



**HAL**  
open science

## Etude prospective sur la résilience des bâtiments face aux canicules

Robin Monnier, Benjamin Leroy, Aude Lemonsu, Ophelie Ouvrier Bonnaz, Eric Francois, Etienne Wurtz, Nicolas Ziv, Karim Selouane, Eduardo Serodio, Stéphane Thiers, et al.

### ► To cite this version:

Robin Monnier, Benjamin Leroy, Aude Lemonsu, Ophelie Ouvrier Bonnaz, Eric Francois, et al.. Etude prospective sur la résilience des bâtiments face aux canicules. Conférence IBPSA France 2022, Laboratoire Matériaux et Ingénierie Mécanique (MATIM), May 2022, Chalons en Champagne, France. hal-03801428

**HAL Id: hal-03801428**

**<https://hal.science/hal-03801428>**

Submitted on 6 Oct 2022

**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.

## Etude prospective sur la résilience des bâtiments face aux canicules

Robin Monnier<sup>1</sup>, Benjamin Leroy<sup>2</sup>, Aude Lemonsu<sup>2</sup>, Ophélie Ouvrier Bonnaz<sup>3</sup>, Eric François<sup>3</sup>, Etienne Wurtz<sup>3</sup>, Nicolas Ziv<sup>4</sup>, Karim Selouane<sup>4</sup>, Eduardo Serodio<sup>5</sup>, Stéphane Thiers<sup>5</sup>, Patrick Schalbart<sup>1</sup> et Bruno Peuportier<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> MINES ParisTech, PSL Research University, CES, 60 Bd Saint Michel, 75006 Paris

<sup>2</sup> CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, Toulouse

<sup>3</sup> Univ. Grenoble Alpes, CEA, Liten, Campus Ines, 73375 Le Bourget du Lac

<sup>4</sup> RESALLIANCE, 22-24 Rue Lavoisier, 92000 Nanterre

<sup>5</sup> IZUBA Energies, Ecoparc, 35 rue Gine, 34690 Fabrègues

\*[bruno.peuportier@minesparis.psl.eu](mailto:bruno.peuportier@minesparis.psl.eu)

---

### RÉSUMÉ.

Les scénarios élaborés par le GIEC prévoient un réchauffement planétaire de plusieurs degrés d'ici la fin du siècle, ce qui augmentera la fréquence et la sévérité des canicules. Quel sera alors le niveau de confort thermique dans les bâtiments ? Pourra-t-on les adapter pour réduire ces surchauffes à un niveau acceptable ? Pour répondre à ces questions, des données de projection climatique à l'horizon 2050 et 2100 ont été élaborées par des techniques de descente d'échelle. Une liste de mesures d'adaptation a été élaborée et un échantillon de bâtiments types a été constitué. Il s'agit alors d'évaluer les mesures d'adaptation par différents indicateurs, par exemple : degrés-heures d'inconfort évalués par simulation thermique dynamique, bilan CO<sub>2</sub>, indicateurs ACV concernant la santé, la biodiversité et les ressources, coûts. La communication présente les premiers résultats obtenus, montrant l'intérêt et les limites du rafraîchissement passif en fonction des bâtiments, de leur localisation, et du comportement des occupants (en particulier la gestion des protections solaires et l'ouverture des fenêtres).

MOTS-CLÉS : confort d'été, simulation thermique dynamique, données climatiques prospectives, résilience.

---

### ABSTRACT.

The scenarios developed by the IPCC predict global warming of several degrees by the end of the century, which will increase the frequency and severity of heat waves. What will be the level of thermal comfort in buildings? Can we adapt them to reduce this overheating to an acceptable level? To answer these questions, climate projection data for 2050 and 2100 were developed using downscaling techniques. A list of adaptation measures was drawn up and a sample of typical buildings was created. Adaptation measures were assessed considering different indicators, for instance: degree-hours of discomfort evaluated by dynamic thermal simulation, CO<sub>2</sub> balance, LCA indicators concerning health, biodiversity and resources, costs. The communication presents the first results obtained, showing the interest and limits of passive cooling according to the buildings, their location, and occupants behaviour (in particular the management of solar protection and opening of windows).

KEYWORDS: comfort, thermal simulation, prospective weather data, resilience.

---

## 1. INTRODUCTION

Le changement climatique impose d'adapter les bâtiments pour assurer un niveau de confort suffisant durant des périodes de canicule de plus en plus sévères. L'enjeu est de parvenir à cet objectif à moindre coût et à moindre impact environnemental, en construction neuve mais aussi en ce qui concerne le parc existant.

Le projet Résilience, qui fait l'objet de cette communication, vise à apporter des éléments en réponse à un certain nombre de questions posées sur l'adaptation au changement climatique, par exemple :

- Quel niveau d'isolation permet de réduire les risques de surchauffe sans induire d'effet négatif en termes d'impacts environnementaux, quelle épaisseur d'isolation est appropriée, les triple-vitrages sont-ils préférables aux double-vitrages ?

- Quel niveau d'inertie thermique permet de réduire la surchauffe diurne tout en permettant un rafraîchissement nocturne et en limitant les impacts environnementaux liés à la production des matériaux ?

- Des brasseurs d'air, permettant d'étendre la zone de confort et d'éviter de devoir ouvrir les fenêtres pour augmenter la vitesse d'air, seront-ils suffisants pour éviter une climatisation active ?

- Peut-on organiser un zonage thermique ménageant un espace plus frais au sein d'un logement ou d'un bâtiment ?

Un état de l'art a montré que la simulation thermique a été utilisée pour répondre à ce type de questions en considérant des projections climatiques pour un contexte donné, par exemple en Grande-Bretagne où le nombre d'heures au-delà de 28 °C à l'intérieur des locaux passe, dans les cas étudiés, de 50 ou 100 dans le climat des années 1980 à plus de 500 en 2080 (Holmes, 2007). Des archétypes sont en général définis pour représenter un parc de bâtiments (Mavrogianni, 2012). Certains travaux se sont concentrés sur des types particuliers de bâtiments comme les écoles (Jenkins, 2009) ou les hôpitaux (Lomas, 2009).

## 2. METHODOLOGIE

Des données de projection climatique ont tout d'abord été élaborées dans le contexte français. Une liste de mesures d'adaptation et un échantillon de bâtiments types ont été constitués (maisons individuelles, logements collectifs, bâtiments tertiaires) en considérant différentes époques de construction. Des critères de performance ont été définis pour évaluer l'efficacité des différentes solutions d'adaptation proposées. Ces critères concernent les risques de surchauffe, en tenant compte de la notion de confort adaptatif, mais aussi la performance environnementale évaluée par analyse de cycle de vie (ACV), en incluant les effets éventuels des mesures d'adaptation sur les besoins de chauffage et de climatisation. L'objectif est ainsi d'évaluer les mesures d'adaptation par différents indicateurs, par exemple : degrés-heures d'inconfort, bilan CO<sub>2</sub>, indicateurs ACV concernant la santé, la biodiversité et les ressources, coûts.

### 2.1. ELABORATION DE DONNEES CLIMATIQUES PROSPECTIVES

Dans le cadre du projet Résilience, le choix a été fait d'utiliser une approche combinant différentes simulations climatiques à haute résolution pour créer des fichiers de forçages climatiques, à savoir

utiliser un modèle numérique de climat régional pour produire une année type en climat futur à partir de longues séries temporelles.

La méthodologie présentée ici a pour but de recréer une année considérée comme typique du climat futur moyen pour un horizon temporel donné (milieu et fin de siècle). De plus, pour évaluer la réponse des bâtiments à des événements thermiques extrêmes, des vagues de chaleur d'intensités variables sont également ajoutées aux forçages moyens. La méthode repose sur deux axes distincts :

- les conditions climatiques « typiques » en climat futur sont fournies par analyse statistique d'un ensemble de projections climatiques produites par les modèles climatiques régionaux de l'ensemble EURO-CORDEX (Jacobs et al., 2014) ;

- les données météorologiques horaires en climat futur sont produites à partir du modèle de climat régional à haute résolution AROME, version climatique du modèle de prévision numérique du temps développé par Météo-France et le CNRM (Seity et al. 2011).

Deux zones climatiques distinctes ont été sélectionnées pour cette étude : la région parisienne pour représenter un climat plutôt « moyen » et la région de Nîmes pour représenter un climat plus extrême (en températures). Pour chacune de ces zones, les points de grille des modèles les plus proches des stations RADOME (réseau Météo-France opérationnel) servant de référence rurale pour chacune des régions d'étude sont choisis : station de Chartres pour Paris (48,46°N ; 1,50°E) sur la base d'études antérieures (Daniel et al., 2019), station de Pujaut pour Nîmes (43,99°N ; 4,76°E). En plus de ces points ruraux, les points les plus proches des villes étudiées sont également utilisés pour produire les forçages contenant l'influence de la ville.

L'approche d'un « Typical Meteorological Year » est choisie pour recréer une année considérée comme typique du climat futur (Hall et al., 1978). Le principe de l'approche consiste à extraire, pour un mois donné, l'année la plus « typique » pour ce mois particulier. Par exemple, à partir d'observations sur la période 1991–2020, le mois de janvier 1999 est le plus proche de la moyenne de tous les mois de janvier de la période, le mois de février 2004 le plus proche de la moyenne de tous les mois de février, etc. En concaténant les douze mois extraits, on obtient alors une série d'un an dont les moyennes mensuelles sont au plus proche des moyennes de la période.

L'année moyenne reconstruite par la méthode « Typical Meteorological Year » permet de représenter les conditions climatiques futures moyennes tout en prenant en compte la variabilité inter-journalière. Cependant elle ne permet pas de prendre en compte des événements extrêmes comme les vagues de chaleur, ou alors de manière très partielle, si par exemple des conditions de vagues de chaleur constantes en été devenaient la norme en climat futur lointain.

Pour « rajouter » le signal d'une vague de chaleur sur l'année moyenne, une approche similaire à la méthode « Typical Meteorological Year » est proposée selon les étapes suivantes :

- le choix d'une définition de vague de chaleur ;
- l'extraction des vagues de chaleurs simulées par l'ensemble EURO-CORDEX ;
- l'extraction des vagues de chaleurs simulées par AROME ;
- la discrimination des types de vagues de chaleurs en fonction de leurs caractéristiques ;

- l'identification de la vague de chaleur simulée par AROME la plus proche de la vague de chaleur EURO-CORDEX d'intérêt.

La figure 1 suivante montre un exemple de profils annuels de température.

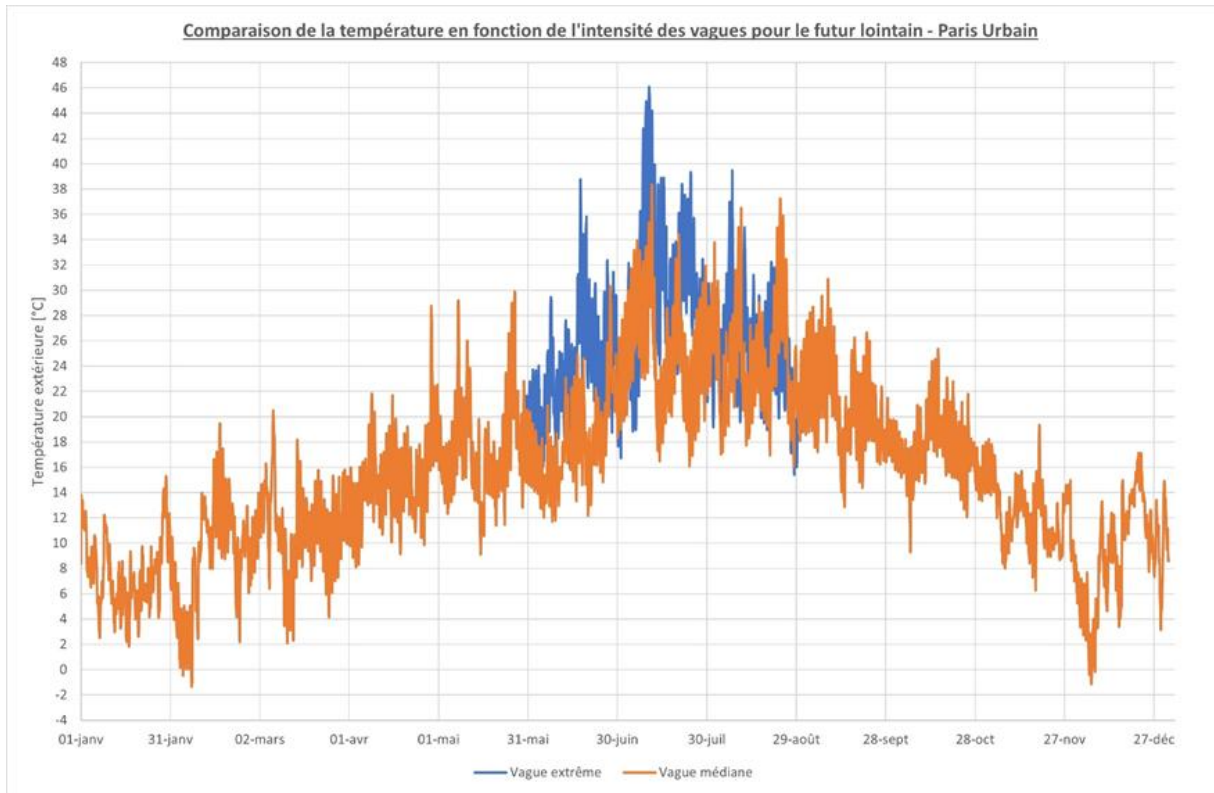


Figure 1: Comparaison entre canicule extrême et médiane, Ile de France horizon 2100 (CNRM)

## 2.2. DEFINITION D'UN ECHANTILLON DE BATIMENTS ET DE MESURES D'AMELIORATION

L'objectif est d'étudier la résilience de différents types de bâtiments : maisons individuelles, immeubles de logement collectif, bureaux et bâtiments scolaires. Il est d'autre part utile de considérer différents niveaux de performance : des bâtiments anciens non isolés, et des bâtiments neufs performants.

Des bâtiments archétypes ont alors été définis pour les maisons individuelles (existant et neuf), les logements collectifs (haussmannien, années 1960 et neuf), les bureaux et les bâtiments scolaires (années 1960 et neuf), en considérant différents niveaux d'isolation thermique. Des données ont été collectées sur ces bâtiments de manière à pouvoir mettre en œuvre la simulation énergétique et l'ACV.

	<b>Maisons individuelles</b>	<b>Logement collectif</b>	<b>Bureaux</b>	<b>Bâtiments scolaires</b>
<b>Neuf, performant</b>	Maison Comepos (2017)	Résidence Les Roches Blanches (2016)	Bureaux IZUBA (2015) + variante non isolée	Ecole à Marseille (2018)
<b>Existant</b>	Maison Phenix (1971)	Immeuble haussmannien (1880s) HLM (1969)		Ecole à Fabrègues (1960s)

Différentes mesures peuvent être envisagées pour améliorer le confort d'été dans les bâtiments existants. Celles-ci se répartissent en deux sous-groupes : les mesures passives qui ne font appel à

aucune force motrice sauf de façon brève et transitoire et les systèmes actifs qui nécessitent le fonctionnement permanent d'un moteur (électrique ou mécanique).

Les solutions passives sont à privilégier car elles n'engendrent pas de consommations énergétiques en phase d'exploitation (électrique ou thermique). Mais elles ne sont pas toutes exemptes de stratégie de pilotage notamment pour les protections solaires mobiles ou la ventilation. On peut citer : la ventilation naturelle (ouverture de fenêtre, imposte à soufflet, fenêtre de toiture...), les protections solaires amovibles (volets, stores...) ou fixes (casquettes, brise-soleil), l'isolation thermique, l'augmentation de la capacité thermique du bâti, les vitrages adaptés (transmission du rayonnement et transfert thermique), les revêtements de faible absorptivité, les murs ou toitures végétalisé(e)s, et le zonage thermique. Les systèmes actifs considérés sont les suivants : la ventilation mécanique, avec éventuellement un puits climatique, les brasseurs d'air, et la climatisation par compression, éventuellement alimentée par une production d'électricité photovoltaïque.

### 2.3. CRITERES DE PERFORMANCE CONSIDERES

La réglementation RE 2020 a introduit un nouvel indicateur de confort hygrothermique : le nombre de degrés-heures d'inconfort estival, exprimé en °C.h et noté DH. Il est évalué pour chaque partie de bâtiment thermiquement homogène, c'est-à-dire au niveau de chaque zone thermique.

Le calcul de cet indicateur consiste à sommer, sur chaque pas de temps en période d'occupation, l'écart entre la température opérative de la zone et une température limite d'inconfort chaud prenant en compte le confort adaptatif, basée sur la norme NF EN 16798-1. Conformément à cette norme, la température limite d'inconfort chaud considérée est calculée à chaque pas de temps en fonction de la température extérieure en moyenne glissante journalière. En présence de systèmes qui modifient la sensation thermique des occupants (par la création d'une vitesse d'air, un apport ou une diminution de l'humidité de l'air, etc.), la température limite d'inconfort chaud est modifiée.

Cet indicateur a l'avantage d'intégrer à la fois la durée et l'intensité des périodes d'inconfort et de prendre en compte le phénomène de confort adaptatif qui constitue une approche intéressante du comportement et du ressenti des occupants. Il présente en cela un intérêt supérieur aux indicateurs plus basiques de type nombre d'heures ou pourcentage d'inconfort au-delà d'une température fixe.

Pensant aux nombreux foyers dépourvus de systèmes de rafraîchissement actif, Givoni a travaillé dans les années 1980 sur l'expression du confort pour des bâtiments naturellement ventilés. Son modèle prend en compte la température résultante (ou opérative), l'humidité, et la vitesse d'air (Givoni, 1992). Le diagramme de Givoni définit sur le diagramme de l'air humide des zones de confort pour une activité sédentaire et avec un habillement adapté à l'été (0,5 clo).

Des critères environnementaux (selon l'ACV) et économiques seront considérés par la suite dans ce projet.

### 2.4. SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE (STD)

Le modèle physique réduit COMFIE (Peuportier et Blanc-Sommereux, 1990) de la suite logicielle *Pleiades* est utilisé pour la STD des bâtiments. Le modèle a été validé par comparaison à des mesures de températures estivales et à d'autres outils de simulation faisant référence au niveau international (Munaretto, 2017). A partir d'une maquette numérique de chaque archétype, des variations paramétriques ont été effectuées via un module programmé en python basé sur le module *AMAPOLA*

de *Pleiades*. Ceci a permis de générer automatiquement un diagramme affichant l'évolution des degrés-heures, selon différents niveaux d'isolation (cinq épaisseurs d'isolants et trois types de vitrage).

### 3. EXEMPLES DE RESULTATS OBTENUS

#### 3.1. BATIMENT HAUSSMANNIEN A PARIS

La figure 2 montre l'augmentation de l'inconfort entre 2050 et 2100, en fonction de la mise en œuvre d'isolation thermique (par l'intérieur dans ce cas de façade classée) et du type de vitrage (simple SV, double DV ou triple TV). La zone thermique la plus exposée (en dessous de la toiture) a été considérée, sous l'hypothèse d'une ventilation traversante (10 vol/h) et d'une vague de chaleur médiane.

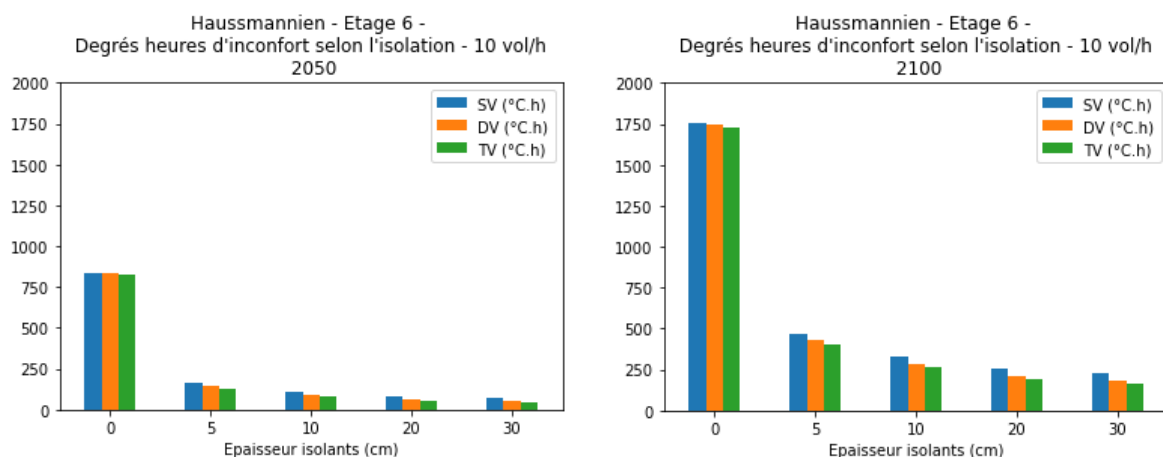


Figure 2 : Tendances d'évolution de l'inconfort dans un immeuble haussmannien à Paris

Les premiers centimètres d'isolant sont très efficaces pour réduire l'inconfort, qui varie ensuite moins nettement avec des épaisseurs plus importantes (ceci étant, une épaisseur suffisante doit être prévue pour réduire la consommation de chauffage). Le remplacement des fenêtres semble avoir peu d'effet sur les surchauffes, il faut noter qu'une occultation à 80 % est considérée (persiennes).

En considérant que la végétalisation à l'échelle urbaine permet au mieux d'obtenir le climat de la zone rurale limitrophe (Chartres dans le cas étudié ici), on peut espérer réduire l'inconfort avec les résultats suivants dans le cas d'une vague de chaleur extrême en 2100 (Figure 3).

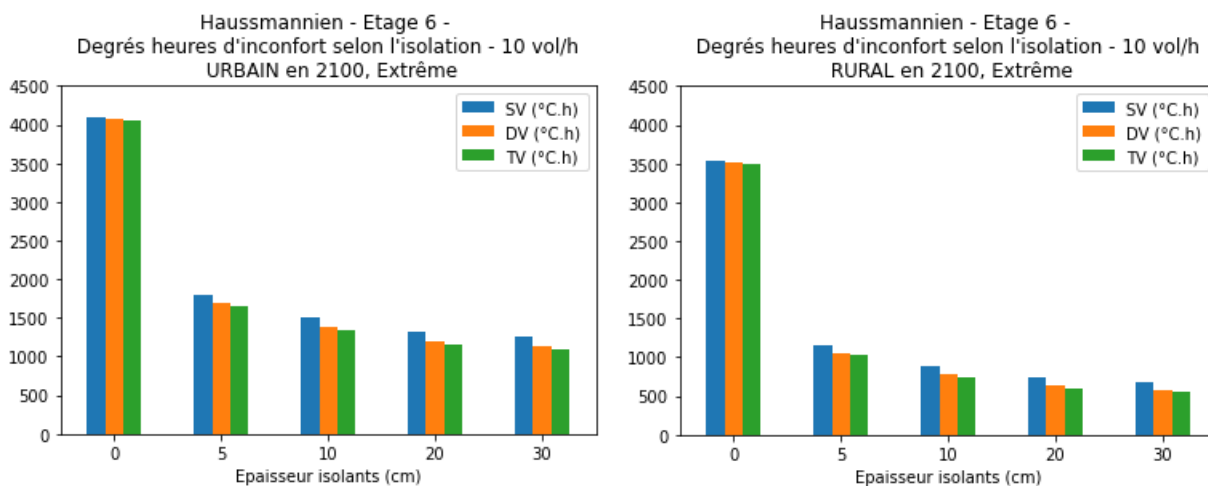


Figure 3 : Influence de l'îlot de chaleur urbain dans le cas d'un immeuble haussmannien à Paris

### 3.2. INFLUENCE DE L'INERTIE THERMIQUE

La comparaison, pour un même site (Île-de-France) et une même sévérité de canicule (vague de chaleur médiane), entre le bâtiment haussmannien isolé par l'intérieur et un immeuble HLM, plus inerte et isolé par l'extérieur, montre sur un exemple l'influence de l'inertie thermique (Figure 4).

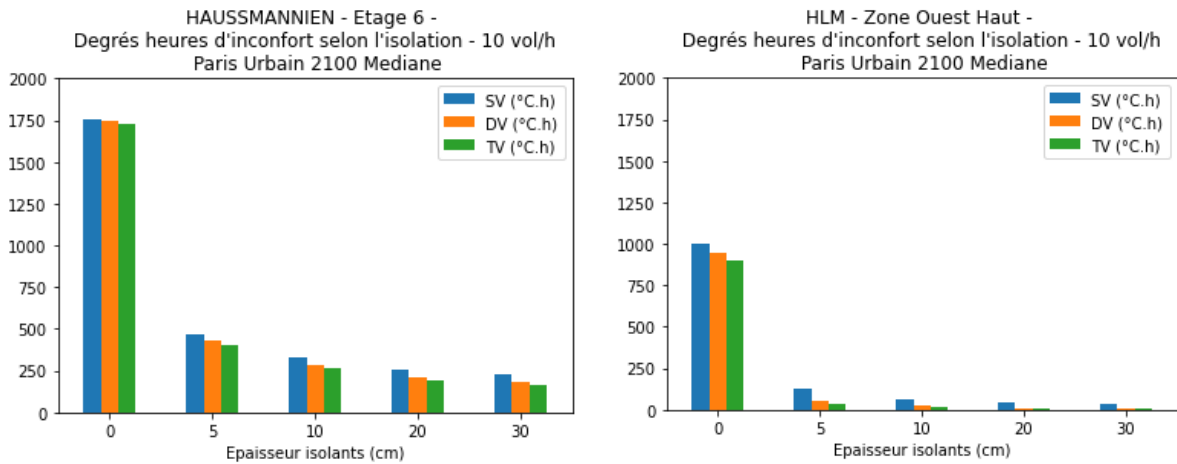


Figure 4 : Comparaison entre HLM (plus inerte, isolation par l'extérieur) et haussmannien

### 3.3. MAISON ANCIENNE

Les maisons anciennes ont généralement des murs épais, et un plancher sur terre-plein en contact avec le sol, ce qui leur confère une très forte inertie thermique. Dans la situation la plus défavorable (Nîmes, horizon 2100 extrême), le nombre de degrés-heures d'inconfort est de 1250 °C.h. Selon les critères du diagramme de Givoni, un brasseur d'air permet de passer de 77% à 92% d'heures de confort.

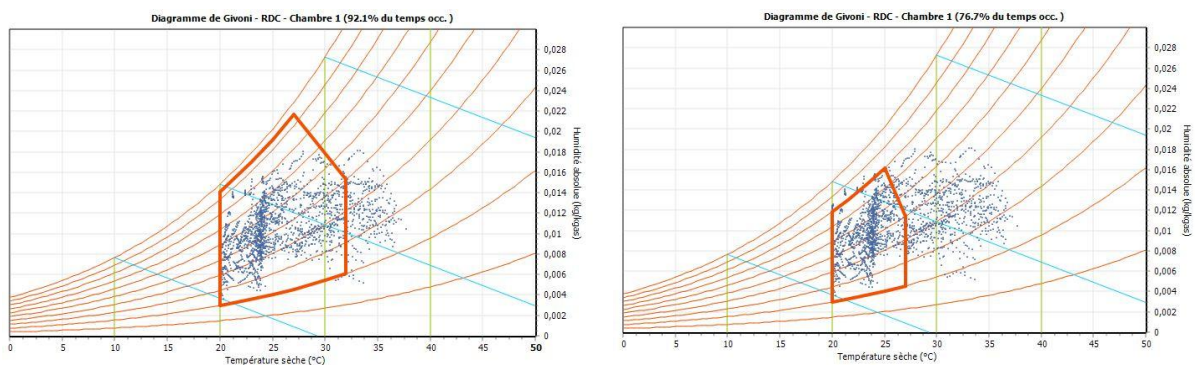


Figure 5 : Maison ancienne, comparaison avec (à gauche) et sans (à droite) brasseur d'air

## 4. DISCUSSION

Les tendances présentées dans cette communication présentent des incertitudes importantes, liées en particulier aux scénarios climatiques prospectifs considérés dans les simulations.

Les résultats présentés ci-dessus correspondent à une ventilation traversante, permettant d'obtenir un débit d'air élevé si les fenêtres sont ouvertes. D'autres simulations ont été réalisées en considérant un taux de renouvellement d'air de 2 vol/h. Pour éviter les risques d'intrusion, il existe des systèmes incluant une ouverture d'imposte et/ou de fenêtre en toiture. Un calcul aérodynamique permettrait d'évaluer



le débit d'air correspondant. Mais en zone de bruit, il faudrait mettre en œuvre un système de ventilation muni de chicanes ce qui réduirait le débit. On suppose également que les occupants ouvrent leurs fenêtres les nuits d'été si la température extérieure est inférieure à la température intérieure et que celle-ci est supérieure à 22 °C. Ils sont, d'autre part, supposés fermer des stores durant les périodes chaudes. Sans ce comportement de bonne gestion, les surchauffes deviennent très importantes.

## 5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les résultats montrent que pour se protéger efficacement des canicules, il faut associer une isolation thermique à une surventilation nocturne suffisante (au moins 2 à 3 vol/h) et à des protections solaires. Le comportement des usagers en termes de gestion des ouvertures et des occultations joue alors un rôle majeur. Cette étude montre aussi qu'une isolation par l'extérieur est à privilégier, l'inertie thermique étant favorable au confort. La végétalisation des façades et l'utilisation de puits climatique améliorent aussi le confort des bâtiments. Enfin, ne rafraîchir qu'une partie d'un bâtiment (zonage thermique) réduirait la consommation pour la climatisation active, qui pourrait s'avérer nécessaire dans le sud de la France où les températures risquent d'être particulièrement élevés d'ici la fin du 21<sup>ème</sup> siècle.

Les résultats de ces évaluations, complétés sur les aspects environnementaux et économiques, permettront d'étudier des recommandations à l'intention des professionnels et des politiques publiques. Du matériel pédagogique sera par ailleurs élaboré en vue de proposer des formations concernant l'usage de la Simulation Thermique Dynamique dans le cadre d'un « diagnostic canicule ». Il serait utile d'étendre l'étude à des régions dont les conditions climatiques extrêmes ne sont pas encore trop contraignantes aujourd'hui, mais qui pourront le devenir à terme.

## 6. REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet ADEME Résilience.

## 7. BIBLIOGRAPHIE

- Hall, I. J., Prairie, R. R., Anderson, H. E., & Boes, E. C. 1978. Generation of a typical meteorological year (No. SAND-78-1096C; CONF-780639-1). Sandia Labs., Albuquerque, NM (USA).
- Holmes MJ, Hacker JN. 2007. Climate change, thermal comfort and energy: Meeting the design challenges of the 21st century. *Energy and Buildings*; 39:802–814
- Givoni B., 1992. Comfort, climate analysis and building design guidelines, *Energy and Buildings*, 18 11-23
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., ... & Yiou, P. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional environmental change*, 14(2), 563-578.
- Jenkins DP, Peacock AD, Banfill PFG. 2009. Will future low-carbon schools in the UK have an overheating problem? *Building and Environment*; 44:490–501
- Lomas KJ, Ji Y. 2009. Resilience of naturally ventilated buildings to climate change: advanced natural ventilation and hospital wards. *Energy and Buildings* ; 41 :629–653
- Mavrogianni A, Wilkinson P, Davies M, Biddulph P, Oikonomou E. 2012. Building characteristics as determinants of propensity to high indoor summer temperatures in London dwellings. *Building and Environment*; 2012:55
- Munaretto, F., Recht, T., Schalbart, P. and Peuportier, B., 2017. Empirical validation of different internal superficial heat transfer models on a full-scale passive house. *Journal of Building Performance Simulation*, doi: 10.1080/19401493.2017.1331376

- Peuportier, B., et I. Blanc-Sommereux. 1990. « Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings ». *International Journal of Solar Energy* 8 (2): 109-120.
- Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., ... & Masson, V. 2011. The AROME-France convective-scale operational model. *Monthly Weather Review*, 139(3), 976-991.