



HAL
open science

Réflexions sur la définition d'une démarche de validation expérimentale des modèles thermo-hygro-aérauliques urbains couplés intérieur/extérieur pour l'étude du confort et de la santé des personnes en période de forte chaleur

Lucie Merlier, Auline Rodler, Teddy Gresse, Julie Soriano, Célia Sondaz, Flavia Barone, Damien David, Frédéric Kuznik, Bassam Moujalled, Marjorie Musy, et al.

► To cite this version:

Lucie Merlier, Auline Rodler, Teddy Gresse, Julie Soriano, Célia Sondaz, et al.. Réflexions sur la définition d'une démarche de validation expérimentale des modèles thermo-hygro-aérauliques urbains couplés intérieur/extérieur pour l'étude du confort et de la santé des personnes en période de forte chaleur. IBPSA France, May 2024, Oléron (FR), France. pp.439-446. hal-04587660

HAL Id: hal-04587660

<https://hal.science/hal-04587660>

Submitted on 24 May 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NoDerivatives 4.0 International License

Réflexions sur la définition d'une démarche de validation expérimentale des modèles thermo-hygro-aérauliques urbains couplés intérieur/extérieur pour l'étude du confort et de la santé des personnes en période de forte chaleur

Lucie Merlier*¹, Auline Rodler², Teddy Gresse¹, Julie Soriano¹, Célia Sondaz³, Flavia Barone,⁴ Damien David¹, Frédéric Kuznik⁴, Bassam Moujalled², Marjorie Musy², Laure Roupioz⁵, Martin Hendel⁶, Emmanuel Bozonnet⁷, Marika Vellei^{8,9}

¹ Université Lyon 1, CNRS, INSA de Lyon, CETHIL UMR5008, 9, rue de la Physique 69621 Villeurbanne

² CEREMA, équipe BPE, rue Viviani 44200 Nantes cedex

³ CNRS, INSA de Lyon, Université Lyon 1, CETHIL UMR5008, 9, rue de la Physique 69621 Villeurbanne

⁴ INSA de Lyon, CNRS, Université Lyon 1, CETHIL UMR5008, 9, rue de la Physique 69621 Villeurbanne

⁵ ONERA, Université de Toulouse, 2 Av. Edouard Belin BP74025, 31055, Toulouse Cedex 4, France

⁶ Université Paris Cité, LIED UMR8236, 10, rue Alice Domon & Léonie Duquet 75013 Paris

⁷ La Rochelle Université, CNRS, LaSIE UMR7356, av. Michel Crépeau, F-17000 La Rochelle, France

⁸ Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295, F-33400, Talence, France

⁹ Arts et Metiers Institute of Technology, CNRS, Bordeaux INP, Hesam Université, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France

[*lucie.merlier@insa-lyon.fr](mailto:lucie.merlier@insa-lyon.fr)

RESUME

Dans un contexte d'intensification des fortes chaleurs, en particulier dans les villes, la modélisation et la simulation numériques à l'échelle du bâtiment, de l'îlot et de la rue permettent d'étudier et de soutenir le développement de stratégies passives de rafraîchissement dans le but de préserver le confort thermique et la santé des personnes. Cette contribution analyse les besoins d'un travail de validation des modèles couplés intérieur/extérieur et discute différents retours d'expérience complémentaires issus de campagnes expérimentales en intérieur ou en extérieur, du point de vue de la validation des modèles numériques. L'objectif est de poser les bases d'un travail collectif visant à développer une campagne expérimentale in situ englobant les environnements intérieurs et extérieurs des bâtiments urbains, ainsi que le suivi des occupants, adapté à la validation des modèles couplés intérieur/extérieur. La démarche doit également garantir que les solutions de rafraîchissement, qu'elles concernent l'aménagement ou les bâtiments, sont correctement représentées dans les modèles.

MOTS-CLÉS : *Surchauffe urbaine, modélisation couplée intérieure/ extérieure, validation.*

ABSTRACT.

In a context of increasing extreme heat events, and particularly in cities, numerical modeling and simulation at the building block and street scales is a powerful means for studying and enabling the development of passive cooling strategies with the aim to preserve people's thermal comfort and health. This contribution analyses the needs of a validation work for coupled indoor/outdoor models, and discusses various feedbacks from indoor or outdoor experimental campaigns with the view of numerical model validation. The aim is to lay the foundations for a collective work aimed at developing a field experimental campaign encompassing building indoor and outdoor environments, as well as occupant monitoring, suitable for validating coupled indoor/outdoor urban models. This experimentation must also ensure that cooling solutions, whether urban or building-based, are properly represented in the models.

KEYWORDS : *urban overheating, indoor/outdoor coupled modeling, validation.*

1. INTRODUCTION

En ville, les surchauffes urbaines exacerbent généralement les effets délétères des vagues de chaleur sur le confort et la santé des personnes (Santamouris 2020; Santé Publique France 2022). Si les personnes passent aujourd'hui la grande majorité de leur temps à l'intérieur et que les réglementations thermiques successives ont conduit principalement à isoler les environnements intérieurs de l'extérieur, ces périodes de surchauffes re-questionnent aujourd'hui la conception, la gestion et les pratiques des espaces extérieurs et intérieurs. Les enjeux environnementaux et énergétiques contemporains amènent par ailleurs à repenser les relations intérieur/extérieur et à rechercher des stratégies de rafraîchissement passif tirant le meilleur parti des deux ambiances.

Différentes solutions de rafraîchissement urbain, grises (morphologie urbaine, revêtements réfléchissants...), vertes (végétalisation, désimperméabilisation...) et douces (adaptation comportementales) sont répertoriées dans la littérature (ADEME 2021). Les solutions passives de rafraîchissement à l'échelle des logements sont également assez bien connues (ventilation naturelle, occultation solaire, isolation thermique...). Cependant, la compréhension des effets sur le confort et la santé des personnes de ces solutions considérées dans leur contexte socio-spatial et leurs combinaisons possibles demeure aujourd'hui un enjeu de recherche, notamment en raison du caractère multiphysique, multiéchelles et multifactoriel des phénomènes à considérer. Dans ce contexte, la simulation numérique est un outil d'étude puissant, permettant de représenter une multitude de phénomènes physiques dans une infinité de scénarios et sur différentes échelles de temps, pour mieux appréhender et étudier les effets potentiels de stratégies de rafraîchissement. Différents types de modèles (Fig. 1) existent aujourd'hui, et peuvent être mobilisés en ce sens.

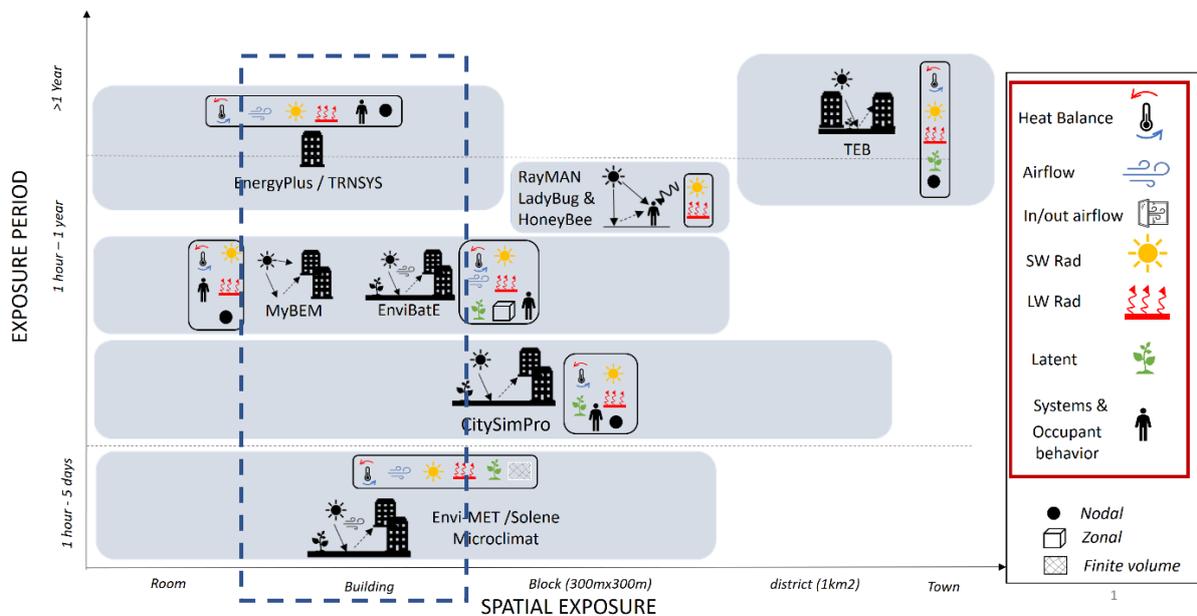


Figure 1: Exemples de modèles aujourd'hui disponibles dans la littérature (Barone 2024). Le cadre pointillé indique les modèles plus particulièrement visés dans cette contribution.

La complexité des phénomènes physiques déterminant les ambiances urbaines nécessite cependant de porter une attention particulière à la fiabilité des modélisations effectuées. Comme le soulignent les méthodologies proposées dans les BESTEST (Judkoff et Neymark 1995), Urban plumber (Lipson et al. 2024) ou, plus récemment, le projet DIAMS (Musy et al. 2023), la qualification des modèles de bâtiment ou de climat urbain est un aspect particulièrement critique d'une telle approche. La validation des modèles par comparaison à des données expérimentales en configuration réelle est généralement l'objectif final d'une telle démarche. Elle est cependant particulièrement complexe, en particulier lorsque les environnements intérieurs/extérieurs et leurs interactions sont considérés de façon équivalente. En effet, la plupart des données de mesure aujourd'hui disponibles se concentrent sur les environnements intérieurs ou extérieurs, la validation des modèles microclimatiques reste un enjeu pour la recherche, et le couplage entre les environnements rend le problème encore plus complexe. La suite de cette contribution propose ainsi 1/ de synthétiser les besoins spécifiques d'un tel travail de validation, 2/ de discuter différents retours d'expérience complémentaires issus de campagnes expérimentales en intérieur ou en extérieur, du point de vue de la faisabilité et de la validation des modèles numériques et 3/ de formaliser des points de vigilance en vue de développer une campagne expérimentale englobant les environnements intérieurs et extérieurs des bâtiments ainsi que le suivi des occupants, adapté à la validation des modèles couplés intérieur/extérieur capables d'évaluer les effets de solutions de rafraîchissement¹ sur le confort et la santé des personnes.

2. SPECIFICATION DES BESOINS

Une expérimentation in situ visant à valider une approche de modélisation telle que définie plus haut doit permettre l'accès à des données observables et représentatives du type de problème à étudier (environnements urbains en période forte chaleur). Ces données doivent permettre la quantification des différents transferts de chaleur dans les ambiances et à l'interface entre le bâtiment et son environnement: transferts radiatifs CLO et GLO, convection/advection, conduction/stockage de chaleur et évapo(transpi)ration. Ces transferts déterminent les ambiances thermo-hygro-aérauliques et le stress thermique des personnes, qui est le résultat final d'intérêt et qu'il convient donc d'évaluer pertinemment. Les protocoles expérimentaux doivent donc être adaptés aux multiples dynamiques temporelles d'intérêt : de l'ordre de la minute (temps de réaction de la température de peau) à plusieurs jours (effets cumulatifs d'une vague de chaleur sur les capacités thermorégulatrices et la tolérance de l'organisme), et à l'étendue des échelles spatiales concernées : du décimètre (segment humain) à la centaine de mètres (influence directe sur l'exposition des personnes). Notons cependant que les modèles existant aujourd'hui ne permettent souvent pas d'accéder aux informations les plus précises, pour lesquelles des

¹ On considèrera ici comme solution : la ventilation naturelle, la protection solaire, la végétalisation, et l'adaptation des revêtements de façade.

approches 3D et de type CFD LES doivent être mobilisées (Gresse 2023), et qu'il est compliqué d'avoir accès à des données en champs dans des campagnes expérimentales in situ. Le positionnement des mesures, souvent ponctuelles, doit donc être stratégique.

La cohérence de la comparaison entre études expérimentales et numériques nécessite de définir précisément (expérimentalement et numériquement) de nombreux paramètres et conditions aux limites. En particulier, la morphologie urbaine et bâtie, incluant les cloisonnements et ouvertures des logements, la constitution des infrastructures urbaines et structures des bâtiments, les propriétés des matériaux, des surfaces minérales et des végétaux ainsi que la modification de la configuration d'étude par les actions humaines (activation de systèmes passifs – notamment à l'interface intérieur / extérieur- ou utilisation de systèmes actifs émetteur de chaleur) déterminent le comportement du système. Ce comportement doit aussi être défini par une loi de comportement ou de contrôle des systèmes, et il dépend des conditions de températures, flux radiatifs, écoulements d'air et humidité aux limites de la zone d'étude, qui doivent donc être localement connues. Notons cependant que la connaissance complète de l'ensemble de ces données de paramétrisation est impossible dans les faits.

3. RETOURS D'EXPERIENCES

Cette contribution initiant un travail collectif à l'échelle nationale, une sélection de campagnes expérimentales réalisées in situ et sur une configuration idéalisée par les auteurs est discutée ici. Les tableaux 1 (principalement extérieur) et 2 (principalement intérieur) synthétisent les principales caractéristiques de celles-ci ainsi que certains de leurs avantages et limites identifiés vis-à-vis de l'objectif de validation de modèles intérieur/extérieur par comparaison avec des données réelles urbaines. Les tableaux 1 et 2 ne visent pas l'exhaustivité mais à illustrer, en toute transparence, l'étendue des possibilités offertes par les différents types de campagnes autant que la diversité des points de vigilance méthodologiques identifiés lors de leur réalisation.

Les résultats synthétisés mettent en évidence la diversité des approches permettant d'accéder à certaines données critiques pour la paramétrisation des modèles ainsi que sur les variables d'ambiance d'intérêt. On peut cependant remarquer sur ces exemples que les campagnes reposent pour la plupart sur des mesures ponctuelles, et qu'elles se sont principalement intéressées à l'extérieur ou à l'intérieur. Dans ce dernier cas, les conditions aux limites des bâtiments ont quand même été mesurées, mais à l'aide d'un nombre limité de mesures, ne permettant pas une description complète des sollicitations du bâtiment.

4. VERS UNE DEMARCHE DE VALIDATION EXPERIMENTALE ADAPTEE

Les sections précédentes ont synthétisé différents besoins, enjeux et contraintes liés à la mise en œuvre d'une démarche de validation des modèles numériques intérieur/extérieur capables d'étudier l'efficacité de solutions de rafraîchissement sur le confort et la santé des personnes par comparaison avec des données expérimentales de terrain. Les prérequis d'une telle approche sont dans l'idéal très nombreux.

Table 1: Avantages et limites de campagnes expérimentales portant principalement sur l'extérieur

5 rues canyon simplifiées à échelle réduite – Climabat (Djedjig et al.2015; Doya, et al.2012) – pour l'étude des effets de revêtements de façades de type 'cool paint' et enveloppes végétalisées sur le comportement transitoire des bâtiments (cycles jour/nuit). Mesures de températures de surface et d'air dans le plan médian des canyons et en intérieur + mesures de référence avec station météorologique sur des saisons complètes			
+	<ul style="list-style-type: none"> Configurations différentes étudiables simultanément dans les mêmes conditions (rues similaires mais adaptables) Très bonne connaissance de la configuration 	/!\	<ul style="list-style-type: none"> Configuration idéale sans occupant
Réseau de 30 stations météorologiques à Paris –réseau LUTECE (Parison, Hendel, et Royon 2020) - pour l'évaluation in situ du stress thermique de piéton dans le cadre de la mise en œuvre de techniques de rafraîchissement sur l'espace public. Mesures de température et humidité de l'air et température globe noir à 1.5m, de température de l'air, rayonnement solaire et vitesse/direction du vent à 4m, et température et flux stocké en profondeur dans les revêtements.			
+	<ul style="list-style-type: none"> Analyse possible par paire de stations, via une méthode d'analyse statistique Before-After-Control-Impact permettant d'évaluer les effets propres des solutions 	/!\	<ul style="list-style-type: none"> Mesures extérieures avec un unique mat par site
Campagne de mesures de températures de surfaces sur les façades et les espaces inter-bâtiments du campus de l'ISAE à Toulouse pour l'étude de leur variabilité spatiale – CAMCATT-AI4GEO (Roupioz et al. 2023)- pendant 15 jours en juin 2021. Mesures thermiques infrarouges aéroportées et par caméra et par 50 ibuttons.			
+	<ul style="list-style-type: none"> Données ponctuelles et de champ disponibles, y compris à l'interface bâtiment / environnement 	/!\	<ul style="list-style-type: none"> Fiabilité des ibuttons altérée par les abris ou les particularités de leur lieu d'implantation Profil de vitesse de vent en condition limite

Il s'agirait en effet de disposer d'un jeu de données complet : identification des propriétés thermiques-radiatives-climatiques nécessaires au paramétrage du modèle, mesure de l'action de l'occupant, mesure via une métrologie exhaustive de l'ensemble des flux et variables de sorties des modèles. Cette ambition est dans les faits souvent limitée par différentes contraintes pratiques. Il est donc utile de mettre en œuvre des démarches de qualification progressives et incrémentales telles que proposées dans le cadre du projet DIAMS (Musy et al. 2023), mobilisant des configurations simplifiées (comme Climabat) et des environnements réels représentatifs. En effet, pour la validation de modèles du point de vue physique, les expérimentations de laboratoire en conditions suffisamment maîtrisées sont bien appropriées car elles permettent d'accéder finement aux données observables en limitant les incertitudes. L'étude des ambiances pour une application au confort et à la santé nécessite cependant des expérimentations in situ, associant de nombreuses mesures physiques et des enquêtes, ainsi qu'une bonne connaissance de la configuration étudiée, d'autant plus si l'on souhaite évaluer des stratégies de rafraîchissement. Ceci est un enjeu majeur, notamment en ce qui concerne la connaissance des divers aménagements et matériaux (sol urbain, réseaux, disponibilité en eau en présence de végétal...) à l'extérieur, et des usages à l'intérieur.

Table 2: Avantages et limites de campagnes expérimentales portant principalement sur l'intérieur

Campagne de mesures dans différents logements et villes françaises – projet CREATIV (Hostein et al. 2022) - pour l'étude du confort thermique en été. Mesures des variables hygrothermiques (toutes les pièces) et extérieur (1/site) et de l'état des fenêtres, portes intérieures, brasseurs, et climatiseurs. Réalisation de questionnaires sur les ménages, leur confort et habitudes durant l'été 2022.			
+	<ul style="list-style-type: none"> Mesures à plusieurs endroits des logements et à l'extérieur Comportement d'ouverture des fenêtres en période chaude selon des paramètres contextuels et des environnements intérieurs et extérieurs 	/!\	<ul style="list-style-type: none"> Difficulté à obtenir des retours suffisants sur les questionnaires si structure inadaptée aux répondants et sur une trop longue durée
Campagne de mesures sur 4 logements à Lyon durant l'été 2020 (Toesca et al. 2022). Mesure de la température extérieure (1 capteur/logement), des température et humidité intérieures (1/pièce), ouverture des portes, fenêtres et volet du logement, complétée par les données des stations synoptiques de MétéoFrance.			
+	<ul style="list-style-type: none"> Mesures à différents endroits des logements et continuum rural/urbain/intérieur Effet de la gestion des portes sur le comportement des appartements traversant 	/!\	<ul style="list-style-type: none"> Manque de précision sur les degrés d'ouverture des ouvrants et volets, et sur l'occupation des logements Manque de représentativité « urbaine » des sollicitations des logements situés en étages élevés
Campagne de mesures sur 6 logements en milieu urbain lors des étés 2022 et 2023 – projet METEORS- pour évaluer l'ambiance intérieure et le comportement individuel. Mesures de températures, d'humidité et CO2 (1/pièce de vie) et de température extérieure sur les balcons, ouverture des fenêtres et volets. Réalisation d'entretiens, carnets de bord et suivi téléphonique intensif sur certaines journées			
+	<ul style="list-style-type: none"> Apport significatif du suivi téléphonique et des entretiens pour la paramétrisation des modèles Information sur l'occupation grâce à la concentration en CO2 modulée par la connaissance de l'ouverture des fenêtres 	/!\	<ul style="list-style-type: none"> Réduction de la qualité des mesures du fait de leur choix de localisation minimisant l'impact des capteurs sur le quotidien des habitants déjà fortement sollicités lors des campagnes avec les enquêtes

Concrètement, pour permettre la réalisation d'une validation pertinente par rapport à des données expérimentales in situ, les retours d'expérience montrent qu'il est nécessaire de porter une attention particulière /de développer des approches adaptées pour :

- réaliser un suivi précis du comportement des usagers et plus précisément de leurs comportements et actions sur le bâtiment pour l'étude des environnements intérieurs.
- choisir et positionner stratégiquement les différents types de capteurs en fonction des objectifs de qualité des mesures et des contraintes d'usages en site utilisé,
- concevoir des expériences ou recourir à des traitements des données permettant d'évaluer l'effet propre de solutions en conditions non maîtrisées, c'est-à-dire en s'affranchissant des différences induites par la variabilité des différents autres facteurs du problème (météo, ...),
- bien choisir les sites d'étude afin de garantir leur représentativité « urbaine », notamment au regard des comportements microclimatiques particuliers observés en milieu urbain dense et

impactant les sollicitation des objets étudiés (voir aussi (Liu et al. 2021)), et par extension de bien décrire les conditions aux limites des configurations étudiées.

De tels retours d'expérience, concrets et pratiques, sont précieux pour la démarche initiée dans cette contribution. Les éléments de réflexion présentés aux sections précédentes doivent cependant être complétés par des considérations sur les résolutions des mesures, entre autres, qui n'ont pas été abordées ici, compte tenu de leur dépendance au type de modèle à valider. Par ailleurs, d'autres retours d'expérience de validation de modèles, non détaillés dans cette contribution, soulignent également l'intérêt de disposer :

- de mesures des différents types de flux de chaleur, notamment aux surfaces des bâtiments,
- de mesures précises permettant l'estimation des débits de ventilation naturelle en configuration de convection forcée ou naturelle,
- de données sur les apports de chaleur anthropiques,
- et d'une grande variété d'informations relatives à la végétation (irrigation, espèces, indices foliaires...), dont l'étude du fonctionnement et la modélisation en milieu urbain contraint demeurent un sujet de recherche ouvert.

CONCLUSION

Cette contribution a discuté des besoins relatifs à la validation de modèles couplés intérieur/extérieur pour l'étude des effets des solutions de rafraîchissement sur le confort et la santé des personnes en milieu urbain. Les enjeux liés aux spécificités des différents modèles et aux contraintes de mise en œuvre pratiques lors de la réalisation de campagnes in situ ont été également abordées. Pour aller au bout de la démarche, la connaissance des facteurs et mécanismes qui déterminent la mise en œuvre ou non de stratégies de rafraîchissement par les personnes seraient également nécessaire, ce qui requiert de mettre en œuvre des études interdisciplinaires, en collaborant notamment avec les sciences humaines et sociales. Par exemple, si la ventilation naturelle peut limiter fortement les surchauffes internes dans des conditions météorologiques tempérées, elle n'est pas nécessairement mise en œuvre par les ménages, même lorsque les conditions intérieures sont thermiquement inconfortables (Vellei et al. 2017). Plus largement, le comportement des personnes, en termes d'action sur leur environnement ou de déplacement, dépend d'une multitude de facteurs multi-domaines et est souvent décisif sur leur exposition à la chaleur. Sa compréhension et sa modélisation en contexte de surchauffe constitue donc une perspective très importante.

5. BIBLIOGRAPHIE

- ADEME. 2021. « Rafraîchir les villes Des solutions variées ». 011441. Ils l'ont fait.
- Barone, Flavia. 2024. « Numerical assessment of heat stress in dwellings and immediate surroundings: development of a Microclimate Zonal Model coupled to Building Models ». These de doctorat, Lyon, INSA.

- Djedjig, Rabah, Emmanuel Bozonnet, et Rafik Belarbi. 2015. « Experimental study of the urban microclimate mitigation potential of green roofs and green walls in street canyons ». *International Journal of Low-Carbon Technologies* 10 (1): 34-44. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt019>.
- Doya, Maxime, Emmanuel Bozonnet, et Francis Allard. 2012. « Experimental measurement of cool facades' performance in a dense urban environment ». *Energy and Buildings, Cool Roofs, Cool Pavements, Cool Cities, and Cool World*, 55 (décembre): 42-50. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.001>.
- Gresse, Teddy. 2023. « Développement et validation d'une modélisation thermo-aéraulique tridimensionnelle et dynamique du bâtiment pour l'étude des environnements thermiques intérieurs complexes ». These de doctorat, Lyon, INSA. <https://www.theses.fr/2023ISAL0018>.
- Hostein, M., B Moujalled, M Musy, et M El Mankibi. 2022. « Taking into account occupant behavior during heatwaves in building simulation ». In *CAT 2022*.
- Judkoff, R., et J. Neymark. 1995. « International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method ». NREL/TP-472-6231. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States). <https://doi.org/10.2172/90674>.
- Lipson, Mathew J., Sue Grimmond, Martin Best, Gab Abramowitz, Andrew Coutts, Nigel Tapper, Jong-Jin Baik, et al. 2024. « Evaluation of 30 Urban Land Surface Models in the Urban-PLUMBER Project: Phase 1 Results ». *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 150 (758): 126-69. <https://doi.org/10.1002/qj.4589>.
- Liu, Zhixin, Wenwen Cheng, C. Y. Jim, Tobi Eniolu Morakinyo, Yuan Shi, et Edward Ng. 2021. « Heat mitigation benefits of urban green and blue infrastructures: A systematic review of modeling techniques, validation and scenario simulation in ENVI-met V4 ». *Building and Environment* 200 (août): 107939. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107939>.
- Musy, Marjorie, Lucie Merlier, Auline Rodler, Frédéric Andre, et Ahmad Raessi. 2023. « Validation of urban microclimate models: toward a methodology ». août. in ICUC, Sydney, Australia
- Parison, Sophie, Martin Hendel, et Laurent Royon. 2020. « A statistical method for quantifying the field effects of urban heat island mitigation techniques ». *Urban Climate* 33 (septembre): 100651. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100651>.
- Roupioz, L., X. Briottet, K. Adeline, A. Al Bitar, D. Barbon-Dubosc, R. Barda-Chatain, P. Barillot, et al. 2023. « Multi-source datasets acquired over Toulouse (France) in 2021 for urban microclimate studies during the CAMCATT/AI4GEO field campaign ». *Data in Brief* 48 (juin): 109109. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109109>.
- 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. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109482>.
- Santé Publique France. 2022. « Bilan canicule et santé : un été marqué par des phénomènes climatiques multiples et un impact sanitaire important ». 22 novembre 2022. <https://www.santepubliquefrance.fr/presse/2022/bilan-canicule-et-sante-un-ete-marque-par-des-phenomenes-climatiques-multiples-et-un-impact-sanitaire-important>.
- Toesca, Adrien, Damien David, André Kuster, Michel Lussault, et Kévyn Johannes. 2022. « An urban thermal tool chain to simulate summer thermal comfort in passive urban buildings ». *Building and Environment* 215 (mai): 108987. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108987>.
- Vellei, Marika, Alfonso P. Ramallo-González, David Coley, Jeehang Lee, Elizabeth Gabe-Thomas, Tom Lovett, et Sukumar Natarajan. 2017. « Overheating in vulnerable and non-vulnerable households ». *Building Research & Information* 45 (1-2): 102-18. <https://doi.org/10.1080/09613218.2016.1222190>.

Ces travaux ont été initiés dans le cadre du projet ANR DIAMS soutenu par l'Agence Nationale de Recherche ANR-21-CE22-0010.