation des ICU pour une application en France. *Comparison and selection of an UHI simulation method for an application in France.*

Modèles	Aménagement opérationnel		Planification urbaine							PCAET						Ventilation urbaine	Appliqué en France			Niveau d'expertise
	OAP	C	PLU	D	PADD	R	AN	PAS	DOO											
Modèles de prédiction du temps / du climat	-	-	X	-	-	X	-	-	X	-	-	X	X	X	-	-	X	> 50000 €	Moyen à élevé	Élevé
Modèles de canopée urbaine	X	X	-	X	X	-	X	X	-	X	X	X	X	X	-	-	X	NC	Faible à moyen	Moyen
Modèles d'énergie du bâtiment	-	X	-	-	X	-	-	-	-	-	X	-	-	-	X	-	X	NC	Moyen à élevé	Élevé
Modèles de dynamique des fluides	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	X	X	< 50000 €	Élevé à très élevé	Élevé
Modèle de milieu urbain poreux	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	X	-	< 50000 €	Moyen	Moyen
Modèles statistiques	-	-	X			X			X			X	X	X	-	-	< 10000 €	Faible	Faible	
Modèles couplés / intégrés	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	> 50000 €	Moyen à très élevé	Élevé

Objectif de l'étude

- Variation temporelle et spatiale de l'ICU
- Prédiction des températures futures
- Évaluation du confort thermique
- Évaluation des besoins énergétiques urbains
- Potentiel de rafraîchissement de solutions de mitigation

Nomenclature

OAP : Orientations d'Aménagement et de Programmation
C: Conception
D: Diagnostic
PADD: Projet d'Aménagement et de Développement Durables
R: Règlement d'urbanisme
AN: Annexes dont diagnostic et évaluation environnementale
PAS : Projet d'Aménagement Stratégique
DOO: Document d'Orientations et d'Objectifs
S: Document Stratégique
AC: Plan d'Actions
NC: inconnu

- Coût de l'étude (en euros)
- Coût computationnel

Les problématiques liées à l'application de méthodes par simulation numérique semblent liées à des limitations techniques communes à toutes les méthodes d'évaluation. En effet, la variété des échelles spatiales et temporelles doit être prise en compte pour diagnostiquer précisément l'ICU. De ce fait, la mise en place de stratégies d'adaptation doit prendre en considération les différences de contexte urbain et climatique des territoires (Gardes *et al.*, 2020). La diversité des indicateurs de l'ICU et de représentation des résultats peut également constituer une limite à l'application territoriale (De Groot-Reichwein *et al.*, 2015). En effet, la cartographie semble être un outil de travail courant pour les acteurs de l'urbanisme, car elle leur permet de visualiser rapidement et spatialement les enjeux de leurs territoires (Ren *et al.*, 2013). À l'inverse, les représentations sous forme de courbes ou de tableaux de températures sont moins utilisées par les acteurs urbains. Par ailleurs, les applications pour l'aménagement opérationnel et la planification

urbaine semblent être limitées par le manque d'expertise des utilisateurs sur le choix et l'utilisation d'une méthode de diagnostic appropriée (Bherwani *et al.*, 2020). L'intérêt pour les méthodes par simulation numérique réside dans leur faculté à tester et comparer plusieurs stratégies tout en prenant en considération un contexte urbain réel. Ainsi, il existe plusieurs échelles d'application des études par simulation allant de la ville au bâtiment (tableau 2). Le choix d'une méthode doit dépendre de l'objectif de celle-ci. Toutefois, les méthodes par couplage de plusieurs modèles semblent davantage répondre aux objectifs multiples des études sur l'ICU : meilleure résolution spatiale, confort thermique ou besoins énergétiques intégrés à l'évaluation de l'ICU, etc. (Parsae *et al.*, 2019). Bien que le développement des outils de simulation se multiplie, leur utilisation et leur connaissance par les acteurs de l'urbanisme restent un challenge en France. Le développement des compétences des acteurs institutionnels est une nécessité pour lier les

connaissances issues de la climatologie urbaine à la pratique de l'urbanisme de demain et une meilleure prise en compte des ICU.

3.2. Recommandations générales pour la recherche

Comme il a été énoncé, les outils de simulation tels que les modèles de dynamique des fluides ou encore les modèles de prédiction du climat sont complexes à appréhender, car ils simulent des phénomènes physiques que les non-initiés comprennent peu (De Groot-Reichwein *et al.*, 2015). L'élaboration et l'amélioration des outils de simulation devraient tendre vers la simplification des outils et des indicateurs de l'ICU par la création d'indices tels que *Urban Heat Island Index* (Jin, 2012). Enfin, la formation des acteurs doit être développée et des experts doivent être missionnés pour faire le lien entre langage opérationnel, réglementaire et recherche fondamentale et appliquée.

La mise en place de stratégies d'adaptation ou d'évaluation des ICU apporte plusieurs bénéfices pour les acteurs de la planification urbaine et le territoire, notamment en termes de coûts énergétiques, environnementaux ou encore économiques. De ce fait, la multiplication des liens entre recherche et planification urbaine est bénéfique pour les territoires, car elle permettrait de tester les impacts de diverses solutions d'adaptation sur la réduction des effets de l'ICU. Ainsi, des initiatives telles que le projet MAPUCE (Lambert *et al.*, 2016 ; Lambert *et al.*, 2019) ou encore les recherches sur les cartes climatiques urbaines (Ng et Ren, 2015) doivent être encouragées et développées en France.

3.3. Recommandation aux acteurs de l'aménagement opérationnel

Les applications d'évaluation de l'ICU sur des projets d'aménagement opérationnel peuvent porter sur deux objectifs principaux : 1) l'amélioration du confort thermique ou des besoins énergétiques ; 2) la simulation de différentes solutions de rafraîchissement urbain. Quelques exemples d'applications existent en France. À Nice, une simulation par un modèle de dynamique des fluides a ainsi permis d'analyser différentes versions du

projet afin de parvenir à des conditions de confort thermique optimales (2ei Véolia, 2022). Différentes solutions de rafraîchissement ont ainsi été simulées : arrosage de la chaussée, pavé à rétention d'eau, verdissement, etc. En milieu tropical, les choix de conception de l'Écocité de la Réunion, située sur la commune de Saint-Paul, sont issus d'une évaluation des différentes options de matériaux par simulation numérique et leur impact sur le confort thermique. À des échelles spatiales plus réduites, des simulations numériques ont été réalisées pour améliorer les conditions de confort thermique dans le cadre de la transformation de cours d'école en îlot de fraîcheur notamment dans les projets RECRE (ADEME 2019-2022) et cours OASIS (FEDER 2018-2022). En ce qui concerne les applications pour l'aménagement opérationnel, les échelles spatiales restent réduites, de l'échelle micro du quartier à celle de la parcelle. De ce fait, les points suivants peuvent être relevés :

- Les exemples d'études énoncés précédemment révèlent que la meilleure opportunité d'employer une méthode par approche numérique pour l'aménagement opérationnel est à l'étape de la conception du projet.
- Les outils de simulation les plus fréquemment utilisés à l'échelle opérationnelle sont les outils permettant d'évaluer les ICU à l'échelle micro, mais également de prendre en compte le confort thermique tels que les modèles de canopée urbaine ou les modèles de dynamique des fluides. Les modèles d'énergie du bâtiment peuvent également être utilisés pour simuler les besoins énergétiques.

3.4. Recommandations aux acteurs de la planification urbaine

Il n'existe pas, à notre connaissance, de cas d'études par simulation de l'ICU ayant conduit à l'élaboration de documents d'urbanisme. Pourtant, les applications peuvent être diverses et les apports majeurs pour le territoire. En effet, les études énoncées précédemment ont révélé que les modèles de simulation permettent de répondre à deux objectifs : 1) l'analyse de l'intensité de l'ICU et 2) la simulation de différentes solutions de planification et d'aménagement. D'après l'analyse des études précédentes, les applications pour la planification

urbaine doivent porter une attention particulière sur :

- Les applications pour la planification urbaine peuvent intervenir principalement au cours de trois étapes : du diagnostic du territoire puis aux étapes de définition des orientations et enfin, des règles de planification. Particulièrement, les études d'évaluation de l'ICU peuvent être intégrées au sein des Plans Locaux d'Urbanisme Communaux (PLU) et Intercommunaux (PLUi), des Schémas de Cohérence Territoriaux (SCOT) ou encore des Plans Climat Air Énergie Territoriaux (PCAET) (Ramora *et al.*, 2013 ; Ministère de la Cohésion des territoires, 2017). D'une part, l'analyse de la présence et de l'intensité de l'ICU sur un territoire à l'échelle méso peut être intégrée au sein des diagnostics contenus dans les rapports de présentation et annexes. D'autre part, les simulations de solutions d'adaptation peuvent être intégrées en tant que recommandations au sein des Projets d'Aménagement et de Développement Durables (PADD), des Projets d'Aménagement Stratégique (PAS) ou des Documents Stratégiques en fixant des orientations concernant la lutte contre les ICU (étalement urbain et structure urbaine, trames vertes et bleues, etc.) (Hidalgo, 2014). Ces solutions peuvent être intégrées au sein des règlements d'urbanisme des PLU qui permettent de définir sur chaque parcelle du territoire, les aspects urbains, architecturaux et paysagers (GRIDAUH, 2018). En effet, ces règlements sont composés d'articles au sein desquels les acteurs de l'urbanisme réglementaires ont la possibilité de définir des règles participant à la lutte contre les ICU. Celles-ci devront être appliquées par tous les projets du territoire (obligation d'un coefficient de biotope ou de végétation, limitation du coefficient d'emprise au sol, emprise des constructions, etc.) (Struillou, 2012 ; Hidalgo, 2014 ; Lambert *et al.*, 2019). Enfin, ces recommandations peuvent également être intégrées au sein des Orientations d'Aménagement et de Programmation (OAP), qui sont des documents obligatoires des PLU/PLUi et qui permettent de définir sur un périmètre, les caractéristiques d'un projet d'aménagement souhaité par la collectivité (Lambert *et al.*, 2016).
- Les outils de simulation qui semblent adaptés pour la planification urbaine dépendent de l'échelle d'étude. Ainsi, pour le diagnostic du territoire, les

modèles d'échelle méso de prédiction du climat sont les plus pertinents. Pour la simulation de solutions d'adaptation, des modèles d'échelles plus réduites telles que les modèles de canopée urbaine ou de dynamique des fluides sont requis.

Les points énoncés précédemment visent une meilleure intégration des études de simulation sur l'ICU au sein de la pratique de l'urbanisme en France. Bien que les applications territoriales se développent, elles mettent en pratique d'autres méthodes d'évaluation telles que le relevé de mesures *in situ*, la télédétection, etc. Ces méthodes ont l'avantage d'être moins coûteuses et de nécessiter moins d'expertise (ADEME, 2017). Pourtant, les méthodes par simulation sont particulièrement adaptées à la notion de prospective de l'aménagement opérationnel et de la planification urbaine, car elles permettent de simuler différents scénarios. Les différentes recommandations doivent permettre une meilleure application des méthodes par simulation au sein des territoires avec les avantages qu'elles présentent, mais également de faire avancer la recherche en climatologie dans le contexte français.

Conclusion

La modification de l'environnement naturel par l'urbanisation est la cause principale de l'effet d'ICU dans les villes, notamment du fait de la disparition des espaces naturels, de la perturbation des échanges radiatifs, de la ventilation et de la présence des activités humaines. Exacerbée par les changements climatiques, cette problématique constitue un vrai défi pour les acteurs de l'urbanisme, car ils doivent trouver des moyens permettant de réduire la surchauffe urbaine et d'assurer la durabilité de leurs territoires.

Cet article contribue à enrichir l'état de l'art et le débat mené sur l'apport des approches par simulation numérique pour l'évaluation de l'ICU en France. Il s'adresse à la fois à la communauté scientifique, aux acteurs de l'aménagement opérationnel et de la planification urbaine, ainsi qu'aux utilisateurs finaux de produits issus de l'évaluation des ICU. Dans ce travail, les différentes techniques de simulation numérique permettant d'évaluer l'intensité des ICU ont été présentées. En fonction de l'échelle spatiale, ces différentes

techniques sont divisées en quatre catégories : 1) les modèles à l'échelle de la ville ou de la région ; 2) les modèles à l'échelle du quartier ou de la rue ; 3) les modèles à l'échelle du bâtiment ; 4) les modèles d'échelles multiples. Les caractéristiques, avantages et faiblesses de chaque modèle ont été présentés et discutés. L'utilisation des outils de simulation des ICU offre des avantages, notamment dans la simulation des solutions d'adaptation dans un contexte urbain réel, la comparaison de diverses versions et l'aide à la décision pour les acteurs qui peuvent faire des choix d'aménagement ou de planification éclairés.

Des études récentes d'évaluation de l'ICU par simulation numérique sur la période 2010-2022 ont ensuite été présentées. Leurs objectifs se regroupent dans quatre grandes applications : 1) variabilité spatio-temporelle de l'ICU ; 2) solutions d'adaptation ; 3) validation des outils de simulation ; 4) confort thermique et besoins énergétiques. Bien que la littérature scientifique soit fournie sur le potentiel de rafraîchissement de diverses solutions telles que le verdissement des zones urbaines, les matériaux urbains, etc., leurs applications au sein de la pratique des acteurs de l'urbanisme restent limitées. En effet, le recours aux méthodes de simulation présente des limites telles que la multiplicité des échelles spatiales et temporelles, la diversité des indicateurs de l'ICU, la complexité des outils de simulation et le manque d'expertise des utilisateurs. À travers cette recherche, des recommandations ont été émises pour intégrer les évaluations par simulation numérique à certaines phases de l'aménagement opérationnel et de la planification urbaine et éclairer et orienter le choix d'un type de modèle permettant de répondre aux besoins et attentes des acteurs de l'urbanisme.

Remerciements : Ce travail, réalisé dans le cadre d'une thèse de doctorat depuis 2019 au sein du laboratoire LIFAM de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Montpellier, a bénéficié du co-financement de l'ADEME, au sein du Pôle Aménagement des Villes et Territoires, et du Ministère de la Culture.

Références

Abbasabadi N., Ashayeri J., 2019. Urban energy use modeling

methods and tools: A review and an outlook. *Building and environment*, 161, 17, 106270, doi: 10.106/j.buildenv.2019.106270

ADEME, 2011. *Diagnostic de vulnérabilité d'un territoire au changement climatique – Éléments méthodologiques tirés de l'expérience internationale*. ADEME, Angers, 53 pages.

ADEME, 2017. *Diagnostic de la surchauffe urbaine – Méthodes et Applications Territoriales*. ADEME, Angers, 67 p.

Aghamolaei R., Fallahpour M., Mirzaei P., 2021. Temporal-spatial thermal comfort analysis of urban heat island with coupling of CFD and building energy simulation. *Energy and Buildings*, 251, 111317, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111317

Akbari H., Cartalis C., Kolokotsa D., Muscio A., Pisello A., Rossi F. *et al.*, 2016. Local climate change and urban heat island mitigation techniques – the state of the art. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22, 1, 1-16, doi: 10.3846/13923730.2015.1111934

Akbari H., Kolokotsa D., 2016. Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research. *Energy and Buildings*, 133, 834-842, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.09.067

Aleksandrowicz O., Vuckovic M., Kiesel K., Mahdavi A., 2017. Current trends in urban heat island mitigation research: Observations based on a comprehensive research repository. *Urban Climate*, 21, 1-26, doi.org/10.1016/j.uclim.2017.04.002

Allegrini J., Carmeliet J., 2017. Coupled CFD and building energy simulations for studying the impacts of building height topology and buoyancy on local urban microclimates. *Urban Climate*, 21, 278-305, doi: 10.1016/j.uclim.2017.07.005

Allegrini J., Carmeliet J., 2018. Simulations of local heat islands in Zürich with coupled CFD and building energy models. *Urban Climate*, 24, 340-359, doi: 10.1016/j.uclim.2017.02.003

Alonso, L., Renard, F., 2020. A Comparative Study of the Physiological and Socio-Economic Vulnerabilities to Heat Waves of the Population of the Metropolis of Lyon (France) in a Climate Change Context. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 3, 1004. Doi: 10.3390/ijerph17031004

Al-Yahyai, S., Charabi, Y., Gastli, A., 2010. Review of the use of Numerical Weather Prediction (NWP) Models for wind energy assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 9, 3192-3198. Doi: 10.1016/j.rser.2010.07.001.

Ameer, B., Krarti, M., 2022. Review of Urban Heat Island and Building Energy Modeling Approaches. *ASME Journal of Engineering for Sustainable Buildings and Cities*, 3, 1. Doi: 10.1115/1.4053677.

Arnfield, A., 2003. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23, 26 pages.

Bahi, H., Mastouri, H., Radoine, H., 2020. Review of methods for retrieving urban heat islands. *Materials Today: Proceedings*, 27, 3004-3009. Doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.272.

Benzerzour M., Masson V., Groleau D., Lemonsu A., 2011. Simulation of the urban climate variations in connection with

- the transformations of the city of Nantes since the 17th century. *Building and Environment*, 46, 8, 1545-1557, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.01.014
- Bernard J., Musy M., Marie H., 2020. Rafrâichissement des villes : Solutions existantes et pistes de recherche. ADEME, Éditions Paranthèses, 16 pages.
- Bherwani H., Singh A., Kumar R., 2020. Assessment methods of urban microclimate and its parameters: A critical review to take the research from lab to land. *Urban Climate*, 34, 100690, doi: /10.1016/j.uclim.2020.100690
- Bouyer J., Inard C., Musy M., 2011. Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context. *Energy and buildings*, 43, 1549-1559, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.02.010
- Bröde P., Blazejczyk K., Fiala D., Havenith G., Holmér I., Jendritzky G. *et al.*, 2013. The Universal Thermal Climate Index UTCI compared to ergonomics standards for assessing the thermal environment. *Industrial Health*, 51, 1, 16-24, doi: 10.2486/indhealth.2012-0098
- Brozovsky J., Radivojevic J., Simonsen A., 2022. Assessing the impact of urban microclimate on building energy demand by coupling CFD and building performance simulation. *Journal of Building Engineering*, 55, 104681, doi: 10.1016/j.job.2022.104681
- Buchin O., Hoelscher M., Meier F., Nehls T., Ziegler F., 2016. Evaluation of the health-risk reduction potential of countermeasures to urban heat islands. *Energy and Buildings*, 114, 27-37, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.06.038
- Bueno B., Norford L., Pigeon G., Britter R., 2011. Combining a detailed building energy model with a physically-based Urban Canopy Model. *Boundary-Layer Meteorology*, 140, 3, 471-489, doi: 10.1007/s10546-011-9620-6
- Bueno B., Norford L., Hidalgo J., Pigeon G. 2013. The urban weather generator. *Journal of Building Performance Simulation*, 6, 4, 269-281, doi: 10.1080/19401493.2012.718797
- Chen F., Kusaka H., Tewari M., Bao J., Hirakuchi H., 2004. *Utilizing the coupled WRF/LSM/URBAN modeling system with detailed urban classification to simulate the urban heat island phenomena over the greater Houston area*. Fifth Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society, Vancouver B.C. Canada, 23-26 août 2004, 25, 9-11.
- De Ridder K., Maiheu B., Lauwaet D., Daglis I., Keramitsoglou I., Kourtidis K. *et al.*, 2017. Urban Heat Island intensification during hot spells—The case of Paris during the Summer of 2003. *Urban Science*, 1, 1, 3, doi: 10.3390/urbansci1010003
- De Groot-Reichwein M., Van Lammeren R., Goosen H., Koekoek A., Bregt A., Vellinga P., 2015. Urban heat indicator map for climate adaptation planning. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 23, 2, 169-185, doi: 10.1007/s11027-015-9669-5
- Delage Y., Taylor P., 1970. Numerical studies of heat island circulations. *Boundary-Layer Meteorology*, 1, 2, 201-226, <https://doi.org/10.1007/BF00185740>
- Diallo-Dudek J., Lacaze B., Comby J., 2015. Land surface temperature in the urban area of Lyon metropolis: A comparative study of remote sensing data and MesoNH model simulation. *2015 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*, 1-4, doi: 10.1109/JURSE.2015.7120528
- Douay N., 2013. La planification urbaine française : théories, normes juridiques et défis pour la pratique. *L'Information géographique*, 77, 3, 45-70, doi: 10.3917/lig.773.0045
- Dubreuil V., 2022. Le changement climatique en France illustré par la classification de Köppen. *La Météorologie*, 116, 037, doi: 10.37053/lameteorologie-2022-0012
- Dudhia J., 2014. A history of mesoscale model development. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 50, 1, 121-131, <https://doi.org/10.1007/s13143-014-0031-8>
- Fallmann J., Emeis S., Suppan P., 2014. Mitigation of urban heat stress – A modelling case study for the area of Stuttgart. *Journal of the Geographical Society of Berlin*, 144, 202-216.
- Gao Z., Bresson R., Qu Y., Milliez M., de Munck C., Carissimo B., 2018. High resolution unsteady RANS simulation of wind, thermal effects and pollution dispersion for studying urban renewal scenarios in a neighborhood of Toulouse. *Urban Climate*, 23, 114-130, doi: 10.1016/j.uclim.2016.11.002
- Gardes T., Schoetter R., Hidalgo J., Long N., Marquès E., Masson V., 2020. Statistical prediction of the nocturnal urban heat island intensity based on urban morphology and geographical factors – An investigation based on numerical model results for a large ensemble of French cities. *Science of The Total Environment*, 737, 139253, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139253
- Gobakis K., Kolokotsa D., Synnefa A., Saliari M., Giannopoulou K., Santamouris M., 2011. Development of a model for urban heat island prediction using neural network techniques. *Sustainable Cities and Society*, 1, 2, 104-115, doi: 10.1016/j.scs.2011.05.001
- Grafakos S., Viero G., Reckien D., Trigg K., Viguie V., Sudmant A. *et al.*, 2020. Integration of mitigation and adaptation in urban climate change action plans in Europe: A systematic assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121, 109623, doi: 10.1016/j.rser.2019.109623
- GRIDAUH, 2018. *Écriture du PLU, Le règlement, Caractéristiques urbaine, architecturale, environnementale paysagère – Fiche 2.1.3.2.*, GRIDAUH, en ligne.
- Gros A., Bozonnet E., Inard C., 2014. Cool materials impact at district scale – Coupling building energy and microclimate models. *Sustainable Cities and Society*, 13, 254-266, doi: 10.1016/j.scs.2014.02.002.
- Hamman P., Les échelles spatiales et temporelles de la « ville durable ». *Espaces et sociétés*, 144-145, 1-2, 213-27, doi: 10.3917/esp.144.0213
- Hidalgo J., 2014. *L'intégration des enjeux climatiques dans la planification et l'aménagement urbains, un nouveau chantier de recherche interdisciplinaire*, 5^{ème} Congrès National Santé Environnement, Rennes, novembre 2014.
- Höppe P., 1999. The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*,

43, 2, 71-75, doi: 10.1007/s004840050118

Hu Z., Yu B., Chen Z., Li T., Liu M., 2012. Numerical investigation on the urban heat island in an entire city with an urban porous media model. *Atmospheric Environment*, 47, 509-518, doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.09.064

Hulley M., 2012. The urban heat island effect: Causes and potential solutions. In *Metropolitan Sustainability*, Editions F. Zeman, Woodhead Publishing, 79-98, doi: 10.1533/9780857096463.1.79

Hurlimann A., Moosavi S., Browne G., 2020. Urban planning policy must do more to integrate climate change adaptation and mitigation actions. *Land Use Policy*, 105188, doi: 10.1016/j.landusepol.2020.105188

Imran H., Shammas M., Rahman A., Jacobs S., Ng A., Muthukumaran S., 2021. Causes, modeling and mitigation of Urban Heat Island: A review. *Earth Sciences*, 6, 10, 244-264, doi: 10.11648/j.earth.20211006.11

IPCC, 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Pörtner, H., Roberts, D., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., et al. (eds.). Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, RU et New York, USA, 3056 pages, doi:10.1017/9781009325844

Janicke B., Milosevic D., Manavvi S., 2021. Review of user-friendly models to improve the urban micro-climate. *Atmosphere*, 12, 1291, doi: 10.3390/atmos12101294

Jin M., 2012. Developing an index to measure Urban Heat Island effect using satellite land skin temperature and land cover observations. *Journal of Climate*, 25, 18, 6193-6201, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00509.1

Kardinal J., Ignatius M., Hien W., Akbari H., 2019. Editorial: Urban heat island (UHI) and its mitigation through urban planning, design, and landscaping. *Architectural science review*, 1, 62, 2, doi: 10.1080/00038628.2019.1548095

Kastendeuch P., Najjar G., Lacarrere P., Colin J., 2010. Modélisation de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg. *Climatologie*, 7, 21-37, doi: 10.4267/climatologie.361

Kastendeuch P., Najjar G., 2015. Une simulation des interactions ville-atmosphère à différentes échelles: Application sur Strasbourg. *Climatologie*, 12, 44-64, doi: 10.4267/climatologie.1118.

Kohler M., Tannier C., Blond N., Aguejdad R., Clappier A., 2017. Impacts of several urban-sprawl countermeasures on building (space heating) energy demands and urban heat island intensities. A case study. *Urban climate*, 19, 92-121, doi: 10.1016/j.uclim.2016.12.006

Kwak Y., Park C., Deal B., 2020. Discerning the success of sustainable planning: A comparative analysis of urban heat island dynamics in Korean new towns. *Sustainable Cities and Society*, 61, 102341, doi: 10.1016/j.scs.2020.102341

Kwok Y., Ng E., 2021. Trends, topics, and lessons learnt from real case studies using mesoscale atmospheric models for urban climate applications in 2000-2019. *Urban Climate*, 36, 100785, doi : 10.1016/j.uclim.2021.100785

Lambert M., Demazeux C., Gallafrio M. 2016. *Climat urbain, énergie et droit de l'urbanisme – PLU(i). Rapport de présentation et PADD*. Hal-01354282.

Lambert M., Hidalgo J., Masson V., 2019. *Urbanisme & (micro-)climat : Outils et recommandation générales pour les documents de planification urbaine issus du projet MApUCE*. Guide méthodologique, ANR France, 48 pages.

Le Mentec S., 2022. *Impact de la végétalisation sur l'îlot de chaleur urbain et la pollution d'ozone : Quantification par une approche de modélisation à l'échelle d'un quartier*. Thèse de l'Université Paris-Saclay, AgroParisTech, tel-03807318.

Lee D., Pietrzyk P., Donkers S., Liem V., Van Oostveen J., Montazeri S. et al., 2013. *Modeling and observation of heat losses from buildings: The impact of geometric detail on 3D heat flux modeling*. Towards Horizon 2020: Earth Observation and Social Perspectives, 33rd AERSel Symposium, Matera Italie, 3-6 juin 2013, 20.

Lee Y., Kim J., Yun G., 2016. The neural network predictive model for heat island intensity in Seoul. *Energy and Buildings*, 110, 353-361, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.11.013

Lemonsu A., Vigié V., Daniel M., Masson V., 2015. Vulnerability to heat waves: Impact of urban expansion scenarios on urban heat island and heat stress in Paris (France). *Urban Climate*, 14, 586-605, doi: 10.1016/j.uclim.2015.10.007

Lin P., Siu Yu Lau S., Qin H., Gou Z., 2017. Effects of urban planning indicators on urban heat island: A case study of pocket parks in high-rise high-density environment. *Landscape and urban planning*, 168, 48-60, doi: 10.1016/j.landurbplan.2017.09.024

Marando F., Heris M. P., Zulian G., Udías A., Mentaschi L., Chrysoulakis N. et al., 2022. Urban heat island mitigation by green infrastructure in European Functional Urban Areas. *Sustainable Cities and Society*, 77, 103564, doi: 10.1016/j.scs.2021.103564.

Martins T., Adolphe L., Bonhomme M., Bonneaud F., Faraut S., Ginestet S. et al., 2016. Impact of Urban Cool Island measures on outdoor climate and pedestrian comfort: Simulations for a new district of Toulouse, France. *Sustainable Cities and Society*, 26, 9-26, doi: 10.1016/j.scs.2016.05.003

Masson V., 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, 94, 3, 357-397, doi: 10.1023/A:1002463829265

Masson V., Gomes L., Pigeon G., Liousse C., Pont V., Lagouarde J. et al., 2008. The Canopy and Aerosol Particles Interactions in Toulouse Urban Layer (CAPITOU) experiment. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102, 3, 135, doi: 10.1007/s00703-008-0289-4

Masson V., Marchadier C., Adolphe L., Aguejdad R., Avner P., Bonhomme M. et al., 2014. Adapting cities to climate change: A systemic modelling approach. *Urban climate*, 10, 407-409, doi: 10.1016/j.uclim.2014.03.004

Mauree D., Naboni E., Coccolo S., Perera A., Nik V., Scartezzini J., 2019. A review of assessment methods for the urban environment and its energy sustainability to guarantee climate adaptation of future cities. *Renewable and Sustainable*

- Energy Reviews*, 112, 733-746, doi: 10.1016/j.rser.2019.06.005
- Memon R., Leung D., Liu C., 2009. An investigation of urban heat island intensity (UHII) as an indicator of urban heating. *Atmospheric Research*, 94, 3, 491-500, doi: 10.1016/j.atmosres.2009.07.006
- Ming T., Lian S., Wu Y., Shi T., Peng C., Fang Y. *et al.*, 2021. Numerical investigation on the Urban Heat Island effect by using a porous media model. *Energies*, 14, 15, 4681, doi: 10.3390/en14154681
- Ministère de la cohésion des territoires, 2017. *PLUI - Un outil pour l'avenir des territoires*. Guide, Ministère de la cohésion des territoires, 4 pages.
- Mirzaei P., Haghighat F., 2010. Approaches to study Urban Heat Island – Abilities and limitations. *Building and Environment*, 45, 10, 2192-2201, doi: 10.1016/j.buildenv.2010.04.001
- Mirzaei P., 2015. Recent challenges in modeling of urban heat island. *Sustainable Cities and Society*, 19, 200-206, doi:10.1016/j.scs.2015.04.001
- Morille B., Musy M., Malys L., 2016. Preliminary study of the impact of urban greenery types on energy consumption of building at a district scale: Academic study on a canyon street in Nantes (France) weather conditions. *Energy and Buildings*, 114, 275-282, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.06.030
- Morille B., Musy M., 2017. Comparison of the impact of three climate adaptation strategies on summer thermal comfort – Cases study in Lyon, France. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 619-626, doi: 10.1016/j.proenv.2017.03.141
- Musy M., Azam M., Guernouti S., Morille B., Rodler A., 2021. The SOLENE-Microclimat Model: Potentiality for comfort and energy studies. *Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies*. Edition Palme & A. Salvati, Springer International Publishing, 265-291, doi: 10.1007/978-3-030-65421-4_13
- Neij L., Heiskanen E., 2021. Municipal climate mitigation policy and policy learning – A review. *Journal of Cleaner Production*, 317, 128348, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128348.
- Ng E., Ren C., 2015. *The Urban Climatic Map*. Routledge, Taylor & Francis Group, 543 pages, doi: 10.4324/9781315717616
- Nieuwenhuijsen M., 2021. New urban models for more sustainable, liveable and healthier cities post covid19; reducing air pollution, noise and heat island effects and increasing green space and physical activity. *Environment International*, 157, 106850, doi: 10.1016/j.envint.2021.106850
- Nogueira M., Hurduc A., Ermida S., Lima D., Soares P., Johannsen F. *et al.*, 2022. Assessment of the Paris urban heat island in ERA5 and offline SURFEX-TEB (v8.1) simulations using the METEOSAT land surface temperature product. *Geoscientific Model Development*, 15, 14, 5949-5965, doi: 10.5194/gmd-15-5949-2022
- Oke T., 1976. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere*, 14, 4, 268-277, doi: 10.1080/00046973.1976.9648422
- Oke T., 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, 455, 1-24, doi: 10.1002/qj.49710845502
- Page M., McKenzie J., Bossuyt P., Boutron I., Hoffmann T., Mulrow C. *et al.*, 2021. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, 71, doi: 10.1136/bmj.n71
- Parsaee M., Joybari M., Mirzaei P., Haghighat F., 2019. Urban heat island, urban climate maps and urban development policies and actions plans. *Environmental Technology & Innovation*, 14, 16, doi: 10.1016/j.eti.2019.100341
- Ramora S., Broomberg K., Molinier J., 2013. *Le schéma de cohérence territoriale SCOT : un projet stratégique partagé pour l'aménagement durable d'un territoire*. Guide pratique, Ministère de l'égalité des territoires et du logement, 152 pages.
- Reder A., Rianna G., Mercogliano P., Castellari S., 2018. Parametric investigation of Urban Heat Island dynamics through TEB 1D model for a case study: Assessment of adaptation measures. *Sustainable Cities and Society*, 39, 662-673, doi: 10.1016/j.scs.2018.03.023
- Ren C., Lau K., Yiu K., Ng E., 2013. The application of urban climatic mapping to the urban planning of high-density cities: The case of Kaohsiung, Taiwan. *Cities*, 31, 1-16, doi: 10.1016/j.cities.2012.12.005
- Revi A., Satterthwaite D., Aragon-Durand F., Corfee-Morlot J., Kiunsi R., Pelling M. *et al.*, 2014. Urban areas. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Field, C., Barros, V., Dokken, D., Mach, K., Mastrandrea, M., Bilir, T., *et al.* (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, RU et New-York, US, 535-612.
- Salamanca F., Krpo A., Martilli A., Clappier A., 2009. A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations – Part I. formulation, verification, and sensitivity analysis of the model. *Theoretical and Applied Climatology*, 99, 3, 331, doi: 10.1007/s00704-009-0142-9
- Santamouris M., 2016. Innovating to zero the building sector in Europe: Minimising the energy consumption, eradication of the energy poverty and mitigating the local climate change. *Solar Energy*, 128, 61-94, doi: 10.1016/j.solener.2016.01.021
- Santamouris M., 2020. Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. *Energy and Buildings*, 207, 109482, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109482
- Schoetter R., Hidalgo J., Jouglar R., Masson V., Rega M., Pergaud J., 2020. A statistical-dynamical downscaling for the urban heat island and building energy consumption – Analysis of Its uncertainties. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 59, 5, 859, doi: 10.1175/JAMC-D-19-0182.1
- Schwarz N., Lautenbach S., Seppelt R., 2011. Exploring indicators for quantifying surface urban heat islands of European cities with MODIS land surface temperatures. *Remote Sensing of Environment*, 115, 12, 3175-3186, doi: 10.1016/j.rse.2011.07.003
- Stensen B., Marelle L., Hodnebrog Ø., Myhre G., 2022.

Future urban heat island influence on precipitation. *Climate Dynamics*, 58, 3393, doi: 10.1007/s00382-021-06105-z

Stewart I., 2011. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology*, 31, 2, 200-217, doi: 10.1002/joc.2141

Struillou J., 2012. L'intégration des préoccupations environnementales dans les documents de planification urbaine. L'apport de la loi Grenelle II. *Revue française de droit administratif*, 5, 872, Hal-02243241

Tian L., Li Y., Lu J., Wang J., 2021. Review on Urban Heat Island in China: Methods, its Impact on buildings energy demand and mitigation strategies. *Sustainability*, 13, 2, 762, doi: 10.3390/su13020762

Toparlar Y., Blocken B., Vos P., Van Heijst G., Janssen W., Van Hooff T. *et al.*, 2015. CFD simulation and validation of urban microclimate: A case study for Bergpolder Zuid, Rotterdam. *Building and Environment*, 83, 79-90, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.08.004

Toparlar Y., Blocken B., Maiheu B., Van Heijst G., 2017. A review of the CFD analysis of urban microclimate. *Renewable and sustainable energy reviews*, 80, 1613-1640, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.248

Tsoka S., Tsikaloudaki K., Theodosiou T., Bikas D., 2020. Urban warming and cities' microclimates: Investigation methods and mitigation strategies – A review. *Energies*, 13, 25, 1414, doi : 10.3390/en13061414

Tzavali A., Paravantis J., Mihalakakou G., Fotiadi A., Stigka E., 2015. Urban heat island : A literature review. *Fresenius Environmental Bulletin*, 24, 12b, 21.

Wang H., Peng C., Li W., Ding C., Ming T., Zhou N., 2021. Porous media : A faster numerical simulation method applicable to real urban communities. *Urban Climate*, 38, 100865, doi: 10.1016/j.uclim.2021.100865

Wang X., Li Y., 2016. Predicting urban heat island circulation using CFD. *Building and Environment*, 99, 82-97, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.01.020

Wouters H., De Ridder K., Demuzere M., Lauwaet D., Van Lipzig N., 2013. The diurnal evolution of the urban heat island of Paris: A model-based case study during Summer 2006. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 17, 8525-8541, doi: 10.5194/acp-13-8525-2013

2ei Véolia, 2022. *Ilots de chaleur : quand l'eau rafraîchit la ville*. Planet Veolia, <https://www.planet.veolia.com/fr/ilots-de-chaleur-quand-l-eau-rafraichit-la-ville>.

Citation de l'article : Técher M., Ait Haddou H., Aguejdad R., 2023. Îlot de chaleur urbain et application territoriale en France : revue des méthodes de simulation numérique. *Climatologie*, 20, 6.