



**HAL**  
open science

# De la construction bioclimatique à la garantie de performance : Retours d'expériences et simulations numériques en conditions estivales

Arnaud Jay

► **To cite this version:**

Arnaud Jay. De la construction bioclimatique à la garantie de performance : Retours d'expériences et simulations numériques en conditions estivales. Génie civil. Université Savoie Mont Blanc, 2024. Français. NNT : 2024CHAMA013 . tel-04709974

**HAL Id: tel-04709974**

**<https://theses.hal.science/tel-04709974v1>**

Submitted on 26 Sep 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.

## THÈSE

Pour obtenir le grade de

### DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC

Spécialité : **Génie Civil et Sciences de l'habitat**

Arrêté ministériel : 25 Mai 2016

Présentée par

**Arnaud JAY**

Référents scientifiques VAE :

**Etienne WURTZ** et **Monika WOLOSZYN**

préparée au sein du **Laboratoire LOCIE**

dans l'**École Doctorale Sciences, Ingénierie, Environnement**

## De la construction bioclimatique à la garantie de performance

**Retours d'expériences et simulations  
numériques en conditions estivales**

Thèse soutenue publiquement le **24 juin 2024**,

devant le jury composé de :

**M. Emmanuel ANTCZAK**

Professeur des universités, Université d'Artois, Rapporteur

**M. Stéphane GINESTET**

Professeur des universités, INSA Toulouse, Rapporteur

**M. Laurent MORA**

Professeur des universités, Université de Bordeaux, Président

**Mme Sihem GUERNOUTI**

Chargée de recherche - HDR, CEREMA, Examinatrice

**M. Etienne WURTZ**

Directeur de recherche au CEA liten, Référent scientifique

**Mme Monika WOLOSZYN**

Professeure des universités, Université Savoie-Mont-Blanc,  
Co-référente scientifique



*A mon père,*

*A mon frère,*

*Tous deux décédés au cours de ce projet de thèse en VAE. Ce travail de thèse m'aura peut-être permis de me raccrocher à un fil rouge, une sorte d'échappatoire pour affronter cette période de fortes turbulences.*

*Vous êtes libérés de votre maladie.*





## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Christophe Ménézo, directeur du LOCIE, laboratoire de l'université Savoie Mont Blanc, qui au détour d'une conversation à l'issue de l'HDR de Simon Rouchier a su faire germer une graine qui était présente dans mon esprit depuis quelques années mais se desséchait aussi au fil des ans. Merci Christophe d'avoir pris le temps de te renseigner pour me lancer dans cette démarche en VAE, inédite à l'USMB, et merci d'avoir toujours répondu présent pour débloquer la situation administrative quand cela me semblait nécessaire.

Merci à Etienne et à Monika d'avoir accepté d'être mes référents scientifiques. Merci Etienne pour les conseils, l'écoute, le temps consacré et le partage de tes nombreuses expériences. J'ai commencé de te parler de l'envie de faire une thèse il y a plusieurs années sans trop savoir sous quelle forme. La VAE aura été le bon format. Merci Monika pour la relecture et le regard bienveillant sur ce travail. Je t'ai impliqué tardivement dans le processus, mais ton regard extérieur m'aura conforté dans le travail présenté et permis d'affiner certaines parties.

Merci à Stéphane Ginestet et à Emmanuel Antzak d'avoir accepté de rapporter mon travail, à Laurent Mora et à Sihem Guernouti d'avoir accepté d'être membre de mon jury de thèse. Merci à vous d'avoir sacrifié une partie d'un dimanche après-midi de juin pour faire le trajet pour venir à l'INES.

Le travail présenté dans ce manuscrit reprend différents projets auxquels j'ai contribué depuis plusieurs années et auxquels j'ai contribué significativement mais toujours en collaboration avec des collègues. Je tiens à les remercier chaleureusement ici pour les nombreux échanges eu. Ceux-ci m'ont nourri et permis de me faire « grandir » dans la thématique, même si au moment de la réalisation de ces travaux, je n'avais aucunement l'idée que je les valoriserai dans un manuscrit de thèse en VAE ! Merci donc à Anne-France B., Anaïs L., Etienne W., Jocelyn A., Sarah T., Adrien B., Pierre B., Philippe M., Anaïs P., Hafsa F., Marie T., David L.W., François M., Kevin C. qui ont contribué significativement à tous ces travaux. Merci également à Amandine P. et Aurélie F. qui n'ont pas contribué directement dans les travaux présentés mais avec qui j'ai eu l'occasion de partager plusieurs projets et qui ont aussi contribué à enrichir mes réflexions et mon appréhension du monde de la recherche.

Merci à Ophélie O.B., de m'avoir encouragé dans cette démarche, ainsi que tous les collègues du CEA, de l'INES, au travers des différents noms de laboratoires et de services que nous avons partagé depuis 15 ans : DTS, LIS, SBST, LGEB, LIPV, SIRE, LELA qui ont de près ou de loin contribué à des discussions enrichissantes ou tout simplement contribué à la bonne ambiance de travail qui ont rendu ces 15 années de travail fort agréable et enrichissante aussi bien d'un point de vue humain que professionnel. Et pour les mêmes raisons, merci aux partenaires des projets Thermacem, Trecadbat, SEREINE et bien d'autres dont Laury Barnes-Davin., Corine Arpin, Pierre Oberlé, Mickael Rabouille, Simon Thebault, Sarah Juricic, Arnaud Chalansonnex

Et enfin merci à ma famille, Naëlle, Ellyn et Jessica qui ont parfois subi ce projet qui m'aura pris pas mal de temps. Et merci à ma maman d'avoir notamment pris le temps de relire ce manuscrit pour corriger les fautes de « frappes »...

## RESUME

Le secteur du bâtiment représentant en Europe 40% des consommations énergétiques et 36% des émissions de gaz à effet de serre, il est primordial de réduire ses consommations énergétiques pour réduire son impact environnemental. Les projections mondiales prédisent que les consommations de climatisations vont être supérieures aux consommations de chauffage. Ainsi, assurer le confort en climat chaud / période estivale en minimisant les consommations énergétiques est l'un des défis pour espérer atteindre les objectifs fixés. Ce manuscrit va dans ce sens au travers de travaux selon deux axes.

Premièrement, il s'intéresse au bioclimatisme et aux solutions passives qui visent à prendre en compte les caractéristiques de l'environnement proche pour améliorer le confort des occupants tout en réduisant les consommations d'énergie. Pour cela, l'étude s'appuie sur l'analyse de plusieurs cas d'études numériques et expérimentaux de maisons individuelles performantes en analysant l'influence et l'impact de différents paramètres que sont la gestion des apports solaires, la sur-ventilation nocturne et l'inertie thermique sous différentes sollicitations climatiques estivales. Ces études permettent de confirmer le rôle positif de ces composantes sur le confort thermique pour cette typologie de de bâtiments performants et de donner des ordres de grandeurs à partir des cas d'études. En premier lieu, la gestion des apports solaires est la plus impactante pour limiter les apports internes dans le logement. La sur-ventilation nocturne, quand le climat le permet, est très efficace pour évacuer la chaleur emmagasinée la journée (apports internes, renouvellement d'air hygiénique, apports solaires non contrôlés) et a un impact sur la température d'air intérieure sur toute la journée. L'inertie thermique permet dans la plupart des cas d'apporter de la résilience au bâtiment, d'être moins sensible à une gestion non optimale de celui-ci et décuple l'impact de la sur-ventilation nocturne.

Le second axe s'intéresse à la mesure de la performance des bâtiments qui est une étape clé au cours du cycle de vie du bâtiment pour s'assurer de ses consommations réelles. Cela peut permettre de trouver les clés pour réduire les consommations et faire progresser la filière sur les bonnes pratiques. Dans ce manuscrit, on s'intéresse à la mesure de la performance intrinsèque de l'enveloppe à l'achèvement de travaux. Les méthodes actuelles de mesures sont toutes réalisées en chauffant le bâtiment, ce qui ne permet pas de réaliser les tests en période trop chaude sans risquer d'endommager le bâtiment ou ses équipements. L'objectif de ce travail est d'explorer une méthode alternative en climatisant le bâtiment au lieu de le chauffer. Des expérimentations à différentes échelles d'une cellule du mètre cube à une maison individuelle ont été réalisées ainsi qu'une approche numérique pour valider la faisabilité d'une telle méthode. Une méthode de co-cooling est proposée et reprend en grande majorité les principes du co-heating avec comme principale modification l'utilisation d'une température extérieure équivalente avec une régression linéaire simple.

Enfin, plusieurs perspectives à ces travaux sont esquissées reliant notamment ces deux axes. La mesure et la garantie de performance des solutions passives du bâtiment seront discutés. Cela intégrera l'évaluation de la gestion des apports solaires, de la ventilation naturelle, de l'inertie thermique effective, et des couplages entre ces solutions dont un couplage entre ventilation naturelle, brassage d'air et climatisation en dernier recours. D'autre part, une réflexion sera amenée sur les atouts et limites du bioclimatisme pour répondre au défi du changement climatique qui va faire varier de façon non négligeable l'environnement d'un bâtiment au cours de son cycle de vie semble nécessaire.

## ABSTRACT

With the building sector accounting for 40% of Europe's energy consumption and 36% of greenhouse gas emissions, it is vital to reduce energy consumption in order to reduce environmental impact. Global forecasts predict that air conditioning consumption will exceed heating consumption. Ensuring comfort in hot climates/summer periods while minimizing energy consumption is therefore one of the challenges to face to meet these targets. This manuscript takes a two-pronged approach.

Firstly, it looks at bioclimatism and passive solutions, which aim to take into account the characteristics of the immediate environment to improve occupant comfort while reducing energy consumption. To this end, the study is based on the analysis of several numerical and experimental case studies of high-performance single-family homes, analyzing the influence and impact of different parameters such as solar gain management, night-time ventilation and thermal inertia under different summer climatic conditions. These studies confirm the positive role of these components on thermal comfort, and provide orders of magnitude based on case studies. First and foremost, solar gain management has the greatest impact on limiting internal gains in the home. Ventilation at night, climate permitting, is highly effective in removing heat stored during the day (internal gains, hygienic air renewal, uncontrolled solar gains) and has an impact on indoor air temperature throughout the day. In most cases, thermal inertia adds resilience to the building, making it less sensitive to non-optimal building management, and increases the impact of night-time ventilation tenfold.

The second area concerns the measurement of building performance, which is a key stage in the life cycle of a building, enabling us to ascertain actual consumption levels, find the keys to reducing them and help the industry move forward with best practices. In this manuscript, we focus on measuring the intrinsic thermal performance of the building envelope upon completion. Current measurement methods are all carried out by heating the building, which makes it impossible to carry out tests in excessively hot weather without risking damage to the building or its equipment. The aim of this work is to explore an alternative method by air-conditioning the building instead of heating it. Experiments at different scales, from a cubic-meter cell to a single-family home, have been carried out, along with a numerical experimental design to validate the feasibility of such a method. A co-cooling method is proposed, largely based on the principles of co-heating, with the main modification being the use of an equivalent outdoor temperature with a simple linear regression.

Finally, a number of prospects for this work are outlined, linking these two parts in particular. Firstly, measuring and guaranteeing the performance of passive building solutions by assessing the management of solar gain, natural ventilation and effective thermal inertia, coupling these solutions and, as a last resort, coupling natural ventilation, air circulation and air conditioning. On the other hand, we need to consider the advantages and limitations of bioclimatism in order to meet the challenge of climate change, which will cause significant variations in a building's environment over the course of its life cycle.



# TABLE DES MATIERES

|  |           |
|--|-----------|
| INTRODUCTION .....   | 2         |
| 1.1 Contexte et enjeux .....   | 2         |
| 1.2 Contenu du manuscrit .....   | 2         |
| <br>   |           |
| <b>PARTIE I PRESENTATION DE MON PARCOURS PROFESSIONNEL ET PERSONNEL DE</b>   |           |
| <b>CHERCHEUR .....</b>   | <b>5</b>  |
| 1. Introduction .....  | 7         |
| 2. Intégration solaire.....  | 7         |
| 3. Simulations Thermo-aéroulque via la Mécanique des Fluides Numériques (MFN ou CFD) en Volumes<br>Finis 7   |           |
| 4. Vers une comparaison mesures / simulations : Définition, mise en œuvre et traitement de données de<br>campagnes expérimentales.....               | 9         |
| 5. Vers la garantie de Performance énergétique .....   | 10        |
| <br>   |           |
| <b>PARTIE II DE LA CONSTRUCTION BIOCLIMATIQUE A LA GARANTIE DE PERFORMANCE .....</b>   | <b>13</b> |
| <br>   |           |
| <b>Chapitre 1 - Bioclimatisme et mesure de la performance thermique – état de l’art.....</b>   | <b>15</b> |
| 1.1 Impact grandissant du confort thermique en période estivale au regard des enjeux de l’énergétique<br>du bâtiment .....                           | 16        |
| 1.2 Bioclimatisme, énergies fossiles et simulations numériques : destins croisés.....  | 16        |
| 1.3 Bioclimatisme et solutions passives des bâtiments performants .....  | 17        |
| 1.3.2 Gestion des apports solaires et apports internes.....  | 18        |
| 1.3.3 Isolation et bioclimatisme .....   | 18        |
| 1.3.4 Ventilation nocturne.....  | 18        |
| 1.3.5 Inertie thermique .....  | 19        |
| 1.3.6 Couplage ventilation et inertie thermique .....  | 19        |
| 1.4 Mesure et garantie de la performance thermique : nécessité et méthodes existantes .....  | 20        |
| 1.4.1 Indicateurs de performances énergétiques d’un bâtiment.....  | 20        |
| 1.4.2 Méthodes de mesure de la performance énergétique d’un bâtiment.....  | 21        |
| 1.4.3 Méthode par le calcul théorique .....  | 22        |
| 1.4.4 Le Co-heating.....   | 22        |
| 1.4.5 Les approches PRBS – exemple de la méthode SEREINE .....   | 24        |
| 1.4.6 Les apports solaires et le co-heating .....  | 25        |
| 1.4.7 Les limites des méthodes de détermination de la performance en chauffage .....   | 25        |
| 1.5 Questions scientifiques et déroulé du manuscrit.....   | 26        |
| <br>   |           |
| <b>Chapitre 2 - Impact du couplage entre inertie thermique et ventilation naturelle nocturne sur le confort<br/>d’été : Approche numérique .....</b> | <b>27</b> |
| 2.1 Introduction et objectif de l’étude .....  | 28        |
| 2.2 Définition du cas d’étude et de l’étude numérique .....  | 28        |
| 2.2.1 Description de la maison INCAS simulée .....   | 28        |
| 2.2.2 Hypothèses de simulation .....   | 30        |
| 2.2.3 Synthèse de l’étude numérique paramétrique .....   | 31        |
| 2.3 Conditions météorologiques .....   | 31        |
| 2.3.1 Conditions météorologiques classiques .....  | 32        |
| 2.3.2 Canicule .....   | 33        |

|  |   |           |
|--|---|-----------|
| 2.4  | Inertie thermique et confort thermique estival .....  | 35        |
| 2.4.1  | Gestion du bâtiment : Sur-ventilation nocturne .....  | 35        |
| 2.4.2  | Gestion du bâtiment : Ouverture/Fermeture des volets roulants .....   | 37        |
| 2.4.3  | Quantité d'inertie .....  | 40        |
| 2.4.4  | Répartition de la masse .....   | 42        |
| 2.5  | Conclusion .....  | 43        |
| <br>   |   |           |
| <b>Chapitre 3 - Impact de la ventilation naturelle nocturne et de l'inertie thermique sur le confort d'été :</b>   |   |           |
| <b>comparaison mesures / simulation sur 2 modes constructifs .....</b>   |   | <b>45</b> |
| 3.1  | Introduction et objectif de l'étude .....   | 46        |
| 3.2  | Cas d'étude .....   | 47        |
| 3.2.1  | Description des maisons expérimentales .....  | 47        |
| 3.2.2  | Métrologie .....  | 47        |
| 3.2.3  | Scénarios.....  | 48        |
| 3.2.4  | Simulation.....   | 49        |
| 3.3  | Résultats et discussions .....  | 49        |
| 3.3.1  | Etape 1.....  | 49        |
| 3.3.2  | Etape 2 : Comparaison mesures / simulations .....   | 52        |
| 3.3.3  | Étape 3 : Impact des différences géométriques des maisons expérimentales – Comparaison numérique basée sur le modèle géométrique de la I-BB ..... | 54        |
| 3.3.4  | Etape 4 : Impact de l'inertie thermique et de la ventilation naturelle nocturne sur le comportement thermique .....                               | 54        |
| 3.4  | Conclusion .....  | 57        |
| <br>   |   |           |
| <b>Chapitre 4 - Impact du bioclimatisme et de solutions passives sur la performance thermique : Retour d'expérience sur une maison individuelle expérimentale bois-béton performante en climat méditerranéen</b> |   | <b>59</b> |
| 4.1  | Introduction.....   | 60        |
| 4.2  | Méthodologie .....  | 61        |
| 4.3  | Présentation du cas d'étude.....  | 61        |
| 4.3.1  | Conditions météo à Cadarache et sur la période étudiée .....  | 61        |
| 4.3.2  | Description de la maison .....  | 64        |
| 4.3.3  | Instrumentation mise en œuvre.....  | 65        |
| 4.3.4  | Scénarios mis en œuvre.....   | 67        |
| 4.3.5  | Modélisation numérique de la maison .....   | 69        |
| 4.4  | Résultats et discussions en période estivale .....  | 69        |
| 4.4.1  | Moteur principal de la ventilation naturelle nocturne et estimation du débit traversant.....  | 69        |
| 4.4.2  | Impact de la ventilation naturelle sur la température d'air intérieure (mesures) .....  | 70        |
| 4.4.3  | Couplage de l'inertie thermique et de la ventilation naturelle en période estivale (mesures).....   | 72        |
| 4.4.4  | Comparaison mesures / simulations .....   | 73        |
| 4.4.5  | Comparaison numérique de 3 scénarios d'ouverture / fermeture des ouvrants sur le comportement de la maison.....                                   | 74        |
| 4.5  | Résultats et discussions en période hivernale : Apports de l'inertie thermique en période hivernale – Mesures .....                               | 75        |
| 4.6  | Conclusion .....  | 76        |
| <br>   |   |           |
| <b>Chapitre 5 - Exploration d'une méthode pour évaluer la performance thermique intrinsèque d'une enveloppe en conditions estivales. Une première approche expérimentale .....</b>                               |   | <b>81</b> |
| 5.1  | Problématiques et enjeux d'une méthode en chauffage à une méthode en climatisation .....  | 82        |
| 5.1.1  | Passage d'une source d'énergie électrique à hydraulique .....   | 82        |
| 5.1.2  | D'un système de chauffage à un système de refroidissement.....  | 83        |
| 5.1.3  | La température extérieure équivalente .....   | 83        |
| 5.2  | Expérimentation à l'échelle d'un mètre cube .....   | 84        |
| 5.2.1  | Expérimentation à l'échelle du mètre cube dans la littérature : The Round Robin Box .....   | 85        |

|                   |  |            |
|-------------------|--|------------|
| 5.2.3             | Résultats .....  | 90         |
| 5.2.4             | Conclusion .....   | 93         |
| 5.3               | Expérimentation à l'échelle d'une cellule Passys .....   | 94         |
| 5.3.1             | Cas d'étude .....  | 94         |
| 5.3.2             | Modèles numériques.....  | 97         |
| 5.3.3             | Résultats .....  | 97         |
| 5.3.4             | Conclusion .....   | 100        |
| 5.4               | Vers une estimation du HTC à l'échelle d'une maison INCAS.....   | 101        |
| 5.4.1             | Description de la maison et des systèmes de refroidissement utilisés .....   | 101        |
| 5.4.2             | Dispositif expérimental.....   | 102        |
| 5.4.3             | Scénarios mis en œuvre au cours de l'été .....   | 103        |
| 5.4.4             | Résultats .....  | 103        |
| 5.5               | Conclusion .....   | 105        |
| <b>Chapitre 6</b> | <b>- Evaluation du potentiel d'une méthode de CO-COOLING par une approche numérique .....</b>                                | <b>107</b> |
| 6.1               | Préambule .....  | 108        |
| 6.2               | Méthodologie .....   | 108        |
| 6.2.1             | Approche globale.....  | 108        |
| 6.2.2             | Première étape : génération de jeux de données numériques .....  | 108        |
| 6.2.3             | Seconde étape : Calibration du HTC par régression linéaire .....   | 109        |
| 6.2.4             | Traitement des données.....  | 109        |
| 6.3               | Description des cas d'études .....   | 110        |
| 6.3.1             | Description des enveloppes simulées.....   | 110        |
| 6.3.3             | Données météo.....   | 111        |
| 6.4               | Résultats .....  | 113        |
| 6.4.1             | Valeurs de références .....  | 113        |
| 6.4.2             | Un premier résultat de co-cooling à Abu Dhabi .....  | 113        |
| 6.4.3             | Influence des conditions météorologiques et du modèle de régression sur les estimations HTC sous le climat d'Abu-Dhabi ..... | 115        |
| 6.4.4             | Influence des conditions météorologiques sur l'évaluation du HTC .....   | 116        |
| 6.4.5             | Influence de la performance de l'enveloppe sur l'évaluation du HTC.....  | 116        |
| 6.4.6             | Influence des conditions climatiques sur l'évaluation du HTC .....   | 117        |
| 6.5               | Discussions .....  | 119        |
| 6.5.1             | Limites de l'étude .....   | 119        |
| 6.5.2             | Pourquoi la régression linéaire simple avec $\Delta T_{eq}$ semble être l'approche la plus robuste ? .....                   | 119        |
| 6.5.3             | Impact des conditions climatiques sur le test de co-cooling .....  | 120        |
| 6.5.4             | Contraintes opérationnelles pour le déploiement d'une méthode de co-cooling .....  | 120        |
| 6.6               | Conclusion et perspectives .....   | 121        |
| 6.6.1             | Synthèse de l'étude numérique sur le co-cooling .....  | 121        |
| 6.6.2             | Perspectives à ces travaux exploratoires.....  | 121        |
|                   | <b>CONCLUSION &amp; PERSPECTIVES : Vers la garantie de performance des solutions passives .....</b>                          | <b>123</b> |
|                   | Synthèse des principaux enseignements des études présentées .....  | 123        |
|                   | Perspectives à ces travaux.....  | 124        |
|                   | <b>Références .....</b>  | <b>129</b> |
|                   | <b>ANNEXES .....</b>   | <b>139</b> |
|                   | <b>Annexe A Prérequis du dossier de soutenance d'un doctorat en VAE.....</b>   | <b>141</b> |
| A.1               | Etapes du doctorat en VAE .....  | 141        |
| A.2               | Prérequis du dossier de soutenance d'un doctorat en VAE .....  | 141        |



---

|                 |  |            |
|-----------------|--|------------|
| <b>Annexe B</b> | <b>Dossier de recevabilité .....</b>   | <b>143</b> |
| B.1             | Rapport d'activités de recherche et de production scientifique .....                   | 143        |
| B.2             | Encadrement .....  | 143        |
| B.3             | Enseignement / activités pédagogiques .....  | 144        |
| B.4             | Divers .....   | 145        |
| B.5             | Curriculum Vitae Court .....   | 147        |
| B.6             | Production scientifique : Liste classée des publications .....                         | 148        |
| B.6.1           | Publications dans des revues internationales à comité de lecture (A) .....             | 148        |
| B.6.2           | Chapitre de livre et Livre .....   | 149        |
| B.6.3           | Publications dans des congrès internationaux avec comité de lecture et actes (B) ..... | 149        |
| B.6.4           | Conférences Nationales .....   | 150        |
| B.6.5           | Workshop, Colloques, Séminaires, Conférences .....                                     | 151        |
| B.6.6           | Information Scientifique & Technique et Vulgarisation .....                            | 152        |
| B.6.7           | Liste Complète .....   | 152        |
| <b>Annexe C</b> | <b>Annexe du Chapitre 1 .....</b>  | <b>153</b> |
| C.1             | Définition du cas d'étude et du plan d'expérience numérique .....                      | 153        |
|                 | • Caractéristiques architecturales .....   | 153        |
|                 | • Composition des parois .....   | 155        |
| C.2             | Résultats - Inertie thermique et confort thermique estival .....                       | 164        |

# TABLE DES ILLUSTRATIONS

|  |    |
|--|----|
| Figure 1-1 - Vue d'ensemble des chapitres du manuscrit .....   | 3  |
| Figure 1-1 - Schéma des coefficients de performance de l'enveloppe des bâtiments, adaptée de (82) .....  | 21 |
| Figure 1-2 : Diagramme des différentes méthodes existantes de détermination du HTC d'un bâtiment à partir de mesures in-situ (Pacquaut 2021 adapté de Juricic et al 2021) .....      | 22 |
| Figure 1-3: Schéma du fonctionnement du test de co-heating .....   | 23 |
| Figure 1-4 - Schéma des régressions linéaires des équations (1.2) et (1.3) issue de (42).....  | 24 |
| Figure 1-5 : Processus de calibration (87) .....   | 25 |
| Figure 2-1 : Photo de la maison I-BB .....   | 28 |
| Figure 2-2 : Plans de la Maison I-DM (RDC à gauche, 1 <sup>er</sup> étage à droite).....   | 29 |
| Figure 2-3 - Vue 3D du modèle d'étude de la maison INCAS (à gauche : Façades Sud et Ouest, à droite : Façades Nord et Est).....  | 29 |
| Figure 2-4 : Comparaison Mesures simulations sur la maison I-DM (tirée de la thèse de C. Spitz).....   | 30 |
| Figure 2-5 : Climat caniculaire .....  | 33 |
| Figure 2-6 - Climats dits "classiques" .....   | 34 |
| Figure 2-7 : Impact de la sur-ventilation nocturne.....  | 35 |
| Figure 2-8 : Evolution de températures opératives au cours d'une journée – Climat océanique. Avec : cas 1 sans, cas 2 avec 1 vol/h et cas 3, 3 vo/h de sur-ventilation nocturne..... | 36 |
| Figure 2-9 : Evolution des températures (minimale et maximale) en période caniculaire.....   | 37 |
| Figure 2-10 : Impact de la non fermeture des volets roulants.....  | 37 |
| Figure 2-11 : Evolution de températures opératives au cours d'une journée – Climat continental. ...  | 38 |
| Figure 2-12 : Pourcentages d'heures d'inconfort fonction de la température – Climat continental. ..  | 39 |
| Figure 2-13 : Impact de la gestion des volets roulants en climat caniculaire .....   | 39 |
| Figure 2-14 : Impact de la quantité d'inertie en climat classique .....  | 40 |
| Figure 2-15 : Impact de la quantité d'inertie en climat caniculaire .....  | 40 |
| Figure 2-16 : °C.heures d'inconfort en fonction de la quantité d'inertie .....   | 41 |
| Figure 2-17 : Evolution des températures (minimale et maximale) en période caniculaire.....  | 42 |
| Figure 2-18 : Impact de la répartition de la masse.....  | 43 |
| Figure 3-1: Maisons INCAS .....  | 46 |
| Figure 3-2 : Méthodologie Comparaison Mesures / Simulations .....  | 47 |
| Figure 3-3: Fenêtre Oscillo-battante de la maison Ossature-bois (L-B), RDC paroi sud.....  | 48 |
| Figure 3-4 : Mesures de la station météo - du 25/08 au 05/09 .....   | 50 |
| Figure 3-5: H-A température d'air au RDC .....   | 50 |
| Figure 3-6 : Température d'air mesurées dans le séjour du 25/08 au 06/09 (Figure du haut) Zoom du 28/08 au 01/09 avec la météo (Figure du bas) .....                                 | 51 |
| Figure 3-7: Température d'air au RDC Maison à forte inertie.....   | 53 |
| Figure 3-8 : Température d'air au RDC Maison à faible inertie.....   | 53 |
| Figure 3-9 : Températures d'air simulées pour les 2 maisons.....   | 54 |
| Figure 3-10 : Température d'air simulées : L-A & H-A configuration.....  | 55 |
| Figure 3-11: Débit d'air simulé au RDC pour H-A-S, et vitesse du vent la nuit.....   | 55 |
| Figure 3-12: Impact de l'inertie thermique et de la ventilation naturelle sur le confort thermique....   | 56 |
| Figure 4-1 : A gauche, photo de la maison expérimentale, à droite volume d'air naturellement ventilé dans l'étude .....  | 60 |
| Figure 4-2 : Données météorologiques en 2016 à Saint-Paul-les-Durance .....  | 62 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure 4-3 : Données météo de la période estivale .....  | 63  |
| Figure 4-4 : Données météo de la séquence hivernale .....  | 63  |
| Figure 4-5 – Plans de la maison .....  | 65  |
| Figure 4-6 – Configuration de la ventilation naturelle et instrumentation associée .....   | 66  |
| Figure 4-7 : Capteurs intégrés dans la dalle du rez-de-chaussée .....  | 66  |
| Figure 4-8 – A gauche - Vitesse d’air au droit de la coupole en fonction de la vitesse de vent. A droite : Vitesse d’air au droit de la coupole en fonction de la différence de température entre l’ambiance intérieure et la température extérieure ..... | 70  |
| Figure 4-9 : Evolution de la température d'air du 11 au 16 août .....  | 71  |
| Figure 4-10: Amplitude journalière et maximum de température d’air pour les scénarios S3 et S4 ...   | 71  |
| Figure 4-11– Evolution de la température et du flux du 8 au 23/08/2016 .....   | 73  |
| Figure 4-12 – Conditions aux limites, charges internes, pilotage et comparaison des évolutions des températures mesurées et simulées .....   | 73  |
| Figure 4-13 – Test de plusieurs scénarios de pilotage (toujours ouvert ou fermé et programmation horaire) .....  | 74  |
| Figure 4-14 – Evolution de la température et des flux du 27/12/2016 au 01/01/2017 .....  | 75  |
| Figure 4-15 – Evolution de la température selon la profondeur de la dalle .....  | 76  |
| Figure 5-1 : Capteur SENS sur un trépied .....   | 83  |
| Figure 5-2 - Schéma électrique équivalent des transferts thermiques d’une paroi opaque schéma adapté de Bouchié R. 2014 .....  | 84  |
| Figure 5-3 – Schéma de la Round Robin Box .....  | 85  |
| Figure 5-4–Résultats sur les coefficients de déperditions surfaciques obtenus par différents participants. Résultats issues de l’Annexe 58 .....   | 85  |
| Figure 5-5. Cellule testée – vue extérieure à gauche, vue intérieure à droite .....  | 86  |
| Figure 5-6. Equipements thermique et hydraulique à l’extérieur de la cellule. ....   | 87  |
| Figure 5-7 – modèle RC utilise pour la calibration. ....   | 89  |
| Figure 5-8. Températures et flux de chaleur mesurées pour un scénario en froid, dt=5min. ....  | 90  |
| Figure 5-9. Comparaison entre la valeur simulée et la valeur mesurée. ....   | 91  |
| Figure 5-10. Vue d’ensemble des résultats. ....  | 92  |
| Figure 5-11. $HTC = f(dT_{air})$ . ....  | 92  |
| Figure 5-12. $HTC = f(abs(Tin_w - Taircellmean))$ . ....   | 93  |
| Figure 5-13 : Vue extérieure d’une cellule Passys .....  | 94  |
| Figure 5-14 : Echangeur de chaleur eau/air à l’intérieur de la cellule .....   | 95  |
| Figure 5-15 : Système de chauffage/refroidissement, à gauche: Génération – Bain thermostatique, à droite: Vue de l’intérieur de la cellule Passys .....  | 95  |
| Figure 5-16 : Résultats des tests avec chauffage électrique pour 2 modèles RC .....  | 98  |
| Figure 5-17 : Evolution de la puissance injectée et des températures .....   | 99  |
| Figure 5-18 - A droite le refroidisseur, à gauche le module des systèmes adjacent à la maison I-BB   | 102 |
| Figure 5-19 - Raccordement du refroidisseur au réseau hydraulique dans le vide sanitaire de la maison .....  | 102 |
| Figure 5-20 - Condensation au raccord entre le plus grand convecteur du salon et le réseau le 25/07/2022 où l'humidité relative avait temporairement augmenté jusqu'à 65% .....  | 103 |
| Figure 5-21 - Exemple disposition d’un ventilateur axial simple .....  | 104 |
| Figure 5-22 - Evolution des scénarios de brassage et de la puissance fonction du temps ; en haut la puissance de brassage, au milieu la puissance dissipée moyenne sur la période et en bas le gains de puissance .....                                    | 105 |
| Figure 6-1 – Méthodologie de l’approche numérique .....  | 108 |
| Figure 6-2 - Méthode de la fenêtre glissante .....   | 110 |

|   |     |
|---|-----|
| Figure 6-3 : Température extérieure (graphique du haut) et rayonnement solaire (graphique du bas) pour le climat de Chambéry du 1er janvier au 1 <sup>er</sup> mars. Trait plein – données horaires, points : moyenne journalière .....   | 112 |
| Figure 6-4 : Conditions météo du 1er juillet au 1er septembre pour les climats de Chambéry (haut), Nice (milieu) et Abu Dhabi (bas) .....   | 112 |
| Figure 6-5 – Evolution des conditions météo et de la puissance de froid absorbée pour un test de co-cooling à Abu Dhabi avec une consigne de température intérieure à 18°C .....  | 114 |
| Figure 6-6 - Régression linéaire pour le test de co-cooling de l'enveloppe IBB-47 à Abu Dhabi et une consigne $T_{int}=18^{\circ}\text{C}$ avec une régression linéaire simple avec en haut : $\Delta T_{eq}$ (S0Teq) , et en bas : simple $\Delta T$ (S0T) .....   | 114 |
| Figure 6-7 – Estimation de HTC pour des périodes glissantes de 21 jours pour différentes régressions linéaires pour le cas IBB-47, Abu-Dhabi, $T_{int}=18^{\circ}\text{C}$ , pour les mois de juillet et août .....   | 115 |
| Figure 6-8 – Écarts des HTC estimés avec la méthode S0Teq en fonction des gains solaires et de la différence de température de l'air $\Delta T_{moy}$ (gauche) et de la différence de température équivalente $\Delta T_{eq, moy}$ (droite), pour trois maisons IBB-47 (haut), IBB-100 (milieu) et IBB-282 (bas), sous les trois climats (Abu-Dhabi, Nice et Chambéry) et les 2 consignes de température (18°C, 20°C) ..... | 118 |
| Figure C-1 : Photo de la maison I-BB .....  | 153 |
| Figure C-2 : Plans de la Maison I-DM (RDC à gauche, 1 <sup>er</sup> étage à droite) .....   | 154 |
| Figure C-3 : Vue 3D du modèle d'étude de la maison INCAS (Façades Sud et Ouest) .....   | 155 |
| Figure C-4 : Vue 3D du modèle d'étude de la maison INCAS (Façades Nord et Est) .....  | 155 |
| Figure C-5 : Apports internes journaliers en occupation continue .....  | 156 |
| Figure C-6 : Apports internes journaliers en occupation intermittente.....  | 157 |
| Figure C-7 : Fonctionnement VMC double Flux - ByPass .....  | 157 |
| Figure C-8 : Météo semi-continentale - Zoom du 08 au 13/07 .....  | 162 |
| Figure C-9 : Météo continentale - Zoom du 06 au 11/08.....  | 162 |
| Figure C-10 : Climat océanique - Zoom du 15 au 20/08.....   | 163 |
| Figure C-11 : Climat méditerranéen - Zoom du 13 au 18/08 .....  | 163 |
| Figure C-12 : Impact de la sur-ventilation nocturne .....   | 164 |
| Figure C-13 : Evolution de températures opératives au cours d'une journée – Climat océanique....  | 165 |
| Figure C-14 : Pourcentages d'heures d'inconfort fonction de la température – Climat continental. 166  | 166 |
| Figure C-15 : Diagramme de Givoni – Climat méditerranéen. ....  | 166 |
| Figure C-16 : Evolution des températures (minimale et maximale) en période caniculaire.....   | 167 |
| Figure C-17 : Impact de la non fermeture des volets roulants.....   | 168 |
| Figure C-18 : Evolution de températures opératives au cours d'une journée – Climat continental. .   | 169 |
| Figure C-19 : Pourcentages d'heures d'inconfort fonction de la température – Climat continental. 169  | 169 |
| Figure C-20 : Impact de la gestion des volets roulants en climat caniculaire .....  | 170 |
| Figure C-21 : Impact de la quantité d'inertie en climat classique .....   | 171 |
| Figure C-22 : Impact de la quantité d'inertie en climat caniculaire .....   | 172 |
| Figure C-23 : °C.heures d'inconfort en fonction de la quantité d'inertie .....  | 173 |
| Figure C-24 : Pourcentages d'heures d'inconfort fonction de la température – Climat semi-continentale. ....   | 174 |
| Figure C-25 : Evolution de températures opératives au cours d'une journée – Climat méditerranéen. ....  | 174 |
| Figure C-26 : Diagramme de Givoni – Climat océanique.....   | 175 |
| Figure C-27 : Evolution des températures (minimale et maximale) en période caniculaire.....   | 176 |
| Figure C-28 : Impact de la répartition de la masse.....   | 177 |
| Figure C-29 : Evolution de températures opératives au cours d'une journée – Climat semi-continentale .....  | 178 |

---

|  |     |
|--|-----|
| Figure C-30 : Diagramme de Givoni – Climat continental .....   | 178 |
| Figure C-31 : Pourcentages d’heures d’inconfort fonction de la température – Climat semi-continental. .... | 179 |
| Figure C-32 : Evolution de températures opératives au cours d’une journée – Climat méditerranéen. ....     | 180 |
| Figure C-33 : Diagramme de Givoni – Climat continental. ....   | 180 |
| Figure C-34 : Evolution des températures (minimale et maximale) en période caniculaire.....                | 181 |

# TABLE DES TABLEAUX

|  |     |
|--|-----|
| Tableau 2-1 - Synthèse du plan d'expérience numérique.....   | 31  |
| Tableau 2-2 - Climats considérés.....  | 32  |
| Tableau 2-3- Jours caractéristiques choisis.....   | 33  |
| Tableau 2-4 : Configurations testées.....  | 38  |
| Tableau 2-5 : Configurations testées.....  | 41  |
| Tableau 3-1 - Définition des scénarios .....   | 48  |
| Tableau 3-2 - Scénarios appliqués.....   | 48  |
| Tableau 4-1: Synthèse des données météo estivales.....   | 62  |
| Tableau 4-2: Synthèse des données météo hivernales .....   | 63  |
| Tableau 4-3 : Séquence estivale .....  | 67  |
| Tableau 4-4: Séquence hivernale .....  | 68  |
| Tableau 5-1 – Capteurs mis en œuvre et leur position .....   | 87  |
| Tableau 5-2 – Scénarios mis en œuvre pour l’expérimentation à échelle 1m3.....   | 89  |
| Tableau 5-3 - Grandeurs mesurées et capteurs .....   | 96  |
| Tableau 5-4 - Mise en place des scénarios.....   | 97  |
| Tableau 5-5 - Résultats des tests hydrauliques pour le mode de chauffage et de refroidissement.....  | 99  |
| Tableau 6-1 - Modèles de régression linéaire utilisées.....  | 109 |
| Tableau 6-2 : Propriétés thermiques des 3 variantes d’enveloppe .....  | 110 |
| Tableau 6-3 - Données météo retenues pour le calcul de la méthode stationnaire .....   | 111 |
| Tableau 6-4 - Résumé des conditions météo pour les 4 climats étudiés .....   | 113 |
| Tableau 6-5 – HTC estimés avec la méthode stationnaire et les co-heating pour les 3 cas d’études   | 113 |
| Tableau 6-6 - Synthèse des estimations de HTC pour le cas IBB-47, Abu-Dhabi, Tint=18°C.....  | 115 |
| Tableau 6-7 - Synthèse des HTC estimés avec une régression linéaire simple et $\Delta T_{eq}$ (S0Teq) pour les 3 enveloppes, les 3 climats et 2 consignes de températures Tint. .... | 117 |
| Tableau C-0-1- Surfaces d'échanges (murs et planchers) .....   | 153 |
| Tableau C-0-2 - Surfaces d'échanges (parois vitrées) .....   | 154 |
| Tableau C-0-3 - Détails de la géométrie des fenêtres .....   | 155 |
| Tableau C-0-4 - Caractéristiques thermiques des fenêtres.....  | 155 |
| Tableau C-0-5 - Débits de ventilation.....   | 160 |
| Tableau C-0-6 - Caractéristiques des volets roulants.....  | 160 |
| Tableau C-0-7- températures de sol moyennes .....  | 161 |
| Tableau C-0-8 : Configurations testées .....   | 165 |
| Tableau C-0-9 : Configurations testées .....   | 168 |
| Tableau C-0-10 : Configurations testées .....  | 173 |
| Tableau C-0-11 : Configurations testées .....  | 177 |
| Tableau C-0-12 : Configurations testées .....  | 179 |

---

# GLOSSAIRE

|         |  |
|---------|--|
| ACV     | Analyse de Cycle de vie  |
| ANR     | Agence Nationale de la Recherche   |
| CEA     | Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives   |
| Cep     | Consommation d'Energie Primaire  |
| CFD/MFN | Computational Fluid Dynamic / Mécanique des fluides Numériques   |
| CVC     | Chauffage Ventilation Climatisation  |
| GES     | Gaz à Effet de Serre   |
| INCAS   | Instrumentation de Nouvelles Constructions à Architecture Solaire : maisons expérimentales à l'INES  |
| INES    | Institut National de l'Energie Solaire   |
| I-BB    | Maison INCAS en Béton Banché   |
| I-DM    | Maison INCAS en Double Mur   |
| I-MA    | Maison INCAS Mono-mur Aéro-gel   |
| I-OB    | Maison INCAS en Ossature Bois  |
| Ubât    | Coefficient moyen caractérisant les déperditions thermiques réelles d'un bâtiment par transmission à travers les parois et les baies (W/m <sup>2</sup> ) |
| HTC     | Heat Transfer Coefficient – Coefficient de déperditions thermiques de l'enveloppe (W/K)  |
| Htr     | Coefficient de déperditions par transmission d'une enveloppe (W/K)   |
| Hinf    | Coefficient de déperditions par les infiltrations (W/K)  |
| PME     | Petites et moyennes entreprises  |
| PRBS    | Pseudo Random Binary Sequence  |
| STD     | Simulation Thermique Dynamique   |
| VAE     | Validation des Acquis et de l'Expérience   |

# Introduction



---

# INTRODUCTION

## 1.1 Contexte et enjeux

Le secteur du bâtiment représentant en Europe 40% des consommations énergétiques et 36% des émissions de gaz à effet de serre, il est primordial de réduire ces besoins énergétiques pour réduire l'impact environnemental du secteur du bâtiment et espérer atteindre les objectifs de neutralité carbone visés par la commission européenne pour 2050.

D'importants efforts ont été consacrés à la réduction des besoins de chauffage ces dernières années dans cet objectif. Les projections mondiales prédisent cependant que les consommations de climatisations vont être supérieures aux consommations de chauffage. Deux phénomènes couplés peuvent l'expliquer : le réchauffement climatique d'une part et le nombre important de pays en voie de développement se situant entre les tropiques d'autre part. Ainsi, assurer le confort en climat chaud en minimisant les consommations énergétiques est l'un des défis du secteur du bâtiment pour espérer atteindre les objectifs fixés. Le bioclimatisme, qui vise à adapter l'architecture des bâtiments à son environnement et son usage est une des pistes pour réduire les consommations énergétiques en période estivale tout en maintenant un confort acceptable pour ses occupants. Mesurer la performance thermique de l'enveloppe des bâtiments est un autre enjeu important du secteur du bâtiment, sans quoi il est difficile de l'améliorer et de garantir l'impact des investissements réalisés. La garantie de performance en période estivale sera un second axe traité dans ce manuscrit.

## 1.2 Contenu du manuscrit

Ce manuscrit s'articule en 2 parties. Pour répondre aux spécificités d'un doctorat en VAE, dont les prérequis sont détaillés en Annexe A , la première partie décrit mon parcours professionnel et personnel de chercheur. Cette partie a pour objectifs de dégager les principaux axes de recherche auxquels j'ai contribué et d'en démontrer la cohérence. La seconde partie s'attache à détailler plus précisément une partie de mes travaux de recherches. Elle s'articulera en 6 chapitres traitant des problématiques du bioclimatisme et de la garantie de performance en conditions estivales. La Figure 1-1 illustre l'enchaînement entre ces différents chapitres qui croisent des approches expérimentales et numériques d'un part, et bioclimatisme et garantie de performance d'autre part. Le premier chapitre aura pour objectif d'introduire le contexte de ce travail au regard des travaux existants. Le chapitre 2 détaillera une étude numérique pour estimer l'influence de différents paramètres de solutions passives sur le comportement thermique d'une maison performante en période estivale sous différentes conditions climatiques. Le chapitre 3 enrichira cette étude numérique par une campagne expérimentale sur les maisons INCAS. Les effets croisés de la gestion des apports solaires, de la ventilation naturelle nocturne et de l'inertie thermique seront étudiés et une comparaison entre les mesures et des résultats de simulations complètera ce travail. Le chapitre 4 sera quant à lui dédié à un retour d'expérience d'une maison bois-béton en climat méditerranéen. Le chapitre 5 présentera des expérimentations réalisées à plusieurs échelles pour explorer une méthode de mesure de la performance thermique intrinsèque de l'enveloppe d'un bâtiment en période estivale. Le chapitre 6 détaillera quant à lui une étude numérique pour évaluer la faisabilité de la méthode du co-cooling. Enfin, la conclusion de ce manuscrit esquissera notamment des pistes de recherche avec d'une part la définition et la mesure d'indicateurs pour quantifier l'efficacité et l'impact de solutions passives pour améliorer le confort et la performance énergétique. Chaque chapitre débutera par un résumé de celui-ci et le contexte de réalisation des travaux ayant été, pour la plupart, réalisés en collaboration avec des collègues.

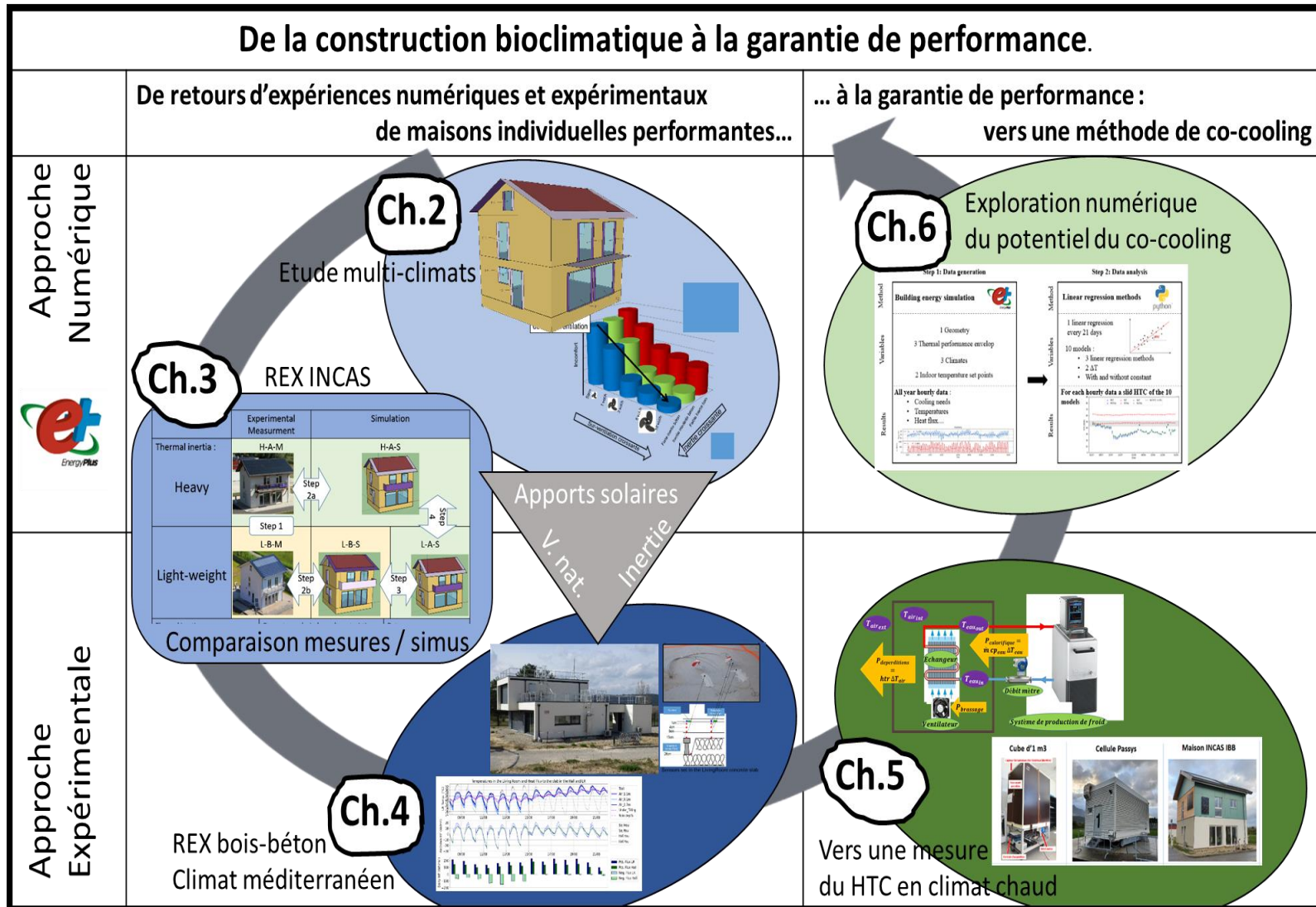


Figure 1-1 - Vue d'ensemble des chapitres du manuscrit



Partie I  
Présentation de mon parcours  
professionnel et personnel de chercheur



## 1. Introduction

Au cours de mon parcours professionnel, j'ai été amené à travailler sur de nombreux sujets. Ce travail de candidature à un doctorat en VAE m'aura permis de prendre du recul sur mes activités et de les structurer en grandes thématiques. Depuis mon intégration au CEA en 2009, mes travaux se sont focalisés sur la **sobriété et l'efficacité énergétique des bâtiments** et se sont plus particulièrement articulés autour de 4 grands axes :

- Premièrement, où je suis (l'INES) : **l'intégration de composants solaires**
- Deuxièmement, d'où je viens : des simulations en mécanique des fluides numériques (CFD / MFN)
- Troisièmement, mes terrains de jeu : la réalisation de **campagnes expérimentales pour valider des modèles numériques** afin d'améliorer la compréhension du comportement de composants ou de bâtiments avec un focus particulier sur l'inertie thermique.
- Quatrièmement, où je vais : la **garantie de performance énergétique**.

La suite de ce chapitre décrit les principaux travaux que j'ai réalisés sur ces 4 axes et essaie de mettre en lumière la cohérence et les interactions entre ces différentes thématiques. L'Partie I - Annexe B Annexe B reprend quant à elle le dossier de recevabilité rédigé dans la première étape de ce doctorat en VAE.

## 2. Intégration solaire

Ayant intégré le CEA à l'INES (Institut National de l'énergie Solaire) en 2009, j'ai pu travailler sur des problématiques d'intégration solaire et d'estimation de productibles PV sous différentes facettes. J'ai commencé par coordonner le projet **ANR COOLPV** pour lequel j'ai réalisé à la fois des simulations numériques thermo-aéraulique en CFD et des campagnes expérimentales pour quantifier le potentiel de **2 méthodes de rafraîchissement de panneaux photovoltaïques intégrés en toiture** : par **convection naturelle** en créant une lame d'air entre le panneau et l'isolant (1) (2) ou par **intégration d'un matériau à changement de phase** en face arrière du panneau (3) (4). Ces travaux sont décrits plus longuement dans les 2 sections suivantes dédiées à la simulation numérique CFD d'une part et aux campagnes expérimentales d'autre part. En parallèle de COOLPV, j'ai également contribué à d'autres projets collaboratifs comme Performance BIPV (5), Rezospring.

Dans le cadre d'une collaboration avec le cimentier VICAT, j'ai, de plus, été amené à creuser la question de l'intérêt du **couplage entre des modules PV et des produits cimentaires**. Ceci m'a amené à **piloter le montage du projet de recherche LIFE CONIPHER** visant au **développement de composant d'enveloppes pour la rénovation qui se voulait « Plug'n'Play » en assurant les fonctions d'isolation, de pare pluie et d'intégration ENR**.

Dans un autre registre, j'ai participé à l'amélioration d'un logiciel de simulation de centrales PV bifaciales avec comme contribution principale, l'élaboration de stratégies de passage d'une modélisation d'un sous-élément rectangle d'une centrale photovoltaïque bifaciale à une centrale avec un calepinage réel (non rectangle). Ceci implique la prise en compte des ombrages portés, différent selon les tables de modules. Sur la thématique des outils de simulation des productibles PV, j'ai pu participer au traitement de données d'un benchmark de différents outils réalisés dans le cadre du projet Européen SERENDI-PV (6) (7).

## 3. Simulations Thermo-aéraulique via la Mécanique des Fluides Numériques (MFN ou CFD) en Volumes Finis

Avant d'intégrer l'INES, j'ai débuté ma carrière en tant qu'**ingénieur étude et formateur « CFD »** chez **ANSYS-FLUENT**. J'ai pu y découvrir de nombreux secteurs d'activités allant de l'énergie (oil&gas, nucléaire, éolien) au secteur pharmaceutique en passant par le CVC, aussi bien pour des industriels

---

que pour des acteurs académiques. Dans le prolongement de mes 2 stages ingénieurs sur la thématique de la CFD dans des labos de recherches universitaires (UMIST – Manchester (Angleterre) et McMaster – Hamilton (Canada)), j’ai ainsi continué à découvrir le monde de la recherche en interagissant régulièrement avec des doctorants et des chercheurs. C’est donc tout naturellement, qu’après cette première expérience de 6 ans, j’ai continué à **valoriser et développer cette activité CFD en rejoignant le CEA en tant qu’ingénieur de recherche sur la thématique de l’énergétique bâtiment et de l’intégration solaire**. Mes activités de recherche dans ce domaine ont été multiples allant du composant bâtiment à la simulation thermo-aéroulque de grands volumes.

**A l’échelle composant**, deux études de recherche ont été réalisées. Premièrement, la **simulation d’un complexe de dalle active** dans le cadre du projet **FUI ACTIDALLE**, dont j’ai coordonné le montage. Ce projet visait à passer du concept de la dalle active à un produit industrialisé. L’un des enjeux a été d’intégrer différents éléments dans la dalle active avec d’une part l’intégration d’absorbeurs acoustiques en sous face de la dalle et d’autre part des goulottes pour faciliter le passage des fluides. Ces deux éléments ont l’inconvénient de limiter les transferts thermiques et donc de réduire la performance thermique de la dalle active. L’enjeu des simulations CFD a donc été d’aider à la conception de la dalle active en **quantifiant l’impact thermique des nombreuses configurations** imaginées par le consortium et de **définir des gardes fous** dans cette conception.

Deuxièmement, sur la thématique de **l’intégration solaire**, des simulations ont été réalisées dans le cadre du projet **ANR CoolPV (2008-2011)**. Ce projet visait à **développer et tester des méthodes innovantes pour limiter la hausse de température des modules PV** intégrés en toiture. J’ai simulé les 2 concepts testés au cours du projet à savoir **l’intégration de matériaux à changement de phase** dans un nid d’abeille en aluminium collé sur la face arrière d’un module PV ainsi que le **rafraîchissement par convection naturelle** d’une lame d’air créée entre les modules PV et l’isolation de la toiture. Ces simulations ont permis de tester différents modèles à la fois pour simuler le changement de phase (propriétés variables du Cp, modèle de solidification/melting avec la constante de Marangoni) et pour la convection naturelle via un couplage entre le modèle de Boussinesq et le modèle de rayonnement Surface à Surface (S2S)

La troisième étude CFD concerne également la **convection naturelle** et a été réalisée dans le cadre du **Benchmark ADNBATI, dans une pièce d’habitation (Programme Interdisciplinaire Énergie du CNRS (projet ADNBATI #PE09-3.2.1-1))**. L’objectif de cette étude était de comparer différents codes de calculs qu’ils soient commerciaux ou « maison » et de comparer le **confort thermique** via le champ de température et profil de vitesses dans une chambre de l’Institut d’Etude Scientifique de Cargèse pour lequel une série de mesures était disponible. J’ai pu participer dans le cadre de ce benchmark à la **définition des hypothèses communes de simulation**, la réalisation des simulations avec le logiciel Ansys-Fluent et la comparaison des résultats. Cette étude a permis de questionner notamment le choix des conditions aux limites d’une telle simulation : où mettre les frontières du domaine simulé (entrées/sorties de la chambre ou mailler autour du logement), le type de conditions aux limites considérées (Neuman, Dirichlet ou mixte) comme cela est possible avec le logiciel Ansys-Fluent. Plusieurs communications scientifiques ont été réalisées à l’issue de ce travail collaboratif (8) (9) (10) (11)

La quatrième étude réalisée concerne également le **confort**, mais avec une application bien différente : un **hangar d’élevage de canard**, pour lequel la notion de confort est également une question de rentabilité. **Les verrous** pour cette étude ont été multiples : **la taille du domaine à simuler** avec une géométrie de plusieurs dizaines de mètres de long, l’intégration des ventilateurs tout au long des cages, et la **modélisation des canards** ayant un double impact sur l’écoulement : de par leur

« géométrie » obstruant l'écoulement selon leur densité, et leur dégagement de chaleur à prendre en compte.

Enfin, la dernière étude présentée ici est également liée au **confort dans un grand volume**, mais de retour avec des humains et consiste à simuler la **performance d'un système de ventilation par déplacement d'air d'un atelier de tôlerie** dans lequel de nombreuses sources de polluants et de chaleurs sont présentes. L'enjeu est de **fournir la meilleure qualité d'air pour préserver la santé des opérateurs tout en maîtrisant l'énergie nécessaire à la ventilation** (électricité pour les ventilateurs et pré-chauffage de l'air). L'objectif étant de diviser par 2 les consommations d'énergie sans dégrader la qualité de l'air des occupants, différentes voies d'améliorations ont été explorées. Le premier enjeu a été de **trouver une configuration de référence** représentative d'un atelier « type », sachant que chaque atelier à travers le monde est unique, et qu'il n'y a pas de trame précise au sein même d'un atelier. Le second enjeu était de retenir les phénomènes physiques à simuler : thermique - dégagements de chaleurs nombreux mais mal quantifiés avec des systèmes de refroidissement spécifiques sur des pinces de soudure, impact de la convection naturelle, du rayonnement, variabilité des sources de polluants à prendre en compte et des climats très variés.

Dans ces différentes études, la CFD a été utilisée au service de la compréhension et quantification des phénomènes physiques, principalement thermo-aérauliques, de « systèmes » innovants en cours de développement.

#### 4. Vers une comparaison mesures / simulations : Définition, mise en œuvre et traitement de données de campagnes expérimentales.

Après une première expérience de 6 ans dédiée à la simulation, et à demander dans le cadre de mes fonctions d'ingénieur support aux utilisateurs Fluent si ils avaient des données expérimentales pour valider leurs modèles, j'ai eu la chance de contribuer directement à la définition et la mise en œuvre de campagnes expérimentales. Cela avait pour objectif d'une part de qualifier et quantifier l'efficacité des technologies développées / testées et de comparer et « valider » les modèles numériques, qu'ils soient CFD/MFN ou STD. Tout comme pour la CFD, ces campagnes expérimentales ont été réalisées à différentes échelles : du composant au bâtiment.

La première campagne expérimentale à laquelle j'ai participé a été réalisée dans le cadre du projet ANR CoolPV. Celle-ci a consisté à mettre **en œuvre des matériaux à changement de phase dans des nids d'abeilles en aluminium et intégrés en face arrière de modules PV**. L'efficacité de ces composants a été testée dans un premier temps **sous le banc d'ensoleillement artificiel** du CEA puis, dans un second temps, **en conditions extérieures**. Ces mesures ont permis de **comparer plusieurs matériaux** à changement de phase pour en mesurer la pertinence et ont également été utilisés pour **valider les modèles numériques** et caler certains paramètres inconnus.

Ensuite, j'ai piloté et participé à une série de campagnes expérimentales pour mieux **appréhender et quantifier l'impact de l'inertie thermique** sur le confort thermique et les consommations énergétiques d'une maison performante. **A l'échelle composant, des mini-dalles** (~40cm de côté) en béton instrumentées avec des thermocouples et des fluxmètres ont été réalisées avec 2 épaisseurs (4 et 20 cm) et plusieurs revêtements de sol (Sans, Carrelage, lino et parquet). Ces mini dalles ont été placées derrière une baie vitrée orientée au sud, et sous le banc d'ensoleillement artificiel afin de quantifier l'énergie captée et relâchée par ces dalles en fonction de leur épaisseur et de leur revêtement de sol. Il a pu être montré que le lino n'a que peu d'impact sur le transfert dans la dalle alors que le parquet réduit le stockage d'énergie par environ un facteur 2 (12). L'impact de la tâche solaire sur le stockage/restitution d'énergie d'une dalle béton a ensuite été étudié **à l'échelle d'une pièce** en intégrant des fluxmètres et des thermocouples entre le lino et une dalle béton dans une chambre



---

d'une maison INCAS (très performante) possédant une baie vitrée orientée au sud. Une expérimentation similaire a ensuite été déployée à **l'échelle d'une maison** en phase de construction de la maison Trecadbat à Cadarache. Cette maison aura la spécificité d'avoir un « Cœur-béton » (forte inertie) et un rideau isolant (faible inertie). Cela a permis d'instrumenter à différents points de l'épaisseur de la dalle. L'objectif était de **quantifier l'énergie stockée par la dalle sur différentes journées et de comparer ces données avec un modèle de type STD pour faire des bilans annuels** avec un focus sur l'énergie stockée et restituée par la dalle en béton. Le maillage horizontal mis en œuvre a également permis de quantifier l'impact de la tâche solaire en fonction des saisons et de la hauteur du soleil, impliquant une pénétration des apports directs du soleil sur une surface plus ou moins grande dans la maison (13). Cette étude sera l'objet du Chapitre 3. Le **couplage de l'inertie thermique à la ventilation naturelle** a également été étudié via différentes campagnes expérimentales à l'échelle de la maison individuelle (14) (15). Deux étés successifs (2013 et 2014), les 4 maisons expérimentales INCAS de l'INES ont été utilisées en parallèle afin de quantifier l'impact du couplage entre l'inertie thermique et la ventilation naturelle nocturne. Ces 4 maisons présentent des systèmes constructifs différents et donc des inerties thermiques différentes. Les 4 maisons ne possédant pas exactement la même géométrie et les mêmes performances par composants (R de paroi et surfaces de vitrages différents), une comparaison directe n'a pas pu être possible. En effet, une plus petite surface vitrée couplée à un triple vitrage (moins transparent que le double des autres maisons), les apports solaires directs dans la maison I-OB (à ossature bois) étaient jusqu'à 50% inférieurs par rapport aux autres maisons au mois d'août. Une étude numérique a donc été mise en œuvre, pour valider les modèles numériques via une description fidèle des maisons telles que réalisées avant de ne s'affranchir dans un second temps des différences autres que celles provenant des systèmes constructifs (essentiellement sur les menuiseries, surfaces vitrées et Ug) (15). Cette étude sera l'objet du Chapitre 4

Toujours dans cette optique d'améliorer la compréhension de la physique du bâtiment sur l'inertie thermique, j'ai également contribué à la conception et au suivi d'une campagne expérimentale dans le cadre du projet **FUI Actidalle** où une dalle active a été mise en œuvre entre 2 cellules (l'une au-dessus de l'autre) de l'outil d'expérimentation FACT de l'INES.

J'ai également participé à un projet sur les **transferts thermo-hydriques dans le béton de chanvre** dans lequel j'ai été amené à participer à la conception et au suivi d'une campagne expérimentale d'une paroi en béton de chanvre intégré dans une cellule Passys. Les données générées ont notamment été utilisées en comparaison des données issues de simulation (que ce soit via des éléments finis avec l'outil Comsol, ou via le logiciel Wufi) (16) (17) (18) (19) (20)

Ces différents travaux liant matériaux cimentaires et performance énergétique m'ont amené à co-organiser une session dédiée à ce sujet à la conférence Advanced Building Skins 2017 à Bern (21) (22) (23).

## 5. Vers la garantie de Performance énergétique

Depuis quelques années, plusieurs de mes travaux portent sur la mesure et la garantie de performance avec deux grandes familles de recherche. Premièrement j'ai suivi des travaux de doctorants sur les thématiques des **analyses de sensibilité, des propagations d'incertitude et d'optimisation** (24) (25) (26) dont le but étaient de mieux faire ressortir les notions d'incertitudes dans les simulations. Deuxièmement, j'ai réalisé plusieurs campagnes expérimentales en support du développement de **méthodes de caractérisation de la performance thermique intrinsèque de l'enveloppe d'un bâtiment**.

Le premier volet des travaux auquel j'ai contribué sur la garantie de performance s'est porté sur **la simulation numérique (27) pour en améliorer la fiabilité et mieux prendre en compte les incertitudes** qu'elles soient statiques comme les propriétés des matériaux, ou dynamiques comme la météo. Ces travaux ont été effectués essentiellement à travers ma participation au projet ANR FIABILITE et au co-encadrement des thèses de Clara SPITZ (28) et de Ana-Maria Stefanou (29) (30) (31) (32)

Le second volet se focalise sur la mesure de **la performance intrinsèque de l'enveloppe (33) (34)** d'un bâtiment. Ces travaux ont été réalisés en partie dans le cadre du projet collaboratif SEREINE du programme PROFEEL. Le volet enveloppe de ce projet a pour objectif de développer une méthode opérationnelle d'évaluation de la performance thermique de l'enveloppe du bâtiment à réception de travaux de rénovation et d'achèvement de la construction (35) (36). Par méthode opérationnelle, est entendu facile à mettre en œuvre et avec un temps d'immobilisation du bâtiment le plus faible possible. Ma contribution s'est portée sur la réalisation de **plusieurs campagnes expérimentales pour mieux appréhender le domaine de validité et les limites des méthodes développées (37)**. J'ai pu superviser la réalisation d'une centaine d'essais SEREINE dans les maisons INCAS pour tester différentes méthodes développées par les partenaires du projet (37), tester la reproductibilité des méthodes sous différentes conditions météo, différents systèmes constructifs pour une même méthode. La robustesse du matériel a également été éprouvée. Ensuite, j'ai mis en œuvre 3 campagnes expérimentales spécifiques. Pour la première réalisée en parallèle d'essais SEREINE, un complément d'instrumentation a été mis en œuvre pour **quantifier l'impact de l'hétérogénéité des températures d'air au sein d'une pièce ou d'une maison sur la valeur du HTC (Heat Loss Coefficient) obtenu**. La seconde campagne expérimentale a eu pour objectif de tester l'impact de **l'hétérogénéité des flux thermiques à travers les parois**. Dans le cas de logements mitoyens, il est nécessaire de quantifier les flux de chaleurs avec les voisins pour extraire la partie des déperditions qui vont vers l'extérieur du bâtiment. Lorsqu'il n'est pas possible de placer un capteur de température dans les pièces adjacentes, une méthode, dite directe, de mesure du flux thermique peut être envisagée. Cependant, une paroi ou un plancher n'est pas forcément homogène et la position du fluxmètre peut donc impacter celle-ci. L'objectif de cette campagne de mesure a donc été de qualifier dans quel cadre la mesure de flux à travers une surface peut être utile pour la méthode SEREINE. Enfin la troisième campagne expérimentale menée au cours du projet SEREINE a été de **quantifier de façon dynamique le taux d'infiltration** d'air dans une maison expérimentale au cours d'un essai SEREINE en couplant cet essai à une **méthode de gaz traceur**. Différents modèles d'évaluations du taux d'infiltration ont ensuite pu être comparés (règle du pouce, modèle LBNL, modèle ISO ...) (38).

En parallèle du projet SEREINE j'ai initié un projet interne pour développer et tester une **méthode de caractérisation de la performance de l'enveloppe via une méthode de refroidissement** et non de chauffage. Une première étape a consisté à réaliser des essais de caractérisation d'une boîte à l'échelle de  $1\text{m}^3$  en conditions maîtrisées et stables (boîte dans une pièce). Le froid a été généré via un échangeur hydraulique alimenté en froid via un bain thermostaté. Les premiers résultats prometteurs (comparable avec une méthode classique en chaud avec un système électrique) (39), (34) nous ont amené à tester la méthode à une échelle supérieure dans une cellule Passys ( $\sim 40\text{m}^3$ ) en conditions extérieures. De nouveaux verrous ont dû être levés lors de cette étude. Les résultats encourageants nous ont poussé à continuer l'aventure pour passer à l'échelle d'une maison individuelle (40), (41). Les conditions météo n'ont pas été suffisamment chaudes pour avoir des résultats interprétables lors de ces expériences. Ces études expérimentales feront l'objet du Chapitre 5 Et enfin pour compléter ces 3 stages expérimentaux, un stage numérique a été réalisé pour explorer la faisabilité d'une méthode de co-cooling (42) (Chapitre 6) et devrait aboutir à une publication supplémentaire en cours de « review » sur l'extension du domaine de validité du co-heating (43).

---

D'un point de vue plus applicatif, j'ai pu contribuer à la définition d'un contrat de performance énergétique dans le cadre du projet ESOPE visant à adapter le concept EnergiSprong au contexte local Rhone-alpin avec un groupement de PME régionales s'appuyant sur le retour d'expérience de la mise en œuvre sur une maison expérimentale INCAS (44).

Au cours de ces 14 années à l'INES, j'ai pu aborder d'autres sujets en lien avec l'efficacité énergétique des bâtiments et la production d'énergie solaire : Le confort et la Qualité des Environnements intérieurs (45), (46) (47) la prise en compte de l'utilisateur comme acteur ou bien le data mining (48) (49). L'ensemble des publications auxquelles j'ai contribué est listé en début de la section références et est classé page 148.

La seconde partie de ce manuscrit revient sur un format plus classique avec un focus détaillé sur une partie des travaux de recherche auquel j'ai contribué.

## Partie II

# De la construction bioclimatique à la garantie de performance

Retours d'expériences et simulations numériques en  
conditions estivales.



# Chapitre 1 - Bioclimatisme et mesure de la performance thermique – état de l’art

## **Résumé :**

Ce premier chapitre vise à introduire l’état de l’art des deux principaux axes de recherche qui vont être abordés dans ce manuscrit. En préambule, l’impact grandissant du confort thermique en période estivale au regard des enjeux de l’énergétique du bâtiment est introduit. Le second paragraphe met succinctement en perspective les évolutions des habitudes et exigences de construction liées au bioclimatisme, au contexte géopolitique et environnemental et aux capacités de simulation numériques. Le focus est ensuite mis sur les travaux scientifiques menés sur la thématique du bioclimatisme et des solutions passives. De nombreux articles portent sur des résultats de simulation mais peu avec des mesures, et encore moins couplant ventilation naturelle, contrôle solaire et inertie thermique. Une grande partie de ces études montre l’intérêt des solutions passives pour assurer la performance et le confort des bâtiments, d’autres en montrent les limites sous certaines conditions. Il en ressort bien que les conditions climatiques et l’usage prévu ou réel du bâtiment impactent fortement les conclusions. Ceci abouti à la première question scientifique de ce manuscrit portant sur la pertinence du bioclimatisme pour les maisons performantes. En effet, les solutions passives historiquement utilisées sur des bâtiments pas ou peu performants sont-elles toujours efficaces pour répondre aux spécificités des nouvelles exigences de construction ou doivent-elles être adaptées ? Une meilleure compréhension du comportement thermique des bâtiments peuvent être valorisées à la fois pour la phase de conception mais aussi en usage pour le « pilotage » du bâtiment. Cependant, il n’est pas suffisant de bien concevoir un bâtiment ni de bien le piloter pour que sa consommation d’énergie et son confort soit réellement à l’objectif. La dernière partie de l’état de l’art est donc consacrée à la garantie de performance énergétique et plus particulièrement à la mesure de la performance thermique intrinsèque de l’enveloppe d’un bâtiment. L’état des lieux des méthodes existantes est dressé et montre l’utilisation systématique de chauffage qui limite la période d’utilisation de ces méthodes lors des périodes chaudes. La seconde question scientifique soulevée porte donc sur la manière de s’affranchir de ce verrou en explorant une méthode en climatisant en lieu et place du chauffage et ainsi permettre la réalisation de ces mesures sur un nouveau panel de conditions météorologiques.

Le secteur du bâtiment représentant en Europe 40% des consommations énergétiques et 36% des émissions de gaz à effet de serre (50), il est primordial de réduire ces besoins énergétiques pour réduire l'impact environnemental du secteur du bâtiment sur le réchauffement climatique et espérer atteindre les objectifs de neutralité carbone visés par la commission européenne pour 2050 (51).

### 1.1 Impact grandissant du confort thermique en période estivale au regard des enjeux de l'énergétique du bâtiment

Que l'on parle de changement, de dérèglement ou de réchauffement climatique, selon les phénomènes que l'on veut mettre en avant, une hausse globale des températures moyennes sur le globe fait aujourd'hui consensus avec des projections à +1.5, +2°C qu'il semble aujourd'hui difficile à ne pas dépasser. A ce réchauffement global vient s'ajouter la notion de changement et de dérèglement avec des phénomènes extraordinaires plus intenses et plus long, comme par exemple la canicule atteinte en 2022 dans une grande partie de l'Europe ou encore les dômes de chaleur au Canada en 2021. Hors du contexte de la France métropolitaine, où la problématique du confort d'été est déjà grandissante, le problème est d'autant plus important avec une prévision des besoins de climatisation mondiale dépassant les besoins en chauffage (52). Outre l'impact du changement climatique sur l'augmentation des consommations en climatisation, de nombreux pays en voie de développement se situent entre les tropiques où les problématiques de climatisations sont prédominants à contrario des besoins de chauffage qui sont moindres voire inexistantes. Ces pays en voie de développement sont amenés à avoir des besoins d'énergie en forte croissance au fil de leur développement.

Ces changements liés au climat sont donc à prendre en compte pour le secteur du bâtiment. Les premières réglementations énergétiques en France se sont principalement focalisés sur la réduction des consommations pour le chauffage. La prise en compte du confort thermique, notamment estival et de l'impact environnemental prennent une place grandissante dans les dernières réglementations avec toute la difficulté méthodologique que cela représente. Dans un système complètement contrôlé par la climatisation, le parallèle avec le chauffage peut être réalisé si on fixe une consigne de température de climatisation réglementaire. Outre le fait que les systèmes de climatisation actifs sont sources de consommations supplémentaires, ils utilisent des fluides frigorigènes à fort pouvoir en GES (Gaz à Effet de Serre) et contribuent à accentuer les problématiques d'ilots de chaleur urbains. Bien que d'importants progrès ont été fait sur ces derniers fluides frigorigènes, la volonté des pouvoirs publics est logiquement de vouloir limiter le recours à la climatisation notamment dans les zones climatiques les moins critiques pour le résidentiel. Des indicateurs autres qu'une mesure de la consommation d'énergie seule et prenant en compte l'impact environnemental et la notion de confort ou la limitation d'un inconfort ont donc été introduits.

### 1.2 Bioclimatisme, énergies fossiles et simulations numériques : destins croisés

Depuis la nuit des temps, l'enveloppe d'un habitat a eu pour objectif premier de protéger ses occupants de son environnement extérieur, que ce soit d'agressions de ses congénères ou d'autres espèces animales, mais aussi des conditions climatiques qui peuvent être plus ou moins hostiles selon les régions et ainsi assurer un confort et une sérénité à ses occupants. Pour cela, les hommes et les femmes ont très longtemps pris en compte les spécificités locales de leur environnement dans leur façon de construire leur habitat pour valoriser au mieux les ressources naturelles proches, se protéger des conditions extrêmes pour s'assurer un confort. Cette approche a été théorisée dans la notion de bioclimatisme(53). Le bioclimatisme vise à concevoir et construire des bâtiments en prenant en compte au mieux son environnement pour minimiser les besoins énergétiques tout en garantissant le confort des occupants. Cette adaptation au contexte climatique local a très longtemps façonné l'architecture à travers le monde. Cette adaptation s'est fortement réduite avec l'avènement des énergies fossiles et des systèmes CVC actifs qui ont permis de garantir un confort aux occupants sans

qu'il soit nécessaire de prendre en compte les spécificités de l'environnement local dans la conception. Une plus grande homogénéité des constructions est apparue à cette époque. Dans les climats tempérés, où la problématique du chauffage était importante, les fortes augmentations du coût de l'énergie suite aux différents chocs pétroliers ont incité à isoler de plus en plus les bâtiments pour réduire ces besoins de chauffage. L'isolation est alors devenue le paramètre prépondérant de conception. Le concept de Passiv-Haus est apparu dans la continuité. Il vise à réduire au minimum les besoins énergétiques de l'enveloppe du bâtiment en s'appuyant notamment sur 3 piliers, l'isolation, l'étanchéité à l'air de l'enveloppe et la ventilation mécanique double flux. Le réchauffement climatique des dernières années a fait croître les problématiques de confort d'été et d'impact environnemental. Pour le confort d'été l'isolation et l'étanchéité à l'air ne sont plus suffisants pour répondre aux enjeux. La problématique de l'empreinte carbone questionne l'utilisation de toujours plus de matériaux comme l'isolation : quel gain d'énergie et environnemental en usage versus le poids d'énergie grise et d'impact environnemental de fabrication de ces matériaux.

Ces évolutions ont été suivies par la montée en puissance des outils de simulation. Avec l'importance croissante de l'isolation, des premières approches statiques ou quasi statiques sont apparues pour dimensionner ou prendre en compte l'isolation de l'enveloppe en fonction d'une valeur climatique intégrée sur l'année comme le nombre de degrés jours unifiés. Puis des approches dynamiques se sont démocratisées, principalement tournées sur le calcul des besoins de chauffage dans un premier temps, mais intégrant l'impact des apports solaires, de l'environnement proche, de la gestion du bâtiment et de son occupation pour intégrer également aujourd'hui les problématiques de confort d'été, de ventilation naturelle. Pour traiter les problématiques d'impact environnemental, les études de simulation thermique dynamique ont été complétées par des analyses de cycles de vie. Le bioclimatisme reprend ainsi une part croissante en conception grâce à l'accroissement des capacités de calculs.

### 1.3 Bioclimatisme et solutions passives des bâtiments performants

La valorisation des solutions passives pour apporter du confort est une partie intégrante de l'approche du bioclimatisme (54). Roulet définit dans (54) les solutions passives comme des éléments de constructions et d'architecture qui fournissent naturellement une meilleure qualité des environnements intérieurs sans ou avec beaucoup moins de consommations énergétiques. Roulet introduit également 5 types de solutions passives : l'isolation thermique, les protections solaires, la valorisation des apports solaires, la ventilation et l'inertie thermique. Il met de plus en avant l'importance et l'intérêt de coupler ces solutions passives entre elles, tout comme Poritt & al dans (55). Dans ce manuscrit, nous retiendrons la définition de Roulet de solutions passives qui vient plus en opposition aux systèmes dits « actifs » qu'au terme passif lui-même. Les systèmes actifs désignent les équipements CVC nécessitant une source d'énergie importante pour apporter de la chaleur ou du froid au bâtiment. A noter donc que les solutions passives peuvent être pilotées comme par exemple les volets roulants pour la gestion des apports solaires et nécessiter de l'électricité comme la ventilation, mais à une échelle moindre que les systèmes actifs classiques. Concernant le rafraîchissement en période estivale, Perez recense dans (56) 12 solutions de rafraîchissement pour les logements, 3 systèmes actifs et 9 solutions passives. Il conclut que les solutions passives permettent d'apporter dans de nombreux cas le confort à moindre coût énergétique.

#### 1.3.1 Le bioclimatisme, une approche régionaliste

Le bioclimatisme est une approche régionaliste, c'est-à-dire que les conditions climatiques et l'environnement du site où est construit le bâtiment sont une des composantes clés à prendre en compte. Les besoins sont très différents selon les climats (54). En France, dans les climats méditerranéen et semi-continentale qui présentent la spécificité d'avoir un hiver plutôt doux, et présente des étés plutôt chauds et secs(57), les problématiques de confort d'été sont importantes sans



pour autant annuler celles liées aux consommations énergétiques pour assurer le confort en hiver. Dans ces régions, les 5 composantes passives mentionnées par Roulet dans (54) sont à prendre en compte. L'isolation thermique pour se protéger des températures les plus chaudes et les plus froides, la gestion des apports solaires pour limiter les surchauffes, la valorisation des apports solaires en hiver pour réduire les besoins de chauffage, la ventilation naturelle en été pour évacuer les excédents de chaleur quand cela est opportun ou apporter un gain en confort de par la vitesse d'air engendrée, et enfin l'inertie thermique. Les conditions climatiques estivales dans ces climats ont conduit à construire des maisons se protégeant des apports solaires en diminuant la taille des surfaces vitrées sur les surfaces soumis au rayonnement solaire.

### 1.3.2 Gestion des apports solaires et apports internes

Une gestion des apports solaires peut permettre de conserver des ouvertures sur les surfaces ensoleillées pour profiter d'un meilleur éclairage naturel d'une part et de profiter des apports solaires « gratuits » en hiver ou à mi-saison lorsque des besoins de chauffage apparaissent. Cela peut prendre plusieurs formes, d'abord par la végétation caduque ou des « casquettes » fixes sur les faces sud, puis par des systèmes mobiles types volets roulants ou brises soleil orientables. La gestion des apports solaires en été ne suffit cependant pas à garantir le confort même dans des maisons bien isolées. En effet, les occupants génèrent de la chaleur par leur métabolisme et par l'ensemble des équipements électriques présents dans les bâtiments qu'il est nécessaire d'évacuer pour conserver un confort en été et éviter l'effet « Thermos ». De plus, pour assurer une bonne qualité de l'air et ne pas dégrader le bâti du fait de potentielles pathologies liées à l'humidité, des systèmes de ventilation ont été mis en place. Ceux-ci sont source de chaleur lorsque la température d'air extérieur est supérieure à la température d'air intérieur, spécialement en journée. L'utilisation de la ventilation mécanique double flux permet de réduire ces apports. De plus, lorsque les nuits sont suffisamment fraîches, la ventilation nocturne présente un fort potentiel pour rafraîchir le bâtiment (58). La ventilation nocturne naturelle ou mécanique est d'autant plus efficace quand elle est couplée à une inertie thermique du bâtiment qui permettra ainsi de capter une partie du surplus de chaleur la journée et l'évacuer la nuit.

Dans la suite de cette section sont présentés des articles montrant l'importance de ces solutions passives. Outre la gestion des apports solaires évoquée précédemment, le rôle de l'isolation, de la ventilation naturelle et de l'inertie thermique (59) et(60) sont décrits dans la suite.

### 1.3.3 Isolation et bioclimatisme

Bien que l'isolation soit parfois ciblée comme une source de surchauffe estivale supplémentaire, comme reporté dans (61), plusieurs études dont (62) montrent que les raisons de cette surchauffe sont plus liées à des paramètres autres que l'isolation, comme la gestion et les habitudes des occupants. Fosas & al dans (61) concluent à travers une large étude paramétrique de simulations que l'isolation est, dans une large majorité de cas, bénéfique sur le confort estival. En effet, associée à la ventilation, l'isolation thermique permet de limiter les apports de chaleur par conduction à travers l'enveloppe en journée, et la ventilation naturelle nocturne permet d'évacuer les gains internes accumulés en journée plus efficacement que par les déperditions par conduction d'une enveloppe peu isolée.

### 1.3.4 Ventilation nocturne

Plusieurs études montrent l'intérêt de la ventilation nocturne comme dans (63). Kuczyński et al mettent en avant dans (64) que la ventilation nocturne et les protections solaires sont les solutions passives les plus utilisées pour protéger les bâtiments des surchauffes en période estivale et que l'inertie thermique est également recommandée. Il en est de même pour Oropeza-Perez qui a mené dans (56) une revue des méthodes de rafraîchissement actives et passives avec comme cas d'étude le logement au Mexique. Il conclut que la gestion des apports solaires et la ventilation naturelle nocturne font partie des méthodes passives parmi les plus efficaces. D'autre part, de nombreuses études

montrent l'intérêt du couplage entre la ventilation naturelle nocturne et l'inertie thermique (65), (59), (66), (67), (68). D'autres montrent l'intérêt d'un couplage entre la gestion des apports solaires et l'inertie thermique (69).

Calama-Gonzalez & al étudient dans (70) l'impact de différents scénarios de ventilation pour des futurs scénarios en climat méditerranéen prenant en compte le changement climatique par une approche couplée de simulation et de mesures. La ventilation naturelle ressort comme avantageuse par rapport à la ventilation mécanique pour des bâtiments à faibles inerties. Rodrigues et al mettent en avant dans (57) l'intérêt de l'inertie thermique dans la région méditerranéenne. Ils précisent cependant que cela ne fait pas consensus dans la communauté scientifique. Leur étude montre que son influence est variable selon les configurations étudiées et que d'autres paramètres de conception doivent être pris en compte dans son dimensionnement et son utilisation. Il est en effet primordial que l'inertie thermique soit directement en contact avec le volume d'air pour assurer un transfert d'énergie efficace par convection. Une couche apparente à faible inertie ou une lame d'air séparant le volume d'air de l'inertie thermique réduit très fortement son impact.

### 1.3.5 Inertie thermique

Le passage de bâtiments peu isolés à des bâtiments fortement isolés amène plusieurs changements de paradigme. Un d'entre eux porte sur l'inertie thermique. L'inertie thermique des bâtiments est encore souvent introduite via 2 paramètres clés et un schéma d'une paroi avec deux ondes journalières de températures sinusoïdales de fréquence 24h, une onde côté extérieur et une côté intérieur. Selon ce principe, une paroi à forte inertie permet à la fois de réduire fortement l'amplitude de température journalière et permet un déphasage du pic du maximum de température de plusieurs heures contrairement à une paroi à faible inertie. Ceci s'applique tout à fait pour les bâtiments sans isolation, en pierre ou en pisé par exemple, comme des vieux corps de fermes avec souvent des murs de 50 cm d'épaisseurs. Cette approche n'est cependant plus du tout valable pour les bâtiments fortement isolés. En effet si l'on regarde le bilan thermique d'un bâtiment bien isolé, le ratio de flux thermique passant par les parois de l'extérieur vers l'intérieur est bien moindre que pour les bâtiments non isolés. L'isolation ayant permis de réduire fortement les flux thermiques à travers les parois, la portion d'autres composantes, dont la ventilation, les apports solaires gratuits et les gains internes ont quant à eux fortement augmenté réduisant l'impact du transfert thermique « direct » de l'extérieur vers l'intérieur à travers les parois opaques. Cette différence est introduite dans (71) et (72) en différenciant deux types d'inertie : l'inertie de transmission (de l'extérieur vers l'intérieur ou inversement) adaptée aux bâtiments peu isolés et l'inertie par absorption (de l'intérieur vers la masse thermique et inversement) adaptée aux bâtiments fortement isolés. L'inertie thermique par absorption nécessite d'être activée par un phénomène connexe pour être valorisée. La ventilation peut jouer ce rôle.

### 1.3.6 Couplage ventilation et inertie thermique

Pour bon nombre de bâtiments performants, l'inertie thermique couplée à la ventilation naturelle nocturne apparaît comme une solution passive intéressante pour améliorer le confort thermique en période estivale. En effet, pendant la journée l'inertie thermique absorbe les gains de chaleur (73). Les gains de chaleur absorbés le jour peuvent être restitués la nuit (74). Geetha et Velraj (75) ont déclaré que "la ventilation naturelle est la technique de refroidissement passif la plus importante" pour libérer les gains de chaleur d'un bâtiment. Lorsque les conditions climatiques le permettent, la ventilation naturelle peut être utilisée en combinaison avec l'inertie thermique pour restituer la nuit, lorsque la température de l'air extérieur est plus basse, la chaleur absorbée dans la masse thermique pendant la journée (76), (77), (59). Avec la ventilation naturelle la nuit, la température de l'air intérieur est également plus confortable pendant la journée (78), (79).

Ces travaux montrent l'intérêt des solutions passives et du bioclimatisme pour améliorer le confort et réduire les consommations énergétiques. Pour les valoriser au mieux, une bonne compréhension du comportement thermique du bâtiment est nécessaire. Cette meilleure compréhension du comportement peut être valorisée à la fois pour la phase de conception mais aussi en usage pour le pilotage du bâtiment. Cependant, il n'est pas suffisant de bien concevoir un bâtiment ni de bien le piloter pour que sa consommation d'énergie et son confort soit réellement à l'objectif. Mesurer la performance thermique d'un bâtiment est une des briques pour s'en assurer.

#### 1.4 Mesure et garantie de la performance thermique : nécessité et méthodes existantes

En réaction aux différentes crises que nous avons traversées depuis 50 ans, qu'elles soient économiques, géopolitiques, énergétiques ou environnementales, les gouvernements successifs français ont défini des réglementations thermiques pour le secteur du bâtiment, puis énergétiques et aujourd'hui environnementales, de plus en plus exigeantes. On peut citer la première réglementation thermique de 1974 qui a fait suite au premier choc pétrolier de 1973, et la dernière en date (RE2020) qui intègre la question environnementale via un calcul de l'empreinte carbone d'un bâtiment sur l'ensemble de son cycle de vie en plus des dimensions énergétiques. Ces réglementations ont permis de construire des bâtiments de moins en moins énergivores, mais ont souvent impliqué un surcoût économique. Les réglementations sont de plus passées d'exigences de moyens par composant (X cm d'isolants ou U minimum par paroi par exemple) à des exigences de résultat global estimé en phase de conception par simulation (ex. : Cep max (kWh/m<sup>2</sup>/an)). L'enjeu aujourd'hui est de massifier la rénovation du parc de bâtiments pour réduire son empreinte, ce qui comporte d'importants investissements de la part des propriétaires et des collectivités. Compte tenu des enjeux financiers et environnementaux, il est primordial de s'assurer que les résultats sont au rendez-vous en terme de consommations énergétiques notamment. Mesurer la performance réelle des bâtiments est donc une nécessité.

A l'achat d'un bien immobilier, les étiquettes énergétiques et carbone permettent aux acquéreurs d'avoir une estimation de consommations énergétiques des logement / bâtiment, mais celle-ci diffère quasi systématiquement de leur consommation réelle future. Ceci est normal car cette estimation vise plutôt à comparer différents bâtiments entre eux à iso-sollicitation qu'à prédire la consommation réelle. Cet écart de performance peut cependant atteindre 300 % selon (80). Cette différence entre consommation réelle et prévue, souvent appelée « Performance Gap », peut être expliquée par de nombreux facteurs. Tout d'abord, en conception, l'usage et les sollicitations climatiques qu'il est nécessaire de définir comme hypothèses d'entrées du modèle permettant l'estimation des consommations énergétiques ne peuvent être prédit avec certitude et précision. En effet, la météo varie selon les années et peut grandement impacter les consommations énergétiques d'une part et d'autre part, l'usage réel du bâtiment est difficilement prévisible. Pour l'usage le comportement du bâtiment dépend du nombre d'occupants, de leur temps de présence, de leurs actions ayant un impact sur le comportement du bâtiment et ses consommations énergétiques, comme l'ouverture des fenêtres, les consignes de températures par exemple. D'autres sources peuvent être à l'origine de ces écarts, comme une mauvaise mise en œuvre de certains composant du bâtiment, l'utilisation de matériaux non conforme à la conception, des erreurs de simulation en conception.

##### 1.4.1 Indicateurs de performances énergétiques d'un bâtiment

Plusieurs indicateurs sont utilisés pour mesurer la consommation énergétique et la performance des bâtiments. La plus simple est de mesurer la consommation globale du bâtiment ou par poste en occupation. Cela ne permet cependant pas d'identifier la source d'éventuels écarts comme par exemple une consigne de température à 25°C, une ouverture excessive des fenêtres en hiver, ou un défaut d'isolation de certaines parois. Des méthodes de signature énergétiques basées sur le lien entre

consommations énergétiques et conditions météorologiques extérieures, ou écart de température entre intérieur et extérieur, permettent d'aller plus loin dans l'analyse. D'autres indicateurs existent pour mesurer la performance thermique intrinsèque d'une enveloppe en essayant de s'affranchir de la météo et de l'usage du bâtiment.

Il existe plusieurs coefficients qui décrivent les transferts thermiques dans l'enveloppe des bâtiments. Ces coefficients, exprimés en [W/K] ne prennent pas les mêmes pertes thermiques en compte. Comme la Figure 1-1 (réadaptée de (81)) le montre les coefficients se décomposent en quatre catégories, le  $H_{ext}$  qui prend en compte les pertes par transmission vers l'extérieur, le  $H_{tr}$  qui prend en compte en plus des pertes par transmissions vers l'extérieur les pertes vers le sol et les pièces avoisinantes, le HTC prend en compte en plus du  $H_{tr}$  les pertes par infiltrations. Enfin le Building Loss Coefficient (BLC) prend en compte toutes les pertes, c'est-à-dire les pertes par transmission, par infiltrations et par ventilation. Le coefficient HTC est le plus souvent utilisé pour caractériser la performance thermique intrinsèque de l'enveloppe d'un bâtiment.

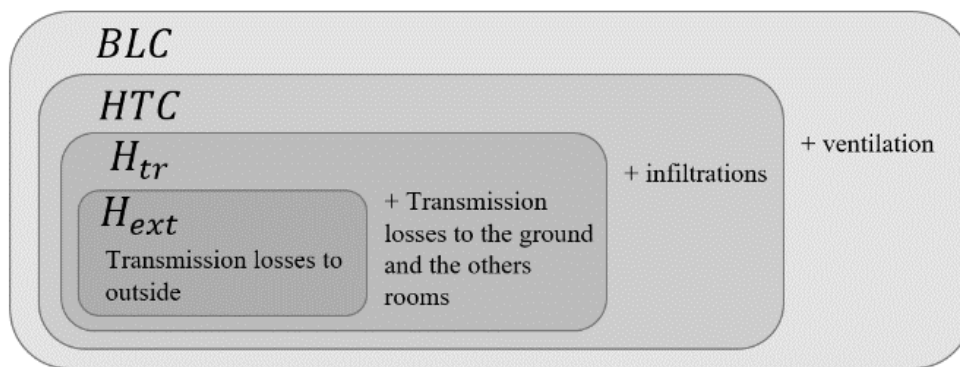


Figure 1-1 - Schéma des coefficients de performance de l'enveloppe des bâtiments, adaptée de (82)

#### 1.4.2 Méthodes de mesure de la performance énergétique d'un bâtiment

Différentes méthodes de mesures existent pour évaluer la performance réelle des bâtiments. Elles peuvent être classées en deux catégories : avec et sans occupation comme illustré sur la Figure 1-2. Les méthodes avec occupation nécessitent une instrumentation non intrusive mais peuvent se dérouler sur une longue période. Les méthodes avec occupation permettent généralement de déterminer la signature énergétique d'un bâtiment, ce qui ne correspond pas à la performance intrinsèque du bâtiment car elles prennent en compte l'usage du bâtiment et le rendement des équipements CVC. Des travaux sont en cours pour cela comme tous les travaux réalisés dans l'annexe 71 du programme EBC de l'AIE et qui devrait être suivi par une nouvelle Annexe en cours de préparation ou encore (33), (35).

Les méthodes sans occupation, les plus développées, consistent à chauffer l'intérieur d'un bâtiment. L'une des plus répandues est le test de co-heating ((83), (84), (85)). Le co-heating est une méthode stationnaire, qui permet de calculer le coefficient de transfert de chaleur (HTC [W/K]) à l'aide de données expérimentales. Il existe plusieurs autres méthodes in situ utilisant une approche dynamique qui permettent de déterminer le HTC d'un bâtiment sur une période plus courte telles que les méthodes PRBS (Pseudo Random Binary Sequence), définissant des créneaux de chauffage et de « relaxe » de différentes durées. Ces méthodes sont encourageantes pour répondre aux besoins de raccourcir la durée des tests qui est l'un des points bloquants de la méthode du co-heating. Dans la suite de cette section, certaines de ces méthodes sont introduites pour en montrer le fonctionnement, les avantages et les limites

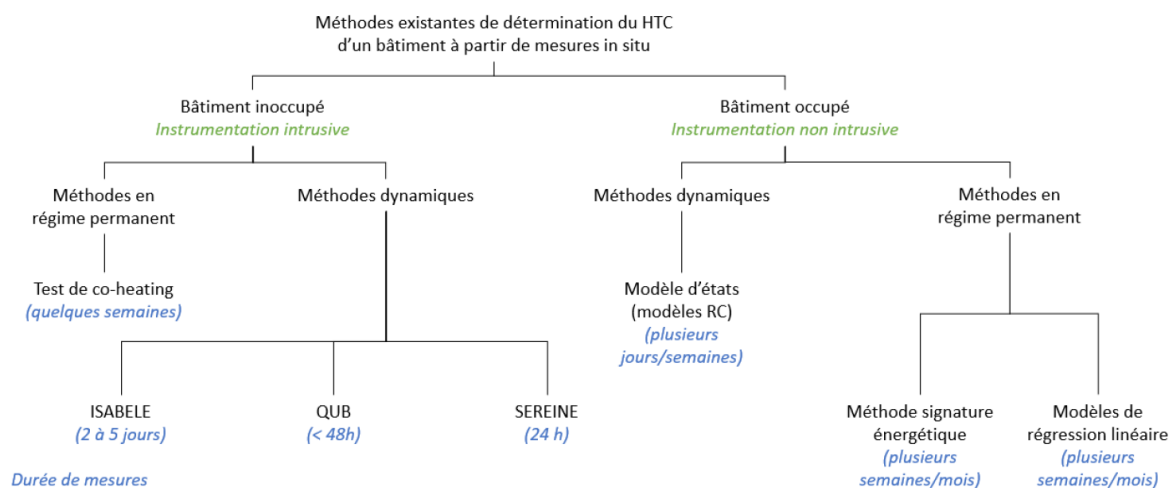


Figure 1-2 : Diagramme des différentes méthodes existantes de détermination du HTC d'un bâtiment à partir de mesures in-situ (Pacquaut 2023 adapté de Juricic et al 2021)

### 1.4.3 Méthode par le calcul théorique

Par le calcul, il est possible de déterminer la performance des bâtiments en se basant sur la norme ISO 6946. Cette norme indique d'utiliser les valeurs théoriques des coefficients de déperditions ( $U$ ) des matériaux théoriquement présents dans le bâtiment et détermine le coefficient de déperdition de l'enveloppe du bâtiment. Le coefficient de performance UA peut être calculé à partir de cette norme au travers de l'équation simplifiée (1.1), où il n'y a pas d'infiltration, de ventilation, ni de ponts thermiques.

$$UA = \sum U_{wall} \cdot A_{wall} \quad (1.1)$$

Cette norme indique aussi les valeurs des résistances thermiques superficielles extérieure et intérieure ( $R_{se}$  et  $R_{si}$ ) selon l'orientation et le sens du flux thermique. Ces valeurs de résistance thermique sont données pour des conditions climatiques particulières, une température de surface extérieure constante de 10°C et intérieure de 20°C, aucune radiation solaire et un vent de 4 m/s adjacent à la surface extérieure. Cette méthode est souvent utilisée en phase conception.

### 1.4.4 Le Co-heating

Le test de co-heating est souvent vu comme une référence dans la mesure de la performance des bâtiments (85), (86). Le test de co-heating est basé sur le principe de bilan d'énergie dans un système en régime quasi-permanent, comme illustré Figure 1-3. Sur une longue période, généralement 3 semaines, les logements sont chauffés à une température constante via un chauffage électrique rapporté. L'énergie consommée par les radiateurs électriques est alors considérée comme égale à la perte de chaleur des logements par son enveloppe, l'inertie thermique pouvant être négligée compte tenu de la température constante maintenue à l'intérieur de l'enveloppe et de la durée du test. Pour réaliser un test de co-heating le bâtiment doit être inoccupé pendant toute la durée du test, la ventilation coupée et les ouvertures de ventilation bouchées, comme pour un test à la porte soufflante permettant d'estimer l'étanchéité à l'air d'un bâtiment. En France, les volets sont souvent fermés pour s'affranchir des apports solaires directs à travers les fenêtres.

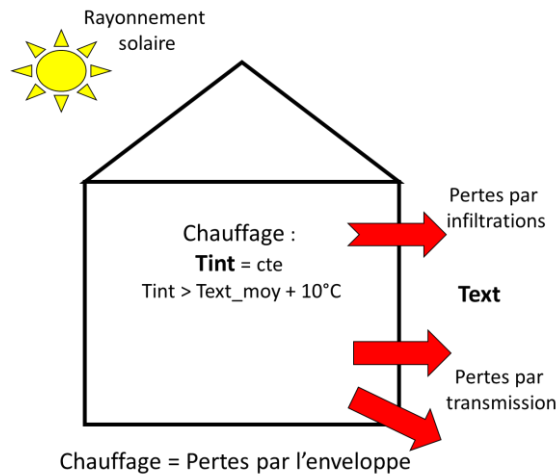


Figure 1-3: Schéma du fonctionnement du test de co-heating

L'état de l'art sur le co-heating (86) indique que la durée du test doit être de 2 à 3 semaines. Les valeurs des trois semaines de tests sont moyennées de manière journalière pour éviter l'impact des variations entre le jour et la nuit (Température extérieure, rayonnement, inertie). Trois méthodes d'analyses sont généralement utilisées pour déterminer le coefficient de transfert de chaleur (HTC) d'un bâtiment grâce à un test de co-heating. Les trois méthodes sont des régressions linéaires décrites par les équations (1.2), (1.3) et (1.4) qui permettent de déterminer la valeur du HTC à partir des données expérimentales.

$$Q_h = HTC \cdot \Delta T + c \quad (1.2)$$

$$Q_h = HTC \cdot \Delta T - A_{sw} * I_{rr} + c \quad (1.3)$$

$$\frac{Q_h}{\Delta T} = HTC - A_{sw} \frac{I_{rr}}{\Delta T} + c * \quad (1.4)$$

La première méthode (1.2) est une régression linéaire simple entre la différence de température entre l'air intérieur et l'air extérieur  $\Delta T$  et l'énergie dissipée par les résistances électriques rapportées  $Q_h$ . La constante  $c$  représente les charges internes constantes ou les gains de chaleur non liés à la différence de température intérieure/extérieure. La plupart du temps, la constante  $c$  est fixée à 0 et permet d'obtenir de meilleurs résultats (86). La deuxième méthode (équation (1.3)) est une régression linéaire multiple avec deux variables considérées comme indépendantes : la différence de température  $\Delta T$  et le rayonnement solaire global horizontal,  $I_{rr}$ . Le résultat de cette régression donne le HTC et l'ouverture solaire,  $A_{sw}$  (86). La troisième et dernière méthode introduite par l'équation (1.4) est appelée méthode de Siviour. Elle est basée sur la division de tous les termes de l'Equation (1.3) par  $\Delta T$ . Les deux variables sont dans ce cas  $I_{rr}/\Delta T$  et  $Q_h/\Delta T$ . Contrairement à la première méthode, les deux dernières méthodes permettent de prendre en compte l'impact des gains solaires dans l'essai de co-heating comme illustré Figure 1-4.

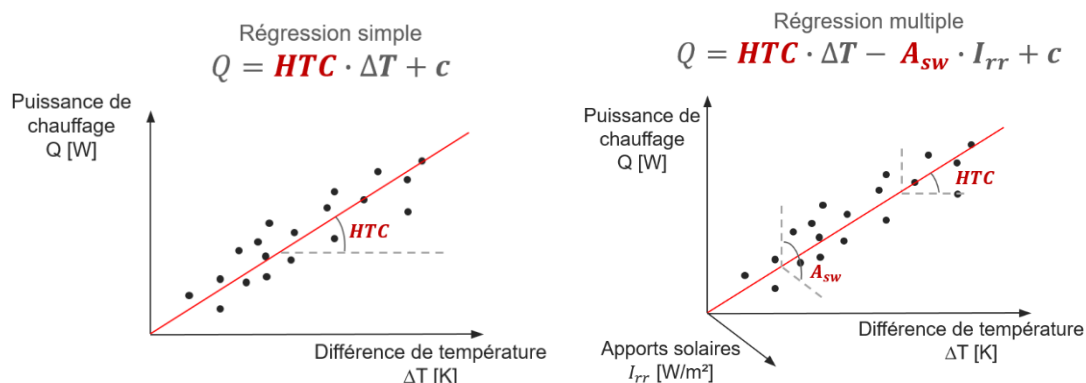


Figure 1-4 - Schéma des régressions linéaires des équations (1.2) et (1.3) issue de (42)

#### 1.4.5 Les approches PRBS – exemple de la méthode SEREINE

Une des principales limites du co-heating est la durée d'immobilisation du bâtiment de plusieurs semaines. Celle-ci est notamment nécessaire pour lisser une partie des phénomènes d'inertie thermique. Afin de palier à cette limite, des méthodes dynamiques ont été développées et prennent en compte ces phénomènes d'inertie thermique, notamment en passant de régressions linéaires à la calibration de modèles dynamiques de type RC par analogie électrique. La méthode SEREINE enveloppe est une de ces méthodes. Elle est développée par un consortium français dans le cadre du projet PROFEEL, et utilise des scénarios de chauffage dynamique. Cette méthode vise à déterminer la performance des maisons individuelles en seulement 1 à 2 jours en instrumentant le bâtiment.

Comme pour le co-heating, l'étanchéité à l'air est estimée en amont, à travers la détermination du taux d'infiltration, obtenu par un test à la porte soufflante. Ceci permettra d'isoler la part des pertes par transmission de celles par infiltrations. Ensuite, le comportement thermique de l'enveloppe est mesuré. Pour cela, une sollicitation thermique avec des créneaux de chauffe et de relaxe avec des durées différentes est mise en place dans le bâtiment grâce à des résistances chauffantes électriques pilotées, souvent munies de ventilateurs pour brasser l'air. La mesure dynamique des grandeurs physiques durant ces phases de test comprend la température intérieure, la puissance de chauffage qui est en l'occurrence la puissance électrique consommée et dissipée par effet Joule, et les conditions météorologiques, en particulier la température extérieure et le rayonnement. Ces données sont ensuite utilisées dans des modèles de calibration pour identifier les paramètres du modèle et déduire les coefficients HTC comme le montre la Figure 1-5 repris de (87). L'algorithme d'optimisation de la méthode de calibration a pour but de trouver, via une méthode inverse, le jeu de paramètres d'un modèle RC pour en déduire le HTC d'une enveloppe (81) (88) (35). Ceci passe par une minimisation de l'écart entre la température intérieure mesurée et celle retrouvée numériquement à partir des données expérimentales (puissance injectée à l'intérieur et température extérieure).



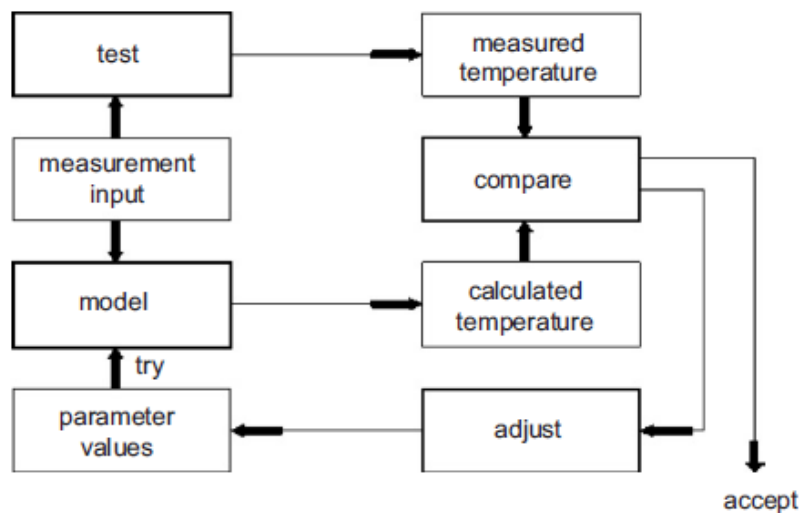


Figure 1-5 : Processus de calibration (87)

#### 1.4.6 Les apports solaires et le co-heating

Une limitation importante du co-heating est la prise en compte des apports solaires. En effet, les résultats du test sont beaucoup moins concluants lorsqu'il y a de forts apports solaires. Richard Jack l'étudie notamment dans sa thèse (89) et explique que les tests de co-heating sont faits en hiver pour avoir une différence de température suffisante entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment et pour limiter le bruit introduit par les apports solaires dans les régressions linéaires.

De plus, Jack relève des problèmes de colinéarité entre la température extérieure et les apports solaires. Cette colinéarité est particulièrement importante en été et en mi saison où une forte température extérieure est liée à de forts apports solaires. Ainsi dans l'équation (1.3) les variables ne peuvent plus être considérées comme indépendantes.

Un premier test de co-heating en climat semi-désertique en Espagne (90) a donné des résultats encourageants pour l'utilisation du test de co-heating sur des climats plus ensoleillés. Ce test a été conduit en hiver pour avoir une différence de température suffisante et ainsi avoir des résultats probants. Ce travail essaie de déterminer la meilleure méthode pour prendre en compte les apports solaires et conclut que la méthode la plus simple, par régression linéaire simple (équation (1.2)) donne un résultat le plus proche de la valeur cible. Cependant, il est important de garder en tête les limites de cette étude. En effet celle-ci ne considère que l'étude expérimentale d'un petit bâtiment très performant et avec une unique petite fenêtre.

Un autre point important à prendre en compte est la différence d'impact des apports solaires entre les maisons bien isolées et les maisons moins isolées. Ce phénomène est abordé par Richard Jack (89) et plus récemment par Pacquaut (33) qui montrent que dans le cas d'une maison bien isolée, les apports solaires ont proportionnellement plus d'impact sur la consommation de chauffage que pour une maison peu isolée et ceci quel que soit le climat. Il est donc important de prendre en compte la performance du bâtiment quand il faut comparer différentes méthodes de régressions linéaires qui ne prennent pas en compte de la même façon les apports solaires.

#### 1.4.7 Les limites des méthodes de détermination de la performance en chauffage

Le co-heating et les autres méthodes en inoccupation sont limités par la nécessité d'avoir une différence de température intérieure-extérieure suffisante (au moins +5°C et généralement +10°C) et de faibles apports solaires. Ces critères ne permettent pas de réaliser des tests de co-heating ou avec la méthode SEREINE tout au long de l'année dans les climats tempérés ou dans les climats tropicaux lorsque les températures extérieures sont trop élevées pour ne pas risquer d'endommager le bâtiment



ou ses équipements en le chauffant à une température excessive. La période potentielle de tests est d'autant plus réduite pour des climats plus chauds comme dans les pays méditerranéens. Dans certains climats, comme dans certaines régions australiennes, il semble même impossible de mettre en place des tests de co-heating (91). Il faut trouver des méthodes innovantes qui permettent de faire des tests de performance durant l'été et en climat chaud.

### 1.5 Questions scientifiques et déroulé du manuscrit

La suite du manuscrit est composée de cinq chapitres. Les trois premiers chapitres visent à répondre à **la question de la pertinence du bioclimatisme pour les maisons performantes**. En effet, **les solutions passives historiquement utilisées sur des bâtiments pas ou peu performants sont-elles toujours efficaces pour répondre aux spécificités des nouvelles exigences de construction ou doivent-elles être adaptées ?** Le chapitre 2 détaille une approche numérique pour estimer l'influence de différents paramètres sur le comportement thermique d'une maison passive en période estivale sous différentes conditions climatiques. Le chapitre 3 complète cette approche numérique par une campagne de test sur les maisons expérimentales INCAS et une comparaison entre les mesures et des résultats de simulations. Le chapitre 4 est quant à lui dédié à un retour d'expérience d'une maison bois-béton en climat méditerranéen. Comme évoqué en fin de paragraphe 1.3 ces études visant à une meilleure compréhension du comportement thermique de ces bâtiments pourront être valorisées à la fois pour la phase de conception mais aussi en usage pour le « pilotage » du bâtiment. Cependant, il n'est pas suffisant de bien concevoir un bâtiment ni de bien le piloter pour que sa consommation d'énergie et son confort soit réellement à l'objectif. Mesurer la performance thermique intrinsèque d'une maison est une des briques pour s'en assurer. Comme il a pu être détaillé dans les paragraphes précédents, **les méthodes de mesure existantes qui utilisent des systèmes de chauffage ne peuvent pas être utilisées quel que soit les conditions météo et notamment pour les périodes chaudes**. Les deux derniers chapitres visent à **s'affranchir de ce verrou en explorant une méthode en climatisant en lieu et place du chauffage** et ainsi de permettre la réalisation de ces mesures sur d'autres climats. Le chapitre 5 présente des expérimentations réalisées à plusieurs échelles pour explorer la faisabilité de cette méthode. Le chapitre 6 détaille quant à lui une approche numérique pour évaluer la faisabilité d'une méthode de co-cooling.

## Chapitre 2 - Impact du couplage entre inertie thermique et ventilation naturelle nocturne sur le confort d'été : Approche numérique

### **Résumé :**

L'objectif de ce chapitre est de **mieux appréhender le potentiel de l'inertie thermique sur le confort d'été et les paramètres influents à prendre en compte**. Il repose sur la **simulation numérique d'une maison basse consommation** de géométrie INCAS. Cette étude détaille l'impact de la quantité d'inertie, de la position de la masse thermique, et de la gestion du bâtiment sur le confort estival sous différents climats métropolitains. Une bonne **gestion du bâtiment est le premier facteur pour améliorer le confort** dans le logement à **commencer par limiter les apports solaires directs**. L'effet de la gestion des volets roulants Sud a notamment pu être mis en avant. La fermeture des volets roulants Sud la journée permet une nette amélioration du confort quelle que soit l'inertie. Cependant, la non fermeture des volets roulants aura un impact beaucoup plus néfaste pour un bâtiment sans inertie que pour un bâtiment à forte inertie. **Un autre paramètre clé de la gestion est la sur-ventilation nocturne**, qui, lorsque les conditions sont favorables permet un net gain en confort pour des maisons à forte inertie, avec comme ordre de grandeur un **abaissement de la température de l'ordre de -1°C par Vol/h de sur-ventilation (de 0 à 3 vol/h)** dans le cas d'étude simulé. Le modèle numérique montre également que **la sur-ventilation nocturne permet d'abaisser la température tout au long de la journée**. Pour le paramètre « quantité d'inertie », **lors d'une sollicitation journalière avec une nuit dite « fraîche », les premiers centimètres d'inertie sont les plus importants** et permettent la plus grande part de gain en confort. Sur des sollicitations chaudes ou caniculaire de plusieurs jours, une forte inertie ou l'ajout de masse thermique amélioreront le confort en sollicitant l'ensemble de l'inertie thermique. L'étude a permis de démontrer **l'importance de la répartition de la masse thermique**. En effet, il ne suffit pas d'avoir une masse thermique importante dans un bâtiment pour en garantir le confort ; Une bonne répartition est importante notamment entre dalles du rez-de-chaussée et de l'étage, et les murs. Enfin, **en période de canicule** ou le potentiel de la sur-ventilation nocturne est limité, **une forte inertie permettra de retarder la montée en température intérieure** et ainsi limiter l'inconfort sur les premiers jours. Par contre, une fois la masse thermique « saturée », **le retour à la normale post canicule sera plus long** même avec de la sur-ventilation nocturne, et son gain peut être discutable selon les configurations (géométrie / climat).

### **Contexte de la réalisation de ces travaux :**

Cette étude a été réalisée dans la première moitié des années 2010 dans le cadre d'un projet de recherche pour l'industriel VICAT. Il a notamment été réalisé en étroite collaboration avec principalement deux collègues, A.-F. Barthélémy et A. Lagesse, qui ont réalisé la plupart des simulations. J'avais pour ma part le rôle de chef de projet et ait contribué avec elles principalement dans la définition de l'étude paramétrique, l'analyse des simulations et la synthèse des résultats.

## 2.1 Introduction et objectif de l'étude

Cette étude présente une approche numérique basée sur le cas d'étude d'une maison INCAS. L'objectif est de mieux appréhender la résultante de différentes configurations d'inertie thermique sur le comportement thermique d'une maison individuelle performante (une maison INCAS dans ce cas d'étude) sous différentes sollicitations climatiques estivales. Les paramètres étudiés sont la quantité d'inertie, la position de la masse thermique, et la gestion du bâtiment.

Dans le premier paragraphe de ce chapitre, le cas d'étude est détaillé avec en premier lieu les caractéristiques des bâtiments modélisés, la géométrie et les propriétés physiques des différentes variantes étudiées, puis la description des climats étudiés. Le second paragraphe est dédié à l'analyse des résultats de cette étude numérique en regardant l'inertie thermique sous 3 angles différents : la quantité d'inertie thermique, la position de la masse thermique et enfin la sollicitation de celle-ci.

## 2.2 Définition du cas d'étude et de l'étude numérique

### 2.2.1 Description de la maison INCAS simulée

La géométrie retenue est basée sur une maison INCAS. Sa conception a été optimisée afin d'atteindre le standard Passiv Haus en terme d'isolation tout en maximisant les apports solaires en hiver et en essayant de limiter l'inconfort d'été. De plus, plusieurs comparaisons mesures / simulations ont été réalisés

- **Caractéristiques architecturales**



Figure 2-1 : Photo de la maison I-BB

La maison a une surface de 97m<sup>2</sup> SHAB, répartie sur deux niveaux. Un niveau rez-de-chaussée, où se trouvent les espaces de vie diurne (salon, salle à manger, cuisine). Un niveau R+1 où se trouvent les espaces de vie nocturne (trois chambres, salle de bain, WC). Le niveau R+1 est bordé d'un balcon en façade Sud, permettant de limiter les apports solaires en été. La maison dispose également d'un vide sanitaire de 80cm de hauteur et de combles non chauffés

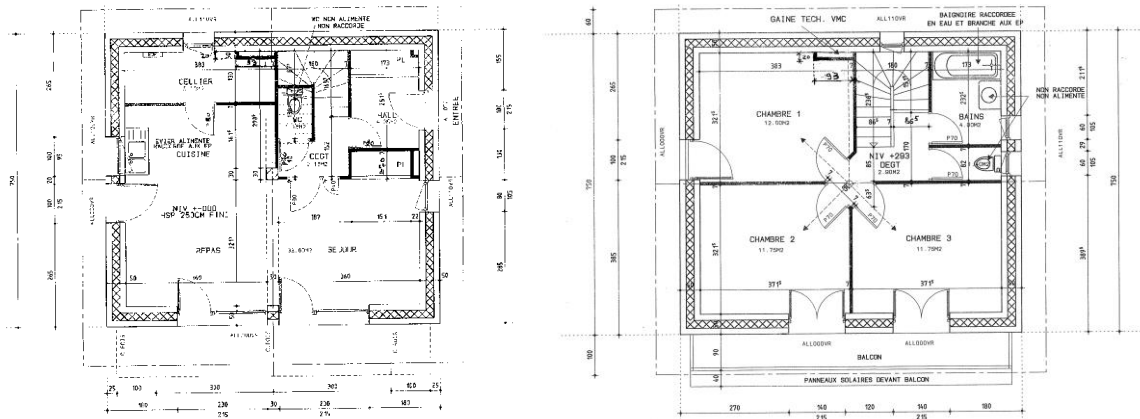


Figure 2-2 : Plans de la Maison I-DM (RDC à gauche, 1<sup>er</sup> étage à droite)

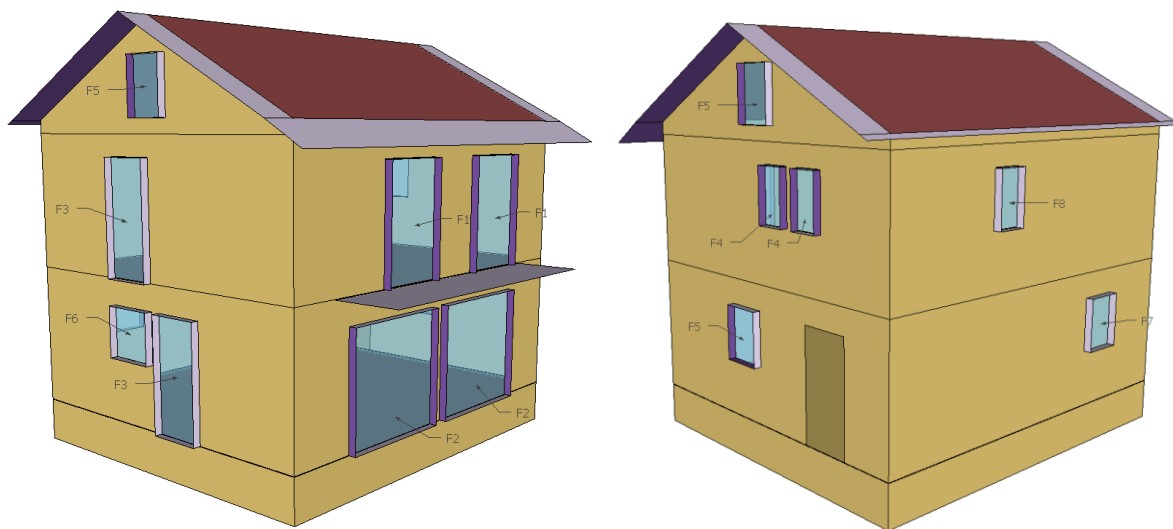


Figure 2-3 - Vue 3D du modèle d'étude de la maison INCAS (à gauche : Façades Sud et Ouest, à droite : Façades Nord et Est)

- **Composition des parois**

Pour chaque type de paroi (verticale ou horizontale), différentes compositions sont proposées : différents matériaux, différentes épaisseurs ; Et de ce fait, une inertie plus ou moins grande. Le détail des parois est précisé en Annexe Partie I - C.1

Les vitrages considérés dans le modèle de référence sont de type double vitrage avec un  $U_f = 1.4 \text{ W}/(\text{m.K})$  et un facteur solaire fenêtre de 0.52:

- **Régulation**

Un système de ventilation double flux avec échangeur et by-pass est considéré dans le modèle de référence. Le débit nominal est de  $135 \text{ m}^3/\text{h}$ , réparti équitablement entre RDC et R+1 avec un rendement de l'échangeur estimé à  $\eta = 80\%$ . La sur-ventilation nocturne sera un des paramètres étudiés dans l'étude. Pour cela, 5 variantes de débits de sur-ventilation nocturne ont été simulées : pas de sur-ventilation nocturne, 1, 3, 5 ou  $10 \text{ Vol}/\text{h}$  de 20h à 7h sous certaines conditions de température. Les débits de sur-ventilation nocturne sont décrits en Annexe C .

Tous les vitrages sont équipés de volets roulants avec les caractéristiques décrites en Annexe C . Les scénarii d'ouverture/fermeture des volets envisagés, tiennent compte d'un comportement intelligent de l'occupant vis à vis de la prévention des surchauffes estivales par la fermeture

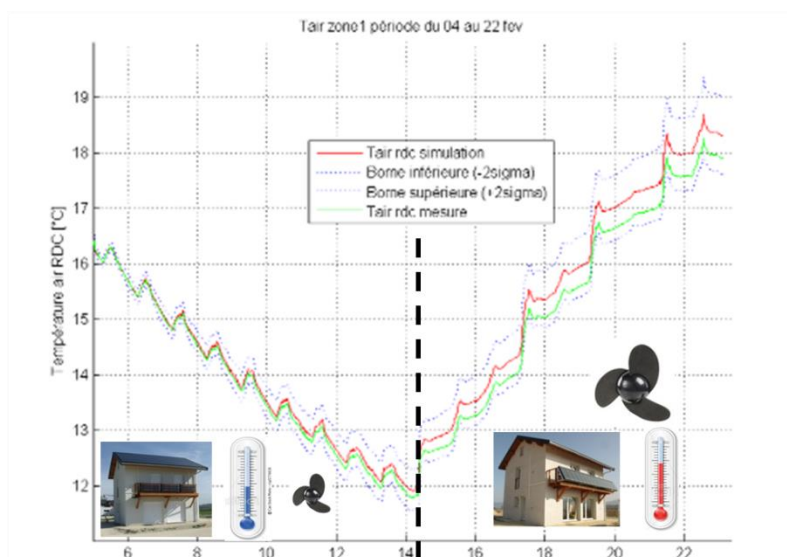
quotidienne des volets roulants « critiques », i.e. orientés Est et Ouest. Les volets orientés Est et Ouest sont ainsi considérés fermés toute la journée.

Les scénarii de gestion des volets Nord et Sud proposés sont binaires : volets ouverts 24h/24 ou fermés 24h/24.

### 2.2.2 Hypothèses de simulation

Le bâtiment a été modélisé via 4 zones thermiques, une par niveau : le vide sanitaire, le rez-de-chaussée, l'étage et les combles. Deux scénarii d'occupation ont été modélisés : occupation continue et occupation intermittente. Les apports internes associés ont également été modélisés et sont détaillés en Annexe C . Le débit de renouvellement d'air dû aux infiltrations implémenté dans les modèles EnergyPlus est de 0,25 Vol/h, se basant sur le label BBC Effinergie qui impose une valeur limite de débit de renouvellement d'air dû aux infiltrations de  $I_4 \leq 0.6 \text{ (m}^3\text{/h)/m}^2$ .

Le modèle développé dans le cadre de cette étude s'appuie fortement sur celui développé dans la thèse de Clara Spitz (92) et qui a fait l'objet de comparaisons avec des données de mesures réelles effectuées sur les maisons INCAS, comme l'illustre la Figure 2-4.



Il est important de mentionner que les résultats illustrés sur ce graphique ont nécessité de nombreux allers-retours entre l'analyse des mesures et les hypothèses de simulation. Les hypothèses du modèle de simulation ont été adaptées, corrigées pour que celui-ci se rapproche au mieux des caractéristiques réelles de la maison, de son usage et de son environnement afin que les résultats de simulation collent au plus près des mesures. En effet, malgré la « simplicité » géométrique apparente d'une maison INCAS, celle-ci reste néanmoins, comme tout bâtiment réel, complexe à modéliser via une approche de simulation thermique dynamique compte tenu du nombre important de paramètres nécessaires à la définition du modèle. L'analyse des mesures a également été challengée par les résultats de simulation. On peut citer par exemple, la non anticipation de certains capteurs dans la tâche solaire pas complètement protégé à tout instant par les boucliers mis en place, le questionnement sur la représentativité des points de mesures sélectionnés sur la « moyenne » d'une zone compte tenu de l'hétérogénéité spatiale entre pièces ou au sein même d'une pièce. Tout cela implique donc les questions sur l'introduction des incertitudes et avait notamment fait l'objet et nourrit le projet ANR FIABILITE.

### 2.2.3 Synthèse de l'étude numérique paramétrique

Tableau 2-1 - Synthèse de l'étude numérique paramétrique

| <b><i>Paramètres</i></b>          | <b><i>Valeurs possibles</i></b>   |
|-----------------------------------|---|
| Inertie des Murs                  | Sans inertie<br>Ossature Bois<br>1cm de béton<br>3cm de béton<br>5cm de béton<br>20cm de béton<br>Parpaing<br>Brique creuse |
| Inertie de la Dalle RDC           | Sans<br>Plancher Bois<br>1cm de béton<br>3cm de béton<br>5cm de béton<br>20cm de béton                                      |
| Inertie de la Dalle Intermédiaire | Sans<br>Plancher Bois<br>1cm de béton<br>3cm de béton<br>5cm de béton<br>20cm de béton                                      |
| Sur-ventilation nocturne          | Sans<br>1Vol/h<br>3Vol/h<br>5Vol/h<br>10Vol/h   |
| Volets roulants (Nord/Sud)        | Ouverts<br>Fermés   |
| Occupation                        | Intermittente<br>Continue   |

### 2.3 Conditions météorologiques

Ces différentes configurations ont été soumises à plusieurs conditions météorologiques sur une période estivale de 2 mois :

- Des conditions classiques : en climat continental, semi-continental, océanique et méditerranéen,
- Des conditions exceptionnelles : lors d'une période de canicule.

Les villes représentatives des climats types classiques sélectionnés sont les suivantes :

Tableau 2-2 - Climats considérés

| Type de climat   | Ville associée | Latitude (°) | Longitude (°) | Altitude (m) |
|------------------|----------------|--------------|---------------|--------------|
| Continental      | Strasbourg     | 48.55        | 7.63          | 154          |
| Semi-continental | Cadarache      | 43.72        | 5.75          | 290          |
| Océanique        | Nantes         | 47.17        | -1.60         | 27           |
| Méditerranéen    | Nice           | 43.65        | 7.20          | 10           |

### 2.3.1 Conditions météorologiques classiques

#### **Climats continental, océanique et méditerranéen**

Les fichiers considérés pour la définition des conditions météorologiques réelles sont issus du logiciel EnergyPlus (fichiers de type .epw). Ces fichiers se basent sur des mesures réelles sur une période de 20 ans. Pour construire ces fichiers, pour chacun des 12 mois de l'année, un mois représentatif (i.e. le plus proche de la moyenne) du climat réel est sélectionné. Ceci donne un fichier météo global composé de mois d'années diverses toujours représentatifs du climat moyen du lieu concerné.

Le climat méditerranéen est caractérisé par une amplitude de température réduite de 5 à 10°C avec une température moyenne avoisinant les 24°C et un ensoleillement variable autour de 8000 Wh/m<sup>2</sup>. Les climats océanique et continental sont assez proches : une amplitude journalière de 10 à 15°C, une température moyenne avoisinant les 20°C et un ensoleillement très varié selon les jours.

#### **Climat semi-continental**

Le fichier météo du climat semi-continental a été construit sur la base de données météorologiques réelles relevées à Saint-Paul-les-Durance (latitude: 43.68°N, Longitude : 5.7°E), dans le Sud Est de la France. L'analyse de ces données montre que les jours d'été sont très similaires : forte amplitude journalière (Forte chaleur la journée : 30°C – Nuits fraîches : 10°C) et fort ensoleillement (Rayonnement global cumulé : 10000 Wh/m<sup>2</sup> environ). Un jour type de ce climat a été sélectionné, a été répété chaque jour durant deux mois pendant l'été. Le climat semi-continental est caractérisé par une forte amplitude journalière 20°C, avec une température moyenne de 20°C, et un bel ensoleillement, proche de 10 kWh/m<sup>2</sup>.

Certains post-traitements spécifiques sont basés sur un jour caractéristique du climat estival considéré, qui semble à priori le plus défavorable pour la température intérieure. Pour chaque climat, un jour type a été sélectionné. Le dernier jour d'une belle période d'au minimum 5 jours a été sélectionné, avec comme caractéristiques :

- Une amplitude journalière représentative des 2 mois d'été (juillet – aout) considérés,
- Une température maximale assez élevée,
- Un bon ensoleillement (sans être nécessairement l'ensoleillement maximal).



Tableau 2-3- Jours caractéristiques choisis

|                  | Date  | Température min (°C) | Température moy (°C) | Température max (°C) | Rayonnement global cumulé (Wh/m <sup>2</sup> ) |
|------------------|-------|----------------------|----------------------|----------------------|--|
| Semi-continental | 12/07 | 9.1                  | 20.4                 | 30.2                 | 9800   |
| Continental      | 10/08 | 16                   | 23.2                 | 31                   | 6850   |
| Océanique        | 19/08 | 17.1                 | 25.1                 | 32                   | 8750   |
| Méditerranéen    | 17/08 | 24.1                 | 26.6                 | 30.4                 | 8650   |

Les figures en Annexe C donnent un aperçu des jours précédents le jour caractéristique choisi.

### 2.3.2 Canicule

Afin de tester en conditions extrêmes le comportement thermique d'été d'un bâtiment, une météo dite de canicule a été créée.

Basée sur deux jours issus de météos réelles, un jour caractéristique d'une météo classique (15°C – 25°C) et un jour caractéristique de la canicule de Montreuil en 2003 (23°C – 40°C), le fichier météo dit de canicule a été construit de la manière suivante :

- Une première période de 20 jours dite classique pour initialiser le modèle,
- Une période de 20 jours caniculaires au cours de laquelle on peut observer la montée en température du bâtiment et sa capacité à maintenir ou non une température intérieure confortable,
- Une période de descente (20 jours initiaux de type classique) pour observer comment le bâtiment redescend en température, combien de temps il met pour retrouver une ambiance intérieure confortable.

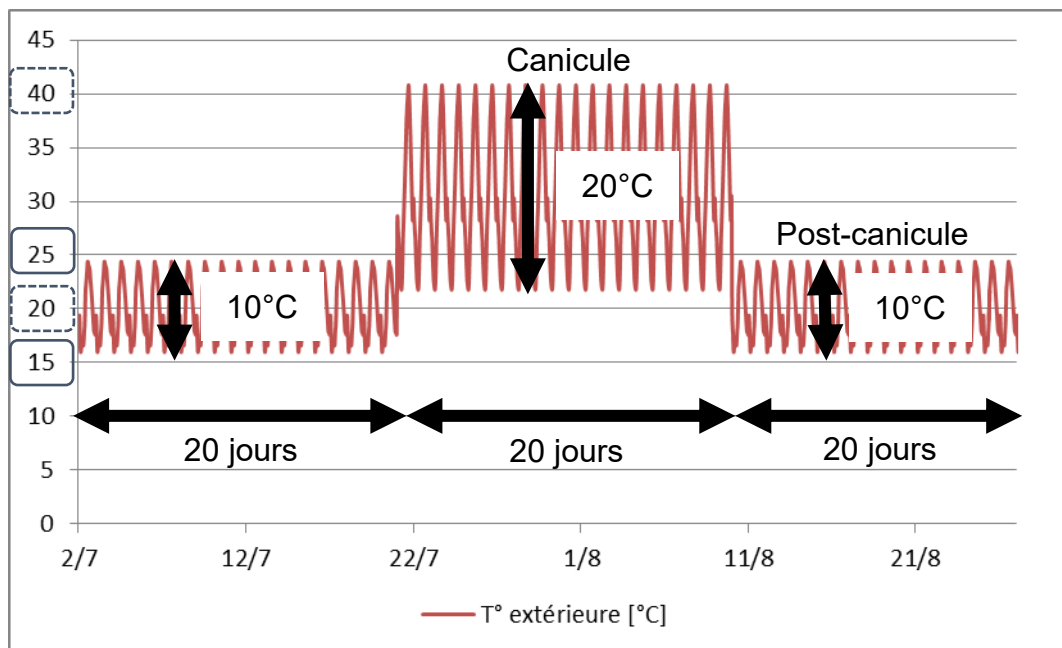


Figure 2-5 : Climat caniculaire



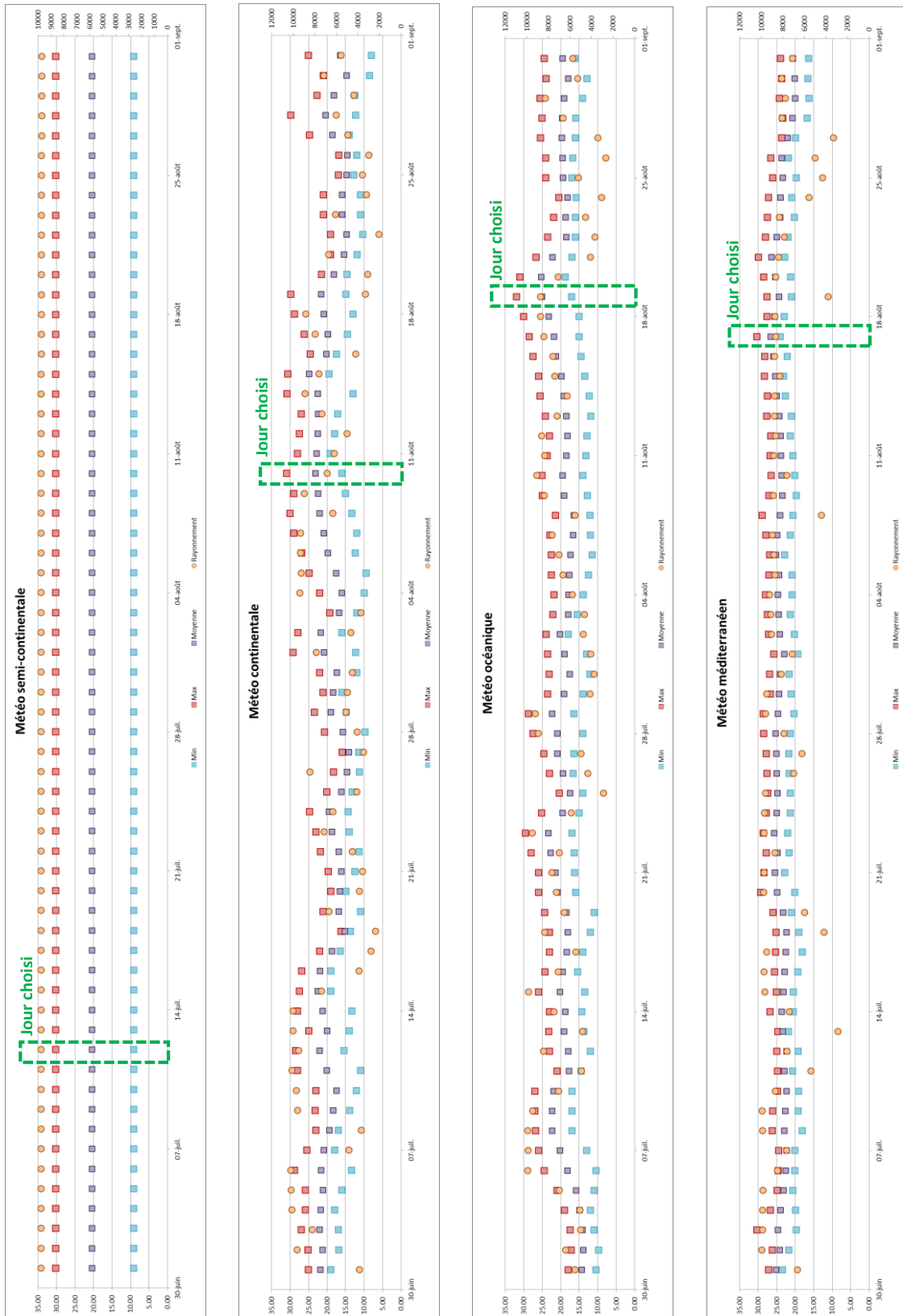


Figure 2-6 - Climats dits "classiques"

## 2.4 Inertie thermique et confort thermique estival

Dans ce paragraphe, une synthèse des résultats de cette étude numérique est présentée et s'appuie sur une étude approfondi de l'ensemble des résultats de simulation qui est détaillée en Annexe C.2

### 2.4.1 Gestion du bâtiment : Sur-ventilation nocturne

L'impact de l'inertie thermique sur le comportement thermique du bâtiment est fortement dépendant de la gestion du bâtiment. L'inertie est censée apporter un amortissement et un déphasage des « vagues de chaleur » extérieures pour améliorer le confort en emmagasinant l'énergie dans sa masse aux heures les plus chaudes. Afin de rendre cette inertie plus efficace, il est nécessaire de faciliter son rafraichissement : La masse pourra ainsi « se décharger » des calories emmagasinées dans la journée pour retrouver un état proche de son état initial (dans la mesure du possible). La sur-ventilation nocturne est pour ce faire un paramètre clé lorsque les températures nocturnes le permettent : i.e. températures extérieures plus fraîches que les températures de la masse thermique et de l'air intérieur. L'ensemble des graphiques suivants montre l'impact de la sur-ventilation nocturne selon divers climats.

La Figure 2-7 représente les degrés heures d'inconfort au-dessus de 26°C en fonction de 3 niveaux d'inertie et de 5 intensités de sur-ventilation nocturne pour un climat semi-continental avec les volets sud ouverts. Elle montre que quelle que soit l'inertie du bâtiment (forte, modérée ou faible), la mise en œuvre de sur-ventilation nocturne permet d'augmenter le confort. Plus le débit de sur-ventilation nocturne est important, plus l'inconfort sera réduit. Cette figure montre également que l'impact est d'autant plus important que l'inertie thermique est forte.

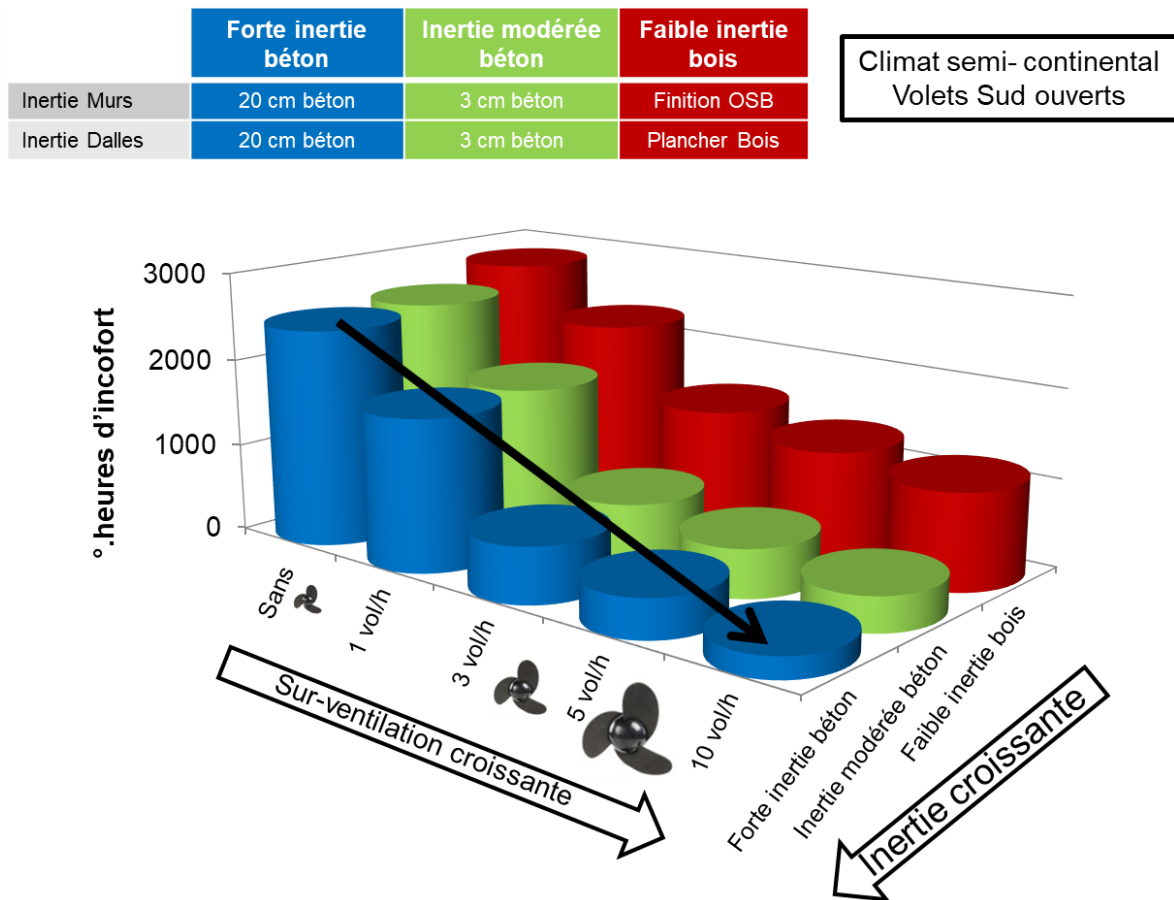


Figure 2-7 : Impact de la sur-ventilation nocturne

L'analyse de l'impact de la sur-ventilation naturelle nocturne montre que dans les configurations étudiées, quel que soit le climat réel étudié (continental, semi-continental, océanique ou méditerranéen), la mise en œuvre de sur-ventilation nocturne permet d'abaisser la température intérieure tout au long de la journée de l'ordre de  $-1^{\circ}\text{C}/(\text{Vol}/\text{h})$  de sur-ventilation pour des débits compris entre 0 à 3Vol/h. La Figure 2-8, issue du climat océanique pour une configuration avec une inertie modérée (3 cm de béton apparent dans les murs et les planchers), les volets roulants sud ouverts et une occupation intermittente), illustre bien cette conclusion avec en cas 1 sans sur-ventilation nocturne, le cas 2 avec 1 vol/h et le cas 3, 3 vo/h de sur-ventilation nocturne ; On y observe une translation des courbes proportionnelle au taux de sur-ventilation nocturne mis en œuvre.

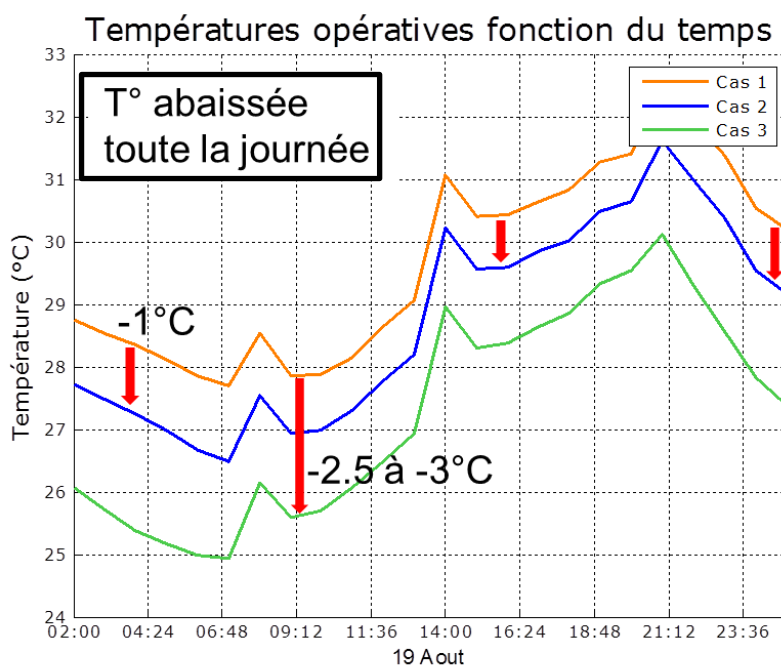


Figure 2-8 : Evolution de températures opératives au cours d'une journée – Climat océanique.

Avec : cas 1 sans, cas 2 avec 1 vol/h et cas 3, 3 vo/h de sur-ventilation nocturne

De même qu'en climat classique, en période de canicule, la sur-ventilation nocturne permet d'abaisser les températures de façon significative tout au long de la période de l'ordre de  $-1^{\circ}\text{C}$  sur les températures maximales par Vol/h de sur-ventilation pour des débits compris entre 0 à 3 Vol/h. La Figure 2-9 illustre cette conclusion ; On y observe une translation des courbes de températures maximales et minimales, proportionnelle au taux de sur-ventilation nocturne mis en œuvre sur une journée caniculaire.

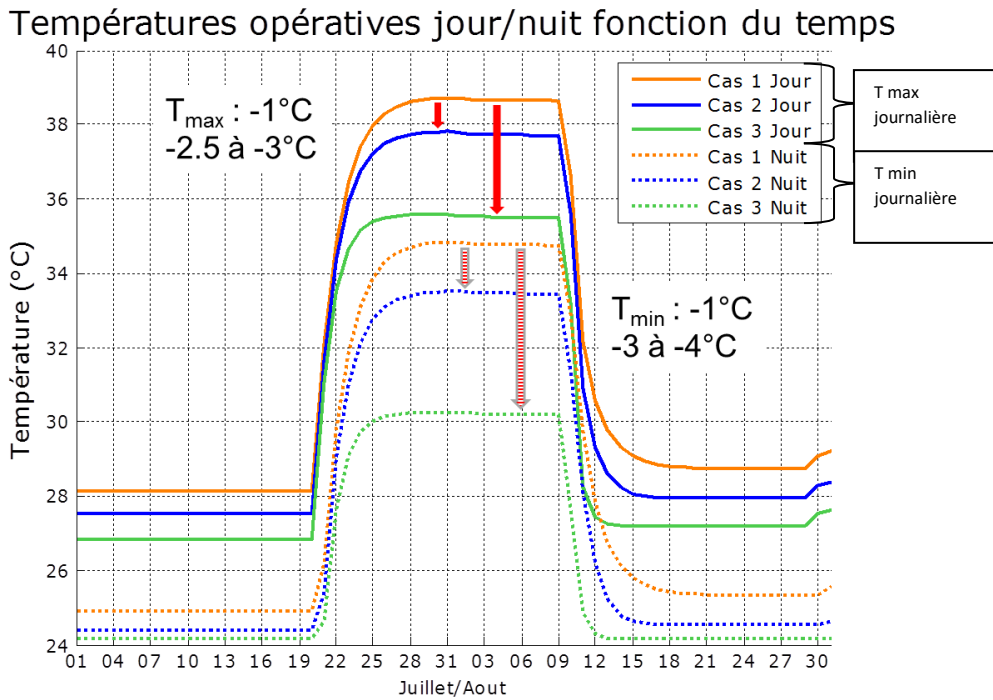


Figure 2-9 : Evolution des températures (minimale et maximale) en période caniculaire

#### 2.4.2 Gestion du bâtiment : Ouverture/Fermeture des volets roulants

- Analyse globale

De même que la sur-ventilation nocturne, une bonne gestion des volets roulants permettra de gagner en confort. La fermeture des volets roulants au Sud permet de diminuer les apports solaires à l'intérieur de la maison, non négligeables au mois d'août malgré les masques présents dans le modèle (balcon et débords de toiture). La fermeture des volets roulants améliore ainsi le confort quelle que soit l'inertie du bâtiment. On peut cependant se rendre compte que la non fermeture des volets roulants (oubli de l'utilisateur, ou nécessité pour celui-ci d'avoir accès à la lumière naturelle) aura un impact beaucoup plus néfaste pour un bâtiment sans inertie que pour un bâtiment à forte inertie comme l'illustre la Figure 2-10.

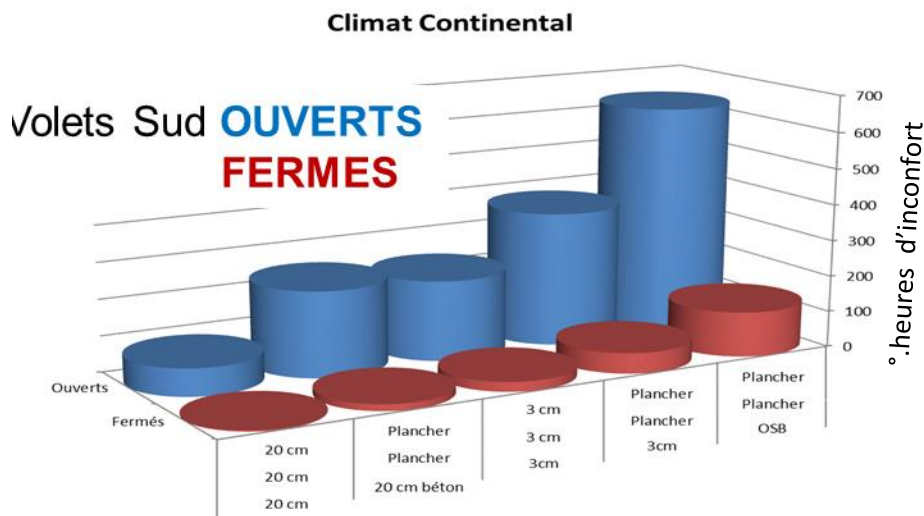


Figure 2-10 : Impact de la non fermeture des volets roulants

- Analyse détaillée

Afin d'évaluer l'impact du paramètre « Ouverture/Fermeture des volets roulants », les deux cas ci-dessous ont été testés en climats classiques et caniculaire.

Tableau 2-4 : Configurations testées

| CAS ETUDIÉS                      | Cas 1         | Cas 2  |
|----------------------------------|---------------|--------|
| <b>Composition des parois</b>    |               |        |
| Murs                             | 3cm béton     |        |
| Planchers (RDC et intermédiaire) | 3cm béton     |        |
| <b>Régulation</b>                |               |        |
| Sur-ventilation nocturne         | 3 Vol/h       |        |
| Volets roulants (Nord/Sud)       | Ouverts       | Fermés |
| <b>Occupation</b>                | Intermittente |        |

- Impact sur le confort en climats classiques

Quel que soit le climat classique étudié (continental, semi-continental, océanique ou méditerranéen), la fermeture des volets roulants permet d'abaisser la température intérieure surtout en journée. la Figure 2-11 et la Figure 2-12, issues de résultats du climat continental, illustrent cette conclusion ; On y observe :

- Sur l'ensemble de la période estivale, une translation des courbes de 1 à 2°C (Figure 2-12),
- Pour une journée type (Figure 2-11), une baisse significative des surchauffes au plus chaud de la journée (après-midi).

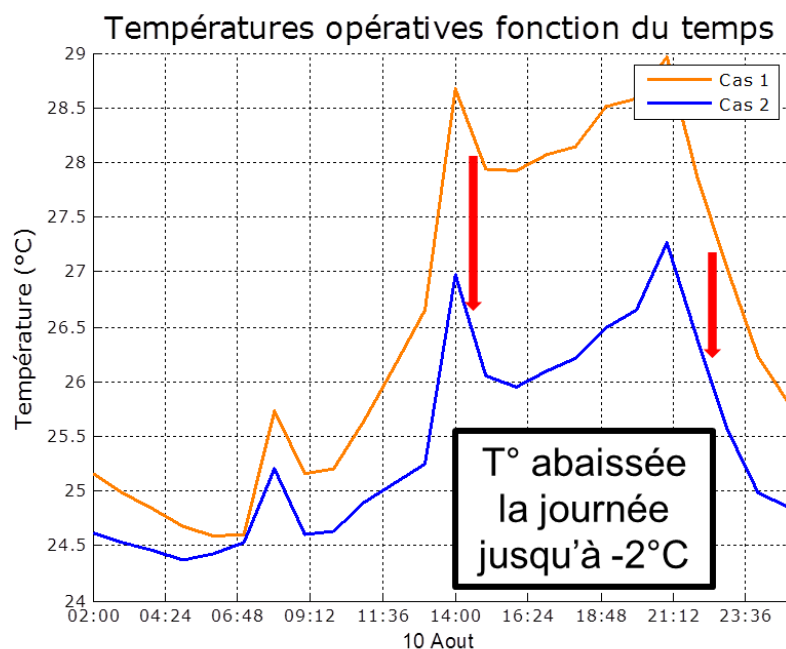


Figure 2-11 : Evolution de températures opératives au cours d'une journée – Climat continental.

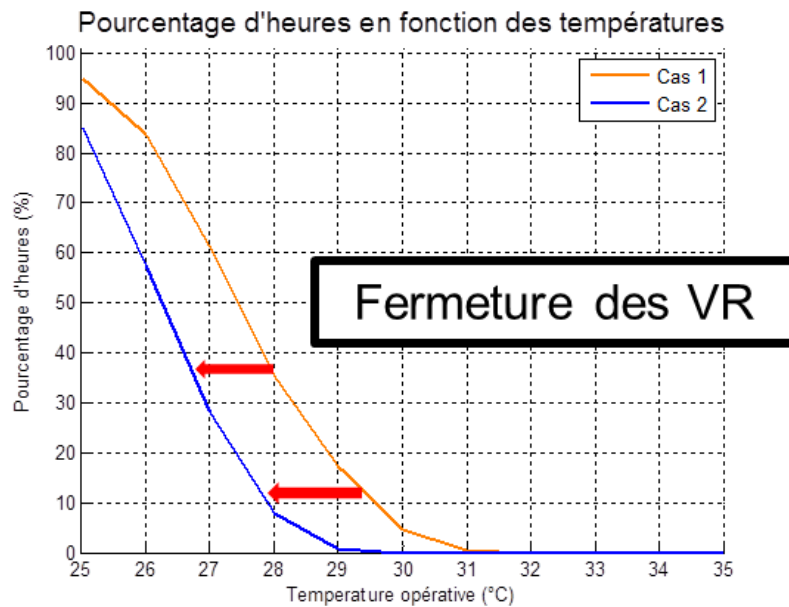


Figure 2-12 : Pourcentages d'heures d'inconfort fonction de la température – Climat continental.

- Impact sur le confort en climat caniculaire

De même qu'en climat classique, fermer les volets roulants en période de canicule permettra de maîtriser les apports solaires et ainsi, d'abaisser les températures et de limiter les surchauffes. L'inertie thermique permet là aussi d'apporter de la robustesse au bâtiment et de moins être impacté par une gestion non optimale des volets roulants si celle-ci est couplée avec de la sur-ventilation nocturne.

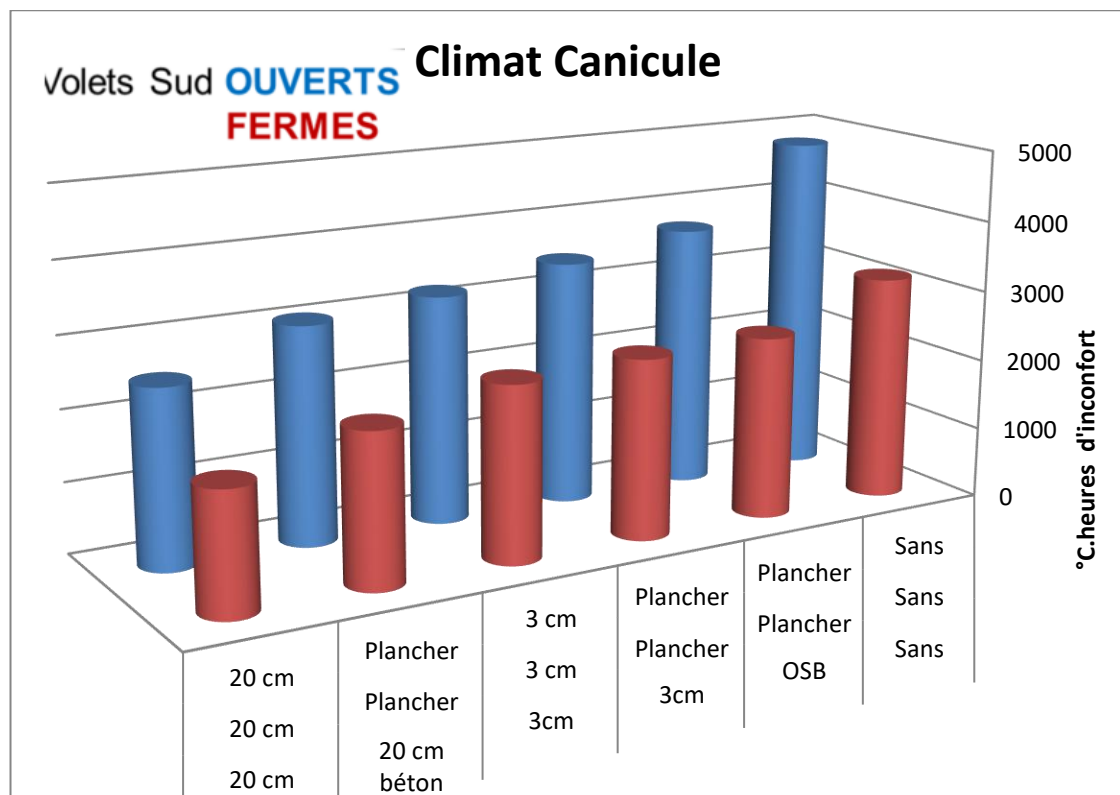


Figure 2-13 : Impact de la gestion des volets roulants en climat caniculaire

### 2.4.3 Quantité d'inertie

Les cas d'étude ont montré qu'en climat dit « classique », les premiers centimètres de masse thermique sont les plus efficaces pour diminuer l'inconfort, comme illustré en Figure 2-14 quand il est soumis à une sollicitation journalière au cours de laquelle la masse thermique pourra être refroidie.

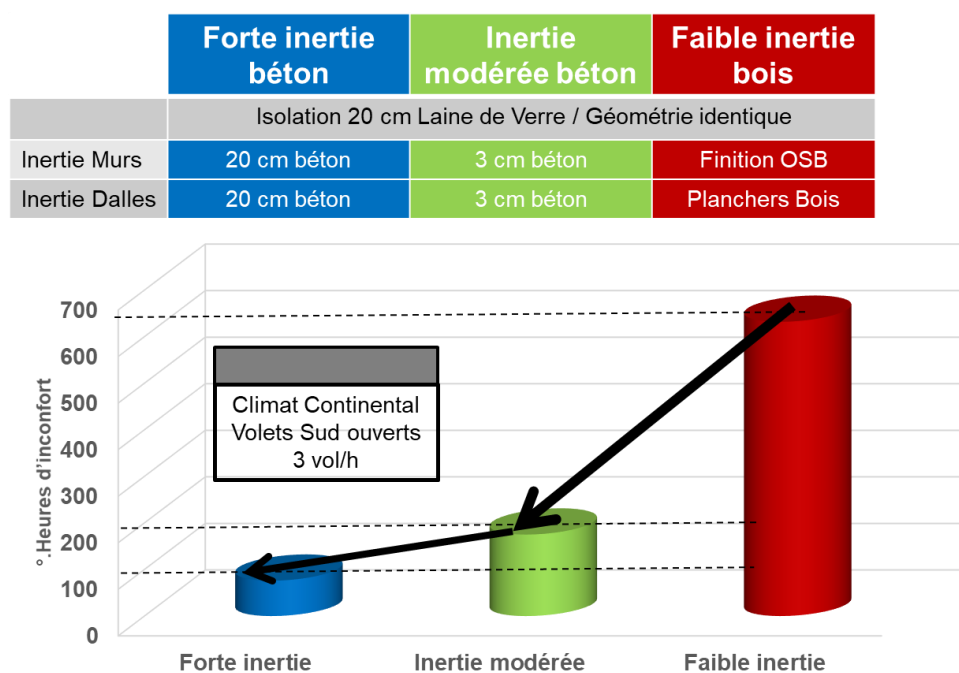


Figure 2-14 : Impact de la quantité d'inertie en climat classique

Dans des climats où la masse thermique ne peut être suffisamment refroidie la nuit, i.e. climat caniculaire, la quantité totale de masse thermique jouera un rôle primordial. Plus la masse thermique est importante, moins le confort sera dégradé (à gestions de bâtiment équivalentes et appropriées) comme illustré en Figure 2-15.

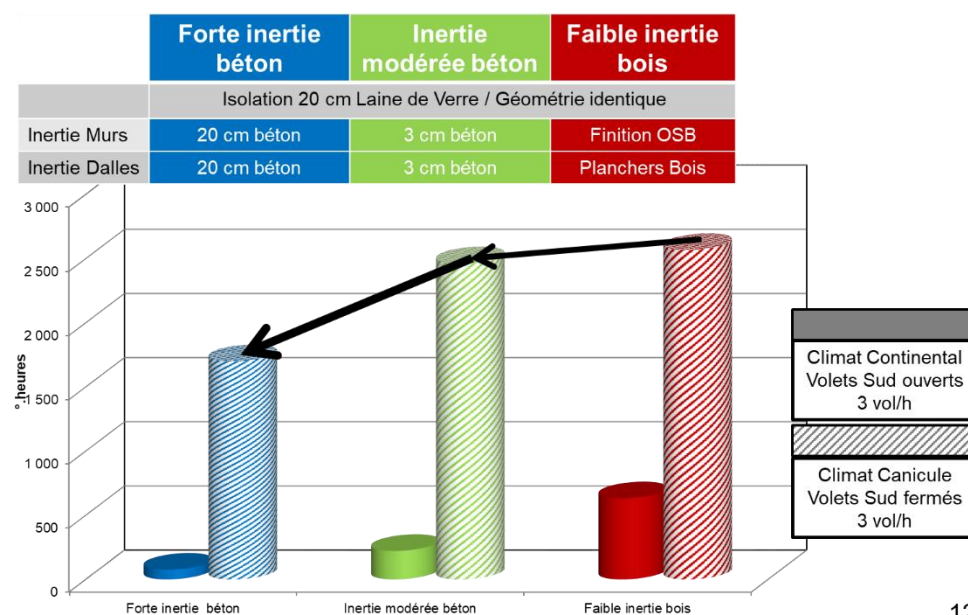


Figure 2-15 : Impact de la quantité d'inertie en climat caniculaire

- Approche globale

La Figure 2-16 illustre à nouveau le fait qu'en climat classique, les premiers centimètres de béton sont ceux qui auront le plus d'impact sur l'amélioration du confort alors qu'en période de canicule l'ensemble de la masse est sollicitée. Les degrés heures d'inconfort en fonction de l'épaisseur de béton mise en œuvre sont représentés (celle-ci étant autant que possible disposée de façon homogène entre dalles et murs) ; Les configurations ont une sur-ventilation nocturne de 3vol/h et les volets roulants Sud ouverts. Il apparaît clairement qu'au-delà de 3cm de béton mis en œuvre dans les murs et planchers, le gain sur l'inconfort est faible en climat classique ; En période de canicule, l'augmentation de la masse thermique permettra de diminuer encore l'inconfort.

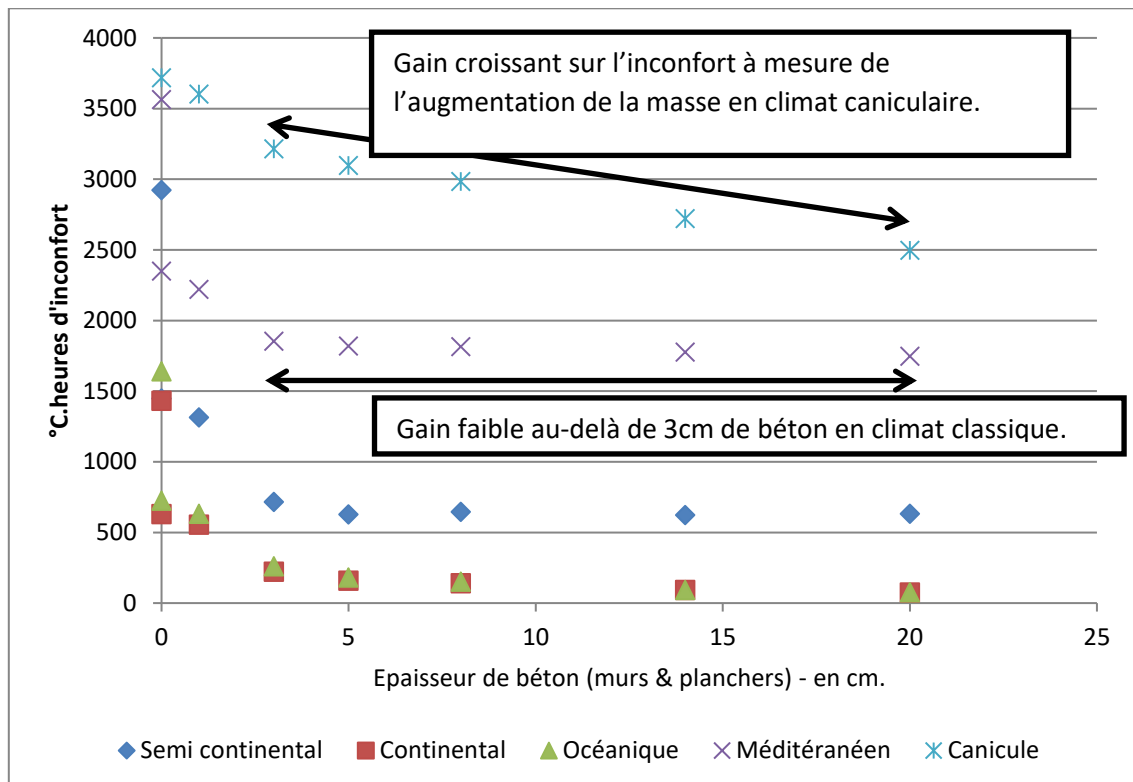


Figure 2-16 : °C.heures d'inconfort en fonction de la quantité d'inertie

- Analyse détaillée en période de canicule

Pour étudier l'influence de la quantité d'inertie sur le comportement thermique d'un bâtiment grâce aux post-traitements détaillés, les trois cas ci-dessous ont été testés en climats classiques et caniculaire :

Tableau 2-5 : Configurations testées

| <b>CAS ETUDIÉS</b>               | <b>Cas 1</b> | <b>Cas 2</b> | <b>Cas 3</b> |
|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Composition des parois</b>    |              |              |              |
| Murs                             | Sans inertie | 3cm béton    | 20cm béton   |
| Planchers (RDC et intermédiaire) | Sans inertie | 3cm béton    | 20cm béton   |
| <b>Régulation</b>                |              |              |              |
| Sur-ventilation nocturne         | 3 Vol/h      |              |              |
| Volets roulants (Nord/Sud)       | Ouverts      |              |              |
| <b>Occupation</b>                |              |              |              |
| Intermittente                    |              |              |              |



En période de canicule, sur la base d'une bonne sollicitation de la masse (sur-ventilation nocturne à 3Vol/h), une quantité croissante d'inertie permettra de réduire l'inconfort dans le bâtiment.

La Figure 2-17 illustre cette conclusion ; On y observe, avec l'augmentation de l'inertie :

- Des températures maximales en baisse significative.

*N.B.* Les valeurs absolues de baisse des températures sont à considérer avec prudence ; En effet, l'ouverture des fenêtres n'est pas considérée dans les simulations, dans la réalité, l'occupant ouvrira probablement ses fenêtres lorsque la température intérieure dépassera la température extérieure.

- Un déphasage croissant : Comparativement au bâtiment sans inertie, le bâtiment à inertie modérée mettra une journée supplémentaire pour atteindre 32°C, contre 7 jours supplémentaires pour le bâtiment à forte inertie.

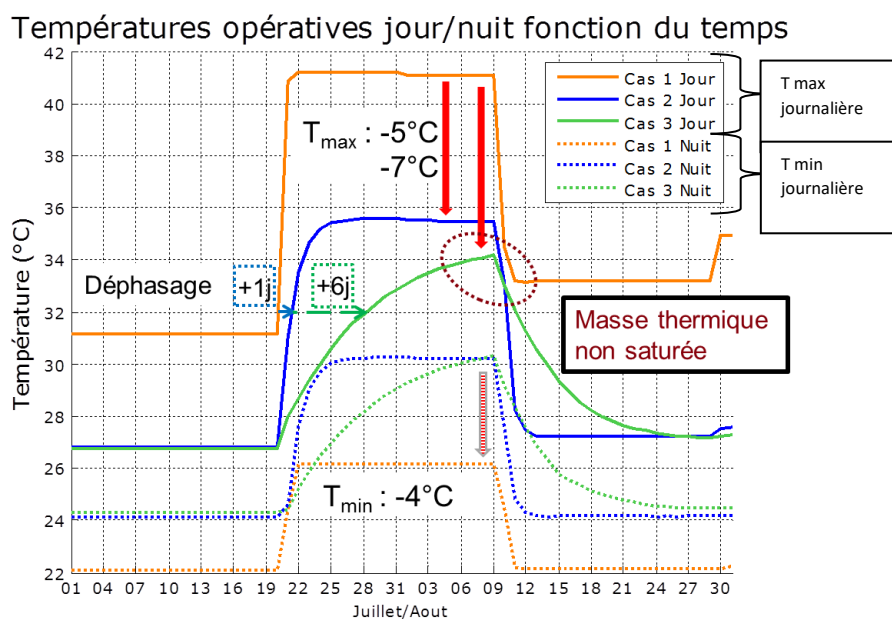


Figure 2-17 : Evolution des températures (minimale et maximale) en période caniculaire

Ce graphique montre également, pendant la canicule, la rapide saturation de la masse thermique dans le bâtiment à inertie modérée ; Dans le bâtiment à forte inertie, en fin de période caniculaire, la masse thermique n'est pas saturée et pourra encore stocker de la chaleur pour maintenir une température intérieure la plus basse possible dans de telles conditions météorologiques. Cependant, pour la période post canicule, le cas avec forte inertie mettra plus de temps à retrouver une température « normale » que les autres cas. Le modèle utilisé a tendance à sous-estimer les coefficients d'échanges air / paroi qui tendraient à défavoriser l'apport de l'inertie dans cette configuration.

#### 2.4.4 Répartition de la masse

- Approche globale

La quantité d'inertie n'est cependant pas le seul critère à prendre en compte pour améliorer le confort. A iso quantité d'inertie, la répartition de la masse au sein du bâtiment est également importante. Elle devra notamment être prise en compte dès la phase de conception en fonction du climat dans lequel le bâtiment se situe. Comme le montre la Figure 2-18, un bâtiment disposant d'une forte masse d'inertie placée en un seul endroit pourra être moins confortable qu'un bâtiment avec une masse thermique globale plus faible mais répartie de façon plus homogène.

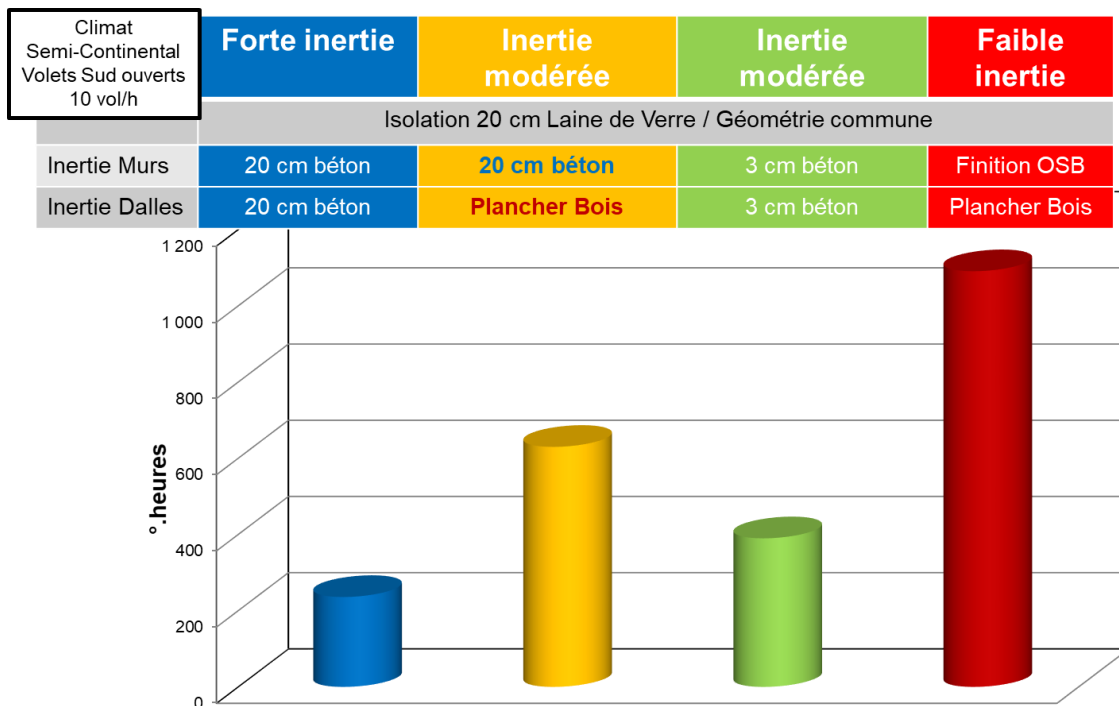


Figure 2-18 : Impact de la répartition de la masse

## 2.5 Conclusion

Cette étude numérique aura pu confirmer que dans le cas d'étude simulé : une maison individuelle bien isolée, présentant de large baies vitrées au sud, **une bonne gestion du bâtiment est le premier facteur pour améliorer le confort dans le logement à commencer par limiter les apports solaires directs** dans la maison en journée. Ensuite lorsque cela est possible et que les nuits sont fraîches, **la sur-ventilation nocturne permet de réduire fortement la température intérieure et ceci toute la journée**. L'inertie thermique n'est cependant pas en reste quand à son apport sur le confort thermique. Même s'il semble préférable en période estivale « classique » d'avoir une maison à faible inertie en limitant les apports solaires direct en journée et en sur ventilant la nuit qu'une maison à forte inertie volets ouverts toute la journée et sans sur-ventilation nocturne, **l'inertie thermique apporte un gain en confort dans une majorité de configurations à iso-sollicitations. L'inertie thermique apporte ainsi au bâtiment de la robustesse et de la résilience** pour reprendre un mot à la mode. La non fermeture des volets roulants aura un impact beaucoup plus néfaste pour un bâtiment sans inertie que pour un bâtiment à forte inertie. La sur-ventilation nocturne permet un net gain en confort pour des maisons à forte inertie, avec comme ordre de grandeur un abaissement de la température de l'ordre de  $-1^{\circ}\text{C}$  par Vol/h de sur-ventilation (de 0 à 3vol/h).

Pour que l'inertie thermique ait un apport sur le confort thermique, il ne suffit pas d'avoir une masse thermique importante dans le bâtiment. Il est tout d'abord nécessaire que **la masse thermique soit accessible**. Une isolation thermique par l'intérieur coupera l'accès à l'inertie thermique et annihilera son impact. **Avoir une isolation thermique par l'extérieur ne garantit pas d'avoir un accès optimal à l'inertie thermique des parois. La finition intérieure jouera un rôle important** pour cela, une configuration très courante d'une lame d'air derrière une plaque de Placoplatre coupera en partie l'accès à cette inertie. **L'étude** présentée dans ce chapitre est restée assez **théorique** et n'a pas regardé ce dernier point. Elle **visait plutôt à regarder le potentiel de l'inertie thermique**. Un autre exemple classique d'inertie thermique non pleinement valorisable est celui des planchers chauffant. Bien souvent la chape en béton de 3 à 5 cm d'épaisseur et dans lesquelles les tuyaux de chauffage sont

coulés est isolée de la dalle en béton d'une épaisseur souvent supérieure à 10cm. Cette configuration restera intéressante pour des sollicitations jour/nuit, mais ne permettra pas de valoriser la totalité de l'inertie thermique du plancher, notamment en période caniculaire. Une possibilité pour continuer d'utiliser les planchers horizontaux comme émetteur de chauffage voire de rafraîchissement est de passer d'un plancher chauffant (avec une faible inertie pour être réactif) à une dalle active moins réactive car valorisant toute l'épaisseur de la masse thermique du plancher. La diminution de la réactivité du plancher pouvant être un atout pour choisir les moments de la journée ou consommer l'énergie pour chauffer le bâtiment tout en diffusant cette énergie de façon plus diffuse. Ceci est d'autant plus facile avec des bâtiments thermiquement peu déperditifs avec de faibles besoins de chauffage et rafraîchissement.

Toujours concernant la « quantité d'inertie » disponible, **lors d'une sollicitation journalière avec une nuit dite « fraîche », les premiers centimètres d'inertie sont les plus importants et permettent la plus grande part de gain en confort.** Pour des climats plus chauds ou des **périodes de canicule, une forte inertie ou l'ajout de masse thermique amélioreront nettement le confort** au sein de la maison.

L'étude a aussi pu démontrer **l'importance de la répartition de la masse thermique.** En effet, il ne suffit pas d'avoir une masse thermique importante dans un bâtiment pour en garantir le confort ; Une bonne répartition est importante notamment entre les murs, les dalles du rez-de-chaussée et de l'étage.

En conclusion, ce chapitre a pu montrer l'apport et les limites de l'inertie thermique sur le comportement thermique d'une maison bien isolée dans différents climats. Bien que le modèle numérique ait pu être comparé à plusieurs reprises à des mesures, ceci reste cependant une étude assez théorique par simulation avec certaines limites. Certaines d'entre elles pourraient être améliorées dans le modèle, comme une meilleure gestion de l'ouverture des fenêtres au-dessus d'une certaine température intérieure ou vis-à-vis de la température extérieure d'une part ou la prise en compte d'autres finitions intérieures comme une lame d'air avec une plaque de Placoplatre d'autre part. D'autres limitations nécessiteront d'avoir un retour d'expérience « terrain » pour consolider ces conclusions. Ce sera l'objectif des deux prochains chapitres.

Le chapitre suivant gardera le même cas d'étude, les maisons INCAS, et comparera le comportement thermique de 2 maisons INCAS sur une période estivale en jouant sur l'ouverture des fenêtres la nuit pour rendre possible la ventilation naturelle nocturne. Il sera basé à la fois sur une étude expérimentale et une numérique.

## Chapitre 3 - Impact de la ventilation naturelle nocturne et de l'inertie thermique sur le confort d'été : comparaison mesures / simulation sur 2 modes constructifs

### **Résumé :**

En été, l'inertie thermique apparaît comme une solution passive pour améliorer le confort thermique dans de nombreuses régions d'Europe. L'objectif de ce chapitre est, dans un premier temps, de générer des données sur le confort thermique de maisons à haute performance énergétique en été, en mettant l'accent sur l'impact de l'inertie thermique et de la ventilation naturelle nocturne. Dans un deuxième temps, des simulations numériques sont effectuées sur ces configurations afin de comparer leurs systèmes constructifs. Ce travail confirme l'impact positif de l'inertie thermique et de la ventilation naturelle nocturne sur le confort thermique des bâtiments à haute performance énergétique en climat continental. Il permet également de quantifier la différence de température intérieure sur ce cas d'étude et de s'assurer de la fiabilité des modèles numériques. Le taux de renouvellement d'air simulé est fortement dépendant de la vitesse du vent et varie de 2 à 3 vol/h pour une faible vitesse de vent entre 0,5 et 1 m/s et peut atteindre jusqu'à 12 vol/h pour une vitesse de vent plus élevée atteignant 3 m/s. Enfin, contrairement à ce qui est mentionné dans de nombreux articles, aucun déphasage significatif entre l'enveloppe lourde et l'enveloppe légère n'a été mis en évidence pour les sollicitations considérées et peut s'expliquer par la sollicitation de l'inertie thermique pas absorption et non pas par transmission.

### **Contexte de la réalisation de ces travaux :**

Les travaux présentés dans ce chapitre ont été réalisés entre 2013 et 2015. Ce sont les premiers travaux expérimentaux significatifs auxquels j'ai contribué en lien avec le confort d'été et une qualification de la performance de bâtiments. Ces travaux ont été réalisés en grande partie au cours du stage et du CDD de S. Truchet que j'ai encadré et accompagné dans ces tâches. Outre cet accompagnement j'ai été à l'initiative des campagnes expérimentales réalisées et contribué significativement à l'analyse des résultats. Bien qu'anciens, ces travaux ont récemment été publiés dans International Journal of Ventilation (15).

### 3.1 Introduction et objectif de l'étude

Le premier objectif de ce travail est de comparer le comportement thermique en été de deux systèmes constructifs différents de maisons performantes en climat continental. Pour cela, la méthodologie illustrée à la Figure 3-2 a été développée.

Dans un premier temps, 2 maisons expérimentales INCAS avec occupation simulée dans des conditions météorologiques réelles, décrites dans la section suivante, ont été utilisées. Ces maisons sont similaires en géométrie et en performances d'isolation avec une différence principale dans leur système de construction induisant une inertie thermique très différente (enveloppe lourde (H-A-M) vs enveloppe légère (L-B-M)). Grâce à une métrologie adaptée et continue en août et septembre 2013, le comportement thermique de chaque maison peut être analysé (étape 1). Même si ces deux maisons sont similaires, elles présentent de légères différences dans leur géométrie, notamment dans les propriétés des fenêtres (la géométrie A correspond à la maison expérimentale à forte inertie – I-BB, et la géométrie B correspond à la maison expérimentale légère – I-OB). Ceci ne permet pas de comparer directement les résultats expérimentaux et de conclure sur l'impact du système constructif sur le comportement thermique.

Cette différence nous a conduit à utiliser la Simulation Thermique Dynamique dans les étapes suivantes. L'étape 2 consiste à développer un modèle numérique pour chaque maison (H-A-S, L-B-S), et à comparer les résultats numériques avec les données expérimentales, l'étape 2a pour la maison lourde (H-A-M vs H-A-S), et l'étape 2.b pour la maison légère (L-B-M vs L-B-S). Dans ces étapes, il est montré que les deux modèles numériques reproduisent correctement le comportement thermique des maisons réelles.

L'étape suivante consiste à développer un modèle numérique identique, à l'exception du système de construction. Pour cela, un deuxième modèle léger (L-A-S) a été développé pour lequel la construction de la maison légère (L) a été appliquée à la géométrie lourde (A). L'étape 3 comparera les résultats numériques d'une maison légère avec sa configuration d'origine (L-B-S) avec la géométrie de la maison lourde (L-A-S).

Enfin, l'étape 4 comparera le système de construction des maisons légères (L-A-S) vs lourdes (H-A-S) tout le reste étant identique.



Figure 3-1: Maisons INCAS

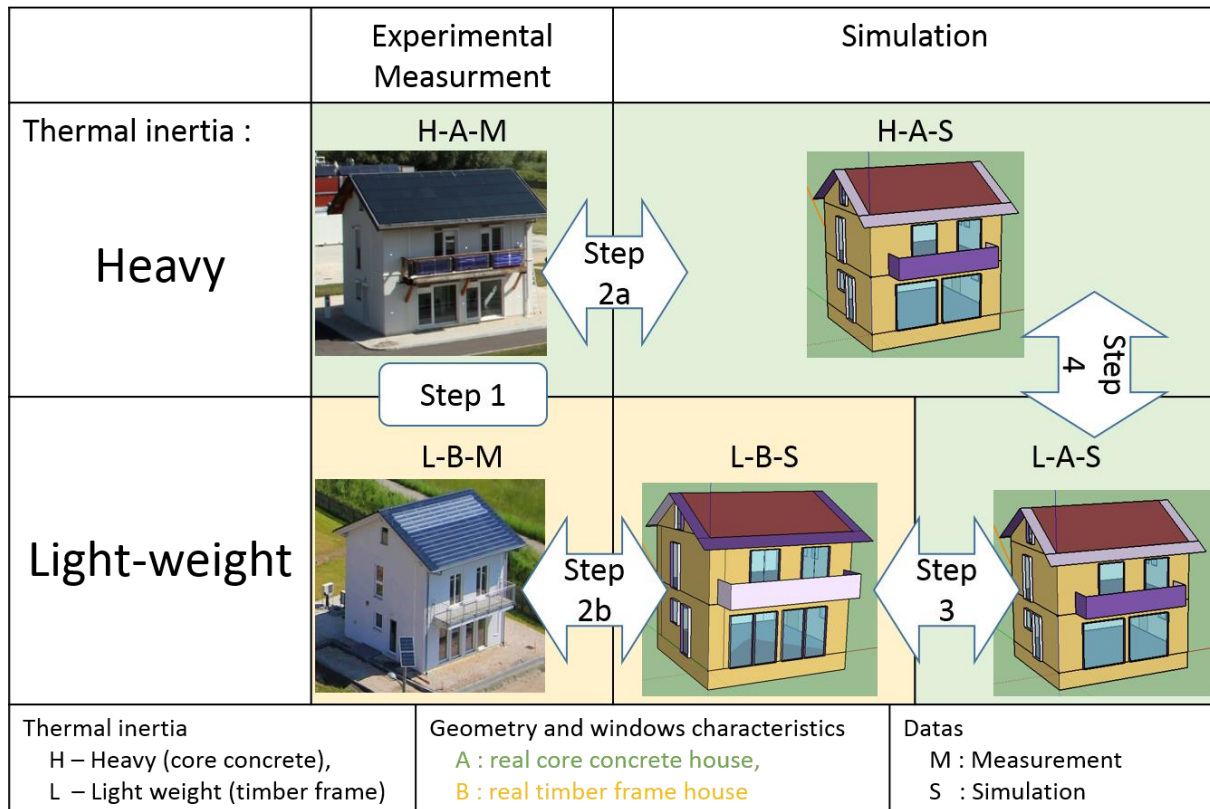


Figure 3-2 : Méthodologie Comparaison Mesures / Simulations

### 3.2 Cas d'étude

#### 3.2.1 Description des maisons expérimentales

Quatre maisons expérimentales, nommées INCAS, sont construites sur la plate-forme expérimentale extérieure (Figure 3-1) de l'Institut national de l'énergie solaire (INES). La plate-forme est située au Bourget du Lac (N : 45°650, E : 5°867). Ces bâtiments sont orientés à 15,3° sur un axe Nord/Sud. Leurs géométries sont simples, compactes et de forme similaire. Elles ont été conçues pour avoir les mêmes besoins de chauffage.

Ces maisons sont des bâtiments basse consommation répondant au standard Passiv-Haus pour leur besoin de chauffage. Au rez-de-chaussée de ces maisons, il y a : une cuisine, un séjour, une entrée, un cellier et un WC. Le premier étage est composé de 3 chambres, une salle de bain et un WC.

Dans cet article, seuls deux de ces bâtiments sont étudiés : la maison I-BB «béton banché » (que nous nommerons H-A dans cet article) et la maison à ossature bois I-OB (que nous nommerons L-B). La maison I-BB (H-A) a une forte inertie thermique. Le bâtiment est en béton banché avec une isolation extérieure. La maison dispose de double vitrage côté Sud, Est et Ouest et de triple vitrage côté Nord. La maison I-OB (L-B) est une maison à ossature bois, qui représentera un bâtiment à faible inertie thermique. Le vitrage est triple côté Sud et Ouest et double-double côtés Est et Nord.

#### 3.2.2 Métrologie

Chaque maison contient environ 100 capteurs. Les capteurs mesurent la température de l'air, la température radiante, la température des parois, l'humidité, la vitesse de l'air, etc. L'acquisition est continue au pas de temps d'une minute. Dans cet article, seule la température de l'air intérieur est



présentée. Pour cela, des capteurs de température PT100 (classe A, précision  $\pm 0,35^{\circ}\text{C}$ ) ont été utilisés. Ces capteurs sont situés au milieu de chaque pièce à différentes hauteurs : 0,1 m, 1,1 m et 1,7 m. Ils sont protégés du rayonnement solaire direct par des boucliers cylindriques en métal blanc. La plateforme expérimentale dispose d'une station météo, à 50 mètres des maisons permettant de mesurer la température extérieure, le rayonnement solaire (direct global et diffus), la vitesse et la direction du vent, l'humidité, la pression atmosphérique.

### 3.2.3 Scénarios

Deux scénarios ont été étudiés et sont décrit en Tableau 3-1:

Tableau 3-1 - Définition des scénarios

|        | Scénario 1: avec ventilation naturelle nocturne – Volets Sud ouvert |                                 |                     | Scenario 2: sans ventilation naturelle nocturne – volets fermés |                   |                     |
|--------|---|---------------------------------|---------------------|---|-------------------|---------------------|
|        | Débit de ventilation mécanique                                      | Etat des fenêtres               | Position des volets | Débit de ventilation mécanique                                  | Etat des fenêtres | Position des volets |
| 7h→21h | 0.5 vol/h   | Fermées                         | Fermés sauf au sud  | 0.5 vol/h   | Fermées           | Fermés sauf au sud  |
| 21h→7h | OFF   | 1 ouverte / orientation / étage | Ouverts             |   |                   |                     |

Tableau 3-2 - Scénarios appliqués

|       | Semaine 1: 25/08 → 30/08                         | Semaine 2: 30/08 → 05/09                        |
|-------|--|---|
| H-A-M | Scenario 1: Avec ventilation naturelle nocturne  | Scenario 2: Sans ventilation naturelle nocturne |
| L-B-M | Scenario 1 : Avec ventilation naturelle nocturne |   |

L'ouverture des fenêtres se fait par des ouvrants oscillo-battants comme illustré Figure 3-3 sur la fenêtre du milieu.



Figure 3-3: Fenêtre Oscillo-battante de la maison Ossature-bois (L-B), RDC paroi sud

### 3.2.4 Simulation

Un modèle numérique de chaque maison INCAS est développé à l'aide du logiciel EnergyPlus. L'objectif est de comparer ces résultats de simulation avec les mesures sur site. Puis d'utiliser la simulation pour comparer plusieurs simulations entre elles, ou tous les paramètres peuvent être considérés comme constant.

- Outil

Pour les simulations thermiques dynamiques des bâtiments, le logiciel EnergyPlus 8.1 a été utilisé. Cet outil a été développé par le U.S. Department of Energy Building Technologies Office. Il modélise, entre autres, le transfert de chaleur à travers les murs et les fenêtres, la ventilation mécanique, la ventilation naturelle, les charges de refroidissement et de chauffage et les systèmes. Le logiciel est très utilisé par la communauté scientifique (28), (93). Il a été testé et validé par des résultats empiriques, des solutions analytiques et d'autres outils (94), (95), (96).

- Modèle numérique

Les maisons sont modélisées avec quatre zones thermiques : le vide sanitaire, le rez-de-chaussée, le premier étage et les combles. L'algorithme TARP est utilisé pour toutes les zones pour calculer les phénomènes de convection en surface des parois. La porte entre le rez-de-chaussée et le premier étage était fermée mais non scellée. Cependant, il est supposé dans la simulation qu'il n'y a pas de flux d'air entre les deux zones. Aucune infiltration d'air n'est envisagée entre le rez-de-chaussée et le premier étage. Les ponts thermiques du rez-de-chaussée sont pris en compte avec une résistance thermique de  $0,0625 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  pour H-A (I-BB) et  $0,0883 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  pour L-B (I-OB). Les infiltrations ont été mesurées avec une porte soufflante. Les infiltrations ont été définies dans le modèle à  $0,0156 \text{ vol/h}$  pour la maison H-A (I-BB) et  $0,0324 \text{ vol/h}$  pour L-B (I-OB). Les centrales d'acquisition présentes dans les maisons produisaient des gains de chaleur internes. Ceci a été pris en compte en connaissant leur nombre et leur position dans les maisons, les gains de chaleur internes ont été fixés à  $160 \text{ W}$  pour le rez-de-chaussée et  $40 \text{ W}$  pour le premier étage de la maison H-A (I-BB) et  $70 \text{ W}$  pour le rez-de-chaussée et  $40 \text{ W}$  pour le premier étage de la maison L-B (I-OB). Les gains de chaleur internes sont définis comme  $70 \%$  dégagés par convection et  $30 \%$  par rayonnement.

Concernant la ventilation, sans ventilation naturelle, le débit de ventilation est supposé à  $0,5 \text{ vol/h}$  pour le rez-de-chaussée et le premier étage. Lorsque la ventilation naturelle est activée, le modèle Wind and Stack Open Area d'EnergyPlus est utilisé. Dans cette configuration, le débit d'air de ventilation est déterminé à partir de la vitesse du vent et de l'effet de cheminée thermique, ainsi que de la surface de l'ouverture modélisée.

## 3.3 Résultats et discussions

### 3.3.1 Etape 1

Pour rappel, cette étape consiste à analyser les mesures obtenues au cours des différents scénarios. Dans ce paragraphe, seule la température de l'air intérieur du rez-de-chaussée est présentée.

- Conditions météorologiques

Les mesures de la température extérieure journalière et de l'irradiance horizontale globale sont présentées sur la Figure 3-4 du 25/08 au 05/09. Le climat du Bourget du Lac est continental. Ces courbes montrent que les températures maximales diurnes varient de  $23$  à  $35^\circ\text{C}$  et de  $9^\circ\text{C}$  à  $21^\circ\text{C}$  pour leurs minimales nocturnes. L'amplitude de température journalière varie de  $9^\circ\text{C}$  à  $21^\circ\text{C}$ .



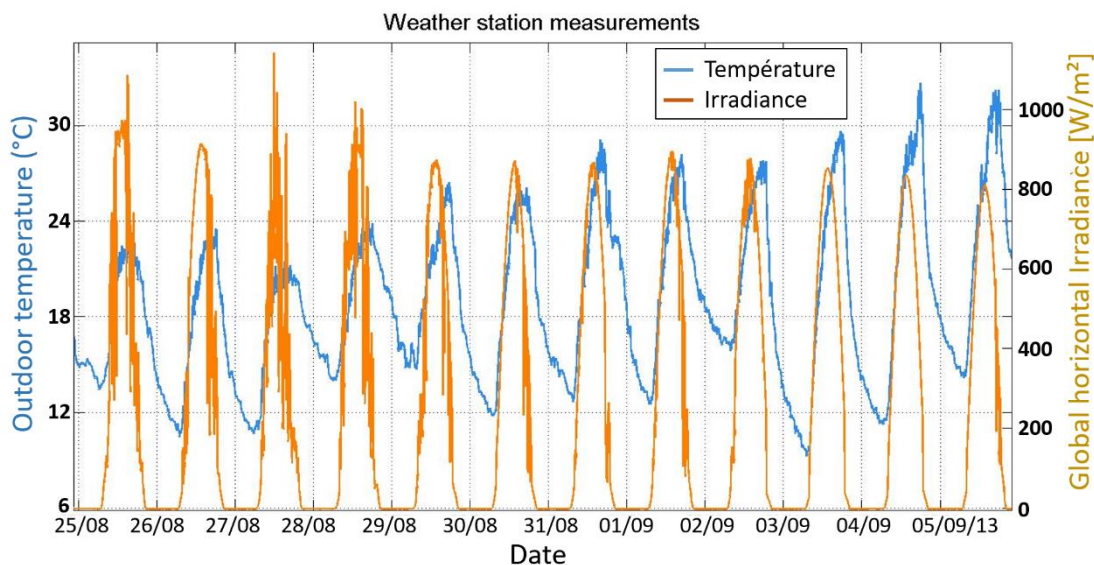


Figure 3-4 : Mesures de la station météo - du 25/08 au 05/09

- Différence de température de l'air intérieur au rez-de-chaussée

Comme mentionné précédemment, de nombreux capteurs sont installés dans chaque maison, notamment pour la température de l'air. La Figure 3-5 montre la température de l'air en différents points du rez-de-chaussée de la maison H-A pour la 1<sup>ère</sup> semaine correspondant à un scénario avec ventilation naturelle nocturne. La plupart des capteurs sont situés à 1,1 m de hauteur sauf deux dans le salon : un à 0,1 m et l'autre à 1,7 m de hauteur. Cela illustre l'hétérogénéité de la température de l'air sur un même niveau. Des températures plus élevées sont enregistrées près des fenêtres sud (salon, salle à manger) pendant la journée. Des températures relativement plus basses sont enregistrées à des endroits éloignés des fenêtres (WC, entrée). Ceci est prévisible en raison de l'effet des apports solaires passant par les grandes fenêtres sud et chauffant principalement la partie plancher qui se trouve à proximité de ces fenêtres. L'écart entre tous les capteurs peut atteindre environ 1.5°C. La température de l'air au rez-de-chaussée de la maison L-B n'est pas présentée dans cette étude, mais les résultats sont similaires sur l'écart des mesures.

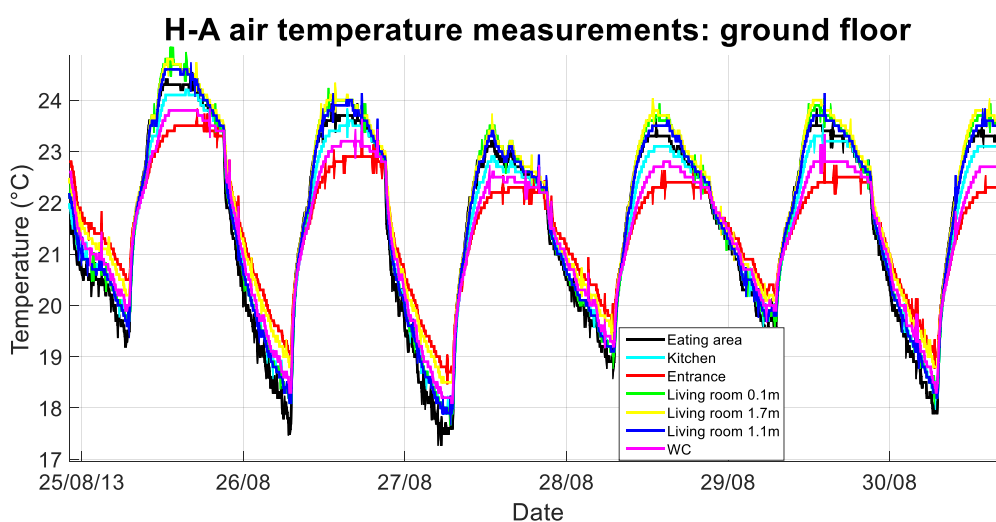


Figure 3-5: H-A température d'air au RDC

Pour les parties suivantes, lorsqu'une seule mesure est affichée, le capteur du salon à 1,1 m de hauteur est choisi. Ce capteur est choisi car il est situé au milieu du rez-de-chaussée.

- **Température de l'air dans chaque maison**

Les mesures de la température de l'air intérieur dans le salon à 1,1 m de hauteur pour les deux maisons H-A et L-B sont présentées à la Figure 3-6.

Du 25/08 au 30/08, le même scénario, numéro 1 avec ventilation naturelle nocturne – volets sud ouverts, est appliqué dans les deux maisons. A 7h les volets (sauf Sud) et les fenêtres sont fermés, il y a une augmentation directe de la température de l'air à cause des fenêtres fermées. L'augmentation de la température de l'air le matin est plus rapide dans la maison à forte inertie H-A que dans la maison à faible inertie L-B ce qui est principalement dû aux différences provenant des fenêtres. En effet, les gains de chaleur solaire sont environ 40 % plus faibles dans la maison en ossature bois L-B par rapport à la maison en béton banché H-A. A 21h, une baisse significative de la température de l'air apparaît, lors de l'ouverture des fenêtres, due à la ventilation naturelle. Pour ce scénario et cette condition extérieure, ces maisons ont un comportement similaire.

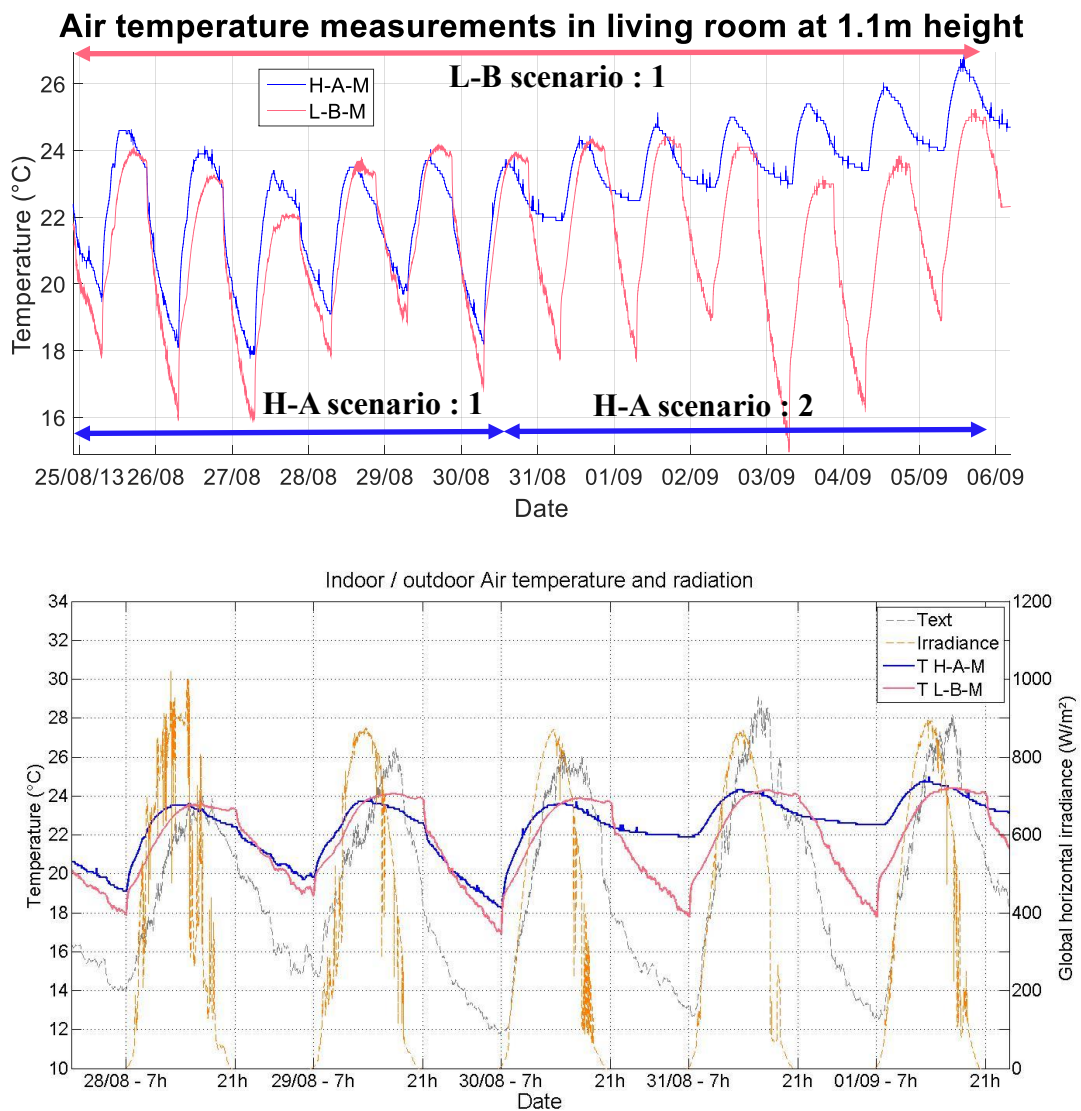


Figure 3-6 : Température d'air mesurées dans le séjour du 25/08 au 06/09 (Figure du haut)

Zoom du 28/08 au 01/09 avec la météo (Figure du bas)

A partir du 30/08 midi, les deux maisons ne suivent plus le même scénario. La maison en béton banché H-A suit le scénario 2 (sans ventilation naturelle nocturne – volets fermés) tandis que la maison à ossature bois L-B continue de suivre le scénario 1 (avec ventilation naturelle nocturne – volets sud ouverts). La Figure 3-6 met en évidence l'impact important de la ventilation naturelle nocturne sur le comportement thermique pour les deux typologies de construction. En effet, L-B garde le même comportement thermique contrairement à H-A. Sans ventilation naturelle – volets fermés, la température moyenne de l'air dans la maison H-A augmente jour après jour et l'amplitude journalière se réduit à environ 2°C (contre une amplitude de 5 à 6°C pour le scénario 1). Le matin, la température intérieure dans H-A volets fermés, commence à augmenter un peu plus tard (environ 30 minutes) qu'avec volets sud ouverts (comme L-B), qui suit le rayonnement solaire et l'augmentation de la température extérieure.

### 3.3.2 Etape 2 : Comparaison mesures / simulations

Dans cette partie, la comparaison de la température de l'air entre les mesures et les simulations (étapes 2a et 2b) est effectuée. Les simulations sont réalisées avec un pas de temps d'une minute. Dans ce paragraphe, seul le rez-de-chaussée est présenté, les résultats au premier étage sont similaires.

- **Étape 2a : Maison à forte inertie I-BB**
  - Scénario 1 : Avec ventilation nocturne naturelle – volets sud ouverts

Tout d'abord, les mesures et la simulation de la maison H-A pour le scénario 1 sont comparées.

Comme illustré sur la Figure 3-7, et compte tenu de la plage d'incertitude des mesures des capteurs, les données mesurées et simulées sont suffisamment proche pour considérer que le modèle numérique de la maison représente correctement le comportement thermique de la maison. L'écart maximum entre une mesure et la simulation est d'environ 1°C et apparaît de jour. Les pics diurnes sont plus prononcés pour le modèle numérique. La raison peut être que le modèle surestime la quantité de rayonnement solaire entrant dans la maison et/ou sous-estime l'inertie thermique de la maison. On observe également que les pics sont en phase entre les mesures et la simulation.

- Scénario 2 : sans ventilation naturelle nocturne – volets fermés

Ensuite, les températures de l'air mesurées et simulées pour le scénario 2 sont comparées. La Figure 3-7 montre un accord satisfaisant entre les mesures et le modèle numérique. L'écart maximum est d'environ 1°C entre une mesure et la simulation et d'environ 2°C juste entre les mesures dues aux positions des capteurs. On peut cependant noter que la dérive de montée en température est légèrement plus lente en simulation que dans les mesures.

Nous pouvons ainsi conclure qu'au regard de la comparaison entre les mesures et les résultats de simulation, le modèle numérique de la maison H-A représente correctement le comportement thermique de celle-ci.

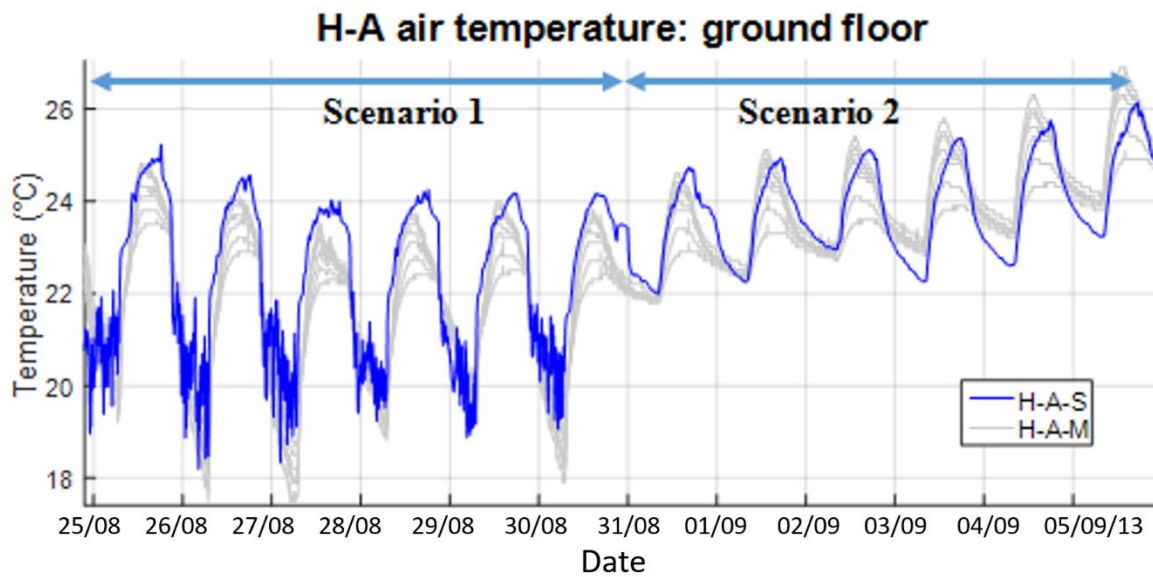


Figure 3-7: Température d'air au RDC Maison à forte inertie

- Étape 2b : Maison à faible inertie I-OB.

La Figure 3-8 montre la température de l'air mesurée et simulée du rez-de-chaussée de la maison L-B pour la période d'août. Là aussi, il y a un bon accord entre le modèle numérique et les mesures. De jour comme de nuit, les températures de l'air simulées sont très proches des mesures (écart inférieur à 0,5°C). De plus, les pics sont en phase entre les mesures et la simulation.

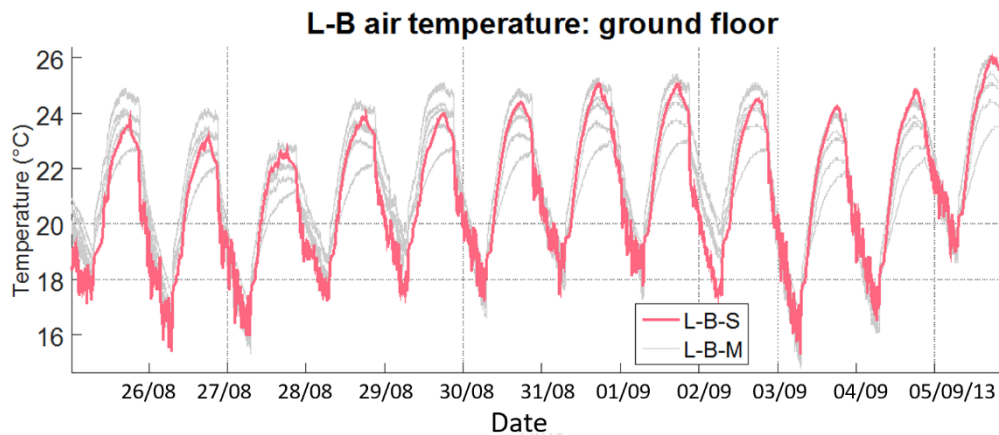


Figure 3-8 : Température d'air au RDC Maison à faible inertie

Dans cette partie nous avons comparé les températures de l'air intérieur entre les mesures et les simulations pour ces deux maisons. Les résultats ont montré un accord acceptable entre le modèle numérique et les mesures.

Dans la partie suivante l'objectif est d'estimer l'impact du type de construction sur la performance thermique à partir de ces modèles numériques. Mais comme nous l'avons vu précédemment des différences existent entre eux : la géométrie, les fenêtres, les apports de chaleur internes, et le débit d'air par infiltration.

### 3.3.3 Étape 3 : Impact des différences géométriques des maisons expérimentales – Comparaison numérique basée sur le modèle géométrique de la I-BB

Un nouveau modèle numérique de la maison légère a été défini. Le modèle a le type de construction de la maison L-B. Mais la géométrie, les fenêtres, les ponts thermiques et le débit d'air des infiltrations sont les mêmes que la maison H-A. Le nouveau modèle s'appelle L-A. La figure 9 montre la température de l'air simulée pour la maison L-B et la maison L-A, donc avec le même système constructif mais une géométrie et surtout des menuiseries différentes. Pendant la journée, la température de l'air intérieur L-A est supérieure à L-B (environ 2°C pour les pics diurnes) en raison de gains de chaleur solaire plus importants, comme expliqué précédemment. En effet, la géométrie A a des fenêtres en double vitrage et la surface de vitrage est plus importante (+2,2m<sup>2</sup> pour le rez-de-chaussée). Le balcon est également plus petit pour la géométrie A, donc l'irradiance solaire rentrant dans cette maison est plus importante. La nuit, la température de l'air intérieur est proche entre les bâtiments (écarts inférieurs à 0,5°C).

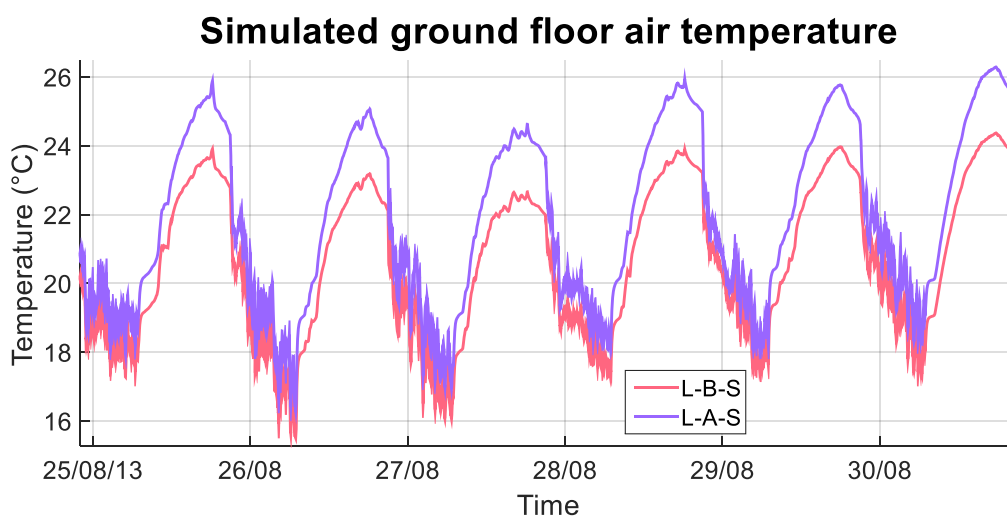


Figure 3-9 : Températures d'air simulées pour les 2 maisons

### 3.3.4 Etape 4 : Impact de l'inertie thermique et de la ventilation naturelle nocturne sur le comportement thermique

L'objectif de cette dernière étape est de comparer le type de construction des deux maisons expérimentales et en particulier l'impact de l'inertie thermique. Pour cela, des modèles numériques H-A et L-A sont utilisés. La figure 10 représente la température d'air pour les 2 modèles H-A et L-A simulée en août. Comme mentionné ci-dessus, le modèle numérique utilisé pour L-A a les caractéristiques de H-A en terme de géométrie et des menuiseries identiques, afin de comparer uniquement le système constructif de ces deux maisons. Les pics diurnes pour la température L-A sont supérieurs à H-A (jusqu'à 2°C pour le 28 août) car la maison H-A a plus d'inertie donc les gains de chaleur sont en partie absorbés par la masse thermique et la température de l'air augmente moins vite. La nuit, la température L-A diminue plus que H-A (environ 2°C). En effet la ventilation naturelle libère l'énergie absorbée en journée et la maison H-A stocke plus de gains de chaleur que L-A pendant la journée. L'amplitude jour/nuit est plus faible (autour de 3°C) pour la maison H-A du fait de l'inertie, mais permet de maintenir la maison H-A dans une plage de température plus resserrée entre 19 et 25°C la plupart du temps pour ces conditions climatiques.

Ceci confirme l'impact de l'inertie thermique en climat continental sur le facteur de décroissance avec la réduction de l'amplitude journalière de température et de la température maximale pour améliorer

le confort thermique. Cependant, contrairement à ce qui est mentionné dans de nombreux articles, aucun décalage temporel significatif entre les deux types de construction n'a été mis en évidence.

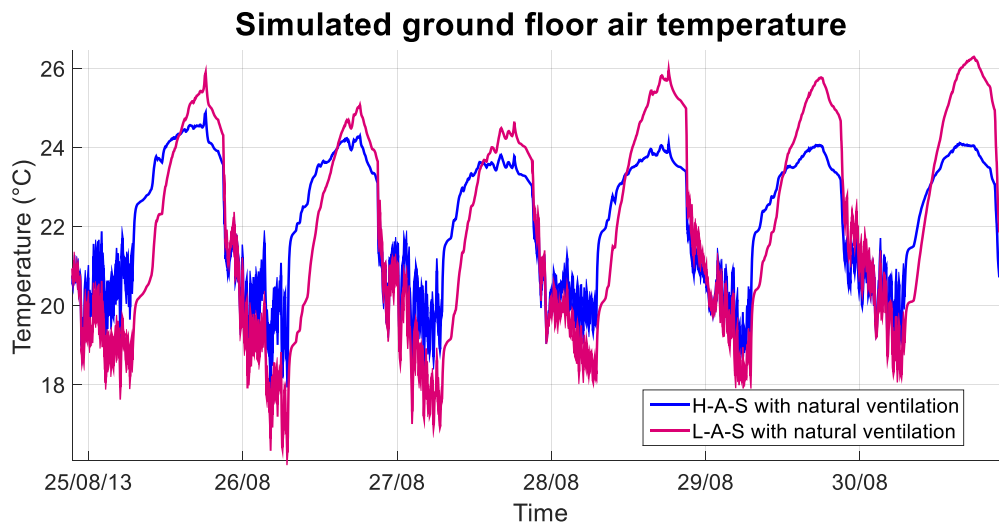


Figure 3-10 : Température d'air simulées : L-A & H-A configuration

Dans cette configuration, le taux de renouvellement d'air varie d'une nuit à l'autre et est fortement dépendant de la vitesse du vent comme le montre la Figure 3-11. Les débits d'air varient de 2 à 3 vol/h pour une faible vitesse de vent (entre 0,5 et 1 m/s) et peut atteindre jusqu'à 12 vol/h pour une vitesse de vent plus élevée (atteignant 3 m/s).

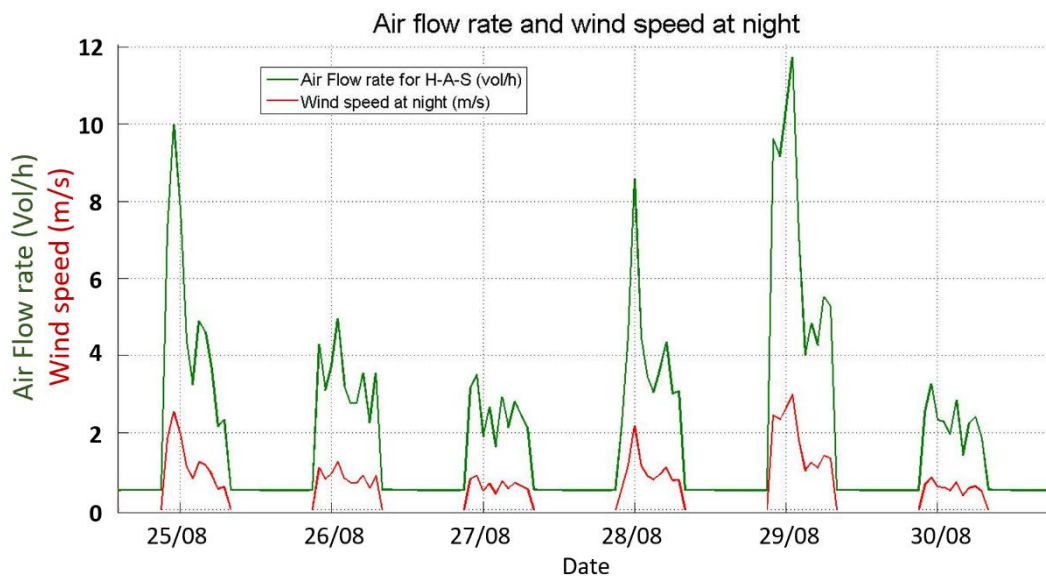


Figure 3-11: Débit d'air simulé au RDC pour H-A-S, et vitesse du vent la nuit

Afin de qualifier l'impact à la fois de la ventilation naturelle nocturne et de l'inertie thermique, 4 simulations ont été réalisées et sont présentées ici, 2 avec le modèle H-A, 2 avec L-A. Pour chaque niveau d'inertie thermique, 2 scénarios différents ont été appliqués à partir du 31/08, un avec ventilation naturelle nocturne et volets sud ouverts (scénario 1), un sans ventilation naturelle nocturne et volets fermés (scénario 2). Chaque simulation a le même scénario appliqué jusqu'au 30/08, avec ventilation naturelle nocturne (scénario 1), comme décrit dans le tableau 3.



Tableau 1: Scenarios appliqués

|                | Configurations  | 01/08→30/08                                       | 31/08→08/09                                      |
|----------------|-----------------|---|--|
| Forte inertie  | H-A with nnv    | Scenario 1<br>avec ventilation naturelle nocturne | Scenario 1                                       |
|                | H-A without nnv |   | Scenario 2 – sans ventilation naturelle nocturne |
| Faible Inertie | L-A with nnv    |   | Scenario 1                                       |
|                | L-A without nnv |   | Scenario 2 - sans                                |

La Figure 3-12 montre la température de l'air du rez-de-chaussée simulée pour ces 4 configurations. Ceci confirme l'effet positif conjugué de la ventilation naturelle nocturne et de l'inertie thermique.

La ventilation naturelle nocturne a un effet positif sur les deux systèmes de construction. Pour les bâtiments légers, il permet de baisser le maximum de température jusqu'à 2°C et le minimum de température la nuit jusqu'à 6°C. Pour la maison à forte inertie thermique, il y a une légère dérive de la température maximale sans ventilation naturelle nocturne dans cette configuration qui monte à une augmentation de 1°C après 5 jours. La différence majeure apparaît la nuit où le minimum de température est supérieur de 4°C sans ventilation naturelle nocturne. Comme indiqué précédemment, la forte inertie thermique est plus confortable que la maison légère avec ou sans ventilation naturelle nocturne. La différence entre la maison à faible et à forte inertie thermique augmente si les bâtiments n'ont pas de stratégie de ventilation naturelle pendant la nuit pour ces conditions météorologiques. Dans ce cas, la maison à forte inertie thermique est plus robuste pour garantir le confort thermique pendant quelques jours de canicule sans stratégie de régulation pour profiter des nuits fraîches.

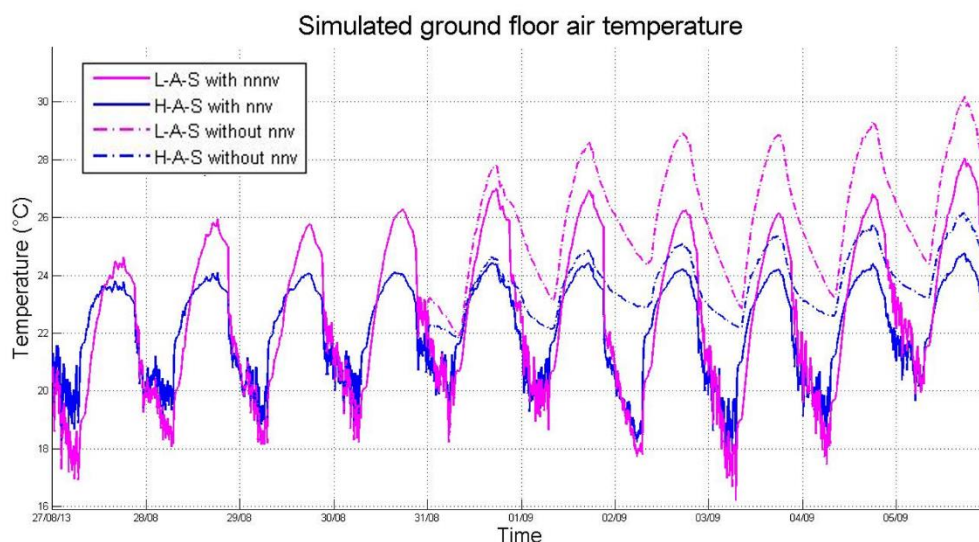


Figure 3-12: Impact de l'inertie thermique et de la ventilation naturelle sur le confort thermique

### 3.4 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était dans un premier temps de générer des données sur le confort thermique estival de maisons fortement isolées en mettant l'accent sur l'impact de l'inertie thermique et de la ventilation naturelle nocturne. Dans un second temps, des simulations numériques sont effectuées sur ces configurations pour comparer leurs systèmes constructifs. Pour cela, le comportement thermique de deux maisons avec des masses thermiques différentes est étudié en été. Le bâtiment à forte inertie est en béton banché avec une ITE et la maison à faible inertie a une construction à ossature bois et une isolation répartie. Deux scénarios sont étudiés pendant un mois : l'un avec ventilation naturelle la nuit et volets Sud ouverts en journée, l'autre sans ventilation naturelle nocturne et volets fermés. Dans un premier temps, les mesures de température de l'air intérieur de ces deux maisons au rez-de-chaussée ont été présentées. **L'impact de la ventilation naturelle nocturne est quantifié pour cette configuration. En effet l'amplitude journalière de la température intérieure dans cette configuration est réduite d'environ 6°C avec ventilation naturelle nocturne à seulement 2°C sans,** et le maximum journalier de température de l'air intérieur est maintenu globalement constant avec la ventilation naturelle nocturne alors qu'il augmente chaque jour sans ventilation naturelle.

Des différences existent entre les deux maisons, notamment sur la performance des surfaces vitrées et il n'est donc pas possible de comparer directement leur comportement thermique. C'est pourquoi des modèles numériques ont été développés avec le logiciel EnergyPlus. La première étape a été de s'assurer que ces modèles représentent correctement le comportement thermique de chaque maison. Pour cela les résultats numériques sont comparés aux mesures. Enfin, un modèle supplémentaire a été construit pour comparer les deux systèmes constructifs sur la même géométrie et les mêmes caractéristiques (à l'exception des matériaux des murs).

Ce travail confirme l'impact positif de l'inertie thermique et de la ventilation naturelle nocturne sur le confort thermique des bâtiments fortement isolés en climat continental. L'inertie thermique réduit les pics de température pendant la journée et l'amplitude jour/nuit de la température. **La différence entre le cas « faible inertie et sans ventilation naturelle nocturne » et « forte inertie et avec ventilation naturelle nocturne » peut atteindre 5 à 6°C sur la température de l'air intérieur pendant une journée entière. Le taux de renouvellement d'air simulé est fortement dépendant de la vitesse du vent et varie de 2 à 3 vol/h pour une faible vitesse de vent (entre 0,5 et 1 m/s) et peut atteindre jusqu'à 12 vol/h pour une vitesse de vent plus élevée (atteignant 3 m/s)** Il met également en évidence que la **masse interne permet d'avoir un bâtiment moins dépendant du scénario de ventilation naturelle pour les bâtiments fortement isolés.** Cependant, contrairement à ce qui est mentionné dans de nombreux articles, aucun déphasage significatif entre l'enveloppe lourde et l'enveloppe légère n'a été observé et peut s'expliquer par la sollicitation de l'inertie thermique par absorption et non pas par transmission.

Le chapitre suivant poursuit ce travail d'une part en changeant de géométrie avec cette fois une maison de constructeur et d'autre part en changeant de climat.





## Chapitre 4 - Impact du bioclimatisme et de solutions passives sur la performance thermique : Retour d'expérience sur une maison individuelle expérimentale bois-béton performante en climat méditerranéen

### **Résumé :**

Ce chapitre s'appuie sur l'analyse du comportement thermique d'une maison expérimentale en climat méditerranéen. Cette maison bien isolée présente 3 spécificités : des éléments inertiels principalement au cœur de la maison avec une enveloppe légère en ossature bois, de larges baies vitrées sur la face sud, et un patio intérieur facilitant l'ouverture en sécurité d'une baie vitrée la nuit. Le travail se focalise sur l'apport des solutions passives : la valorisation et la gestion des apports solaires, la ventilation naturelle nocturne, l'inertie thermique et l'isolation thermique. Des simulations thermiques dynamiques complètent l'analyse des mesures. Le concept a démontré son intérêt en période estivale avec un confort qui peut être maintenu à condition d'utiliser de façon adéquat les solutions passives à disposition. L'inertie thermique couplée à la ventilation naturelle nocturne permet de maintenir une température intérieure journalière maximale stable et inférieure à la température extérieure avec une amplitude thermique journalière allant jusqu'à 13°C. La dalle en béton du rez-de-chaussée échange avec l'air intérieur jusqu'à 10 W/m<sup>2</sup> en journée et jusqu'à 25 W/m<sup>2</sup> avec la ventilation naturelle nocturne. Le débit de cette dernière est estimé entre 3.5 et 5.5 Vol/h. En hiver, l'inertie thermique de la dalle permet de mieux valoriser les apports solaires, avec par exemple un flux thermique pénétrant dans la dalle pouvant atteindre localement jusqu'à 60 W/m<sup>2</sup>, et représente, en cumulé sur la journée, une énergie transférée à la dalle jusqu'à 300 Wh/m<sup>2</sup>. Cette énergie est diffusée tout au long de la nuit avec une intensité de l'ordre de 10 W/m<sup>2</sup>.

### **Contexte de la réalisation de ces travaux :**

Les travaux décrits dans ce chapitre ont été réalisés avec plusieurs collègues dans le cadre de différents projets de recherche avec des industriels (Trecobat, VICAT, Delta-Dore, Velux et K-line) en marge du projet COMEPOS. Les principaux collègues ayant contribué à ces travaux qui ont été nécessaires à la rédaction de ce chapitre sont : P. Maréchal (coordination du projet principal suivi de l'instrumentation et des expérimentations); J. Anger (définition et mise en œuvre de l'instrumentation) ; A. Brun, (co-simulation entre aéraulique et thermique pour la convection naturelle en lien avec Velux); P. Bernaud (mise en œuvre du pilotage) ; A. Pacquaut (analyse de l'impact de l'inertie thermique). Pour ma part, j'avais au cours de ce projet, une triple casquette, chef de laboratoire dans lequel se sont déroulés l'ensemble de ces projets, chef de projet avec VICAT visant à mieux comprendre les apports de l'inertie thermique sur la performance thermique des maisons individuelles et tuteur d'A. Pacquaut. Ma contribution technique s'est fortement orientée sur l'inertie thermique mais a nécessité la prise en compte de l'ensemble des autres composantes. La reprise d'une partie de ces travaux pour mon manuscrit m'a amené à rédiger une publication dans Building and Environment (13) et est présentée ici.

#### 4.1 Introduction

Comme explicité en 1.3 , Kuczyński et al soulignent dans (64) le fait que de nombreux articles portent sur des résultats de simulation mais peu avec des mesures, et aucun des travaux qu'ils ont trouvés avant les leurs ne couplait ventilation naturelle, contrôle solaire et inertie thermique. Lopez-Cabessa & al étudient dans (97) l'impact couplé de l'inertie thermique et de la ventilation naturelle sur le confort de patios en climats chauds et montrent son impact positif. Une grande partie de ces études montrent l'intérêt des solutions passives pour assurer la performance et le confort des bâtiments, d'autres en montrant les limites sous certaines conditions. Il en ressort bien que les conditions climatiques et l'usage prévu ou réel du bâtiment impactent fortement les conclusions.

Ce travail complète l'ensemble de ces travaux en portant cette étude sur une maison expérimentale (à échelle 1) et amène à la fois une analyse sur l'impact de ces solutions passives sur le confort estival mais explore également l'impact du couplage entre apports solaires et inertie thermique en hiver. L'objectif principal de l'article sera donc d'appréhender le comportement thermique d'une maison individuelle avec une enveloppe extérieure en ossature bois avec une faible inertie et présentant un cœur à forte inertie en béton dans un climat méditerranéen. Cette maison présente de plus la spécificité d'avoir un patio intérieur qui facilite l'ouverture des menuiseries la nuit pour favoriser la ventilation naturelle nocturne. Deux saisons sont étudiées dans cet article. Premièrement en été, l'objectif est d'appréhender le comportement et de quantifier l'impact du couplage entre gestion des apports solaires, ventilation naturelle et inertie thermique sur le confort thermique, puis de quantifier la quantité d'énergie que l'inertie permet de stocker / dissiper dans une dalle en béton quand la ventilation naturelle nocturne est active. Dans une seconde partie, l'hiver est étudié avec pour objectif de quantifier l'impact de la tache solaire sur l'énergie stockée dans la dalle et d'estimer les gains énergétiques que cela peut apporter. L'analyse des mesures effectuées selon différents scénarios mis en œuvre est complétée par un modèle numérique.



Figure 4-1 : A gauche, photo de la maison expérimentale,  
à droite volume d'air naturellement ventilé dans l'étude

## 4.2 Méthodologie

Ce travail étudie le comportement thermique d'une maison individuelle performante bois-béton, illustrée Figure 4-1 en climat méditerranéen avec un focus sur l'impact couplé de solutions passives : isolation thermique de l'enveloppe, apports solaires, ventilation naturelle nocturne et inertie thermique. Elle repose sur le suivi et le retour d'expérience d'une maison expérimentale (échelle un) conçue et instrumentée pour tester différents composants d'enveloppe et systèmes thermiques. Cet article s'intéresse plus particulièrement à la gestion des solutions passives à travers l'enveloppe de cette maison présentant la spécificité d'une peau extérieure en ossature bois (légère) avec un « cœur » béton apportant de l'inertie thermique et à l'impact du pilotage des ouvrants et des occultations pour contrôler à la fois les apports solaires et permettre la ventilation naturelle. La maison présente la spécificité d'avoir un patio intérieur facilitant l'ouverture des menuiseries la nuit en toute sécurité afin de favoriser la ventilation naturelle nocturne.

Ce travail est structuré de la façon suivante. La maison ayant été conçue à des fins de recherche pour tester différents composants en climat méditerranéen, une pré-étude du climat du site retenu a d'abord été réalisée pour valider l'intérêt de celui-ci et est présentée dans le paragraphe 4.3.1. L'instrumentation a été pensée en parallèle de la conception afin d'être mise en œuvre dès la phase de construction lorsque cela était nécessaire. La description de la maison et l'instrumentation mise en œuvre sont détaillées respectivement dans les paragraphes 4.3.2 et 4.3.3. Une fois la maison opérationnelle, différents scénarios ont été mis en œuvre au fil des saisons pour solliciter les composants testés. La maison étant uniquement utilisée à des fins de recherche, la présence des occupants a été simulée. Cela comprend la programmation et l'automatisation de dégagement de chaleur, de soutirage de l'eau chaude sanitaire et de l'ouverture/fermeture des occultations et des menuiseries. Les scénarios étudiés dans cet article se sont concentrés sur une période estivale et une période hivernale et sont décrits dans le paragraphe 4.3.4. Pour la période estivale, l'intérêt s'est porté sur l'apport couplé de l'inertie thermique, de la ventilation naturelle nocturne et des protections solaires sur le comportement thermique estival de la maison. Pour la période hivernale, l'interaction entre la tache solaire et l'inertie thermique de la dalle du rez-de-chaussée a été le principal sujet d'étude. En complément de l'analyse des mesures sur ces différents scénarios nous permettant d'appréhender leur impact successif, une modélisation de la maison par simulation thermique dynamique a été réalisée et est présentée au paragraphe 4.3.5. Afin de s'assurer du bon comportement du modèle, une première simulation a été réalisée en construisant le fichier météo mesuré sur la période étudiée et en simulant les scénarios réellement mis en œuvre. Une fois cette étape validée, le modèle numérique a pu être utilisé afin de comparer différents scénarios pour les mêmes conditions climatiques et ainsi quantifier leur impact à iso-sollicitations.

## 4.3 Présentation du cas d'étude

### 4.3.1 Conditions météo à Cadarache et sur la période étudiée

La maison étudiée est construite à Saint-Paul-les-Durance (latitude: 43.68°N, Longitude : 5.7°E), dans le Sud Est de la France. Le climat est méditerranéen, classé Csa selon la classification de Köppen et Geiger (climat tempéré avec des étés secs et chaud) et H3 selon la réglementation environnementale française. La Figure 4-2 illustre la météo mesurée sur l'année 2016. Il y a un bon ensoleillement sur l'ensemble de l'année allant d'une moyenne de 6h l'hiver à 13h en juillet (98). Le site est particulièrement bien adapté pour valoriser la ventilation naturelle nocturne par tirage thermique du fait d'un écart de température jour/nuit moyen d'environ 15°C en période estivale.

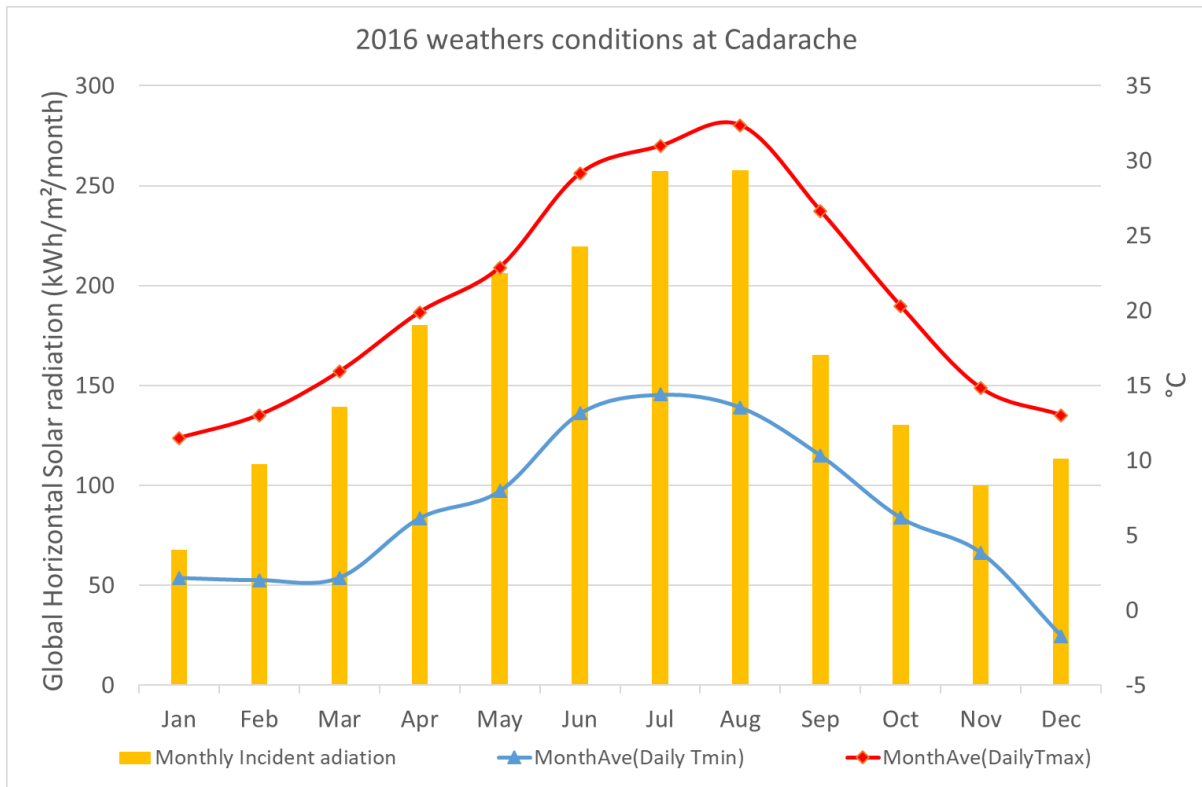


Figure 4-2 : Données météorologiques en 2016 à Saint-Paul-les-Durance

Pour cet article, deux périodes sont étudiées, une estivale du 8 juillet au 23 août 2016 et une hivernale du 21 décembre 2016 au 15 janvier 2017.

La période estivale, illustrée Figure 4-3 et résumé dans le Tableau 4-1, est globalement ensoleillée avec une majorité de jours sans passages nuageux, des températures d'air maximum journalières la plupart du temps au-dessus de 30°C et présente une forte amplitude de température journalière souvent entre 15 et 20°C.

|                                     |      | Température extérieure journalière pour la période estivale |      |         |           | IrrGH  |
|-------------------------------------|------|---|------|---------|-----------|--------|
|                                     |      | Min   | Max  | Moyenne | Amplitude |        |
|                                     |      | °C  | °C   | °C      | °C        | kWh/m² |
| Statistiques de la période estivale | mean | 14.0  | 33.0 | 23.6    | 19.0      | 8.2    |
|                                     | min  | 9.4   | 22.9 | 18.6    | 6.6       | 0.3    |
|                                     | max  | 19.4  | 39.2 | 27.7    | 24.4      | 11.4   |
|                                     | std  | 2.6   | 3.3  | 2.0     | 3.8       | 2.9    |

Tableau 4-1: Synthèse des données météo estivales

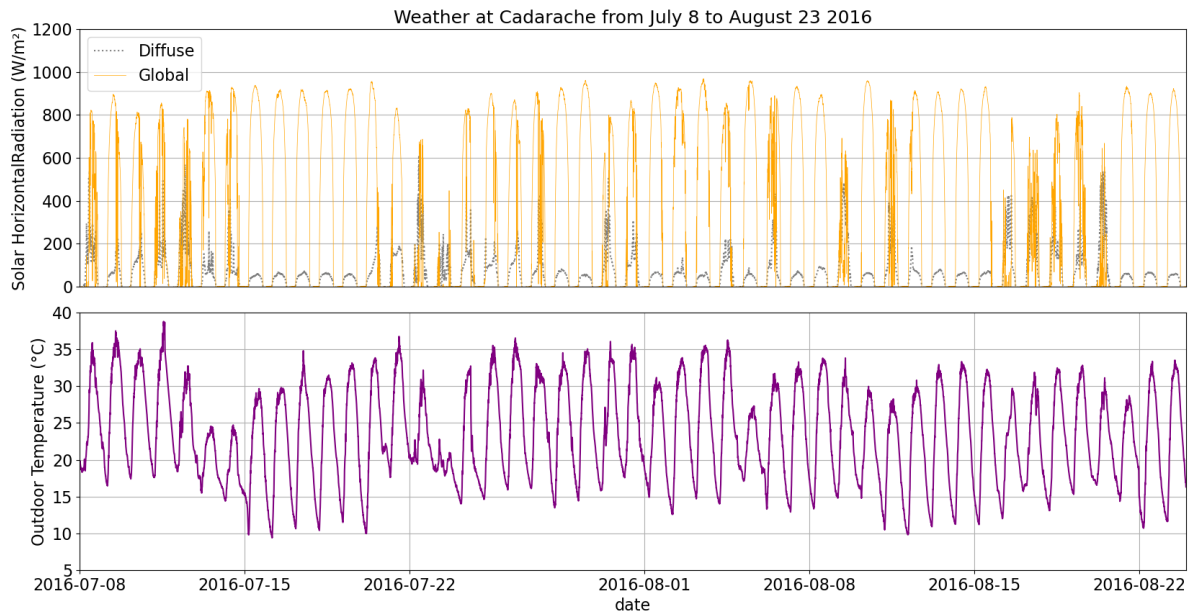


Figure 4-3 : Données météo de la période estivale

La période hivernale est illustrée Figure 4-4 et Tableau 4-2 avec une température oscillant entre -5°C et 16°C avec un mixte entre journées ensoleillées et nuageuses

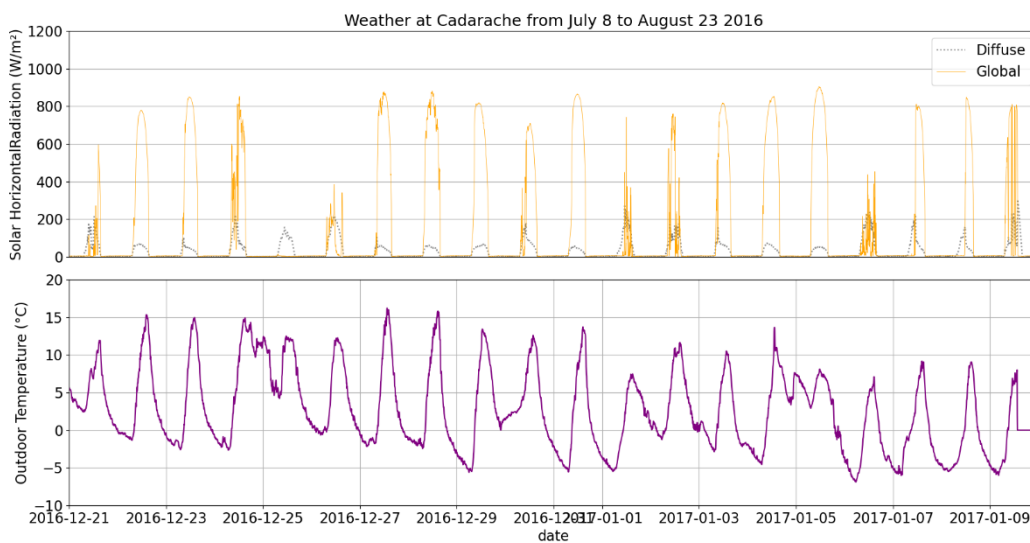


Figure 4-4 : Données météo de la séquence hivernale

|                                      |      | Température extérieure journalière pour la période hivernale |      |         |           | IrrGH              |
|--------------------------------------|------|--|------|---------|-----------|--------------------|
|                                      |      | Min  | Max  | Moyenne | Amplitude |                    |
|                                      |      | °C   | °C   | °C      | °C        | kWh/m <sup>2</sup> |
| Statistiques de la période hivernale | mean | -3.7   | 10.5 | 2.0     | 14.3      | 2.1                |
|                                      | min  | -10.5  | 1.9  | -3.3    | 3.7       | 0.1                |
|                                      | max  | 2.4  | 16.2 | 7.4     | 19.4      | 6.5                |
|                                      | std  | 3.1  | 3.5  | 2.6     | 4.2       | 2.2                |

Tableau 4-2: Synthèse des données météo hivernales

#### 4.3.2 Description de la maison

La maison expérimentale, Figure 4-1- Gauche, d'une surface utile de 116 m<sup>2</sup> pour une SHON RT (99) de 145 m<sup>2</sup> est composée de deux niveaux. Elle est orientée de 4° vers l'Est par rapport à l'axe Nord-Sud. Les pièces du rez-de-chaussée, Figure 4-5 en bas à gauche, s'articulent autour d'un patio (cour intérieure) de 10 m<sup>2</sup> avec une grande pièce à vivre de 47 m<sup>2</sup> sur l'ensemble de la face Sud, un cellier au Nord-Est, des WC au Nord, une salle d'eau à l'Ouest et une chambre au Nord-Ouest. Un escalier en béton adossé au mur Ouest du patio débouche sur le palier du 1<sup>er</sup> étage, Figure 4-5 en haut à gauche. Il dessert deux chambres orientées au Sud de 10 m<sup>2</sup> chacune, une salle d'eau orientée à l'Ouest, et une chambre de 15 m<sup>2</sup>, côté Nord. Les déperditions thermiques par transmission de l'enveloppe sont estimées par le calcul réglementaire établi par un bureau d'étude à 145 W/K, pour une surface totale des parois déperditives de 398 m<sup>2</sup>. L'étanchéité à l'air de l'enveloppe a été mesurée à  $Q_{4Pa\_surf} = 1.50 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Le système de ventilation est une double-flux.

Dans cet article, on s'intéressera plus particulièrement au volume comprenant la pièce à vivre, l'escalier et le palier de l'étage comme illustré Figure 4-1- droite.

Concernant les apports solaires et leur gestion, la façade Sud présente de grandes ouvertures avec notamment 2 baies vitrées coulissantes ( $U_w = 1.5 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ ,  $S_w = 0.49$ ) donnant sur la pièce à vivre. Une troisième baie vitrée coulissante ( $U_w = 1.6 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ ,  $S_w = 0.48$ ) relie la pièce à vivre au patio. Chacune de ces ouvertures est équipée de brises soleil orientables permettant de contrôler les apports solaires tout en conservant un éclairage naturel. Les fenêtres de toit positionnées au R+1 ( $U_w = 1.6 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ ,  $S_w = 0.31$ ) sont équipées de volets roulants pilotables.

L'enveloppe extérieure est en ossature bois avec une transmittance thermique de  $U_p = 0.191 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ . Elle présente donc une faible inertie thermique. L'inertie thermique provient principalement de quatre éléments positionnés au cœur de la maison. La dalle du rez-de-chaussée est en béton d'une épaisseur de 13 cm et repose sur une structure poutrelle isolée par des hourdis polystyrène. La dalle intermédiaire entre le RDC et l'étage est un plancher collaborant de 10 cm d'épaisseur en moyenne. Enfin, le mur de refend entourant le patio et l'escalier est en béton.

La ventilation naturelle sera assurée, dans cette étude, par plusieurs menuiseries pilotables. Premièrement, la baie vitrée donnant sur le patio permettra de faciliter l'ouverture des fenêtres la nuit en « sécurité ». La fenêtre de toit donnant sur la cage d'escalier complète ce dispositif comme illustré par les flèches rouges sur la Figure 4-5.



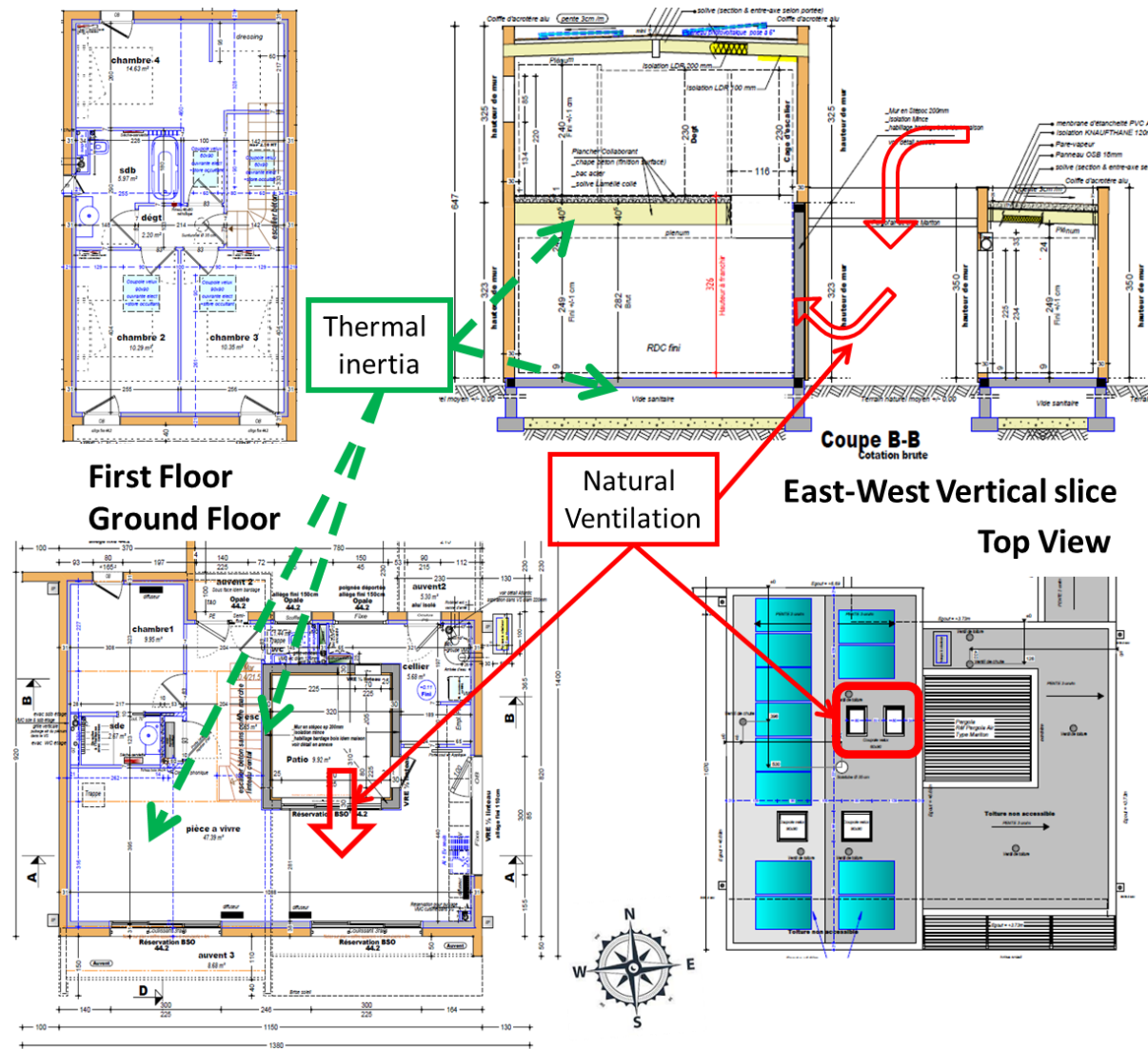


Figure 4-5 – Plans de la maison

#### 4.3.3 Instrumentation mise en œuvre

Pour les conditions extérieures, une Station météo THIES WSC11 a été installée. Elle permet notamment de mesurer le rayonnement global, la température, l'humidité relative, la vitesse et l'orientation du vent.

Pour les conditions intérieures, la température d'air est mesurée à l'aide de sondes platines PT100 positionnées au milieu de chaque pièce à 1.1 m de hauteur. Un gradient de température est mesuré dans le séjour avec 3 sondes positionnées à 0.1, 1.1 et 1.7 m de hauteur. A cela s'ajoute des capteurs Tybox 5102 de DeltaDore dans chaque pièce mesurant la température et l'humidité relative et 3 capteurs NanoSense E4000 mesurant température, humidité relative, CO2 et COV positionnés dans le séjour, la cuisine et sur le palier de l'étage.

Pour appréhender la ventilation naturelle, des anémomètres sont positionnés proche de la baie vitrée du patio et du Velux du palier à l'étage avec des capteurs VAISALA WXT532 K3B2A3B2B1B pour la vitesse, et TSI 8475-300-1 pour la direction comme illustré Figure 4-6.



Des capteurs sont également positionnés sur la baie vitrée et le Velux pour connaître leur position.

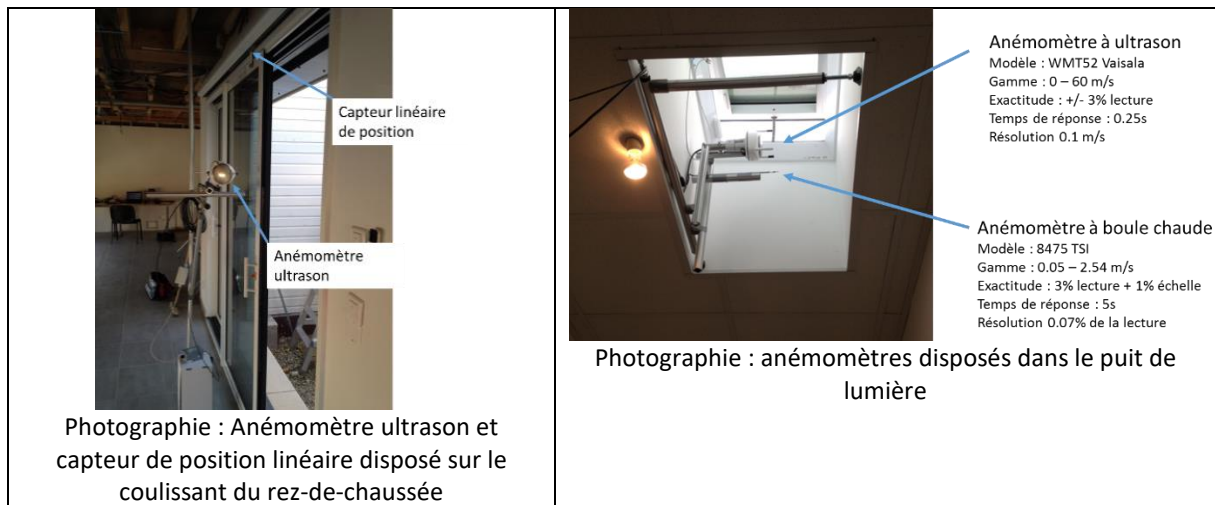


Figure 4-6 – Configuration de la ventilation naturelle et instrumentation associée

Afin de suivre le comportement de la masse thermique de la dalle du rez-de-chaussée, des thermocouples de Type T (diamètre 0.5 mm) et des fluxmètres Captec 50mmx50mm ont été intégrés entre la dalle et le carrelage, des sondes platines PT100 (diamètre 6 mm) ont été coulées dans la dalle du rez-de-chaussée en 3 endroits de la pièce de vie comme illustré Figure 4-7.

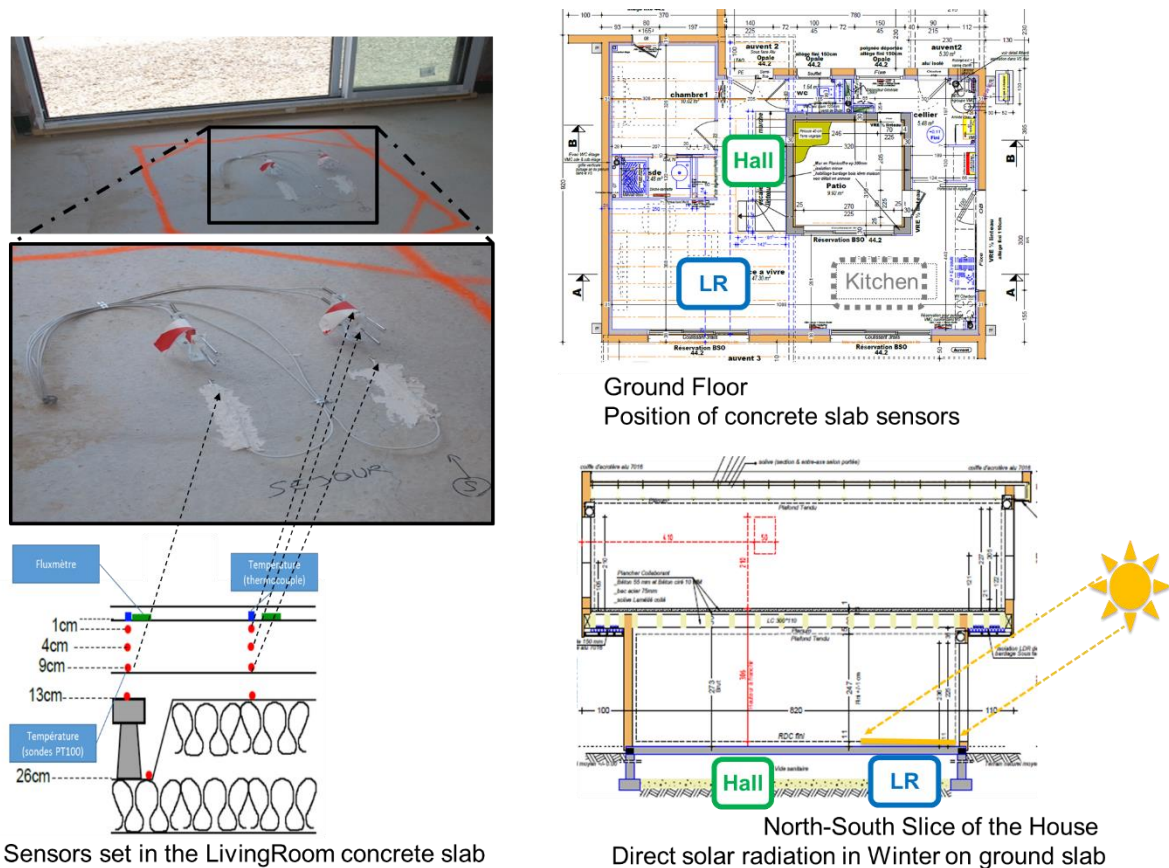


Figure 4-7 : Capteurs intégrés dans la dalle du rez-de-chaussée

#### 4.3.4 Scénarios mis en œuvre

Comme spécifié dans le paragraphe 4.3.2, on s'intéresse principalement dans cet article au volume du rez-de-chaussée, à la cage d'escalier et au palier du R+1. Les portes intérieures avec les autres pièces restent fermées. Le volume aéraulique ainsi considéré est illustré Figure 4-1- droite. Pour la ventilation naturelle, seule la baie vitrée du patio et le velux au-dessus de la cage d'escalier sont pilotés pour les ouvrir et fermer selon le scénario mis en œuvre. Deux séquences sont présentées ici, une première période estivale allant du 8 juillet au 23 août 2016 et une période hivernale allant du 21 décembre 2016 au 15 janvier 2017.

- Séquence estivale (8 juillet au 23 août)

Pour la séquence estivale, 4 scénarios s'enchainent pour le pilotage des occultations et de la ventilation naturelle nocturne comme détaillés en Tableau 4-3.

|           | Durée (jours) | VNat                                  | Volets  | VMC  | Clim.                 | Apports internes           | Portes internes | Puisage ECS                 | DATE              |
|-----------|---------------|---------------------------------------|---|------|-----------------------|----------------------------|-----------------|-----------------------------|-------------------|
| <b>S1</b> | <b>12</b>     | OFF                                   | Fermés  | Qref | ON<br>Consigne : 24°C | 0                          | Fermées         | 0                           | 08/07/16-19/07/16 |
| <b>S2</b> |               |                                       |   |      |                       |                            |                 |                             |                   |
| S2.A      | 12            | ON<br>21h à 7h                        | Fermés<br>jour<br>8h-20h                                | Qref | OFF                   | 2<br>personnes<br>(RT2012) | Fermées         | 45<br>l/jour/pers.<br>40 °C | 20/07/16-31/07/16 |
| S2.B      | 7             | OFF<br>7h à 21h                       | Ouverts<br>nuit<br>20h-8h                               |      |                       | 4<br>personnes<br>(RT2012) |                 |                             | 01/08/16-07/08/16 |
| <b>S3</b> | <b>7</b>      | ON<br>21h à 7h<br><br>OFF<br>7h à 21h | Ouverts   | Qref | OFF                   | 4<br>personnes<br>(RT2012) | Fermées         | 45<br>l/jour/pers.<br>40 °C | 08/08/16-14/08/16 |
| <b>S4</b> | <b>7</b>      | OFF                                   | Fermés<br>nuit : 21h-8h<br><br>Ouverts<br>jour : 8h-21h | Qref | OFF                   | 6<br>personnes<br>(RT2012) | Fermées         | 50<br>l/jour/pers.<br>40 °C | 15/08/16-21/08/16 |

Tableau 4-3 : Séquence estivale

Le scénario S1, du 8 au 19 juillet, sert d'initialisation. Les volets et les menuiseries restent fermés en permanence. Il n'y a pas d'apports internes des occupants simulés ni de puisage d'ECS. Une climatisation est mise en marche avec une consigne à 24°C durant cette période afin de stabiliser l'état de l'inertie thermique au lancement des scénarios suivants.

Le scénario S2, du 20/07 au 07/08, met en œuvre la ventilation naturelle nocturne en limitant les apports solaires. La porte fenêtre du patio et du velux sont ouverts chaque nuit de 21h à 7h. Les volets sont fermés la journée de 8h à 20h et ouverts la nuit pour laisser la ventilation naturelle fonctionner. Des apports internes et du puisage d'ECS sont simulés selon 2 configurations détaillés dans le tableau (S2.A, S2.B).

Le scénario S3, du 08 au 14/08, a pour but de voir l'impact de la ventilation naturelle nocturne et de l'inertie thermique sans gestion des apports solaires. La porte fenêtre du patio et du velux sont ouverts chaque nuit de 21h à 7h. Les volets sont ouverts en permanence. La présence est simulée également. En août, la hauteur du soleil a suffisamment diminué pour pouvoir pénétrer par les baies vitrées orientées au sud malgré la présence de casquettes comme illustré dans (15). Ceci rend donc ces

scénarios particulièrement intéressants pour valider l'impact de laisser les occultations ouvertes à cette saison.

Enfin le scénario S4 du 15 au 21/08 teste l'impact de l'inertie thermique sans ventilation naturelle nocturne ni gestion des apports solaires. Les menuiseries sont en permanence fermées, les occultations sont ouvertes en journée et fermées la nuit laissant le soleil largement pénétrer dans la maison.

Pour l'ensemble de ces scénarios, la ventilation mécanique est en fonctionnement avec son débit nominal.

- Scénario hivernal (du 19 décembre 2016 au 15 janvier 2017)

Pour la séquence hivernale qui se déroule du 19 décembre 2016 au 15 janvier 2017, plusieurs scénarios se succèdent pour mieux appréhender le comportement de la maison en période hivernale et notamment l'impact de la tache solaire sur la dalle du rez-de-chaussée comme détaillé Tableau 4-4.

|            | Durée (jours) | Volets   | VMC  | Chauffage  | Apports             | Portes internes | Puisage ECS                                 | DATE                            |
|------------|---------------|--|------|--|---------------------|-----------------|---|---------------------------------|
| <b>SH1</b> |               |  |      |  |                     |                 |   |                                 |
| SH1.A1     | 7             | Gestion horaire ouverts de 6h à 18h, fermés de 18h à 6h<br>Sauf CH2 : fermés | Qref | 21°C   | 2 pers.<br>(RT2012) | Fermées         | 45 l/jr/pers.<br>40 °C                      | 19/12/2016<br>--><br>25/12/2016 |
| SH1.A2     | 7             | Gestion horaire ouverts de 6h à 18h, fermés de 18h à 6h<br>Sauf CH3 : fermés |      | 26/12/2016<br>--><br>31/12/2016                                      |                     |                 |   |                                 |
| SH1.B1     | 2             | Gestion horaire ouverts de 6h à 18h, fermés de 18h à 6h                      |      | 21°C   | 4 pers.<br>(RT2012) |                 | 01/01/2017<br>--><br>04/01/2017 - 16h       |                                 |
| SH1.B2     | 2             |  |      | 20°C   |                     |                 | 04/01/2017 - 16h<br>--><br>06/01/2017 - 14h |                                 |
| SH1.B3     | 3             |  |      | 20°C de 6h à 8h et de 18h à 23h &<br>17°C de 8h à 18h et de 23h à 6h |                     |                 | 06/01/2017 - 14h<br>--><br>08/01/2017       |                                 |
| SH1.C      | 7             |  |      | 6 pers.  |                     |                 | 09/01/2017 - 15/01/2017                     |                                 |

Tableau 4-4: Séquence hivernale

Du 19 au 31 décembre (SH1.Ax), une consigne de température est fixée à 21°C. Les apports internes et soutirages d'eau chaude sanitaire sont simulés pour 2 personnes selon le scénario de la réglementation thermique française RT2012. Les volets sont ouverts la journée de 6h à 18H et fermés la nuit à l'exception de celui de la chambre 2 du 19 au 25 décembre qui reste fermé en permanence (SH1.A1) puis celui de la chambre 3 qui reste fermé en permanence du 26 au 31 décembre (SH1.A2). Les scénarios suivants (SH1.Bx) se déroulent du 01 au 08 janvier 2017 à 14h. Ils se font volets ouverts en journée (6h-18h) et fermés la nuit, avec la simulation des dégagements internes et soutirages d'ECS pour 4 personnes. Du 01 au 04/01/2017 16h, la consigne de température est fixée à 21°C (SH1.B1), puis à 20°C du 04 au 06/01 14H (SH1.B2) puis un scénario sur le chauffage est mis en place à partir de

cette date avec 20°C de 6h à 8h et de 18h à 23h, et un réduit à 17°C le reste du temps pour simuler une famille absente la journée et qui met en place un réduit de nuit lorsqu'ils dorment. Enfin le scénario SH1.C se déroule du 09 au 15/01 est identique au SH1.B3 à l'exception du nombre d'occupants qui est augmenté de 4 à 6.

#### 4.3.5 Modélisation numérique de la maison

Un modèle numérique de la maison a été réalisé à l'aide du logiciel de simulation thermique dynamique EnergyPlus. La maison a été décomposée en 8 zones thermiques, 3 au rez-de-chaussée : Séjour, Cellier et chambre, 4 à l'étage : les 3 chambres et la salle de bains et enfin le vide sanitaire. Un pas de temps de simulation de 15 min a été retenu. La convection est modélisée à l'aide du modèle TARP, et le rayonnement courte longueur d'onde pour prendre en compte la tache solaire à l'aide du modèle RayTracing d'ordre 1. Concernant la ventilation naturelle, seule la zone comprenant le séjour, la cage d'escalier et le palier du premier étage est considérée, comme le montre la figure 1 – droite. Un modèle Air Flow Network est utilisé. Les effets du vent sont négligés (cf 4.4.1) et les coefficients de pression sont fixés à 0. Des coefficients de décharge sont utilisés pour les deux ouvertures vers l'extérieur : Cd fenêtre de toit = 0,43, Cd porte coulissante = 0,69 et Cd\_int entre le salon et le couloir du 1er étage = 0,65.

Afin de pouvoir comparer les résultats de simulation numérique aux mesures expérimentales, un fichier météo a été reconstruit à partir des données météo mesurées sur site. De plus, les scénarios de pilotage comprenant les ouvertures/fermetures des fenêtres et des volets roulants, les dégagements de chaleurs simulées pour l'occupation ont été imposées dans la simulation à l'aide d'un couplage entre EnergyPlus et Matlab.

### 4.4 Résultats et discussions en période estivale

#### 4.4.1 Moteur principal de la ventilation naturelle nocturne et estimation du débit traversant

La ventilation naturelle peut être engendrée grâce à deux phénomènes physiques qui génèrent une différence de pression entre l'intérieur du bâtiment et l'extérieur. Le premier moteur est le vent, le second est un écart de température entre l'intérieur et l'extérieur couplé à une différence de hauteur entre une entrée et une sortie d'air générant un tirage thermique par différence de densité de l'air et effet gravitationnel. La Figure 4-8 trace la vitesse d'air mesurée sous la fenêtre de toit de la cage d'escalier quand celle-ci est ouverte en fonction de la vitesse de vent mesurée 30 cm au-dessus de la toiture (graphique de gauche) et en fonction de l'écart de température d'air entre le séjour et l'extérieur (graphique de droite). Une corrélation apparaît plus nettement entre la vitesse d'air traversant la coupole et l'écart de température qu'avec la vitesse de vent traduisant un moteur de ventilation naturelle principal par tirage thermique. Ainsi, le modèle numérique retenu pour simuler la ventilation naturelle reposera sur le tirage thermique.

La vitesse d'air mesurée au niveau de la coupole a été intégrée sur la surface d'air de sortie. Une première approximation permet d'estimer le débit d'air quand la ventilation naturelle nocturne est activée de l'ordre de 500 à 780 m<sup>3</sup>/h soit un renouvellement d'air qui serait compris entre 3.5 et 5.5 vol/h.

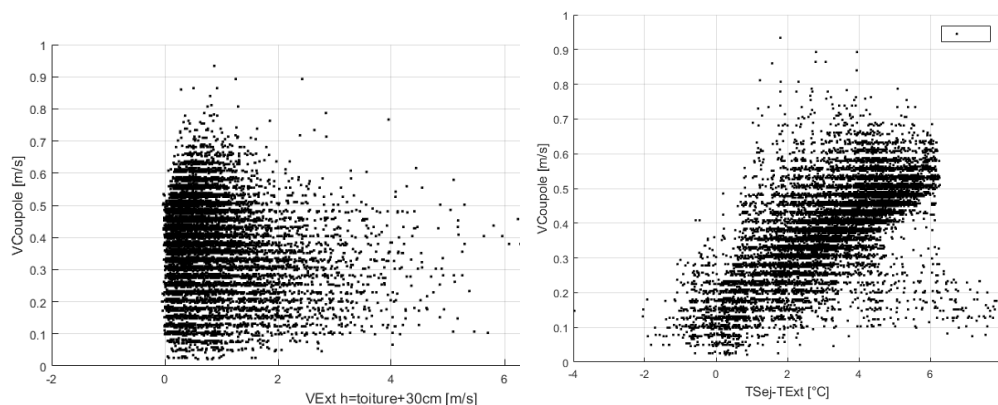


Figure 4-8 – A gauche - Vitesse d’air au droit de la coupole en fonction de la vitesse de vent.  
A droite : Vitesse d’air au droit de la coupole en fonction de la différence de température entre l’ambiance intérieure et la température extérieure

#### 4.4.2 Impact de la ventilation naturelle sur la température d’air intérieure (mesures)

La Figure 4-9 présente l’évolution des températures d’air intérieur en plusieurs points du rez-de-chaussée et des conditions météorologiques du 11 au 18 août à cheval entre 2 scénarios : S3 avec ventilation naturelle nocturne et S4 sans ventilation naturelle nocturne. Dans les deux cas il n’y a pas de gestion des apports solaires et donc les volets sont ouverts en permanence. Les températures d’air intérieures sont tracées pour 3 points mesurés à 1.1 m de hauteur : dans le séjour (bleu – trait continu), le Hall (Vert - Pointillé) et la cuisine (Rouge – ligne pointillée). Sur ce graphe, sont en plus représentés les conditions météo (lignes pointillées fines) avec la température d’air extérieur en gris, et le rayonnement solaire global horizontal en orange.

Le changement de scénario s’effectue dans la nuit du 14 au 15 août à minuit. On peut distinguer un saut dans les températures d’air intérieur à cet instant provoqué par la fermeture des fenêtres coupant la ventilation naturelle nocturne. Chaque matinée ensoleillée, on distingue un pic de température pour le capteur positionné dans la cuisine. La cuisine étant positionné à l’Est, c’est l’effet du rayonnement direct sur le capteur insuffisamment protégé.

Au cours du scénario S3, avec ventilation naturelle nocturne, on distingue nettement l’impact de l’ouverture et de la fermeture des menuiseries. Avant l’ouverture à 21h, la température intérieure commence de redescendre doucement. A l’ouverture, on observe une cassure de pente avec une décroissance plus importante. A 7h, heure de fermeture des fenêtres, une nette hausse de la température d’air intérieure apparaît. 7h correspond également sur cette période à la température journalière minimale et au lever du soleil. Sans ventilation naturelle nocturne (à partir du 15/08), la température intérieure ne remonte qu’à partir de 8h, on peut donc imputer la hausse de température à la seule fermeture des fenêtres. L’écart de température entre les 3 points peut atteindre 2°C et est maximal au minimum et maximum journaliers des températures intérieures.

La Figure 4-10 permet de quantifier l’amplitude journalière des température (barres sur le graphique) et les températures maximales journalières (points sur le graphique) pour les mêmes capteurs que la Figure 4-9. Sur le scénario avec ventilation naturelle nocturne et volets ouverts (S3), l’amplitude journalière de température intérieure varie entre 7 et 13°C dans le séjour pour une amplitude extérieure variant entre 14 et 22°C. La température d’air intérieur maximale dans le séjour à 1.1 m reste stable sur l’ensemble du scénario autour de 28°C +/-1°C alors que la température extérieure varie entre 28.4 et 34°C.

Dès que la ventilation naturelle nocturne est arrêtée, au début du scénario S4 le 15 août, l'amplitude journalière de température intérieure se réduit fortement et est inférieure à 6°C dans le séjour. De plus, la température maximale augmente les 6 premiers jours du scénario sans ventilation naturelle pour passer de 29°C à presque 33°C avec une météo globalement moins ensoleillée et moins chaude. Cette hausse de température intérieure est donc principalement à imputer à l'arrêt de la ventilation naturelle nocturne.

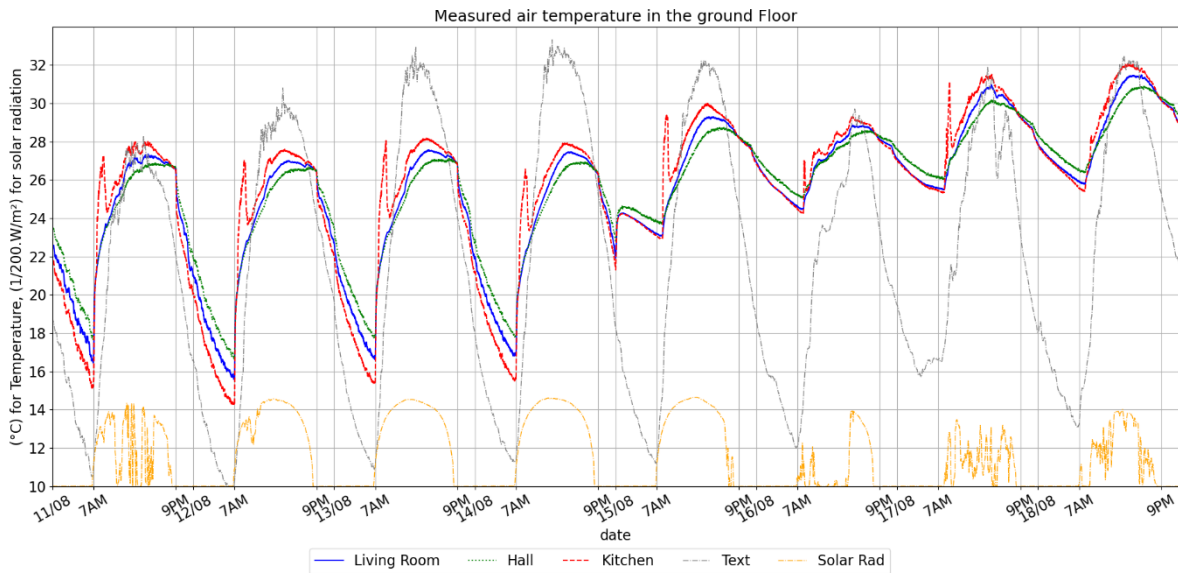


Figure 4-9 : Evolution de la température d'air du 11 au 16 août

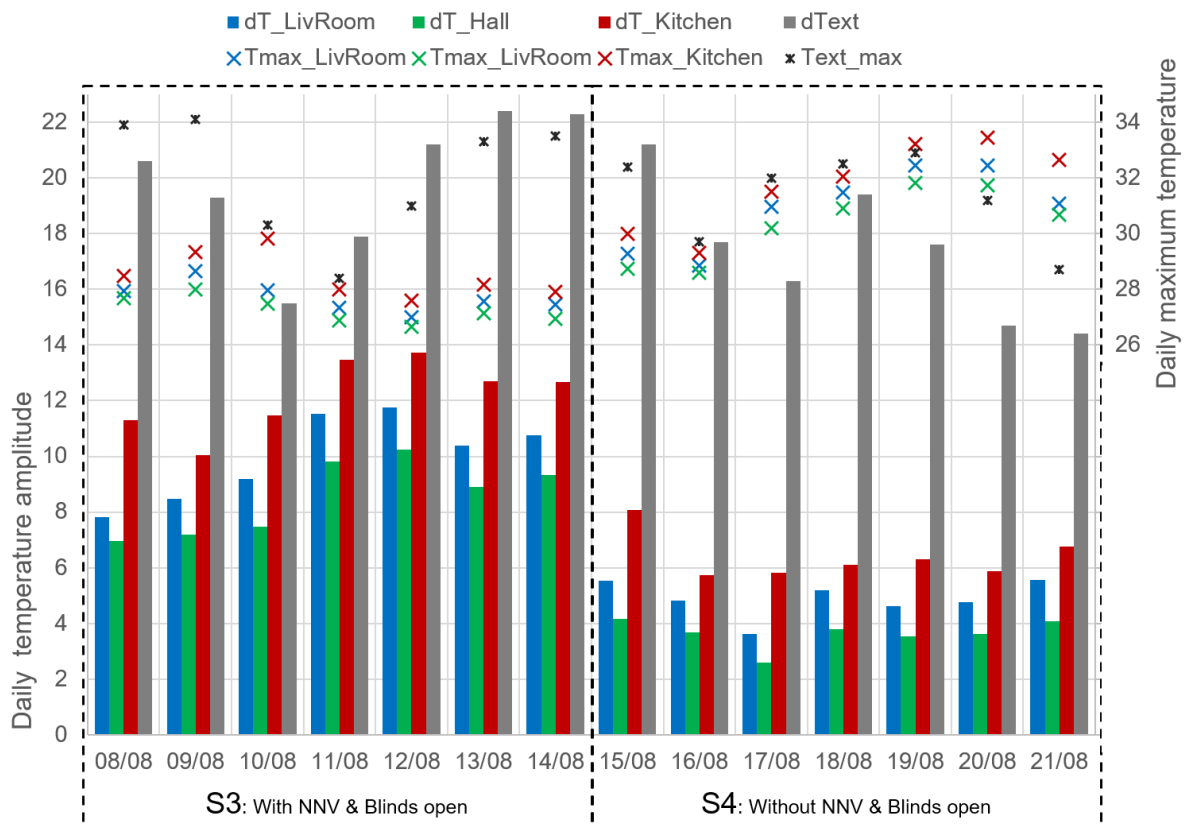


Figure 4-10: Amplitude journalière et maximum de température d'air pour les scénarios S3 et S4



#### 4.4.3 Couplage de l'inertie thermique et de la ventilation naturelle en période estivale (mesures)

La Figure 4-11 illustre la réponse thermique de la dalle du rez-de-chaussée aux sollicitations. Le graphique supérieur trace la température extérieure (trait pointillé fin gris), les températures d'air intérieur dans le séjour (trait plein épais) à 3 hauteurs : 1.7 m (bleu foncé), 1.1 m (bleu) et 0.1 m (bleu clair), et la température de la dalle du rez-de-chaussée sous le carrelage (trait pointillé violet) et à 9 cm de profondeur (pointillé violet). Le second graphique trace les flux thermiques mesurés sous le carrelage en 4 points. 2 points dans le séjour et 2 points dans le Hall, au droit d'un hourdis polystyrène et d'une poutrelle béton. Par convention, on considère que le flux thermique est positif lorsque l'air réchauffe la dalle ( $T_{air} > T_{surf}$ ), ie la dalle se charge, et inversement il est négatif lorsque la dalle libère de l'énergie à l'air de la pièce à vivre. Le graphique inférieur représente l'énergie échangée entre la dalle du rez-de-chaussée et l'air intérieur. Deux grandeurs sont représentées chaque jour sur ce graphique : en foncé (valeurs positives) sont représentés l'énergie emmagasiné par la dalle, pour cela, le flux thermique en ( $W/m^2$ ) est intégré lorsqu'il est positif, et en clair (valeurs négatives), l'énergie dissipée par la dalle, pour cela, le flux thermique en ( $W/m^2$ ) est intégré lorsqu'il est négatif.

Avant le 15/08, scénario S3 avec ventilation naturelle nocturne et volets ouverts, la température de la masse thermique de la dalle du RDC reste stable au fil des jours avec une amplitude journalière thermique journalière sous le carrelage variant de 1.5 à 4°C et une amplitude journalière à 9 cm de profondeur variant de 1 à 2.5°C pour une amplitude journalière de la température d'air intérieur supérieure à 10°C. L'évolution des températures intérieures montre que la température d'air est supérieure à la température de la dalle sous le carrelage en journée, et que grâce à la ventilation naturelle nocturne, celle-ci est inférieure durant la nuit. Ceci permet de restituer l'énergie accumulée la journée. En journée, la dalle se « charge » à une intensité de 10 à 20  $W/m^2$ . La nuit le flux de chaleur cédé par la dalle à l'air suit le profil de température intérieure avec un pic concomitant avec le minimum de température intérieure et de fermeture des ouvrants pilotés. Le flux thermique atteint jusqu'à 25  $W/m^2$  les matins du 11 et 12 août. Au cours de ce scénario S3, l'énergie accumulée dans la dalle et celle dissipée la nuit est à plusieurs reprises du même ordre de grandeur, ce qui est en cohérence avec le fait que la température de la dalle reste stable au fil des jours. Selon les jours et le point de mesure, l'énergie accumulée et dissipée par la dalle du rez-de-chaussée varie entre 100 à 200  $Wh/m^2$ . En supposant une énergie journalière moyenne sur la dalle du rez-de-chaussée à 100  $Wh/m^2$ , cela correspond à une énergie de 4.7 kWh échangée entre l'air et la dalle pour le séjour. A titre de comparaison, l'énergie nécessaire pour augmenter l'ensemble du volume d'air de la maison de 10°C est d'environ 1.3 kWh.

Sans ventilation naturelle nocturne et avec apports solaires (après le 15/08), l'évolution de la température de la dalle suit l'évolution de la température de l'air. La température augmente au fil des jours et l'amplitude journalière diminue par rapport au scénario précédent. La température d'air est quasiment toujours supérieure à la température de surface de la dalle ce qui se traduit par la quasi disparition d'énergie restituée par la dalle. L'énergie emmagasinée journalière dans la dalle sur ce scénario est du même ordre de grandeur que celle du scénario précédent.

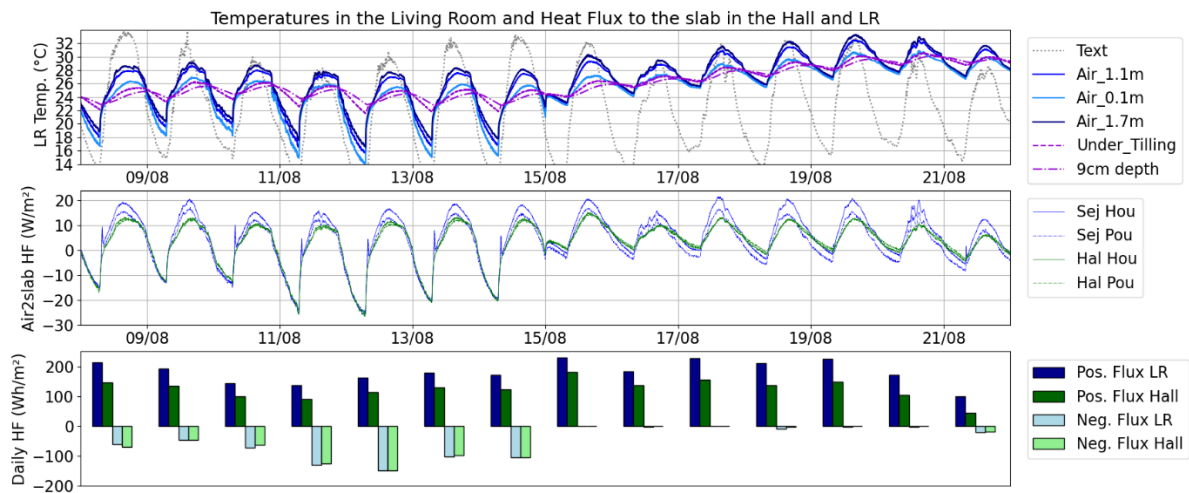


Figure 4-11– Evolution de la température et du flux du 8 au 23/08/2016

#### 4.4.4 Comparaison mesures / simulations

L'étape suivante a été de simuler le cas d'étude dans les mêmes conditions que la campagne expérimentale sur une période estivale. Cela a nécessité donc de reconstruire le fichier météo à partir des données météo mesurées sur le site en tenant compte des conditions de vent, du rayonnement global et direct, de la température extérieure, de la pression atmosphérique et de l'humidité relative. Les informations quant au pilotage des stores, des fenêtres et le dégagement de charges internes ont également été reproduites. Cela a été mis en œuvre grâce à une co-simulation entre le logiciel EnergyPlus et Matlab. Une première simulation a été réalisée du 20 juillet au 23 août 2016.

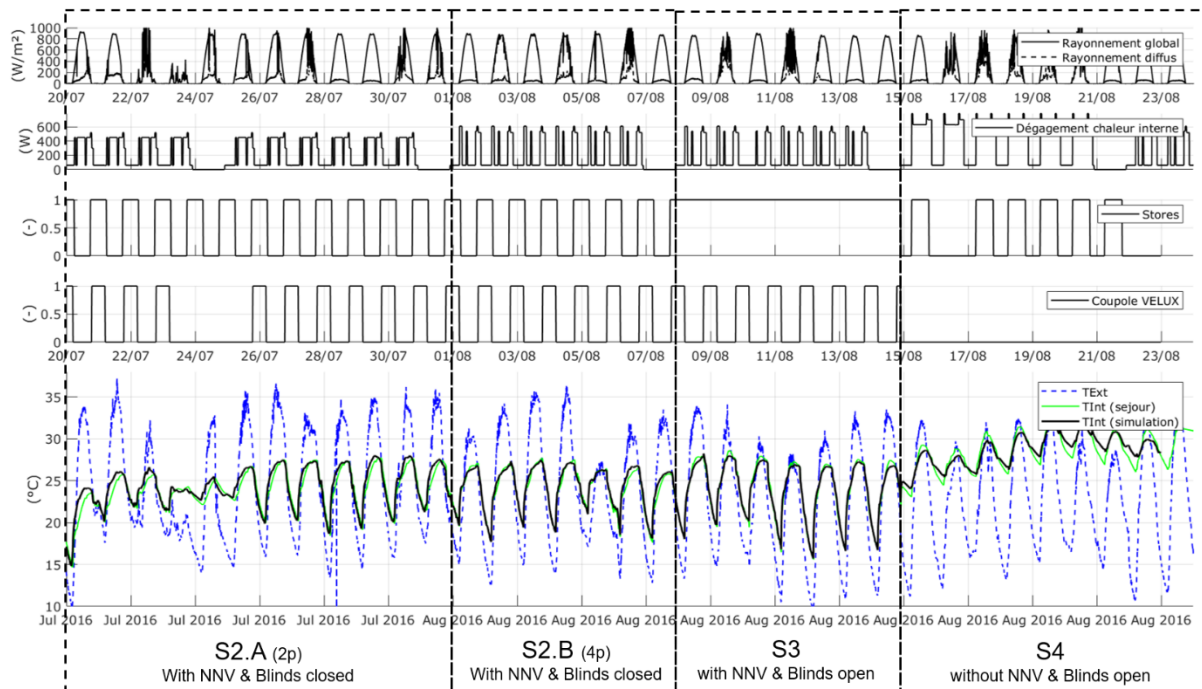


Figure 4-12 – Conditions aux limites, charges internes, pilotage et comparaison des évolutions des températures mesurées et simulées

Les 4 graphiques supérieurs de la Figure 4-12 tracent les conditions imposées dans la simulation avec de haut en bas, le rayonnement global et diffus sur le 1<sup>er</sup> graphique, les charges internes simulées sur



le second, la position des stores pour le troisième et la position de la fenêtre de toit au-dessus de la cage d'escalier sur le 4<sup>ième</sup>. Enfin la température d'air extérieur est tracée sur le graphique du bas en bleu pointillé. Sur ce même graphique sont reportés la températures d'air mesurée dans le séjour (en vert) et celle simulée dans cette zone (en noir). Le modèle numérique mis en œuvre permet de refléter le comportement thermique de la maison pour les deux scénarios avec ou sans ventilation naturelle nocturne. Un calcul d'erreur moyenne absolue a été réalisé en considérant l'ensemble des points de mesures. L'erreur moyenne sur l'ensemble de la campagne est de 0,6°C. Cette erreur est satisfaisante étant du même ordre de grandeur que l'incertitude de mesure de la température d'air qui est de 0,5°C.

En complément de la comparaison des scénarios avec (S3) et sans ventilation naturelle (S4) réalisé au paragraphe précédent, on peut voir les 24 et 25 juillet l'impact direct de l'arrêt de la ventilation naturelle sur l'amplitude thermique journalière. En effet, ces 2 jours, les fenêtres sont involontairement restées fermées même la nuit contrairement aux jours précédents et suivants.

#### 4.4.5 Comparaison numérique de 3 scénarios d'ouverture / fermeture des ouvrants sur le comportement de la maison

Fort de ce constat, le modèle numérique a été utilisé pour comparer trois stratégies de gestion des ouvertures des menuiseries pilotables sur une période de 15 jours du 28 juillet au 13 août. Les 3 scénarios sont les suivants : menuiseries pilotables toujours fermées (pas de ventilation naturelle), toujours ouvertes (ventilation naturelle permanente), et une programmation horaire (ventilation naturelle uniquement nocturne à l'image du scénario S2 mis en œuvre dans l'expérimentation). Dans tous les cas de figures, les occultations sont fermées la journée pour limiter l'impact des apports solaires. La Figure 4-13 trace l'évolution des températures d'air pour ces 3 simulations. En bleu pointillé est reporté la température d'air extérieur, en rouge le modèle toujours fermé, en rose toujours ouvert et en bleu clair le programme horaire.

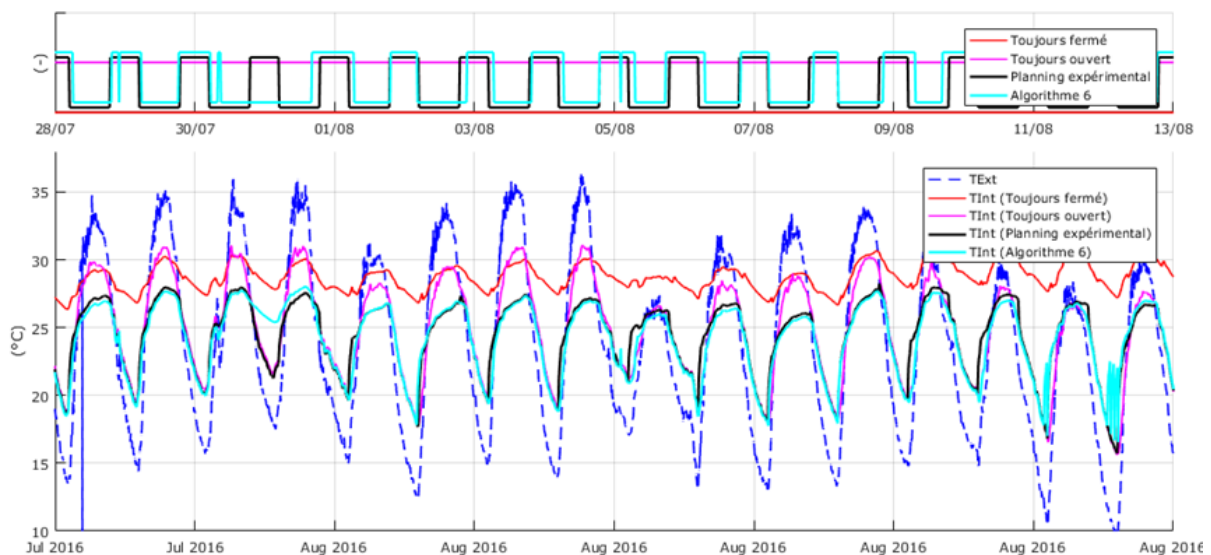


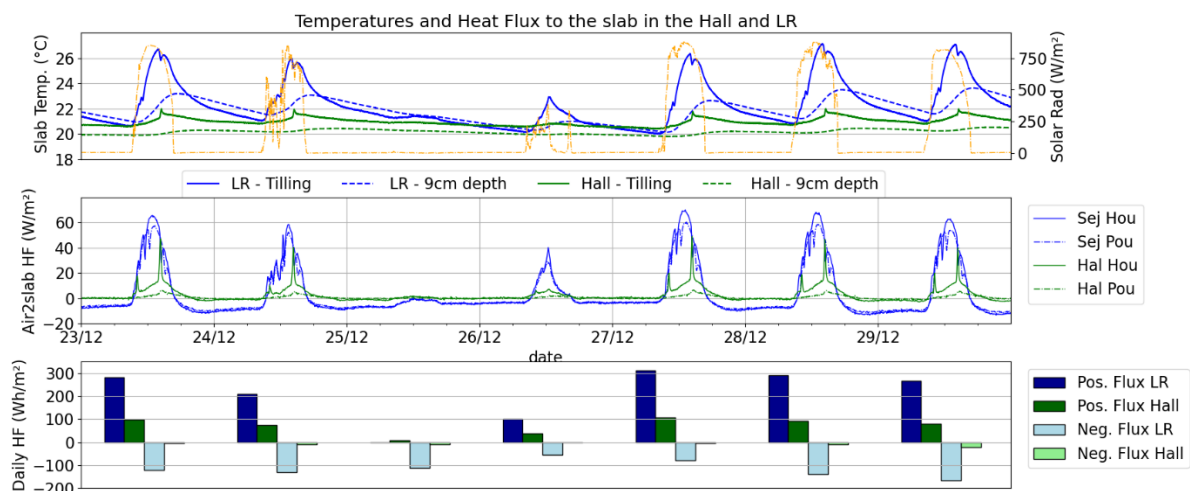
Figure 4-13 – Test de plusieurs scénarios de pilotage (toujours ouvert ou fermé et programmation horaire)

Avec ventilation naturelle nocturne et sans ventilation naturelle, les mêmes conclusions que celles présentées dans les paragraphes précédents peuvent être formulées. Avec ventilation naturelle nocturne, la température maximale journalière oscille entre 27 et 28°C et est toujours inférieure à la température extérieure. La ventilation naturelle nocturne permet d'abaisser la température minimale

journalière de 8 à 15°C par rapport à la température d'air intérieure maximale. Sans ventilation naturelle, la température journalière maximale est 2 à 3°C supérieure à celle simulée avec ventilation naturelle nocturne et l'amplitude journalière est réduite à moins de 5°C impactant fortement le confort thermique avec une température minimale supérieure à 26°C. Enfin, les jours plus frais comme le 5 août, la température d'air intérieur reste supérieure toute la journée à la température d'air extérieur. En laissant les fenêtres pilotées en permanence ouvertes, le confort thermique est similaire avec le scénario ventilation naturelle nocturne sur la période nocturne et en début de journée. Il est cependant dégradé aux heures les plus chaudes avec une température journalière maximale de 2 à 5°C supérieure.

#### 4.5 Résultats et discussions en période hivernale : Apports de l'inertie thermique en période hivernale – Mesures

Des campagnes hivernales ont également été mises en œuvre afin de voir l'impact couplé des apports solaires et de l'inertie thermique en hiver. Dans le scénario détaillé en 4.3.4, du 27/12/16 au 01/01/2017, le chauffage est en marche avec une consigne de température fixée à 20°C, les volets sont ouverts la journée. A cette saison, la course du soleil est basse ce qui permet au soleil de pénétrer dans la maison par les portes fenêtres de la pièce à vivre orientées au Sud. La tache solaire atteint la cuisine et le séjour mais pas le hall d'entrée. La Figure 4-14 trace l'évolution des températures et des flux thermiques sur 5 jours du 27 au 31/12. Sur le graphique supérieur sont représentés les températures d'air, sous le carrelage et à 13 cm de profondeur dans le hall (en vert) et dans le séjour (en bleu). La température sous le carrelage augmente de 5°C de plus dans le séjour par rapport au hall au moment du passage de la tache solaire sur la période étudiée. Le second graphique trace le flux thermique mesuré sous le carrelage dans le hall (en vert) et dans le séjour (en bleu). Une valeur positive signifie que l'énergie va de l'air à la dalle. Le graphique du bas représente l'énergie journalière accumulée dans la dalle et dissipée par celle-ci. Le flux passant sous le carrelage atteint une valeur jusqu'à 60 W/m<sup>2</sup> supérieure pour la zone irradiée par la tache solaire en comparaison du Hall, situé « dans l'ombre », ce qui se traduit par une énergie stockée sur une journée 3 fois supérieure à l'endroit de la tache solaire en comparaison à une zone qui n'en bénéficie pas. Le hall est irradié par la tache solaire à deux courts moments dans la journée, deux pics de flux mesurés sont visibles chaque jour. Concernant la meure de flux dans le séjour on peut voir des chutes de flux mesurés à 3 moments à heures quasi fixes. Ceux-ci sont dus à l'ombrage ponctuel généré par la partie centrale des dormants des baies vitrées.



Dans le séjour, de l'énergie est restituée à l'air de façon diffuse durant la nuit avec une intensité autour de  $10 \text{ W/m}^2$  pour les journées précédentes ensoleillées pour une période de 12 à 14h. Il n'y a pas de pic de flux négatif, mais un flux négatif sur l'ensemble de la nuit. Le graphique des flux cumulés journaliers montre que le flux restitué est moins important que le flux emmagasiné sans doute du fait d'une combinaison des effets 3D non pris en compte par la mesure du flux ponctuel d'une part et d'autre part de pertes par la face inférieure de la dalle.

La Figure 4-15 trace les évolutions des températures dans la dalle à différentes profondeurs, dans le séjour pour le graphique supérieur et dans le Hall pour le graphique inférieur. Dans le séjour, l'élévation en température de la dalle dépend de la profondeur. Elle est de  $6^\circ\text{C}$  sous le carrelage et réduit progressivement jusqu'à atteindre  $2,5^\circ\text{C}$  à 13 cm de profondeur avec un déphasage s'allongeant au fil de la profondeur pour atteindre à 13 cm 6 à 9 h respectivement au droit d'un hourdis ou d'une poutrelle. La variation de température est beaucoup plus faible dans le Hall du fait que la tache solaire n'atteint quasiment pas cette zone. Sous le carrelage, on distingue le deuxième court moment où la tache solaire irradie le hall avec un pic de température de  $+0,5^\circ\text{C}$ , mais qui n'est plus visible dès le point de mesure suivant à 1cm plus profond.

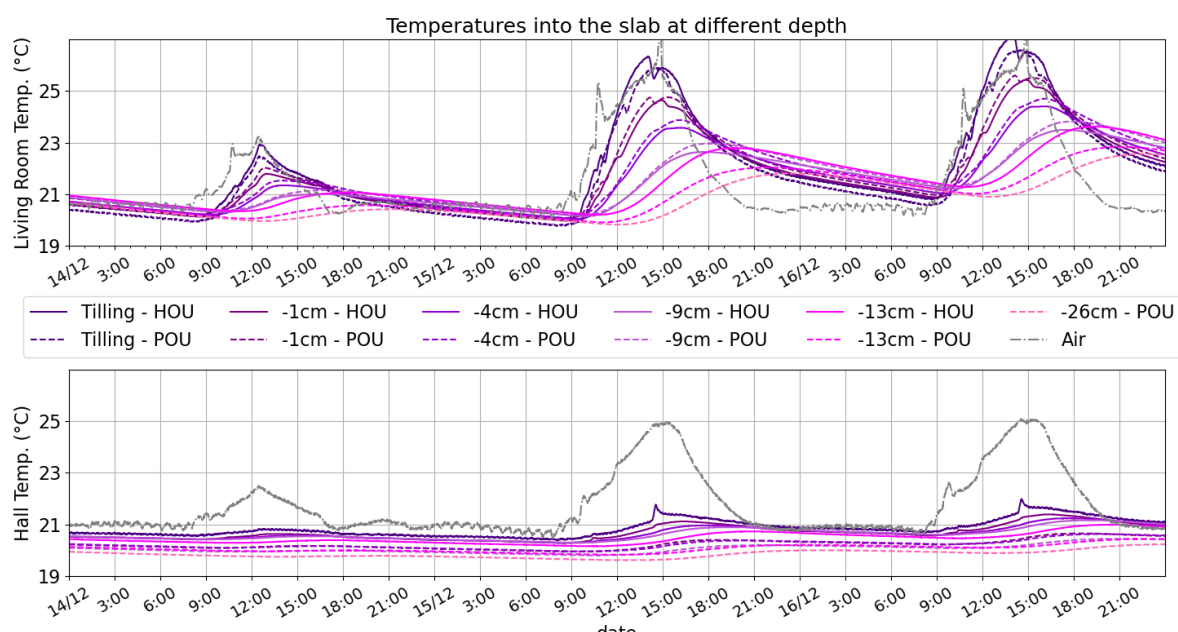


Figure 4-15 – Evolution de la température selon la profondeur de la dalle

## 4.6 Conclusion

### 4.6.1 Synthèse de l'étude expérimentale sur la maison Trecadbat

Ce chapitre s'est appuyé sur l'instrumentation, le **suivi et l'analyse du comportement thermique d'une maison expérimentale en climat méditerranéen** où les problématiques de confort d'été sont prédominantes. La maison étudiée présente plusieurs particularités pour la région où elle est située. Premièrement, concernant son système constructif et son inertie thermique : **les parois extérieures sont en ossature bois (à faible inertie) et l'inertie thermique est déportée dans plusieurs éléments internes en béton** : dalle du rez-de-chaussée, dalle intermédiaire, un mur de refend et un escalier. Deuxièmement, de **larges baies vitrées sur la face sud**, permettant de profiter d'un bon éclairage naturel, de valoriser les apports solaires l'hiver pour réduire les besoins de chauffage mais à contrario nécessitent une bonne gestion des apports solaires par des occultations en été et en mi-saison pour

ne pas dégrader le confort d'été. Enfin, la maison possède **un patio intérieur au rez-de-chaussée permettant de faciliter l'ouverture en sécurité d'une baie vitrée sur cet espace la nuit afin de valoriser la ventilation naturelle nocturne et des fenêtres de toit pour favoriser le tirage thermique.**

**Pour la période estivale, avec l'ouverture la nuit d'une baie vitrée donnant sur le patio et la fenêtre de toit au-dessus de la cage d'escalier, le moteur principal du renouvellement d'air est le tirage thermique.** La mesure des vitesses d'air sous la fenêtre de toit, a permis d'avoir une première estimation de la **ventilation naturelle nocturne de l'ordre de 3.5 à 5.5 vol/h**. Dans ce cas d'étude, il a pu être montré que **le couple ventilation naturelle nocturne et inertie thermique** permet de **compenser en partie les gains solaires engendrés par les volets sud ouverts** en journée, notamment du fait de la forte amplitude thermique journalière. La température intérieure journalière maximale est maintenue à une valeur stable en dessous de la température journalière maximale extérieure. Cette configuration permet de plus d'abaisser la température d'air intérieure de 7 à 13°C la nuit pour une amplitude de température d'air extérieure de 14 à 22°C. En journée, l'air réchauffe la dalle en béton avec une intensité atteignant 10 à 20 W/m<sup>2</sup> représentant jusqu'à 200 Wh/m<sup>2</sup> d'énergie emmagasinée. **Avec la ventilation naturelle nocturne**, cette énergie est dissipée la nuit avec une intensité maximale concomitante avec le minimum de la température d'air intérieur le matin à l'heure de fermeture des ouvrants pilotés. Le flux thermique dissipée par la dalle peut atteindre 25 W/m<sup>2</sup> pour **une énergie dissipée sur l'ensemble de la nuit**. Cette énergie dissipée la nuit est du même ordre de grandeur que l'énergie emmagasinée en journée. **Sans ventilation naturelle et en conservant les volets ouverts en journée, l'amplitude thermique journalière est fortement réduite.** La dalle emmagasine de l'énergie avec la même intensité que le scénario précédent en journée. Mais l'arrêt de la ventilation naturelle nocturne fait qu'il n'y a plus de dissipation de l'énergie accumulée dans la dalle la nuit et ainsi **la température de la dalle dérive comme la température d'air intérieur**, ne permettant plus de ralentir cette hausse de température. La comparaison par simulation de l'évolution de température du bâtiment naturellement ventilé la nuit aux scénarios non-ventilé et ventilé en permanence. a permis d'estimer un gain de 3°C sur les températures maximales par les stratégies de ventilation naturelle nocturne. Ces résultats ont par ailleurs montré que **le pilotage est fondamental pour assurer l'efficacité du système « ventilation naturelle & inertie thermique »**. En effet, les températures maximales obtenues en maintenant les ouvrants en permanence ouverts ou en permanence fermés sont très proches.

**Pour la période hivernale**, l'étude s'est principalement portée sur la valorisation des apports solaires directs par l'inertie thermique de la dalle du rez-de-chaussée. Compte tenu de la hauteur du soleil sur la période étudiée, les deux zones de mesures que sont le séjour et le hall ont permis de comparer une zone irradiée par le soleil et une zone qui ne l'est quasi pas. **Le flux thermique pénétrant dans la dalle peut atteindre jusqu'à 60 W/m<sup>2</sup> induisant une hausse de température sous le carrelage allant jusqu'à 5°C.** Cumulée sur la journée, l'énergie transférée à la dalle peut atteindre 300 Wh/m<sup>2</sup>. Cette énergie est ensuite **diffusée sur l'ensemble de la nuit avec une puissance relativement stable pouvant atteindre localement 10 W/m<sup>2</sup>**. Cumulée sur la nuit, l'énergie diffusée par la dalle peut atteindre localement 150 Wh/m<sup>2</sup>.

#### 4.6.2 Perspectives à ces travaux liés au bioclimatisme des maisons performantes en conditions estivales

Le concept de la maison étudiée dans ce chapitre, s'appuyant fortement sur des solutions passives, a démontré son intérêt en période estivale avec un confort qui peut être maintenu à condition d'utiliser de façon adéquate ces solutions passives à disposition. En effet une bonne gestion des apports solaires et de la ventilation naturelle sont les clés pour maintenir un confort thermique satisfaisant. Il pourra cependant être nécessaire d'étudier la mi-saison où la ventilation naturelle peut être source

d'inconfort froid si son utilisation n'est pas bien dosée. Pour la partie hivernale, la comparaison du modèle thermique avec les mesures sera nécessaire pour valider la bonne prise en compte des apports solaires à cette période et son interaction avec la dalle avant de ne pouvoir en extrapoler l'impact sur le bilan énergétique. Il serait de plus intéressant d'étendre l'étude du concept de maison bois-béton à d'autres géométries, notamment sans patio.

**Le bioclimatisme visant à prendre en compte au maximum dans la conception du bâtiment son environnement proche et l'usage pressenti du bâtiment, on peut se demander si cela restera un atout au regard du changement climatique. En effet, les mutations rapides des conditions météorologiques locales du fait du changement climatique semblent plus rapide en comparaison à la durée de vie d'un bâtiment.** Cette question a été effleurée dans le chapitre 2 avec l'analyse d'un climat caniculaire, mais nécessiterait d'être bien plus approfondie pour mieux cerner les apports et les limites des différentes composantes du bioclimatisme à l'épreuve du changement climatique. Les atouts du bioclimatisme pour un climat d'aujourd'hui le seront-ils toujours pour le climat dans 20, 50 ans ? L'impact de la gestion des apports solaires en période estivale / chaude devrait être grandissant. Si le couple inertie thermique et ventilation naturelle, permet de compenser les apports solaires directs du fait d'une non gestion de ceux-ci pour nombre de climat de la France métropolitaine aujourd'hui, ce ne sera certainement plus suffisant dans le futur. Cela ne l'est déjà pas dans les épisodes caniculaires de ces dernières années.

Concernant la **ventilation naturelle nocturne**, il faut **garder à l'esprit les contraintes qui peuvent freiner son utilisation** notamment liés aux **problèmes de sécurité** avec la possibilité d'intrusion en cas d'ouverture large. Bien que les systèmes proposés en oscillo-battants ou avec la baie vitrée donnant sur un patio ont esquissés des réponses, cela reste une **question d'acceptabilité par les occupants**. Dans ce travail, la **problématique acoustique** n'a pas du tout été traitée, et peut être **rédhibitoire pour des logements en milieu urbain ou proches d'axes routiers**. Des solutions de **sur-ventilation avec les systèmes de ventilation mécanique** ou des systèmes de **ventilation naturelle spécifiques intégrant des « pièges acoustiques »** dans les menuiseries peuvent être une réponse à cette problématique pour en limiter les contraintes et également répondre à la problématique des logements non traversant et sans différence de hauteur significative pour assurer un tirage thermique efficace.

**La composante qui est sans doute la plus incertaine à long terme est l'efficacité de l'inertie thermique et dépendra fortement de l'évolution du climat dans les différentes zones géographiques.** Dans les pays déjà chauds, des constructions légères sont souvent privilégiées lorsqu'il n'y a que peu d'amplitude thermique journalière. Cependant, ces constructions ne sont souvent pas ou peu isolées, et il faut garder à l'esprit le **changement de mode de fonctionnement de l'inertie d'un bâtiment pas ou peu isolé à un bâtiment fortement isolé passant d'une inertie par transmission à une inertie par absorption**. L'inertie thermique n'a pas le même objectif et effet entre ces deux modes. La première visera à décaler et atténuer le pic de chaleur de la journée, alors que la seconde visera à absorber les gains internes la journée pour limiter la hausse de température intérieure en espérant les dissiper la nuit. L'intérêt de l'inertie thermique dépendra donc des régions et de l'évolution du climat dans chacune d'elle et dépendra notamment de l'amplitude thermique journalière en période « classique » d'une part et de l'intensité, de la durée et de la fréquence des épisodes caniculaires qui pourraient rendre l'effet de l'inertie thermique contreproductif. Il faudra de plus **distinguer les bâtiments en évolution libre, ie non climatisés, de ceux qui seront climatisés lors des périodes les plus chaudes.**

Il se pose également la **question de l'inertie thermique effective**. En effet, une isolation thermique par l'intérieur ou une finition avec une lame d'air et une plaque de plâtre limitent fortement ou totalement **l'accès à l'inertie thermique** des parois. Un autre exemple classique d'inertie thermique non pleinement valorisée est celle des planchers chauffant. Bien souvent la chape en béton de 3 à 5 cm

d'épaisseur et dans lesquelles les tuyaux de chauffage sont coulés est isolée de la dalle en béton d'une épaisseur souvent supérieure à 10cm. Cette configuration restera intéressante pour des sollicitations jour/nuit, mais ne permettra pas de valoriser la totalité de l'inertie thermique du plancher, notamment en période caniculaire. Une possibilité pour continuer d'utiliser les planchers horizontaux comme émetteur de chauffage voire de rafraîchissement est de passer d'un plancher chauffant (avec une faible inertie pour être réactif) à une dalle active moins réactive car valorisant toute l'épaisseur de la masse thermique du plancher. La diminution de la réactivité du plancher pouvant être un atout pour choisir les moments de la journée ou consommer l'énergie pour chauffer le bâtiment tout en diffusant cette énergie de façon plus diffuse. Ceci est d'autant plus facile avec des bâtiments thermiquement peu déperditifs qui ont de faibles besoins de chauffage et de rafraîchissement.

Ce chapitre et les deux précédents ont pu montrer l'intérêt de valoriser des solutions passives pour améliorer le confort d'été sans climatisation. On peut maintenant se demander comment mesurer l'efficacité et la performance de ces systèmes. C'est l'objet de la thématique de la mesure et de la garantie de performance énergétique. Il faut tout d'abord pour cela choisir les indicateurs à mesurer et ensuite les méthodes qui permettent de mesurer ces indicateurs. Un des indicateurs principaux pour mesurer la performance thermique de l'enveloppe est souvent lié à son isolation et se traduit par un  $U_{bat}$  ( $W/(m^2.K)$ ) dans la réglementation thermique ou plus largement par un HTC pour Heat Transfer Coefficient et exprimé en ( $W/K$ ). Cette thématique sera l'objet des deux chapitres suivant visant à explorer la mesure de ce coefficient HTC en période estivale.



# Chapitre 5 - Exploration d'une méthode pour évaluer la performance thermique intrinsèque d'une enveloppe en conditions estivales. Une première approche expérimentale

## **Résumé :**

De nombreuses méthodes existent pour mesurer la performance thermique intrinsèque d'un bâtiment. Toutes utilisent un système de chauffage. Ceci ne permet pas d'effectuer ces mesures pour des climats chauds sans risquer de dégrader le bâtiment ou ses équipements. Ce chapitre présente des premières expérimentations explorant une méthode pour mesurer le HTC de l'enveloppe d'un bâtiment en le climatisant. Pour cela un système de génération de froid est placé à l'extérieur de l'enveloppe et un ou des échangeurs air/eau sont placés à l'intérieur du bâtiment. La puissance d'énergie absorbée est mesurée à l'aide du débit du fluide et de l'écart de température de ce fluide entre l'entrée et la sortie de l'enveloppe. Une première expérimentation à l'échelle du mètre cube en ambiance intérieure contrôlée a montré que le système et la métrologie mise en œuvre permettent d'estimer le coefficient HTC. La seconde étape a été de réaliser des mesures à l'échelle d'une cellule de 40m<sup>3</sup> en environnement extérieur. Elle a également permis de valider la méthode développée. Enfin, le passage à l'échelle d'une maison n'a pas été concluant du fait des conditions météo pas assez chaude pendant la période de tests, mais cette expérimentation a permis de lever plusieurs verrous de mise en œuvre.

## **Contexte de la réalisation de ces travaux :**

Le travail présenté dans ce chapitre repose principalement sur le travail de 3 stages de fin d'études expérimentaux que j'ai initié et encadré. Le premier stage, réalisé par H. FARES en 2020, consistera d'abord à défricher la problématique puis à la mise en œuvre d'un test à l'échelle d'1 m<sup>3</sup> en climat contrôlé. Les résultats étant intéressants, il a fait l'objet de 2 communications en conférence, une nationale IBPSA (39), une internationale (34). Le second stage de fin d'études, réalisé par M. Tanchou en 2021, a permis de passer à l'échelle supérieure, d'une cellule Passys, en climat réel. Il aura été également concluant et a également abouti sur 2 communications, une nationale IBPSA (40), et une internationale (41). Le troisième stage sur le sujet, celui de D. Lerond-Willemy en 2022, a eu pour objectif de passer à l'échelle d'une maison. Chacun aura pu profiter du support soit de J. Anger soit de F. Machefert, techniciens au CEA, dans l'orientation de ces expérimentations. Ce chapitre reprend donc principalement les travaux réalisés au cours de ces 3 stages. Ma contribution aura été d'être à l'initiative de la méthode, de suivre et guider de façon rapprochée ces travaux et de participer activement à la rédaction des différentes publications en poursuivant l'analyse des résultats après ces stages.



Comme évoqué dans le premier chapitre en section 1.4 , il est important de pouvoir mesurer la performance thermique d'une enveloppe de bâtiment à réception de travaux (de construction ou de rénovation). Pour cela, des méthodes existent afin de mesurer les déperditions thermiques par transmission et par infiltrations. Elles ont toutes le point commun de s'appuyer sur les périodes de chauffage du bâtiment et de nécessiter un écart de température d'au moins 5°C entre l'intérieur et l'extérieur. Ces méthodes ne peuvent donc pas être mises en œuvre en période estivale voire en mi-saison selon les climats sans risque de dégrader certains composants de l'enveloppe du bâtiment. Par exemple, la méthode SEREINE, qui fait appel pour la maison individuelle à une approche de chauffage en créneaux, définit une température intérieure à ne pas dépasser de 35°C. Cela limite donc la période où ces méthodes peuvent être utilisées voire même les rend impossible dans certaines régions du monde (91). Le travail présenté dans ce chapitre vise donc à explorer une méthode pour mesurer le HTC d'un bâtiment non pas en le chauffant mais en le climatisant. Il s'articule en quatre parties. La première introduira les problématiques et les enjeux du passage d'une méthode en chauffage à une méthode en climatisation. Les trois suivantes présenteront 3 expérimentations qui ont été réalisées avec une échelle croissante, tout d'abord à l'échelle d'un mètre cube en environnement contrôlé, puis en environnement réel à l'échelle d'une pièce (cellule Passys de 40m<sup>3</sup>) et d'une maison individuelle.

### 5.1 Problématiques et enjeux d'une méthode en chauffage à une méthode en climatisation

Pour rappel, l'idée des méthodes de mesures du HTC est de supposer que l'ensemble de l'énergie injectée dans le bâtiment mesuré est transmis par l'enveloppe du bâtiment ou par ces infiltrations. Il est donc primordial de mesurer avec précision l'énergie injectée dans le bâtiment d'une part et que d'autre part il n'y ait pas de sources ou de puits de chaleur autres dans le bâtiment, ou que ceux-ci soient également quantifiés avec la même précision. Les méthodes existantes utilisent des systèmes de chauffage électriques de type ventilo-convecteur rapportés spécifiquement pour la mesure. L'hypothèse est faite que l'ensemble de l'énergie électrique consommée par ces ventilo-convecteur est dissipé en chaleur. A notre connaissance, il n'existe pas de système équivalent produisant du froid et un des verrous techniques à relever pour développer une méthode en climatisation.

#### 5.1.1 Passage d'une source d'énergie électrique à hydraulique

Un changement majeur par rapport aux méthodes de chauffage existantes a donc été de trouver une solution alternative à la production de chaleur thermique électrique. La solution retenue a été de passer d'une production de chaleur électrique à une source hydraulique. Afin de produire et de dissiper le froid dans la cellule, un système hydraulique est utilisé au lieu des résistances chauffantes munies de ventilateurs. Le passage d'un système électrique à un système hydraulique implique deux changements principaux : la consigne en puissance et l'évaluation de la puissance. En effet, dans les méthodes existantes, la consigne est soit une température de consigne d'air intérieur et on mesure la puissance nécessaire au maintien de cette température, soit une puissance de chauffage avec une température intérieure seuil à ne pas dépasser. Dans le cas d'un système hydraulique, il est plus difficile de fixer une puissance car celle-ci va dépendre du débit injecté mais aussi de la différence de température entre le fluide entrant et l'air intérieur. La méthode de mesure de la puissance, et donc l'instrumentation, est également modifiée. Dans les méthodes existantes, les capteurs de puissance mesurent la consommation électrique des équipements placés dans la cellule et supposent que la consommation d'énergie est égale à la perte d'énergie par l'enveloppe en prenant en considération un coefficient de performance thermique des résistances chauffantes électriques et autres équipements comme les brasseurs d'air. L'incertitude du capteur de puissance électrique utilisé dans la méthode SEREINE est par exemple de 2% sur l'intervalle des valeurs de puissance sollicitée. Pour le système hydraulique, la puissance injectée par le fluide dans la cellule  $P_{\text{hydrau}}$  peut être estimée grâce au débit

du fluide  $\dot{m}_{eau}$ , à la différence de température du fluide entrant  $T_{eau_{entrée}}$  et sortant de la cellule  $T_{eau_{sortie}}$  et à la capacité calorifique du fluide  $C_p$  comme mentionné dans l'équation (5.1). La perte/gain d'énergie dans la cellule  $P_{cellule}$  est la somme de l'énergie captée par le fluide (négative) et de la consommation électrique du ventilateur  $P_{ventilateur}$  (positive) qui vise à optimiser les performances de l'échangeur et à homogénéiser la température de l'air intérieur du bâtiment comme défini dans l'équation (5.2).

$$P_{hydrau} = -\dot{m}_{eau} \cdot C_p \cdot (T_{eau_{sortie}} - T_{eau_{entrée}}) \quad (5.1)$$

$$P_{cellule} = P_{Hydrau} + P_{ventilateur} \quad (5.2)$$

L'incertitude liée au système hydraulique peut être estimée selon la formule suivante :

$$\frac{\Delta P_{hydrau}}{P_{hydrau}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \dot{m}_{eau}}{\dot{m}_{eau}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\Delta T_{eau})}{\Delta T_{eau}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C_p}{C_p}\right)^2} \quad (5.3)$$

### 5.1.2 D'un système de chauffage à un système de refroidissement

Un autre défi de cette méthode est l'éventuel impact de la condensation au niveau du système de production de froid. En effet, injecter un fluide froid dans une cellule fermée peut générer des phénomènes de condensation à la surface des conduites refroidies. Si de la condensation apparaît dans le bâtiment, elle génère une source d'énergie lié au changement de phase de l'humidité présente dans l'air. Ainsi une partie de l'énergie apportée par le système hydraulique sera utilisée pour le changement de phase (de vapeur à liquide) et non pour compenser le flux de chaleur à travers les parois. La condensation doit donc soit être évitée, soit quantifiée de manière dynamique.

### 5.1.3 La température extérieure équivalente

La méthode SEREINE sera utilisée dans ce travail. Une des composantes de cette méthode réside dans l'estimation d'une température extérieure équivalente. Cette température extérieure équivalente est substituée dans les modèles à la température d'air extérieur pour une meilleure prise en compte des échanges avec l'environnement notamment radiatif, qu'il soit courte ou grande longueur d'ondes. L'estimation de la température extérieure équivalente se fait dans la méthode SEREINE grâce à des capteurs de façade appelé également SENS (100), mesurant la température de deux surfaces différentes (une noire, une blanche) dont les propriétés radiatives (émissivités et absorptivités) sont connues, comme illustré sur la Figure 5-1.



Figure 5-1 : Capteur SENS sur un trépied

Ce capteur permet une prise en compte de l'ensemble des flux en provenance de l'environnement extérieur sur une surface, comme le schématise la Figure 5-2. (inspiré de (100)). La température extérieure équivalente à chaque paroi,  $T_{eq,s}$ , peut être déterminée selon l'équation (5.4). Elle dépend de la température extérieure  $T_e$ , du rayonnement solaire incident  $I_s$ , des coefficients d'échanges extérieurs convectifs  $H_{ce}$  et radiatifs  $H_r$ , et de l'absorptivité de la paroi  $\alpha_{e,s}$ . Ensuite, une température extérieure équivalente de l'ensemble du bâtiment  $T_{eq}$  est déterminée en pondérant les températures extérieures équivalentes de chaque paroi par leurs surfaces  $S_i$  et leur coefficient de déperdition  $U_i$  comme défini dans l'équation (5.5). Les principales hypothèses résident dans l'estimation de l'absorptivité des parois mesurées et le  $U_i$  de chaque paroi.

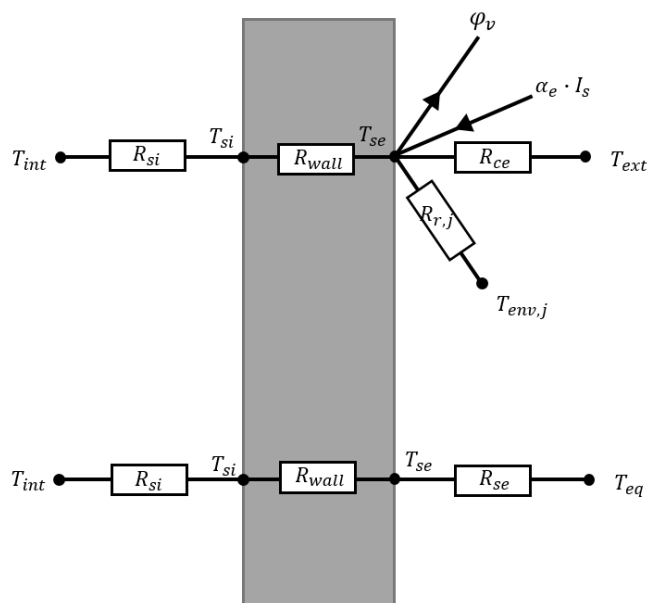


Figure 5-2 - Schéma électrique équivalent des transferts thermiques d'une paroi opaque schéma adapté de Bouchié R. 2014

$$T_{eq,s} = T_e + \frac{\alpha_{e,s} \cdot I_s}{h_{ce} + h_r} \quad (5.4)$$

$$T_{eq} = \frac{\sum_i T_{eq,i} \cdot U_i \cdot S_i}{\sum_i U_i \cdot S_i} \quad (5.5)$$

## 5.2 Expérimentation à l'échelle d'un mètre cube

Afin d'explorer une méthode en climatisation, une première étape a consisté à concevoir et à mettre en œuvre une expérience à l'échelle d'une cellule d'un mètre cube utilisant un échangeur de chaleur. Le test consiste à refroidir l'air à l'intérieur de la cellule et à mesurer l'évolution dynamique de la puissance frigorifique injectée et de la température à l'intérieur et à l'extérieur de la cellule. La puissance nécessaire pour compenser les pertes de chaleur avec l'extérieur est ensuite estimée, ce qui conduit au coefficient HTC de la cellule en utilisant la méthode d'étalonnage SEREINE (37), (101). Des expériences de chauffage utilisant des résistances électriques ont également été menées afin d'être comparées aux expériences de refroidissement.

### 5.2.1 Expérimentation à l'échelle du mètre cube dans la littérature : The Round Robin Box

#### Robin Box

Il existe une multitude de projets dans la littérature scientifique de méthode d'évaluation de performance d'enveloppe à l'échelle du mètre cube. Le projet qui a servi d'inspiration pour la conception de la boîte d'un mètre cube ici est l'Annexe 58 du programme EBC de l'IEA. L'Annexe 58 [9] consistait en partie à concevoir une boîte appelée Round Robin Box avec une composition de l'enveloppe connue. Plusieurs instituts ont pu évaluer la performance de son enveloppe, par l'expérimentation, en mettant en chauffe l'intérieur de la boîte sous différentes conditions de climat extérieur (en Belgique puis en Espagne). Ensuite, les données expérimentales furent envoyées à d'autres instituts de recherche pour essayer de remonter par méthode inverse à la caractérisation de l'enveloppe de la boîte à partir des données expérimentales.

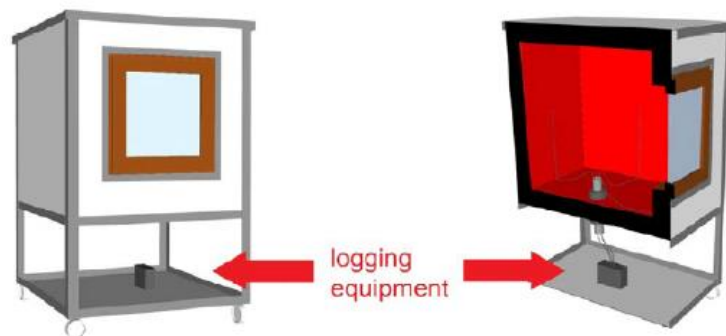


Figure 5-3 – Schéma de la Round Robin Box

La Round Robin Box, illustrée Figure 5-3, est un cube de dimension 120 cm. Ces parois sont d'épaisseurs égales à 12cm. Un des murs comporte une ouverture de type fenêtre. Une ouverture sur sa paroi inférieure est prévue pour permettre de faire passer toutes sortes de câbles. La boîte est disposée sur un socle rendant possible son élévation du sol de 50cm. Une plateforme inférieure est aussi prévue pour pouvoir disposer les éléments de mesures/centrale d'acquisition etc... Cet exercice commun aura permis dans un premier temps de tester l'influence du protocole expérimental suivi, puis dans un second temps l'impact de la méthode mathématique utilisée pour retrouver le coefficient de performance de l'enveloppe.

La Figure 5-4 liste les valeurs du coefficient de déperditions surfaciques de l'enveloppe de la Round Robin Box retrouvés par les différents participants concernant la résolution inverse à partir des données expérimentales. Certains participants ont fourni également au calcul une incertitude associée.

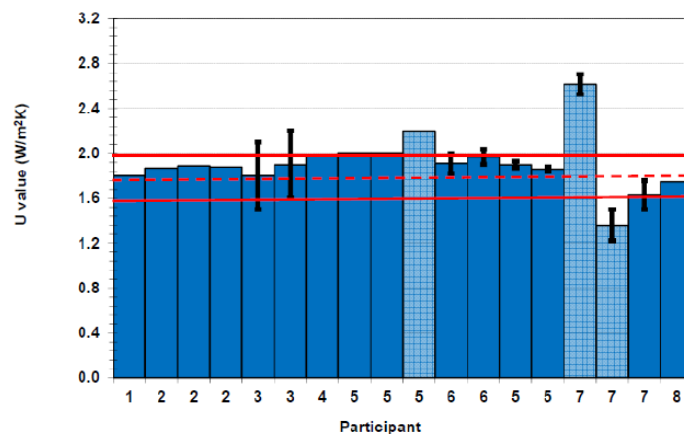


Figure 5-4–Résultats sur les coefficients de déperditions surfaciques obtenus par différents participants.

Résultats issues de l'Annexe 58

La ligne en pointillés rouge représente la valeur théorique du U, les deux lignes rouges continues représentent, quant à elles plus ou moins 10% de cette valeur théorique. La majorité des instituts retrouvaient des valeurs proches de la valeur théorique, seuls 3 essais ont été considérés hors intervalle. Cette expérimentation visant à estimer la valeur HTC (W/K) de l'enveloppe d'une cellule a donc été reprise en partie pour développer l'expérimentation réalisée à l'échelle d'un mètre cube décrite dans la suite de cette section.

### 5.2.2 Description de l'expérimentation

- Description de la cellule expérimentale

Afin d'étudier la faisabilité d'une méthode d'évaluation de la performance intrinsèque par refroidissement, une première expérience a donc été menée avec une cellule d'environ un mètre cube. L'enceinte, Figure 5-5, a une base rectangulaire avec des côtés  $L = 1,2$  m et  $l = 0,8$  m et une hauteur  $h = 1,2$  m. Ses parois sont en contreplaqué filmé de 1,5 cm d'épaisseur. La paroi inférieure est constituée d'une couche extérieure supplémentaire de polystyrène de 4 cm d'épaisseur. Ce choix d'une enveloppe non isolée sur 5 côtés vise à avoir un ordre de grandeur significatif de la puissance injectée par rapport aux incertitudes de mesure. La paroi frontale est amovible pour permettre l'accès à l'intérieur à tout moment. La cellule repose sur une structure métallique, et est surélevée du sol de 50 cm, pour favoriser les échanges convectifs air/paroi. L'étanchéité à l'air est assurée par des joints en silicone à l'intersection de chaque face, et par du ruban adhésif sur le côté amovible. Des mesures de gaz traceurs ont été effectuées pour mesurer l'impact de l'infiltration. Les tests ont révélé une perte par infiltration ( $H_{inf}$ ) inférieure à 0,1 W/K, qui sera négligée pour les différents scénarios. Le coefficient théorique  $H_{tr}$  de l'enveloppe est estimé à 23,2 W/K grâce aux conductivités thermiques et aux épaisseurs du contreplaqué filmé et du polystyrène ( $\lambda_{cp} = 0,13$  W/(m.K) et  $\lambda_{pol} = 0,035$  W/(m.K)) et des surfaces de chaque face. Les conductivités thermiques des matériaux de l'enveloppe ont également été mesurées à l'aide d'un ct-mètre et donnent une grande incertitude avec pour le contreplaqué des valeurs variant entre 0,08 et 0,12 W/(m.K), ce qui est inférieur à la valeur utilisée dans le premier calcul théorique. Avec ces valeurs de conductivité thermique, la fourchette de  $H_{tr}$  estimée se situe entre 18 et 21 W/K.

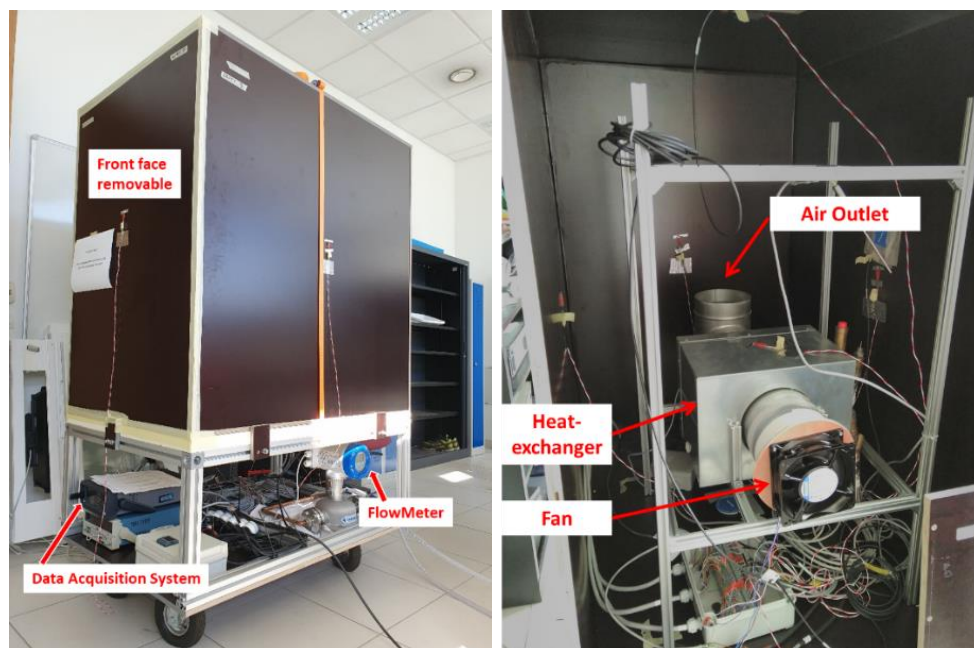


Figure 5-5. Cellule testée – vue extérieure à gauche, vue intérieure à droite.

L'émetteur de refroidissement/chauffage est un échangeur air/eau placé à l'intérieur de la cellule comme illustré Figure 5-5. L'eau circulant dans cet échangeur est refroidie ou chauffée par un bain thermostaté à droite de la Figure 5-6 avec une pompe à débit variable pour régler le débit d'eau circulant dans le circuit hydraulique. L'échangeur de chaleur est couplé à un ventilateur électrique dont le but est de brasser l'air qui circule dans l'échangeur et d'homogénéiser l'atmosphère intérieure de la cellule. La consommation électrique du ventilateur est calculée en amont, et est prise en compte dans la puissance thermique globale qui est injectée dans la cellule expérimentale, en considérant que la puissance électrique consommée par le ventilateur est dissipée en puissance de chauffage.

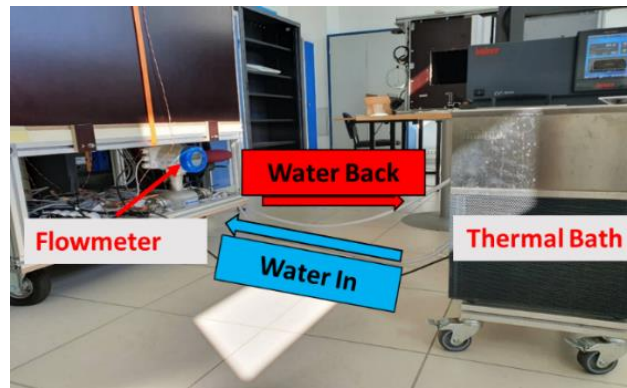


Figure 5-6. Equipements thermique et hydraulique à l'extérieur de la cellule.

- **Métrologie mise en œuvre**

Les grandeurs physiques mesurées sont les températures de l'air, des surfaces et de l'eau, les flux de chaleur à travers certaines parois, l'humidité relative de l'air, ainsi que le débit d'eau. La configuration et la position des capteurs sont résumées dans le Tableau 5-1. Les sondes de température ont été étalonnées en amont des essais avec leur chaîne d'acquisition complète. Les données des capteurs sont prétraitées pour alimenter l'algorithme SEREINE. Une température moyenne de l'air intérieur est calculée à partir des 4 capteurs installés. La température extérieure est donnée directement par le capteur de température d'air.

Tableau 5-1 – Capteurs mis en œuvre et leur position

| Type de capteurs | Unité | Position                | Position   | Nombre |
|------------------|-------|-------------------------|--|--------|
| Température      | °C    | Intérieur de la cellule | En différents points                             | 4      |
|                  |       | Extérieur de la cellule | Proche de la cellule                             | 1      |
|                  |       | Circuit hydraulique     | En entrée du circuit hydraulique dans la cellule | 1      |
|                  |       |                         | En sortie du circuit hydraulique dans la cellule | 1      |
| Débitmètre       | kg/h  | Circuit hydraulique     | En amont de la cellule                           | 1      |
| Hygromètre       | %     | Intérieur de la cellule | En sortie de l'échangeur                         | 1      |



|           |                  |                               |                           |   |
|-----------|------------------|-------------------------------|---------------------------|---|
|           |                  | Extérieur de la cellule       | Proche de la cellule ext. | 1 |
| Fluxmètre | W/m <sup>2</sup> | Parois internes de la cellule | Face supérieure           | 1 |
|           |                  |                               | Face inférieure           | 1 |
|           |                  |                               | Côté droit                | 1 |

Comme évoqué, dans les méthodes usuelles (co-heating, SEREINE, QUB), des résistances électriques sont utilisées comme sources de chaleur. La puissance dissipée est alors mesurée directement via la consommation électrique. L'un des défis en mode refroidissement est de pouvoir mesurer avec une précision suffisante la puissance thermique injectée dans l'enceinte. Dans notre cas, elle est calculée en ajoutant la puissance calorifique fournie par le système hydraulique à la puissance électrique fournie par le ventilateur. La puissance calorifique est calculée à partir des mesures de débit et de température de l'eau du circuit hydraulique effectuées à l'entrée et à la sortie de la cellule comme décrit dans les équations (5.1) et (5.2).

La puissance du ventilateur a été calculée avant les essais en mesurant l'intensité du courant circulant dans le ventilateur à l'aide d'un multimètre pour différentes valeurs de tension.

- [Scénarios mis en œuvres](#)

Les tests ont été effectués entre fin août et mi-novembre 2020. La cellule a été placée dans une pièce non climatisée. La température de la pièce, qui sert de condition limite extérieure à la cellule, a été principalement constante au cours d'une même phase de test. Le Tableau 5-2 liste l'ensemble des scénarios mis en œuvre au cours de ces essais. Ils se décomposent en 3 familles. Premièrement des essais avec un système de chauffage électrique pour avoir des points de comparaisons avec les méthodes existantes. Un essai d'une semaine avec une température constante imposée à l'intérieur de la cellule a été effectué pour servir d'essai de type co-heating afin d'obtenir une valeur de référence de HTC. Compte tenu de la faible inertie de la cellule et de son positionnement en intérieur avec des conditions sans rayonnement direct et peu de variations de températures, il a pu être vérifié que cette durée était suffisante. Des essais courts ont également été réalisés à la fois en chauffage électrique et avec le réseau hydraulique, avec une alternance entre chauffage et refroidissement pour ce dernier. Ainsi une alternance d'essais de refroidissement pendant la journée et de chauffage pendant la nuit a été effectuée avec le système hydraulique, afin de pouvoir comparer l'évaluation du coefficient de perte de chaleur pour les deux configurations. Les paramètres qui ont été modifiés au cours de ces scénarios sont la température de l'eau du bain thermostatique, le débit d'eau de la pompe du circuit hydraulique et le taux de brassage de l'air du ventilateur à l'intérieur de la cellule. La durée de la période en refroidissement était plus courte en journée que la période de chauffage la nuit étant mis en œuvre manuellement.

- [Présentation de la méthode de calibration](#)

Le but de l'algorithme d'optimisation pour la calibration est de trouver l'ensemble des paramètres (du modèle RC retenu) qui minimise la différence entre la température intérieure mesurée et celle simulée sur la base des données expérimentales (puissance injectée à l'intérieur et température extérieure). L'algorithme utilisé est tiré du code numérique utilisé dans la méthode SEREINE. Cet algorithme est une évolution des versions utilisées dans les méthodes précédentes (ISABELE (102) (103) (104) (105) et EPILOG), et est en partie basé sur l'algorithme de propagation d'incertitude pySIP (101).

La présente analyse consiste à calculer par méthode inverse le HTC d'une enveloppe, à partir d'un modèle RC (81) [6] [8] de l'outil SEREINE. La chaîne d'analyse SEREINE embarque tout une banque de modèles RC. Pour cette étude le modèle nommé TWTM illustré Figure 5-7 a été retenu. Cela correspond au modèle M2\_TmTmiTi dans [1] et [6] sans tenir compte de la résistance superficielle intérieure due au coefficient de transfert de chaleur par convection, ce qui équivaut à avoir  $R_{si}=0$ . TW indique la présence d'une capacité associée à deux résistances modélisant une paroi et TM indique la présence d'une capacité modélisant la masse interne. Dans notre cas, cette masse interne est représentée par l'échangeur de chaleur. Elle ne nécessite comme paramètres d'entrée que la puissance fournie et les températures équivalentes intérieure et extérieure de l'enceinte.

Tableau 5-2 – Scénarios mis en œuvre pour l'expérimentation à échelle 1m3

| Scenarii             |    | Durée du test | Nb de tests par scénario | Bain Thermostaté               |                  | Brasseur d'air |
|----------------------|----|---------------|--------------------------|--------------------------------|------------------|----------------|
|                      |    |               |                          | T <sub>in</sub> eau °C         | Débit d'eau kg/h | m3/h           |
| Hydraulique en froid | 1C | ~8h           | 9                        | 13                             | 70               | 370            |
|                      | 2C | ~8h           | 5                        | 13                             | 70               | 210            |
|                      | 3C | ~8h           | 5                        | 15                             | 70               | 210            |
|                      | 4C | ~8h           | 7                        | 17                             | 70               | 370            |
| Hydraulique en chaud | 1H | ~15h          | 9                        | 42                             | 70               | 370            |
|                      | 2H | ~15h          | 6                        | 42                             | 70               | 210            |
|                      | 3H | ~15h          | 1                        | 38                             | 70               | 210            |
|                      | 4H | ~15h          | 5                        | 40                             | 70               | 210            |
|                      | 5H | ~15h          | 5                        | 38                             | 70               | 370            |
|                      |    |               |                          | Résistance thermique(W)        |                  |                |
| Chauffage électrique | 5E | ~6h           | 3                        | 100                            |                  | 210            |
|                      | 6E | ~8h           | 3                        | 100                            |                  | 370            |
|                      | 7E | ~1 semaine    | 1                        | Consigne de température à 27°C |                  | 370            |

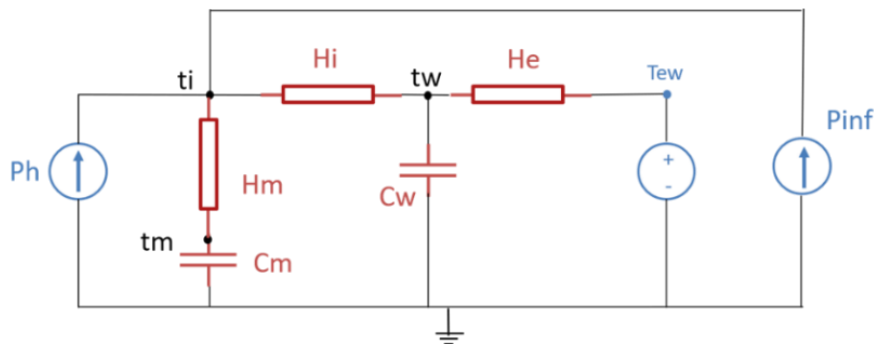


Figure 5-7 – modèle RC utilise pour la calibration.



## 5.2.3 Résultats

- Exemple d'un résultat avec un scénario en refroidissement hydraulique

La Figure 5-8 illustre les mesures de l'essai 1 et représente, sur le graphique du haut, l'évolution des températures de l'air intérieur des quatre capteurs intérieurs ( $T_{a_{int1}}$  à  $T_{a_{int4}}$ ), les températures de l'eau entrant ( $T_{water_{in}}$ ) et sortant ( $T_{water_{out}}$ ) de la cellule et la température extérieure ( $T_{a_{ext}}$ ). En bas est tracée l'évolution des flux de chaleur sur les parois supérieure, inférieure et droite de la cellule. Pour les températures de l'air intérieur, on note une décroissance exponentielle depuis 26°C jusqu'à une stabilisation autour de 19°C. Le régime transitoire est d'environ une heure. Les températures de  $T_{a_{int1}}$ , 3 et 4 sont homogènes autour de 18,5°C, quant à  $T_{a_{int2}}$ , elle est légèrement inférieure à 17,8°C puisque le capteur est situé immédiatement à la sortie de l'échangeur où l'air est soufflé. La température extérieure varie entre 21,5°C et 25,2°C. En régime permanent, la différence de température de l'air entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule est en moyenne de 6,4°C, et la différence de température de l'eau entre l'entrée et la sortie de la cellule est de 2,2°C. Les flux sur les faces non isolées (faces supérieure et latérales) se situent en régime permanent autour de 20 W/m<sup>2</sup>, tandis que le flux sur la face inférieure isolée est sans surprise plus faible, autour de 5 W/m<sup>2</sup>. La Figure 5-9 compare la température de l'air intérieur mesurée à celle simulée avec les paramètres retenus après calibration du modèle TWTM pour l'essai 2. La bande bleue correspond à l'incertitude propagée sur cette sortie. La concordance entre les valeurs mesurées et simulées est l'un des critères permettant de garantir la convergence correcte de la méthode. A la fin de l'analyse, on obtient une valeur du coefficient HTC ainsi que l'incertitude aléatoire associée. Il est à noter qu'aucune adaptation de l'algorithme de calibration n'a été nécessaire pour la calibration du refroidissement.

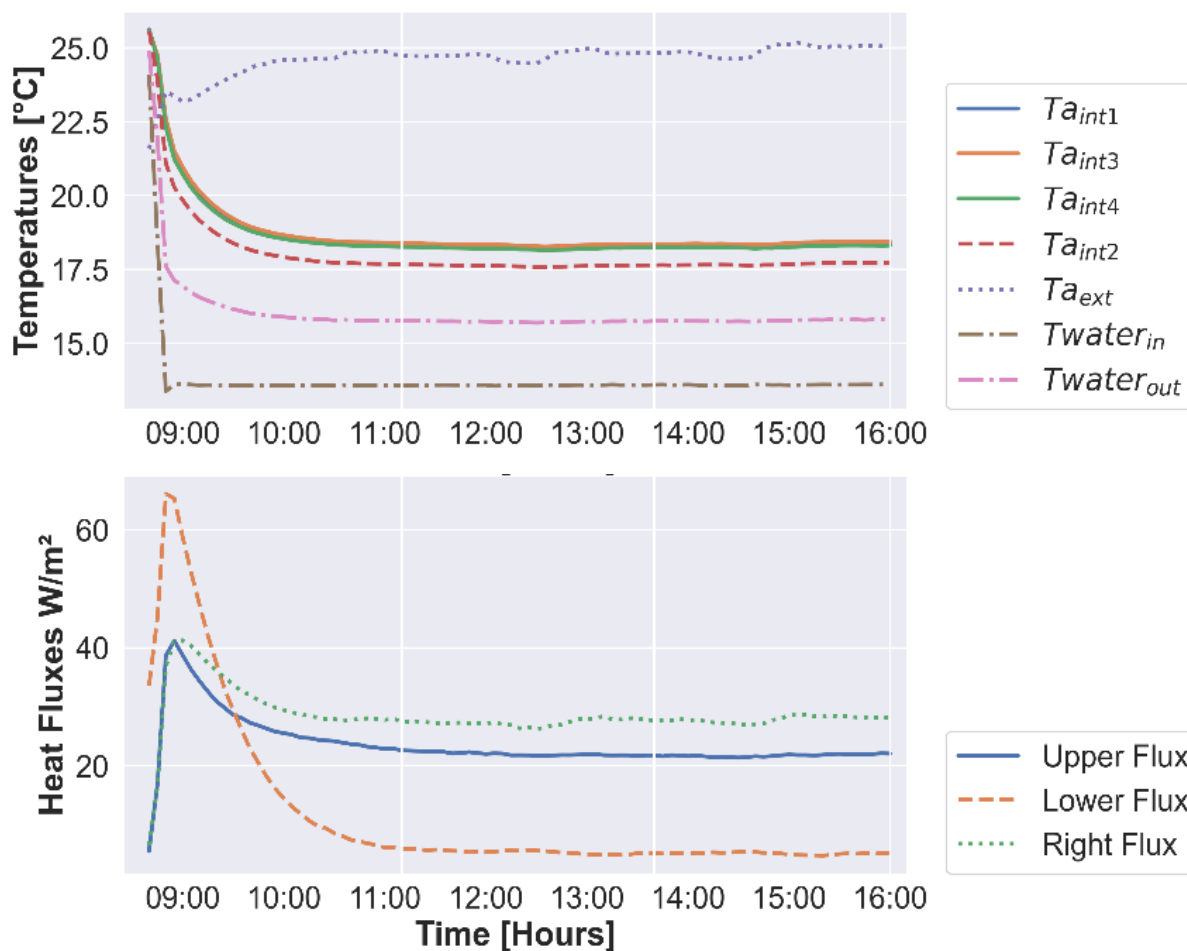


Figure 5-8. Températures et flux de chaleur mesurés pour un scénario en froid, dt=5min.

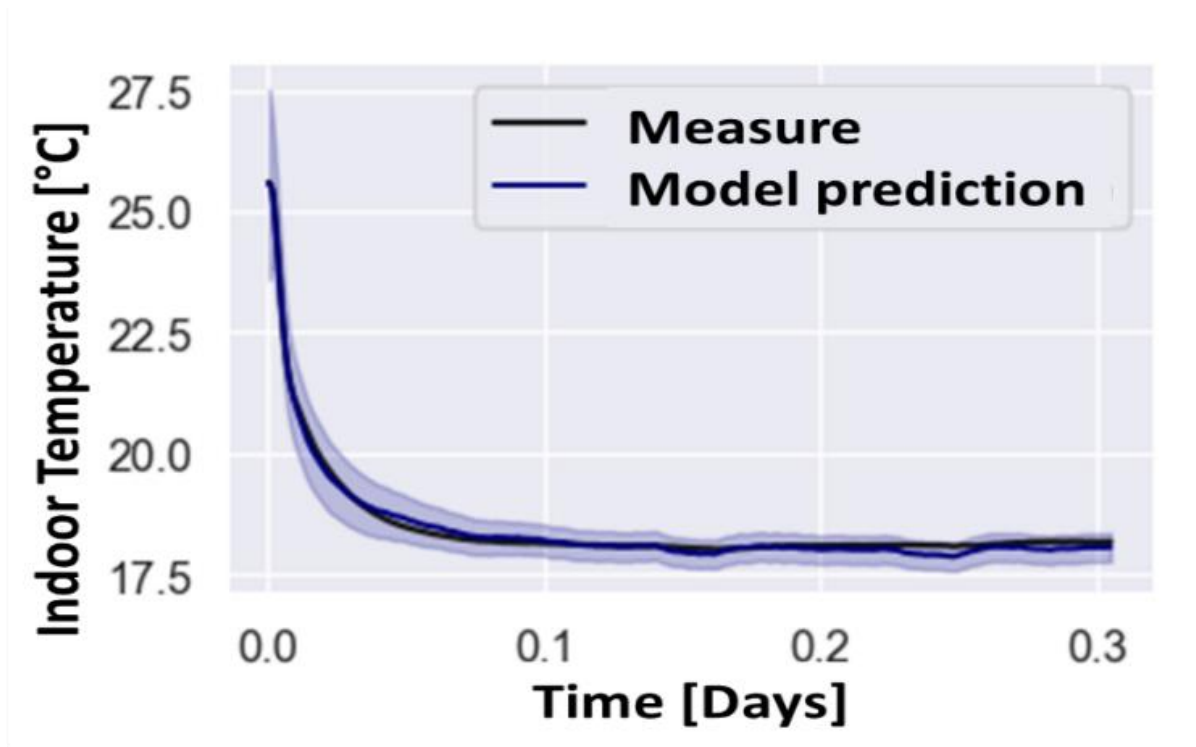


Figure 5-9. Comparaison entre la valeur simulée et la valeur mesurée.

- Résultats globaux

La Figure 5-10 représente l'estimation du coefficient HTC pour les différents essais décrits dans le Tableau 5-2. Le taux de brassage de l'air du ventilateur situé à l'intérieur de la cellule a influencé l'estimation du HTC avec une différence moyenne de 3 W/K. En effet, la plupart des essais réalisés avec un taux de brassage de 210 m<sup>3</sup>/h donnent un HTC compris entre 16 et 18 W/K, alors que les essais avec un taux de brassage de 370 m<sup>3</sup>/h se situent entre 18 et 20 W/K. Cette différence provient probablement du coefficient de transfert convectif à l'intérieur de la cellule. Pour un taux de mélange fixe, la majorité des résultats des tests se situe dans une fourchette de +/- 1 W/K, ce qui représente +/-6% et +/-5% pour un taux de mélange de 210 m<sup>3</sup>/h et 370 m<sup>3</sup>/h respectivement. A ce stade de l'étude, aucune différence claire n'apparaît entre les essais hydrauliques en mode refroidissement ou chauffage et les essais de chauffage électrique. En conservant le taux de mélange le plus élevé (370 m<sup>3</sup>/h), un essai plus long d'une semaine se comportant comme un essai de co-heating a été réalisé et a donné une valeur HTC de 19,3 W/K qui sera considérée comme une valeur de référence pour cette série de scénarios, et est dans la plage de 18 à 21 W/K, calculé théoriquement. Parallèlement, les deux essais avec une résistance électrique ont donné une valeur de 18,2 et 18,4 W/K à la limite inférieure des valeurs.

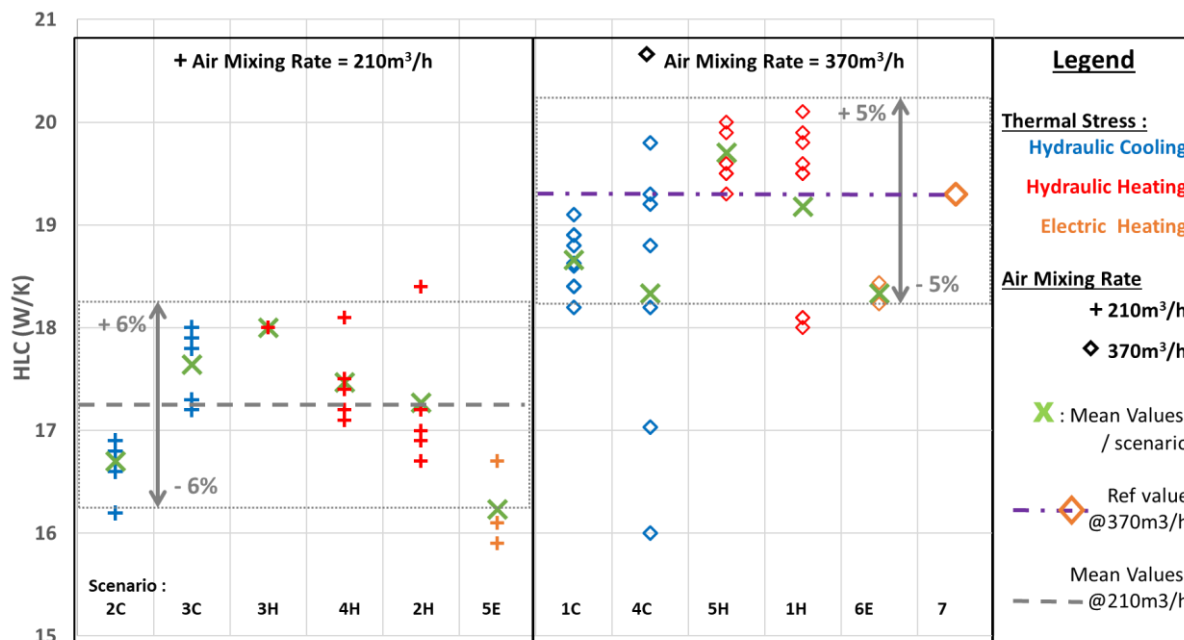
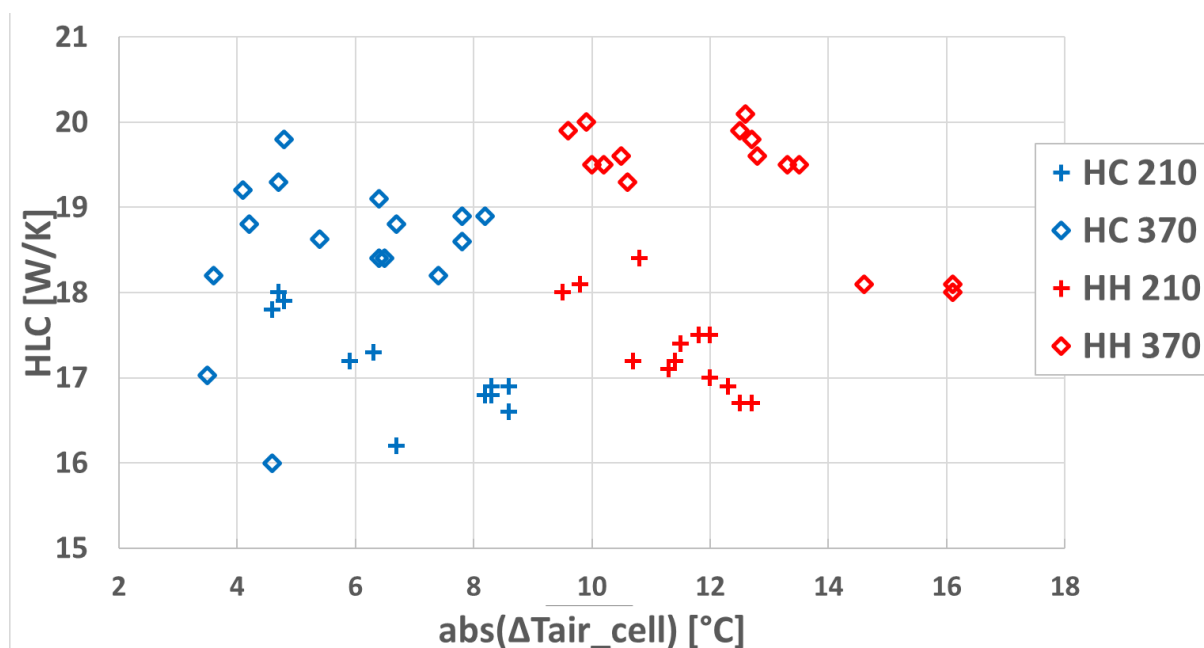


Figure 5-10. Vue d'ensemble des résultats.

Différentes températures d'eau d'entrée ont été testées pour les essais hydrauliques de refroidissement et de chauffage, comme décrit dans les différents scénarios présentés dans le Tableau 5-2, mais aucun impact clair de ce paramètre n'apparaît comme le montre la Figure 5-10. La différence de température de l'air entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule, qui varie de  $-6^{\circ}\text{C}$  à  $16^{\circ}\text{C}$  dans les différents essais effectués, ne semble pas avoir d'impact sur l'évaluation du HTC comme le montre la Figure 5-11. La Figure 5-12 montre le HTC en fonction de la valeur absolue de la différence entre la température de l'eau d'entrée et la température moyenne de l'air dans la cellule pour un essai, et aucune relation directe n'a été trouvée entre ces valeurs non plus.

Figure 5-11.  $\text{HTC} = f(\Delta T_{\text{air}})$ .

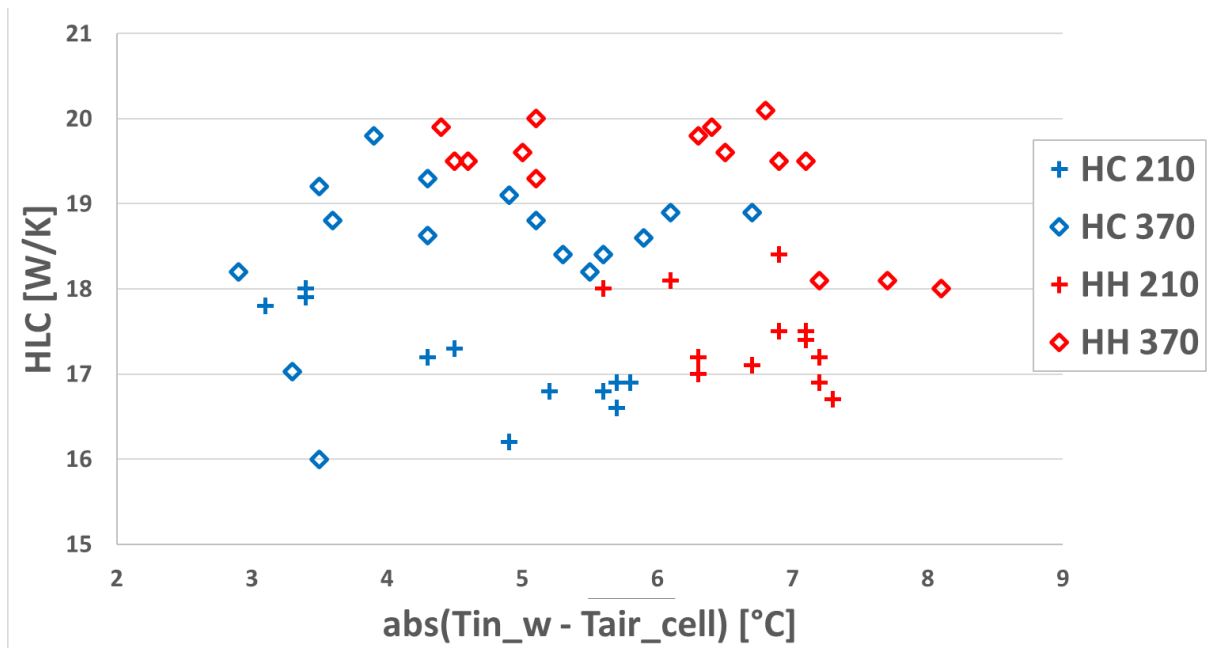


Figure 5-12.  $HTC = f(\text{abs}(T_{in\_w} - T_{aircellmean}))$ .

#### 5.2.4 Conclusion

Cette première étape visait à explorer une méthodologie pour évaluer le coefficient global de perte de chaleur de l'enveloppe du bâtiment en été, en la refroidissant la cellule au lieu de la chauffer en reprenant la philosophie de la méthode SEREINE. Pour ce faire, une expérimentation à petite échelle a été menée. Près de 60 essais ont été réalisés en faisant varier différents paramètres, parmi lesquels le système de refroidissement/chauffage hydraulique ou la résistance thermique électrique, le taux de brassage de l'air à l'intérieur de la cellule de mesure, et la température de l'eau pour le système hydraulique.

Les premiers essais montrent que la configuration adoptée (dimensions de la cellule et dimensionnement du système de génération et d'émission de froid/chaleur couplé à un ventilateur) permet de créer une atmosphère intérieure homogène et stable, avec une différence suffisante entre les températures de l'air extérieur et intérieur.

En ce qui concerne le processus de calibration, aucune adaptation de l'algorithme d'étalonnage développé pour les méthodes de chauffage n'a été nécessaire dans cette première phase pour déterminer le HTC en mode refroidissement.

Les résultats obtenus lors de cette première étape sont prometteurs. Le taux de mélange de l'air à l'intérieur des cellules a un impact évident sur l'estimation de la valeur HTC. En l'augmentant de 210 à 370 m<sup>3</sup>/h, le HTC moyen passe de 17,1 à 19,3 W/K (~10 %). Pour un taux de mélange d'air fixe, les valeurs calculées du coefficient HTC pour les charges de chauffage et de refroidissement et pour le chauffage hydraulique et électrique se situent généralement dans une fourchette de +/-5%.

Pour étendre cette étude, l'échelle de la cellule d'essai de 1m<sup>3</sup> étant assez petite, des essais à plus grande échelle ont été réalisés pour confirmer ces premiers résultats et passer avec un environnement extérieur réel. Cela permettra de prendre en compte les variations journalières de températures extérieures et l'impact du rayonnement solaire sur l'enveloppe. C'est l'objet du paragraphe suivant.

### 5.3 Expérimentation à l'échelle d'une cellule Passys

Le travail présenté dans cette section vise donc à tester cette méthodologie sur une plus grande cellule et positionnée en environnement extérieur. Cette évolution a nécessité de résoudre deux verrous techniques et scientifiques, le premier lié au changement d'échelle et le second aux perturbations supplémentaires apportées par le placement en extérieur, dues au rayonnement solaire et aux variations de température jour/nuit.

#### 5.3.1 Cas d'étude

- Description de la cellule de test

La cellule test utilisée dans cette étude est une cellule Passys Figure 5-13 d'environ 40m<sup>3</sup> issue du projet PASLINK (87) rénovée peu de temps avant l'étude et qui présente 5 faces fortement isolées (~40cm d'isolation), et une façade adaptative. Dans notre cas, la façade adaptative est fixe et orientée au sud, elle est composée d'un ouverture (double vitrage standard), et d'une paroi opaque en ossature bois peu isolée ( $R \sim 0,5 \text{ m}^2\text{K/W}$ ). La face opposée, qui est l'une des 5 faces fortement isolées, sépare la cellule d'un local technique dans lequel le générateur de froid/chaud est positionné.



Figure 5-13 : Vue extérieure d'une cellule Passys

- Système de chauffage/refroidissement utilisé

Le système de refroidissement/chauffage est le même que celui utilisé dans l'expérimentation à l'échelle d'un mètre cube présenté en 5.2.2. L'échangeur air/eau est placé à l'intérieur de la cellule comme illustré sur la Figure 5-14. L'eau circulant dans cet échangeur est refroidie ou réchauffée par le bain thermostatique, illustré Figure 5-15. Celui-ci est couplé à une pompe à débit variable pour régler le débit d'eau traversant le circuit hydraulique. L'échangeur de chaleur est couplé à un ventilateur électrique, dont le but est de brasser l'air qui traverse l'échangeur et d'homogénéiser l'air intérieur de la cellule. Un deuxième ventilateur est installé pour homogénéiser la température de l'air intérieur.

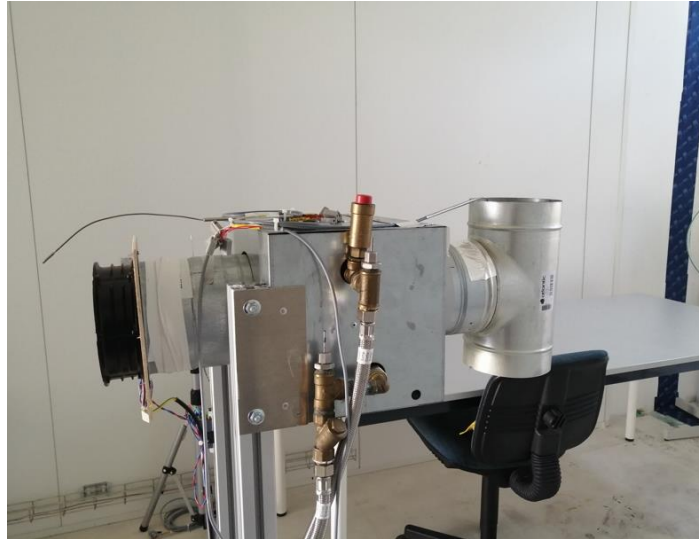


Figure 5-14 : Echangeur de chaleur eau/air à l'intérieur de la cellule



Figure 5-15 : Système de chauffage/refroidissement, à gauche: Génération – Bain thermostatique, à droite: Vue de l'intérieur de la cellule Passys

- **Métrologie mise en œuvre**

Les grandeurs physiques mesurées à l'intérieur de la cellule sont les températures de l'air, des surfaces de la cellule et de l'eau entrante et sortant de la cellule, les flux de chaleur à travers certaines parois, l'humidité relative de l'air, ainsi que le débit d'eau. La station météo de l'INES, située à quelques dizaines de mètres, enregistre les données de température extérieure et de rayonnement solaire. Le montage et la position des capteurs sont résumés dans le Tableau 5-3. Les sondes de température ont été étalonnées avec leur chaîne d'acquisition complète en amont des essais.

Une température moyenne de l'air intérieur est calculée à partir des capteurs installés. La puissance thermique injectée dans l'enceinte est calculée en additionnant la puissance calorifique fournie par le



système hydraulique à la puissance électrique fournie par les ventilateurs. Celle dernière a été calculée en amont des tests en mesurant l'intensité du courant traversant les 2 ventilateurs à l'aide d'un multimètre pour différentes valeurs de tension. Il est considéré que la puissance électrique consommée par le ventilateur est totalement dissipée en chaleur. Le premier ventilateur se trouvant en entrée de l'échangeur  $fan_{HE}$ , a une puissance mesurée égale à 42.6W, le second servant à homogénéiser la température dans la cellule  $fan_{cel}$ , a une valeur de 24.8W pour les tests réalisés.

Tableau 5-3 - Grandeurs mesurées et capteurs

| Grandeur mesurée<br>[Unité]         | Placement           | Position                              | Nb |
|-------------------------------------|---------------------|---------------------------------------|----|
| Température [°C]                    | Air intérieur       | Différents points de la cellule       | 11 |
|                                     | Air intérieur       | Entrée et sortie d'échangeur          | 2  |
|                                     | Surface intérieure  | Centre de chaque face de la cellule   | 5  |
|                                     | Air extérieur       | Local technique et extérieur          | 2  |
|                                     | Surface extérieure  | Sous-face et face ouest               | 2  |
|                                     | Circuit hydraulique | Entrée et sortie                      | 2  |
| Débit [kg/h]                        | Circuit hydraulique | Entrée de la cellule                  | 1  |
| Hygrométrie [%]                     | Air                 | Sortie d'échangeur et local technique | 2  |
| Flux de chaleur [W/m <sup>2</sup> ] | Surface intérieure  | Haut/Bas/ Est/Ouest                   | 4  |

- Sollicitations thermiques

Des tests ont été effectués entre mai et décembre 2021 avec différentes familles de scénarios, exécutés avec un système électrique et un système hydraulique.

Avec le système électrique, les scénarios sont de type co-heating et pseudo-aléatoires. Le co-heating, qui servira de valeur de référence, a duré 17 jours avec une température de consigne fixée à 35°C. Les scénarios pseudo-aléatoires (inspirés du projet SEREINE et nommés PSA dans cet article) consistent en des séquences avec source de chauffage ON et OFF d'une durée variable allant de quelques minutes à quelques heures (88). Deux types de scénarios ont été testés nommés PSA court et PSA long. Dans ce scénario, une température d'air maximale est fixée à 35°C à l'intérieur de la cellule.

La deuxième famille de scénarios utilise le système hydraulique, avec deux paramètres contrôlés : la température de consigne du fluide du bain thermo-régulé, et le débit d'eau. Trois types de scénarios avec le système hydraulique ont été testés : conditions constantes imposées sur une durée de 2 à 5 jours, en mode rafraîchissement ou en mode chauffage selon les prévisions météorologiques, des scénarios pseudo-aléatoires, dans le même esprit que celui avec le système électrique et enfin des scénarios avec température de consigne du bain thermo-régulé alternant entre le mode refroidissement pendant la journée et le mode chauffage pendant la nuit. Comme illustré dans le Tableau 5-4, certains des scénarios ont été mis en œuvre plusieurs fois afin de vérifier la répétabilité de l'expérience.

Tableau 5-4 - Mise en place des scénarios

| Type        | Mode          | Consigne | Scenario   | Nb tests                   | Exploitable |
|-------------|---------------|----------|------------|----------------------------|-------------|
| Hydraulique | Chauffage     | 35 °C    | Constant   | Hy.1                       | OUI         |
|             |               |          | PSA court  | Hy.7                       | OUI         |
|             |               |          | PSA long   | Hy.17                      | NON         |
|             |               | 30 °C    | Constant   | Hy.11                      | OUI         |
|             | 25 °C         | PSA long | Hy.8       | NON                        |             |
|             | Climatisation | 18 °C    | PSA court  | Hy.2, Hy.3                 | NON         |
|             |               | 15 °C    | Steady     | Hy.4, Hy.6                 | NON         |
|             |               |          | PSA court  | Hy.5                       | NON         |
|             |               | 10 °C    | Constant   | Hy.9, 10, Hy.12, 13, Hy.14 | OUI         |
|             |               |          | Créneaux   | Hy.15                      | OUI         |
| Alternance  | 10 à 35 °C    | Créneaux | Hy.16      | OUI                        |             |
| Electrique  | Chauffage     | 35 °C    | Co-heating | El.1                       | OUI         |
|             |               |          | PSA court  | El.2, EL.3                 | OUI         |
|             |               |          | PSA long   | El.4, El.5                 | OUI         |
|             |               | 200 W    | Steady     | El.6                       | OUI         |

### 5.3.2 Modèles numériques

Le modèle mathématique utilisé pour la calibration dans ce paragraphe est le modèle RC TWTI de l'outil SEREINE (ou M2\_TmTi dans (81)), où TW indique la présence d'une capacité associée à deux résistances, qui modélisent l'enveloppe, et TI représente une capacité modélisant la masse interne Figure 5-5. Les données d'entrée nécessaires sont la puissance injectée, la température intérieure, et la température extérieure équivalente de l'enceinte. En ce qui concerne la température extérieure, considérer uniquement la température d'air extérieur autour de la cellule n'est pas suffisant, car cela ne prend pas en compte l'impact du rayonnement solaire sur la surface extérieure de la cellule Passys. Une température équivalente extérieure  $T_{ew-meteo}$ , comme décrit dans le paragraphe 5.1.3, est donc calculée, en utilisant les données météorologiques de température et de rayonnement et les caractéristiques des surfaces de la cellule.

### 5.3.3 Résultats

- Etanchéité à l'air

Afin de pouvoir dissocier l'impact de l'infiltration et la perte de chaleur par conduction, il est important de mesurer l'étanchéité à l'air du bâtiment. Pour estimer le débit d'infiltration de la cellule, des essais à la porte soufflante ont été effectués et donnent une valeur  $Q_{50}$  de 138 m<sup>3</sup>/h à 50 Pa et une surface équivalente ELA de 0,0026 m<sup>2</sup>. Grâce à cette dernière valeur, on estime le débit d'infiltration grâce au modèle « LBNL » défini par (106) en fonction de la différence de température intérieure/extérieure et de la vitesse du vent, selon l'équation (5.6). Nous estimons la perte thermique due à l'infiltration grâce aux équations (5.7) et (5.8).



$$Q_{inf} = ELA * \sqrt{f_w^2 * v^2 + f_s^2 * |\Delta T|} \quad (5.6)$$

$$P_{inf} = Q_{inf} * \rho_{air} * C_{p_{air}} * \Delta T \quad (5.7)$$

$$H_{inf} = \frac{P_{inf}}{\Delta T} \quad (5.8)$$

Où  $Q_{inf}$  est le débit d'infiltration ( $m^3/s$ ),  $f_w = 0,13$  et  $f_s = 0,12 m/(s.K^{1/2})$  sont des coefficients constants liés aux effets du vent et du gradient thermique. Pour la cellule Passys,  $H_{inf}$  est de l'ordre de 2,3 W/K en considérant une vitesse moyenne de l'air extérieur de 5 m/s.

- Estimation du Htr théorique

Une première estimation de la perte de transfert de chaleur par les murs est calculée grâce aux spécifications de la cellule (dimensions et propriétés des matériaux). Le Htr est estimé supérieur à 13 W/K, sans la prise en compte des ponts thermiques dus aux points singuliers qui n'ont pas été quantifiés. L'ajout de la perte par infiltration conduit à une valeur de HTC supérieure à 15,3 W/K, ce qui signifie que la perte par infiltration représente environ 15% de la perte thermique de l'enveloppe.

- Résultats avec une sollicitation électrique

Le scénario co-heating donne une valeur HTC estimée à 16,4 W/K avec une incertitude de 1,2 W/K. Les 3 scénarios PSA donnent des valeurs HTC comprises entre 14 W/K et 17 W/K, soit un intervalle de +/- 15 % autour de la valeur théorique estimée de 15,3 W/K comme illustré Figure 5-16

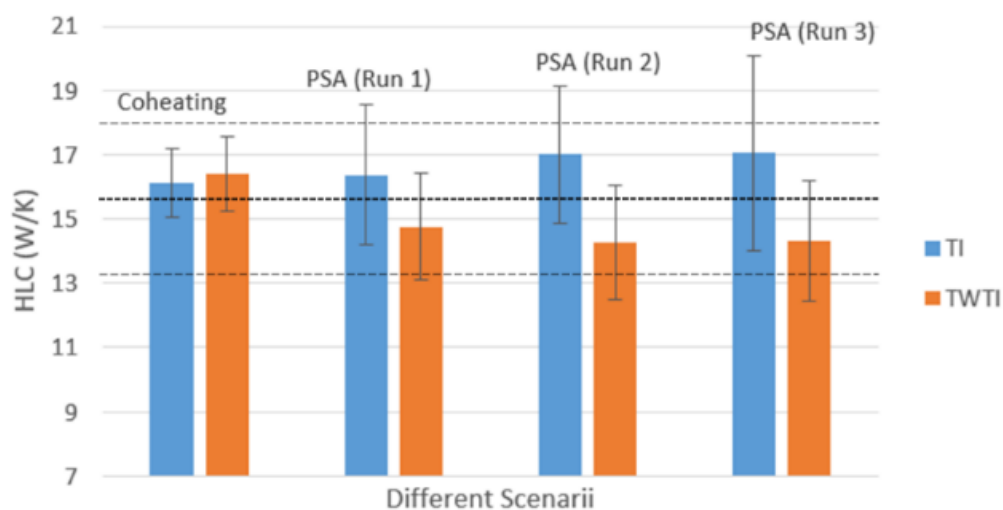


Figure 5-16 : Résultats des tests avec chauffage électrique pour 2 modèles RC

- Résultats avec une sollicitation hydraulique

La Figure 5-17 montre les données mesurées pour un scénario de 3 jours, le graphique supérieur montre l'évolution de la puissance injectée par le système hydraulique  $P_{inj}$  et de la puissance effective  $Ph$ , reçue par la cellule, qui est, en mode refroidissement, inférieure à  $P_{inj}$  du fait de la puissance dégagée par les appareils électriques de la cellule. Le graphique du bas montre l'évolution de la température de l'air intérieur ( $T_i$ ) et de la température extérieure équivalente. La puissance se stabilise après moins d'une journée autour de 200 W avec des petites variations journalières.

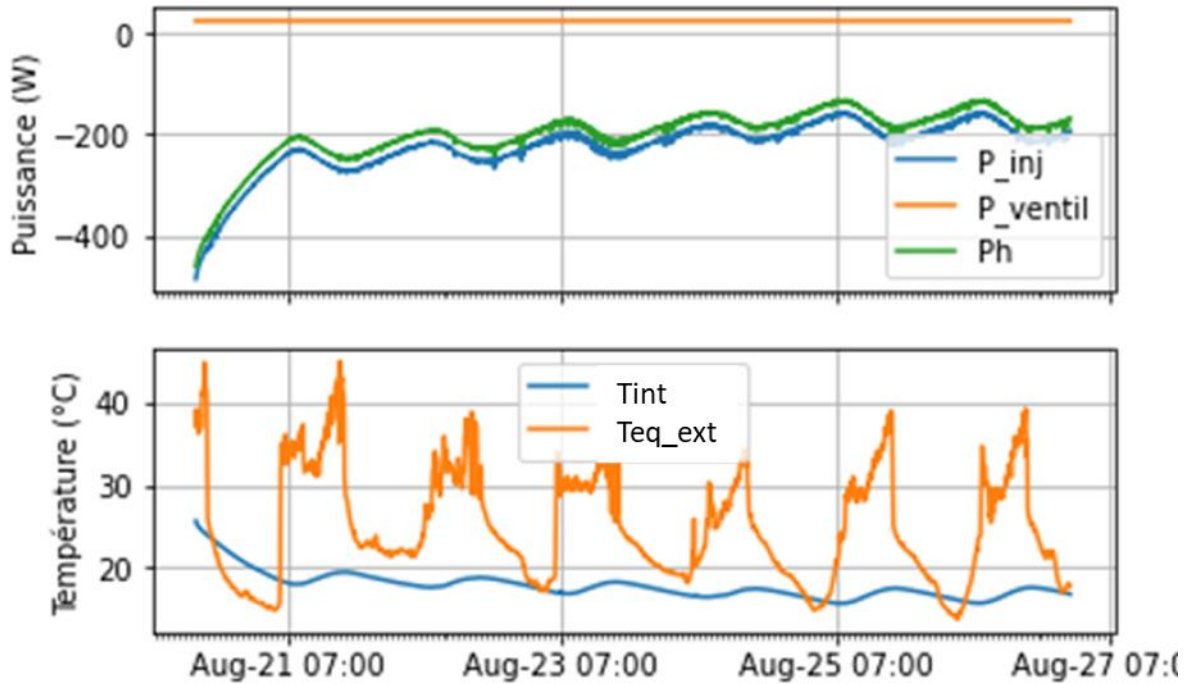


Figure 5-17 : Evolution de la puissance injectée et des températures

Les séries d'essais « constants », en mode refroidissement ainsi qu'en mode chauffage et les résultats d'un processus d'étalonnage utilisant le modèle TWTI sont affichés dans le Tableau 5-5. Les valeurs de HTC obtenues se situent dans la plage [14.5, 17.5] W/K quelle que soit la température de consigne, avec une incertitude globale inférieure à 3 W/K, et sont cohérentes avec la valeur théorique et celle estimée avec le co-heating.

Les scénarios pseudo-aléatoires mentionnés n'ont pas permis de donner des résultats exploitables compte tenu de la faible puissance délivrée par le système retenu couplé à l'intermittence du signal.

Tableau 5-5 - Résultats des tests hydrauliques pour le mode de chauffage et de refroidissement

| Test nb | Consigne [°C] | HLC [W/K] | $\Delta$ HLC [W/K] | Durée test (Day) |
|---------|---------------|-----------|--------------------|------------------|
| Hy.1    | 35            | 14.9      | 2.8                | 2.8              |
| Hy.7    | 35            | 15.4      | 1.8                | 1.9              |
| Hy.9    | 10            | 17.1      | 1.9                | 5.0              |
| Hy.10   | 10            | 17.5      | 1.5                | 5.7              |
| Hy.11   | 30            | 17.0      | 1.9                | 3.2              |
| Hy.12   | 10            | 17.3      | 1.4                | 6.8              |
| Hy.13   | 10            | 15.5      | 1.0                | 4.6              |
| HY.14   | 10            | 10.5      | 1.9                | 2.0              |
| Hy.15   | 10            | 15.6      | 1.7                | 2.1              |

- Problématique de la condensation

L'un des verrous de passer en mode de refroidissement est de contrôler la condensation. En effet, si il y a de la condensation à l'intérieur de la cellule mesurée, cela génère un « puits » d'énergie dû à la

chaleur latente qu'il faudra considérer dans l'équation du bilan d'énergie. Des tests ont été réalisés avec une consigne de température d'eau en entrée à 10°C, inférieure à la température du point de rosée, selon le diagramme psychrométrique. Au cours de ces tests, des phénomènes de condensation sont apparus et ont été observés grâce à des photographies capturées au pas de temps de 10 minutes. Deux séries d'essais ont alors été menés : une première sans isolation des tuyaux à l'intérieur de la cellule, une seconde avec. Pour la première série, deux éléments ressortent de ce constat : d'une part quelques gouttes d'eau sont apparues sur le tuyau tout au long du test confirmant les phénomènes de condensation et d'autre part, pendant la première heure de chaque essai, une flaque sous les tuyaux proches de l'entrée de la cellule à l'intérieur grandit puis diminue, avant de se stabiliser. Il peut y avoir un phénomène de condensation suivi d'un épisode d'évaporation, car la température du sol, sur lequel sont tombées les gouttes dues à la condensation, est plus élevée que la température de rosée. La valeur HTC obtenue est de  $16,2 \pm 2,4$  W/K dans le cas des tuyaux isolés et de  $17,3 \pm 1,4$  W/K sans isolation des tuyaux. Ainsi, les deux résultats se situent dans la plage considérée acceptable dans la section précédente, ce qui semble rendre la condensation négligeable dans ces configurations.

#### 5.3.4 Conclusion

Au cours de ce travail, des expériences ont été réalisées à l'échelle d'une cellule de 40m<sup>3</sup> en conditions extérieures réelles pour estimer la valeur HTC avec différentes méthodes de sollicitations thermiques. Deux systèmes ont été testés : un système électrique grâce à des ventilo-convecteurs électriques, et un système hydraulique grâce à un bain thermostatique couplé à un échangeur eau-air. Les tests ont été effectués à la fois en chauffage et en refroidissement. Les résultats montrent qu'il est possible d'estimer la valeur HTC d'une cellule Passys dans une plage d'incertitude acceptable pour le système électrique et hydraulique et pour les méthodes de chauffage et de refroidissement. Certaines limitations de la méthode de refroidissement avec ce système hydraulique sont apparues et ont commencé à être étudiées comme la limite d'une trop faible puissance injectée avec le système hydraulique si l'on veut éviter la condensation. La condensation qui est apparue pour certaines configurations ne semble pas impacter, dans la configuration étudiée, la capacité à estimer la HTC de la cellule Passys.

L'étape suivante est naturellement de vérifier la faisabilité d'une telle méthode à une échelle réelle avec un HTC plus proche de cas réels, et fait l'objet du paragraphe suivant.

#### 5.4 Vers une estimation du HTC à l'échelle d'une maison INCAS

L'exploration de la mesure d'un HTC en climatisation nous a amené à réaliser des expérimentations à l'échelle d'une maison réelle. Pour cela, la maison INCAS I-BB rénovée dans le cadre du projet ESOPE a été utilisée au cours de l'été 2022. Cette expérimentation et ces enseignements sont décrits dans ce paragraphe

##### 5.4.1 Description de la maison et des systèmes de refroidissement utilisés

La maison INCAS I-BB utilisée pour ces essais et qui est décrite dans le paragraphe 2.2.1 a fait l'objet au préalable d'une rénovation énergétique dans le cadre du projet de recherche ESOPE financé par l'Ademe. Le projet ESOPE a pour objectif d'adapter le concept EnergieSprong aux spécificités du contexte français et plus particulièrement avec une visée de PME régionales en Auvergne-Rhône-Alpes. EnergieSprong est un concept venant des Pays-Bas et qui vise à industrialiser la rénovation avec un objectif de bâtiments à énergies positives garanties. La maison INCAS I-BB, construite à la fin des années 2000 avec le standard PassivHaus a d'abord été déshabillée de son isolation extérieure pour les besoins du projet pour mettre son enveloppe en béton banché à nu et en faire une épave thermique. Les panneaux préfabriqués isolants ont ensuite été mis en œuvre pour tester les développements réalisés au cours du projet ESOPE. Elle comporte donc toujours une isolation thermique performante. L'une des spécificités du concept EnergieSprong est d'adosser à une maison individuelle rénovée un « module énergie » en déportant tout ou partie des systèmes CVC dans un cabanon adossé à l'extérieur de la maison. Cela peut ainsi permettre d'une part de rajouter des systèmes plus volumineux sans empiéter sur la surface habitable et d'autre part d'intégrer une VMC double flux en faisant passer les conduits d'insufflations d'air neuf par l'extérieur entre l'enveloppe existante et l'isolation rapportée.

Les équipements CVC installés pour assurer le confort dans la maison sont une pompe à chaleur et une VMC double flux. La pompe à chaleur est une PAC double service Air/Eau « Alféa Extensa A.I. » pour le chauffage et la production de l'eau chaude sanitaire. Celle-ci n'est pas réversible et ne peut pas être utilisée pour climatiser le bâtiment. Elle dispose cependant d'un mode de rafraîchissement permettant d'abaisser la température intérieure de 1 à 2 °C. La distribution de chaud est assurée par un réseau hydraulique. Les émetteurs de chaleur ont également été modifiés au préalable de la rénovation ESOPE afin de refléter des radiateurs en place dans une maison peu isolée, de type épave thermique. Des radiateurs hydrauliques dimensionnés pour une maison ancienne peu isolée ont donc été mis en œuvre. Ils possèdent ainsi une grande surface d'émission. Le concept ESOPE vise à conserver les radiateurs en place afin de garder une grande surface d'échange mais de pouvoir fortement diminuer la température en sortie du générateur et ainsi gagner en rendement du système. Il est important de noter que les radiateurs dans la maison I-BB n'ont pas été prévus pour un usage en froid, mais ont été utilisés pour les besoins de cette expérimentation et leur large surface d'échange a tout de même permis de réaliser une série de campagne expérimentale.

La pompe à chaleur ne permettant pas d'assurer la fonction climatisation, un refroidisseur externe de 6,9 KW de capacité frigorifique (« Lauda Ultracool UC-3 ») a été installé à l'extérieur de la maison et mis en court-circuit de la pompe à chaleur. Le seul paramètre qui peut être contrôlé sur ce refroidisseur est la température du fluide sortant du refroidisseur en mode « tout ou rien » avec le bouton marche/arrêt. Il est connecté au réseau hydraulique de la maison dans le vide sanitaire. Un passage de gaines enterrées y accédant et prévu à cet effet a permis de faire passer les tuyaux sans dégrader l'étanchéité à l'air de la maison. La partie du réseau en extérieur est calorifugé. Le système de distribution et d'émission en place dans la maison sont donc utilisés dans le cadre de cette expérimentation.



Figure 5-18 - A droite le refroidisseur, à gauche le module des systèmes adjacent à la maison I-BB



Figure 5-19 - Raccordement du refroidisseur au réseau hydraulique dans le vide sanitaire de la maison

#### 5.4.2 Dispositif expérimental

La VMC a été coupée lors des essais, et les bouches de ventilation obstruées pour se placer dans des conditions de tests type co-heating. Les volets ont de plus été fermés.

- Instrumentation

La maison I-BB possède un réseau de capteurs mis en œuvre au cours d'expérimentation précédentes et d'un système d'acquisition composé de plusieurs centrales d'acquisition permettant de remonter les données mesurées et de les enregistrer avec un pas de temps d'une minute. Parmi les capteurs en places sont présents des mesures de températures d'air dans chaque pièce, et à différents points des équipements techniques (gainés de ventilation, réseau hydraulique), d'humidité relative, des températures de globe noir, des vitesses d'air, et un débitmètre pour mesurer le débit en sortie des générateurs. La station météo installée sur la plateforme expérimentale à quelques mètres de la maison permet d'enregistrer les données climatiques au cours des expérimentations.

Des capteurs de températures du fluide caloporteur à l'entrée et à la sortie du vide sanitaire au point de piquage avec le refroidisseur ont été rajoutés. Ceci a permis de mesurer la puissance de froid dissipée dans le volume d'air intérieur, à l'image des expérimentations à l'échelle d'un mètre cube ou de la cellule Passys présentés dans les paragraphes précédents.



- Dégagements de chaleurs internes

Un certain nombre d'équipements électriques ne peuvent être arrêtés dans la maison, comme les centrales d'acquisition, le PC de sécurité et la centrale incendie. Ces appareils électriques dégagent de la chaleur dans la maison qu'il est nécessaire de quantifier pour être intégrée dans l'équation du bilan thermique et ne pas induire un biais sur le HTC estimé. Cette puissance dégagée a été estimée à 160 W.

La puissance thermique dissipée par les brasseurs d'air et qui vient également en opposition de l'effort de refroidissement est également monitorée et ajouté à la chaleur fatale mesurée.

#### 5.4.3 Scénarios mis en œuvre au cours de l'été

Plusieurs scénarios ont été mis en œuvre au cours de l'été et l'automne 2022 incluant, un co-heating avec la panoplie hydraulique au printemps, un co-heating avec un système classique électrique en octobre 2022, des pré-essais pour voir l'influence du brassage d'air pour trouver le meilleur compromis entre puissance électrique consommée et donc dissipation thermique supplémentaire et augmentation de l'efficacité de l'échange en froid et plusieurs tentatives de co-cooling au cours de l'été

#### 5.4.4 Résultats

- Brassage d'air et puissance dissipée

Lors des premiers tests de mise en marche du refroidisseur, l'apparition de condensation a été constatée localement comme illustré sur la Figure 5-20. Cette condensation est apparue en plusieurs points, premièrement dans le cellier au niveau du point de piquage d'entrée des tuyaux provenant du refroidisseur sur le réseau hydraulique de la maison et également au niveau des radiateurs et de l'arrivée du fluide dans ceux-ci. Afin de limiter la condensation, des brasseurs d'air ont été disposés à ces différents endroits. Outre l'objectif de limiter la condensation, ces ventilateurs auront le double effet d'augmenter localement le coefficient d'échange entre le radiateur et l'air et ainsi augmenter l'énergie échangée avec l'air ambiant. Les brasseurs employés sont de deux formes distinctes : ventilateur sur pied classique ou ventilateur axial simple comme illustré Figure 5-21.



Figure 5-20 - Condensation au raccord entre le plus grand convecteur du salon et le réseau le 25/07/2022 où l'humidité relative avait temporairement augmenté jusqu'à 65%



Figure 5-21 - Exemple disposition d'un ventilateur axial simple

L'ajout de ces ventilateurs a permis de grandement limiter l'apparition de la condensation. Celle-ci sera donc négliger dans la suite de l'étude.

- Impact de la position et de la puissance des brasseurs d'air sur la puissance dissipée

L'ajout des ventilateurs décrits dans le paragraphe précédent permet également d'augmenter les transferts thermiques. Une pré-étude a donc consisté à étudier la disposition des brasseurs d'air afin de quantifier son impact et de déterminer un positionnement optimal qui permet d'obtenir le meilleur équilibre entre puissance dissipée et amélioration des coefficients d'échanges sur les radiateurs. En effet, un débit d'air plus important permet d'augmenter les échanges thermiques et donc la puissance de froid dissipée par le radiateur, mais dissipe également plus de chaleur de par la consommation électrique du ventilateur supérieure. La Figure 5-22 illustre ceci. La courbe supérieure trace la puissance électrique consommée par les ventilateurs selon différentes configurations (débit et position). On fait l'hypothèse que cette puissance électrique est dissipée en chaleur. La courbe du milieu représente la puissance de froid dissipée par le réseau à la maison. Enfin la courbe inférieure montre le bénéfice de la configuration de brassage retenue. Les premières configurations testées dissipaient plus de chaleur de par la puissance électrique qu'elles n'amélioraient la dissipation de froid, d'où la valeur de gain négative. A partir du 20 juillet, des configurations ont pu montrer un gain en dissipation de froid. Il est apparu que des ventilateurs axiaux disposés dans le sens du flux de convection naturel auprès des raccordements des radiateurs au réseau conduisent à des échanges thermiques plus importants et minimisent les phénomènes de condensation. La disposition étudiée qui permet de maximiser la puissance de froid diffusée correspond à une consommation des brasseurs d'air de 160 W, et permet d'atteindre une puissance moyenne totale de 830 W diffusés soit un gain de 190 W par rapport à la puissance moyenne totale sans l'emploi de ventilateur.

### Evolution des scénarios de brassage et de la puissance fonction du temps

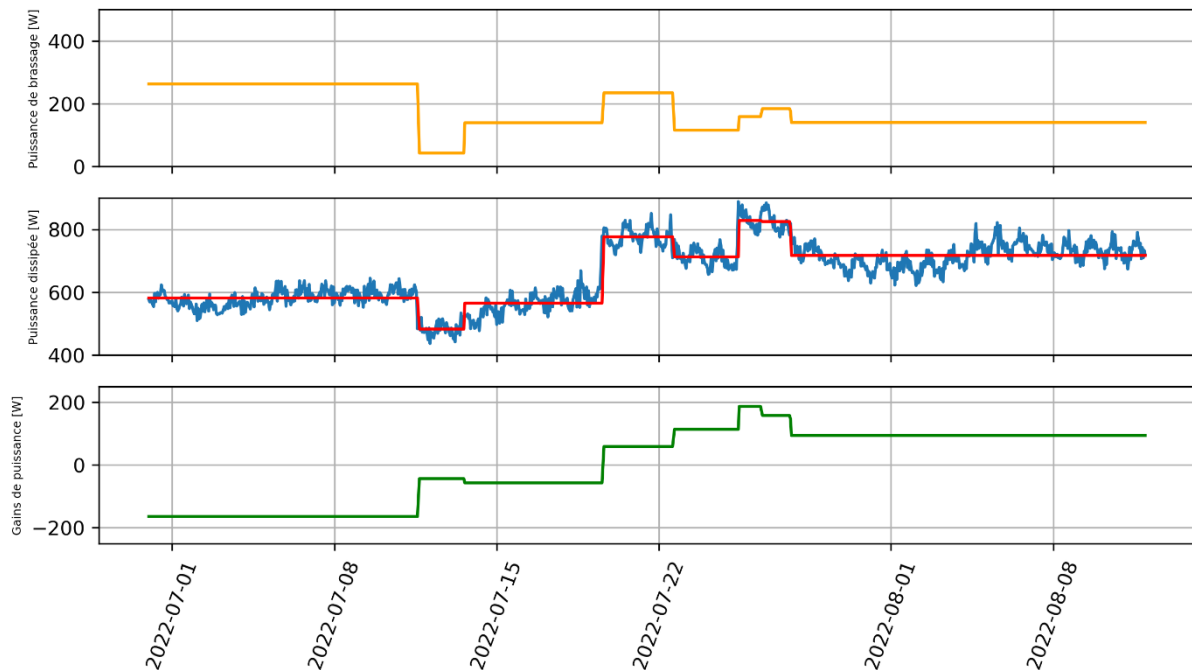


Figure 5-22 - Evolution des scénarios de brassage et de la puissance fonction du temps ; en haut la puissance de brassage, au milieu la puissance dissipée moyenne sur la période et en bas le gains de puissance

- **Contraintes limitant l'analyse des résultats**

Malheureusement, plusieurs contraintes ne permettent pas d'exploiter pleinement les tests réalisés.

Il existe une forte incertitude sur la mesure du taux de glycol dans le circuit hydraulique post branchement du refroidisseur (changeant le volume global de fluide), impactant la valeur de la capacité calorifique du fluide caloporteur. Cela n'a pas permis d'aboutir à une valeur de HTC pour l'essai de co-heating mis en œuvre au printemps avec la panoplie hydraulique cohérente avec celle du co-heating avec un système électrique classique mis en œuvre en octobre.

Le système d'émission en place a été dimensionné pour du chauffage d'une maison peu isolée et non pas pour l'émission de froid, ceci limite la puissance dissipée ou génère de la condensation.

Ensuite, lors des essais en co-cooling réalisés au cours de l'été, les conditions météorologiques n'ont pas été suffisamment chaudes pour permettre d'avoir un écart de température suffisant entre l'intérieur et l'extérieur, voire d'avoir des inversions de l'écart de températures entre le jour et la nuit.

### 5.5 Conclusion

Ces travaux exploratoires ont permis d'esquisser une méthode pour mesurer la performance thermique intrinsèque de l'enveloppe d'un bâtiment en le climatisant au lieu de le chauffer. Cette méthode s'appuie sur l'utilisation d'un réseau hydraulique en déportant la génération de froid à l'extérieur de l'enveloppe et en mesurant la puissance de froid injectée dans le volume d'air refroidi à partir de la mesure des températures du fluide caloporteur en entrée et en sortie de l'enveloppe et du débit de ce dernier.

Pour développer une telle méthode, trois expérimentations ont été réalisées à différentes échelles : cellule d'un mètre cube en environnement contrôlé, cellule de 40m<sup>3</sup> en environnement réel et enfin



pour une maison échelle 1. Les expérimentations à l'échelle du mètre cube et de la cellule Passys ont permis de valider l'utilisation d'un système hydraulique en lieu et place du système électrique d'une part et d'autre part qu'il était possible d'estimer le HTC en mode refroidissement. Dans ces expérimentations la chaine SEREINE, avec un algorithme de calibration de modèle RC valorisant la partie dynamique des essais a été utilisée sans adaptation de ce dernier pour le passage du mode chauffage au mode climatisation.

Plusieurs contraintes ont pu être relevées au cours de ces essais. Premièrement, la puissance froid est plus rapidement limitée que la puissance que l'on peut obtenir avec des résistances électriques. En effet celle-ci est fortement dépendante de la température de fluide froid en entrée de l'enveloppe. Outre les contraintes des climatiseurs classiques limitant la température froide, la problématique de la condensation est à considérer pour ne pas générer des puits d'énergie non quantifiés au sein du bâtiment mesuré. L'idée initiale de réaliser des créneaux de froid à l'image de ce qui est fait dans certaines méthode de chauffage semble donc être compromis de par la faible puissance de froid injectée. Une méthode de type « co-cooling », à l'image du co-heating semble être plus prometteuse dans un premier temps. La question du périmètre de validité de la méthode a aussi pu être soulevée au regard des problématiques rencontrées dans les expérimentations à l'échelle de la maison : quelles sont les conditions climatiques nécessaires pour que cette méthode de co-cooling soit valable. Cette question sera l'objet du chapitre suivant.

## Chapitre 6 - Evaluation du potentiel d'une méthode de CO-COOLING par une approche numérique

### **Résumé :**

Comme pour le chapitre précédent, l'objectif est d'explorer une méthode pour évaluer la performance thermique intrinsèque d'une enveloppe de bâtiment en le climatisant. Dans ce chapitre, le potentiel d'une méthode de co-cooling est étudiée au travers d'une approche numérique. Une géométrie de maison INCAS a été étudiée avec 3 variantes d'isolation de l'enveloppe et testée sous 3 climats estivaux. La méthode développée permet d'évaluer avec une incertitude satisfaisante le HTC d'une enveloppe pour les cas d'études numériques étudiés, dès lors que les conditions climatiques sont suffisamment chaudes. Un écart de température entre l'intérieur et l'extérieur de 7°C semble nécessaire pour cela dans l'étude présentée. La méthode développée utilise une régression linéaire simple en utilisant une température extérieure équivalente, basée sur la méthode SEREINE, en lieu et place de la température extérieure couramment utilisée dans la méthode de co-heating.

### **Contexte de la réalisation de ces travaux :**

Ce travail a principalement été réalisé au cours du stage de fin d'études de K. Campagna que j'ai co-encadré avec A. Pacquaut en 2023. Il consistait en partie à explorer la faisabilité « théorique » d'une méthode de co-cooling via une approche numérique. Ce travail a fait l'objet d'une publication dans la « Special Issue » « Performance Gap » de JBPS « Journal of Building Performance Simulation »(42). Ma contribution aura été d'être à l'initiative de la méthode, de le nourrir d'idées nouvelles à creuser, le guider et le challenger dans les résultats présentés et dans la façon dont les présenter. J'ai aussi contribué à la structuration de l'article, la reformulation d'une partie de certains paragraphes et l'ajout d'éléments dans les parties résultats et discussions. Ce chapitre reprend en grande partie cet article.

## 6.1 Préambule

En parallèle de ces premiers travaux, une étude numérique d'une méthode en climatisation nommée "reverse co-heating", a aussi été réalisé par Elizabeth Chard et Richard Fitton à l'Université de Salford (107). Cette méthode correspond à un test de co-heating par climatisation. Chard présente et étudie la validité de la technique en climatisation pour les trois méthodes de régressions linéaires décrites en 1.4.4, pour différents climats anglais et des climats australiens. Les résultats de la méthode de E. Chard dans les climats anglais ne sont pas très probants. Les climats ne permettent pas d'avoir une différence de température suffisamment grande entre l'intérieur et l'extérieur. En effet, une des limites du co-cooling est de ne pas pouvoir refroidir l'intérieur du bâtiment à moins de 16°C ou 17°C sachant que les températures de travail des fluides caloporteurs utilisés dans les climatiseurs actuels ne descendent pas en dessous de 15°C. Chard conclut que les résultats numériques du reverse co-heating réalisés sur des données de climats australiens ne sont pas non plus très probants. L'autrice conclut que la forte colinéarité entre les variables de l'irradiance et de l'écart de température de l'équation (1.3) peut être l'un des problèmes. En effet, une température extérieure élevée est souvent liée à un fort ensoleillement et lie donc ces deux variables. L'utilisation des méthodes de régression linéaire « classiques » de co-heating, décrites en 1.4.4, ne semblent pas adaptées au co-cooling. Il faut donc explorer différentes méthodes de régressions linéaires pour pouvoir valider la faisabilité et l'intérêt de méthode par climatisation, ce que nous allons tenter de faire ce ce chapitre.

## 6.2 Méthodologie

### 6.2.1 Approche globale

L'objectif de ce travail est de réaliser une approche numérique pour explorer le potentiel d'une méthode de co-cooling. Pour cela, le travail s'est décomposé en 2 étapes comme illustré Figure 6-1. La première étape a été de générer un jeu de données de comportement thermique de différentes enveloppes de bâtiments sous différentes sollicitations. Pour cela le logiciel de simulation thermique dynamique EnergyPlus a été utilisé. La seconde étape a été d'utiliser ces jeux de données pour différentes méthodes de régression pour calibrer la valeur de HTC de l'enveloppe simulée

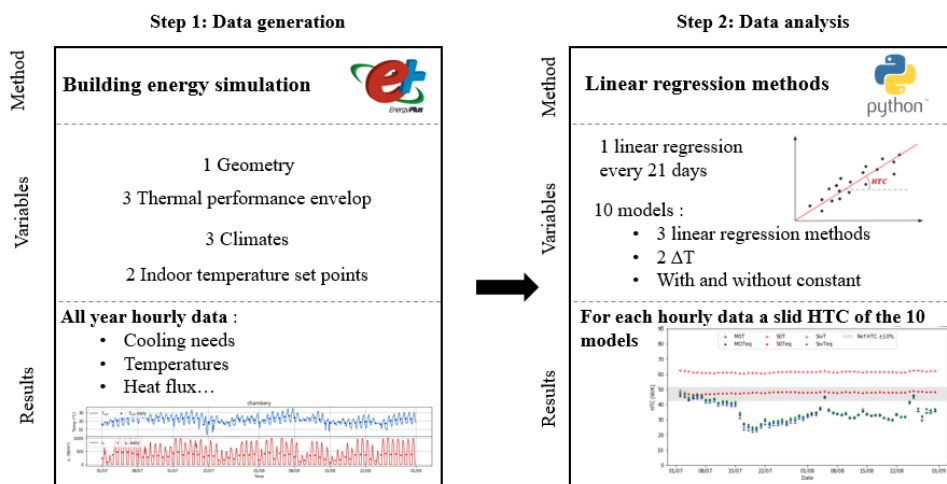


Figure 6-1 – Méthodologie de l'approche numérique

### 6.2.2 Première étape : génération de jeux de données numériques

Les cas d'études sont basés sur la géométrie de la maison INCAS I-BB (avant rénovation) avec 3 niveaux d'isolation considérés (IBB-47, IBB-100 and IBB-282), 3 fichiers météo (Abu-Dhabi, Nice et Chambéry) et deux consignes de températures. Ces cas d'études numériques sont décrits plus en détail au

paragraphe 6.2 . A des fins de comparaison, des simulations en mode co-heating ont également été réalisés en plus des simulations en co-cooling.

### 6.2.3 Seconde étape : Calibration du HTC par régression linéaire

Plusieurs modèles de régressions linéaires ont été testés sur les jeux de données simulées et sont résumés dans le Tableau 6-1

Tableau 6-1 - Modèles de régression linéaire utilisées

| Linear regression method         | Type of temperature difference | Models name |
|----------------------------------|--------------------------------|-------------|
| Multiple linear regression (1.3) | $\Delta T$                     | M0T         |
|                                  | $\Delta T_{eq}$                | M0Teq       |
| Simple linear regression (1.2)   | $\Delta T$                     | S0T         |
|                                  | $\Delta T_{eq}$                | S0Teq       |
| Sivour method (1.4)              | $\Delta T$                     | SivT        |
|                                  | $\Delta T_{eq}$                | SivTeq      |

- Modèles de régression linéaires utilisés

Trois méthodes de régression linéaires ont été étudiées. Il s'agit des 3 méthodes utilisées pour le co-heating (86), correspondant aux équations (1.2), (1.3) et (1.4) détaillées dans le paragraphe 1.4.4

- Ecart de température intérieur / extérieur

Comme introduit dans le paragraphe 1.4.6, compte tenu de la part plus importante des échanges radiatifs, dont le rayonnement solaire, sur les échanges thermiques entre l'enveloppe et son environnement, une alternative à l'utilisation de la température extérieure a été utilisée dans le calcul de l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur. La température d'air extérieur a été remplacé par la température d'air équivalente extérieure comme présentée en 1.4.6. La température équivalente extérieure prenant en compte de par sa définition les échanges avec l'environnement proche et lointain dont le rayonnement solaire, cela peut permettre de s'affranchir de cette contrainte plus importante en été. Cela peut aussi permettre de résoudre les problèmes de colinéarité comme évoqué dans (107). Ainsi pour chacune des 3 méthodes de régression linéaire, les 2 écarts de températures seront utilisés. Celui faisant appel à la température d'air extérieur comme dans la méthode de co-heating sera noté par la suite  $\Delta T$ , et celui introduisant la température équivalente extérieure  $\Delta T_{eq}$ . Ces deux écarts de températures sont détaillés dans les deux équations suivantes :

$$\Delta T = |T_{int} - T_{ext}| \quad (6.1)$$

$$\Delta T_{eq} = |T_{int} - T_{eq}| \quad (6.2)$$

### 6.2.4 Traitement des données

Afin d'avoir plusieurs estimations de valeur de HTC pour chaque étude simulée, la méthode de "moving window HTC" comme décrite dans (108) a été utilisée. Comme illustré dans la Figure 6-2, une valeur de HTC est estimée pour chaque période de 21 jours avec un glissement de cette période jour par jour. Et couvre les 2 mois d'été. Ceci permet de voir l'évolution de l'estimation du HTC en fonction des conditions météorologiques.

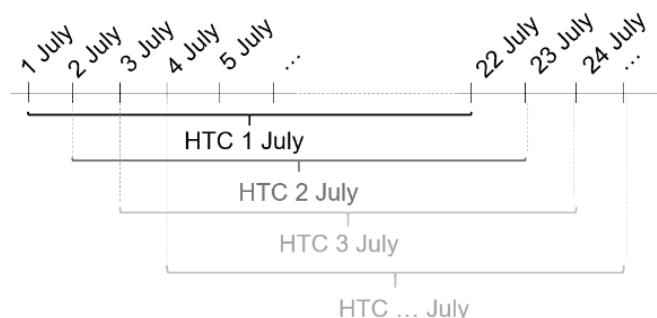


Figure 6-2 - Méthode de la fenêtre glissante

### 6.3 Description des cas d'études

#### 6.3.1 Description des enveloppes simulées

- Géométrie des cas d'étude

Les 3 maisons simulées ont la géométrie basée sur la maison INCAS I-BB avant rénovation décrite en 3.2.1. Pour rappel, la maison a une enveloppe en béton banché avec une isolation thermique par l'extérieur en polystyrène pour les parois verticales. Elle est constituée de 2 niveaux de 46m<sup>2</sup> et a une surface de parois déperditives de 220 m<sup>2</sup> pour un volume chauffé de l'ordre de 250 m<sup>3</sup>.

- IBB-47: Caractéristiques thermiques réelles de la maison I-BB

Le premier cas d'étude correspond à la maison I-BB telle qu'initialement construite, à l'exception du vide sanitaire qui n'est pas simulé et remplacé par un sol supposé adiabatique.

- IBB-100 and IBB-282 – Caractéristiques thermiques dégradées

Les 2 autres cas d'études IBB-100 and IBB-282 sont basés sur la même géométrie que le cas IBB-47. Le niveau d'isolation de leur enveloppe est quant à elle dégradée pour étudier deux cas d'études avec des performances thermique moindres. Les propriétés thermiques des 3 cas d'études sont détaillées dans le Tableau 6-2.

Tableau 6-2 : Propriétés thermiques des 3 variantes d'enveloppe

|  | Cas d'étude    | IBB-47 | IBB-100 | IBB-282 |
|--|----------------|--------|---------|---------|
| Valeurs U prenant en compte les résistances thermiques superficielles intérieure et extérieure [W/(m <sup>2</sup> .K)] | Paroi vertical | 0.144  | 0.435   | 2.306   |
|  | Toiture        | 0.128  | 0.374   | 1.727   |
|  | Fenêtres       | 1.3    | 3       | 5       |

- Hypothèses pour simuler un « co-cooling »

Les volets sont fermés pour éviter tout apport solaire direct, aucun débit de ventilation n'est introduit. De plus aucune infiltration n'est considérée pour simplifier ces premiers cas d'études. Le plancher du rez-de-chaussée est supposé adiabatique, ce qui permet de ne pas à avoir à prendre en compte la température du vide sanitaire dans le calcul de la température extérieure équivalente dans un premier temps. Ainsi, dans ces modélisations le coefficient de transmission par conduction vers l'extérieur  $H_{ext}$  est égal au coefficient de transmission par conduction de l'enveloppe globale  $H_{tr}$ , lui-même égal au coefficient de transmission global de l'enveloppe HTC comme explicité au paragraphe 1.4.1.

### 6.3.2 Génération des données simulées

- Outil de simulation

Le logiciel de simulation thermique dynamique utilisé est EnergyPlus dans sa version 22.1. Un pas de temps de 10 minutes est utilisé.

Le modèle simulé est composé de 6 zones thermiques contenant le rez-de-chaussée, les 3 chambres et la salle de bains à l'étage et les combles. La consigne de température est fixée à une valeur constante. Ainsi la température est homogène à travers toute la zone chauffée. Le modèle de ciel est celui de Berdhal-Martin (109). L'algorithme TARP (110) est utilisé pour les coefficients de convections intérieurs et extérieurs.

- Estimation de valeurs de références

Afin d'avoir une valeur de référence pour chacune des 3 enveloppes simulées, une méthode stationnaire a été utilisée. L'objectif de cette méthode est d'éliminer tous les transferts autres que ceux directement liés à l'écart de température entre l'intérieur et l'air extérieur. Il est réalisé dans des conditions similaires aux tests de co-cooling et de co-heating : sans occupations, volets fermés, sans ventilation. Pour cela un fichier spécifique a été défini en imposant toutes les grandeurs comme constantes tout au long de la période simulée. De plus le vent, le rayonnement sont fixés à 0. Les températures d'air et la température de ciel sont fixées à la même valeur. Le Tableau 6-3 résume les différentes hypothèses et les valeurs retenues pour ce fichier météo.

Pour chaque enveloppe, deux valeurs sont obtenues avec ce modèle stationnaire, une en mode chauffage appelée « HTC heating » et une en mode froid appelée « HTC cooling ». Ces valeurs correspondent aux valeurs calculées avec :  $T_{ext} = 10\text{ °C}$  et  $T_{int} = 30\text{ °C}$  en mode chauffage et  $T_{ext} = 35\text{ °C}$  et  $T_{int} = 15\text{ °C}$  en mode froid. Pour la suite, on retiendra la valeur en mode chauffage comme référence.

Tableau 6-3 - Données météos retenues pour le calcul de la méthode stationnaire

| File         | Physical quantity                              | Value                |                      |
|--------------|--|----------------------|----------------------|
| Weather file | Field Atmospheric Station Pressure             | 99332 Pa             |                      |
|              | Field Dry Bulb Temperature                     | Constant             |                      |
|              | Field Dew Point Temperature                    | Constant             |                      |
|              | field Relative Humidity                        | 50%                  |                      |
|              | Field Extraterrestrial Horizontal Radiation    | 0 W/m <sup>2</sup>   |                      |
|              | Field Extraterrestrial Direct Normal Radiation | 0 W/m <sup>2</sup>   |                      |
|              | Field Horizontal Infrared Radiation Intensit   | 0 W/m <sup>2</sup>   |                      |
|              | Field Global Horizontal Radiation              | 0 W/m <sup>2</sup>   |                      |
|              | Field Direct Normal Radiation                  | 0 W/m <sup>2</sup>   |                      |
|              | Field Diffuse Horizontal Radiation             | 0                    |                      |
|              | Field Wind Direction                           | 0 m/s                |                      |
|              | Precipitation                                  | 0 mm                 |                      |
|              | Simulation                                     | Sky temperature      | Exterior temperature |
|              |  | Interior Temperature | Constant             |

### 6.3.3 Données météos

Les climats de Chambéry, Nice et Abu Dhabi sont étudiées pour les périodes estivales. Ils sont classés selon la classification de Köppen-Geiger (111) respectivement en catégorie Cfc, Csa et Bwh. Cfc correspond à un climat tempéré avec un été court et frais, Csa à un climat tempéré avec un été

chaud et Bwh pour un climat chaud et sec. Une vue d'ensemble des conditions météo retenues est tracée sur les graphiques de la Figure 6-3 pour la période hivernale du climat de Chambéry et sur la Figure 6-4 pour les 3 climats estivaux. Celles-ci sont également résumées pour les 4 fichiers météo dans le Tableau 6-4. A Abu Dhabi, les journées sont ensoleillées avec un maximum de rayonnement solaire presque tous les jours à  $1000 \text{ W/m}^2$ . Les températures d'air extérieur varient principalement entre 28 et  $42^\circ\text{C}$ . A Nice, les journées sont globalement ensoleillées avec un pic de rayonnement solaire également proche de  $1000 \text{ W/m}^2$  mais quelques journées sont nuageuses. Les températures d'air extérieur sont plus basses qu'à Abu-Dabi variant de 15 à  $31^\circ\text{C}$ . A Chambéry, Les journées nuageuses sont plus nombreuses avec seulement une moitié de journées atteignant un pic d'ensoleillement à  $1000 \text{ W/m}^2$ . Les températures sont globalement moins élevées qu'à Nice avec des amplitudes journalières de températures fortement réduites les journées nuageuses.

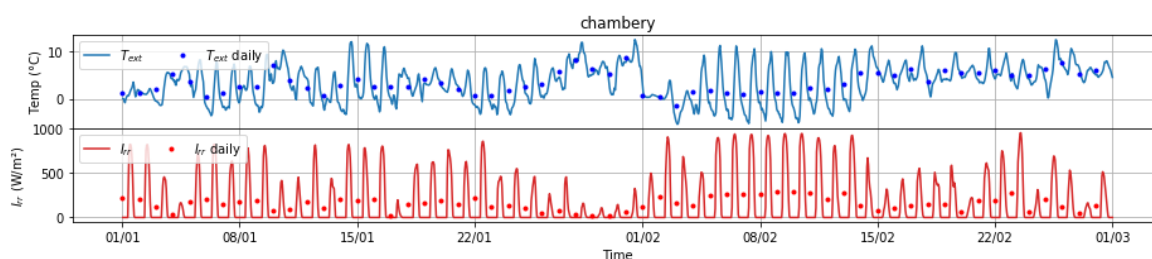


Figure 6-3 : Température extérieure (graphique du haut) et rayonnement solaire (graphique du bas) pour le climat de Chambéry du 1er janvier au 1er mars. Trait plein – données horaires, points : moyenne journalière

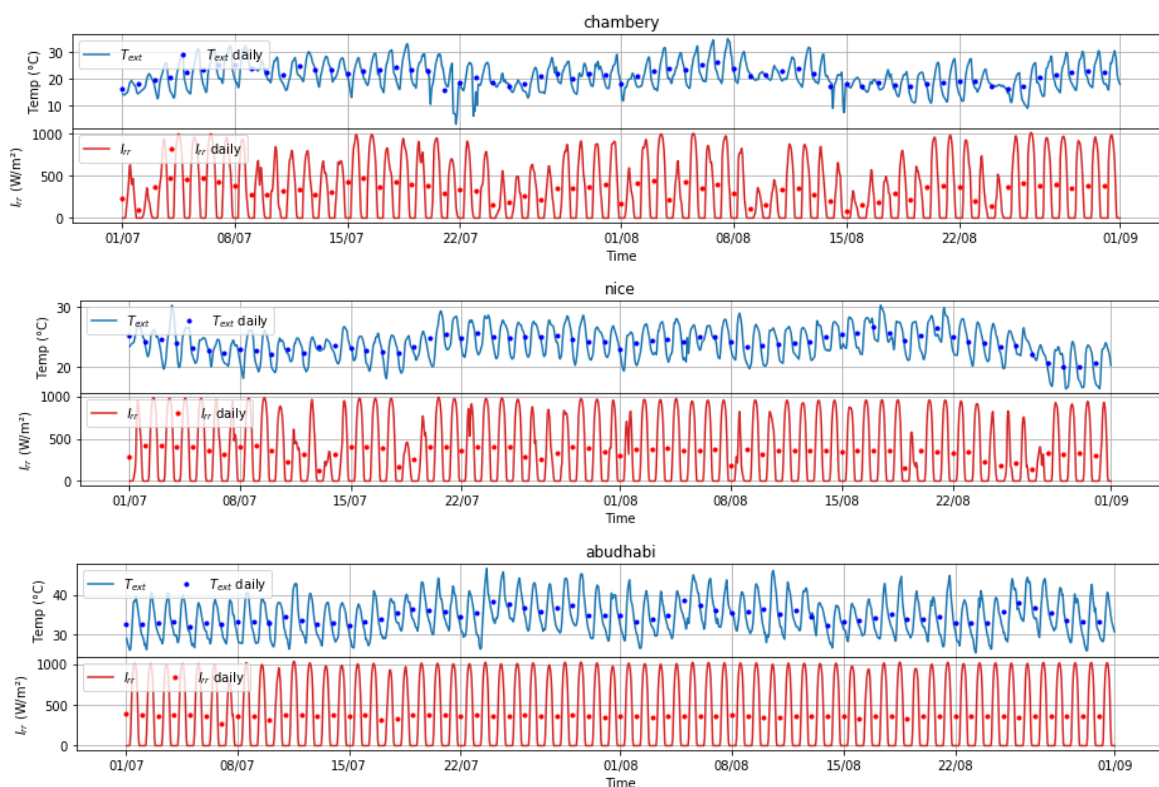


Figure 6-4 : Conditions météo du 1er juillet au 1er septembre pour les climats de Chambéry (haut), Nice (milieu) et Abu Dhabi (bas)

Tableau 6-4 - Résumé des conditions météo pour les 4 climats étudiés

|  | Hiver<br>(1er Janv. – 1er Mars)<br>Chambery | Été<br>(1er Juillet, 1er sept.) |       |           |
|--|---|---------------------------------|-------|-----------|
|  |   | Chambery                        | Nice  | Abu-Dhabi |
| Rayonnement solaire horizontal global moyen[W/m <sup>2</sup> ] | 154,5                                       | 317,3                           | 334,0 | 360,4     |
| Température extérieure moyenne [°C]                            | 3,4   | 20,9                            | 23,9  | 34,6      |

## 6.4 Résultats

### 6.4.1 Valeurs de références

La première étape a consisté à avoir une valeur de référence de chaque enveloppe simulée. Pour cela la méthode avec une météo stationnaire a été mise en œuvre. Cette météo a été utilisée à la fois en chaud et en froid. En parallèle, un co-heating a été simulé et 3 valeurs de HTC ont été estimés avec ces données en utilisant les trois méthodes de régression linéaires telles que décrites en 1.4.4. Le Tableau 6-5 résume les valeurs obtenues pour les 3 niveaux d'isolation. Les méthodes avec météo stationnaires en chauffage ou en climatisation donnent des résultats similaires avec une différence comprise entre 3 et 4% pour chacune des enveloppes. Les valeurs des méthodes stationnaires entre chauffage et climatisation ne sont pas égales compte tenu de certains phénomènes physiques non directement proportionnel à l'écart de température intérieur /extérieur. Même deux calculs de HTC stationnaire en chauffage donnent des résultats légèrement différents à écart de température différent même en prenant des précautions sur la température de ciel, les coefficients d'échanges convectifs, radiatifs. Cela pourrait sans doute faire l'objet d'un chapitre entier, mais ne sera pas plus détaillé ici. Les valeurs de référence retenues pour l'enveloppe de la IBB-47 est de 47 W/K, pour la IBB-100 de 100 W/K et pour la IBB-282 de 282 W/K. Les co-heating simulés, sur le climat hivernal de Chambéry, donnent également des valeurs similaires avec des écarts inférieurs à 10%.

Tableau 6-5 – HTC estimés avec la méthode stationnaire et les co-heating pour les 3 cas d'études

| Enveloppe simulée | Fichiers météo stationnaires |                           |               | Co-heating               |                            |                      |
|-------------------|------------------------------|---------------------------|---------------|--------------------------|----------------------------|----------------------|
|                   | Chauffage (Reference)        | Reference uncertainty 10% | Climatisation | Rég. Linéaire simple (3) | Reg. linéaire multiple (4) | Siviour Equation (5) |
| <b>IBB-47</b>     | <b>47</b>                    | <b>± 5</b>                | 49            | 45                       | 48                         | 48                   |
| <b>IBB-100</b>    | <b>100</b>                   | <b>± 10</b>               | 103           | 99                       | 104                        | 101                  |
| <b>IBB-282</b>    | <b>282</b>                   | <b>± 28</b>               | 292           | 302                      | 310                        | 287                  |

### 6.4.2 Un premier résultat de co-cooling à Abu Dhabi

A titre d'exemple, ce paragraphe détaille un premier résultat pour un co-cooling réalisé sur le climat d'Abu-Dhabi du 1er au 21 juillet avec une consigne de température intérieure à 18°C. L'évolution horaire et la moyenne journalière des conditions climatiques et de la puissance de refroidissement sont présentées dans la Figure 6-5. Dans cette figure, sont représentées sur le graphique supérieur la température extérieure en ligne bleue continue, la température extérieure équivalente en ligne orange pointillée, sur la courbe du milieu, le rayonnement solaire horizontal global et en bas la puissance frigorifique absorbée dans la maison. Les conditions extérieures sont similaires au fil des jours, la température extérieure variant principalement de 27 à 40°C avec des journées ensoleillées. Les besoins de refroidissement ont également une forme journalière similaire avec un besoin croissant jusqu'à 1100 W lorsque le soleil est au zénith et une diminution des besoins suivant 2 pentes, une



première lorsque le rayonnement solaire diminue et une seconde après le coucher du soleil. Il est intéressant de noter que pour les derniers jours à partir du 17 juillet, la température maximale extérieure journalière augmente de 40 à 44°C, ce qui affecte directement la puissance maximale journalière de refroidissement de 1100 W à 1200 W.

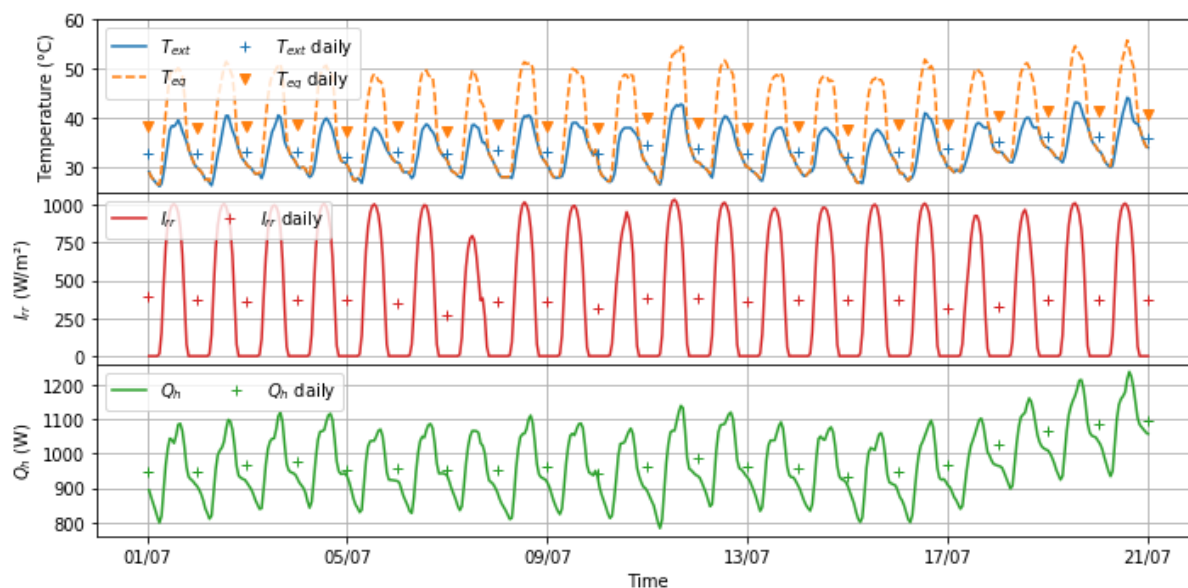


Figure 6-5 – Evolution des conditions météo et de la puissance de froid absorbée pour un test de co-cooling à Abu Dhabi avec une consigne de température intérieure à 18°C

Dans la Figure 6-6, la puissance frigorifique journalière est représentée en fonction des différences de température moyennes journalières  $\Delta T$  (graphique du bas) et  $\Delta T_{eq}$  (graphique du haut) afin d'effectuer les régressions linéaires simples correspondant aux méthodes avec la température extérieure standard ou la température extérieure équivalente. Avec la température extérieure équivalente (SOTeq), le HTC est estimé à 47 W/K (+/- 9%), c'est-à-dire égal à la valeur de référence alors que le HTC estimé avec la température extérieure standard (SOT) est de 62,4 W/K (+/- 12%), c'est-à-dire 30% plus élevé que la valeur de référence. De plus, la méthode Teq donne un coefficient de détermination plus élevé et une incertitude plus faible que la méthode de la température extérieure standard.

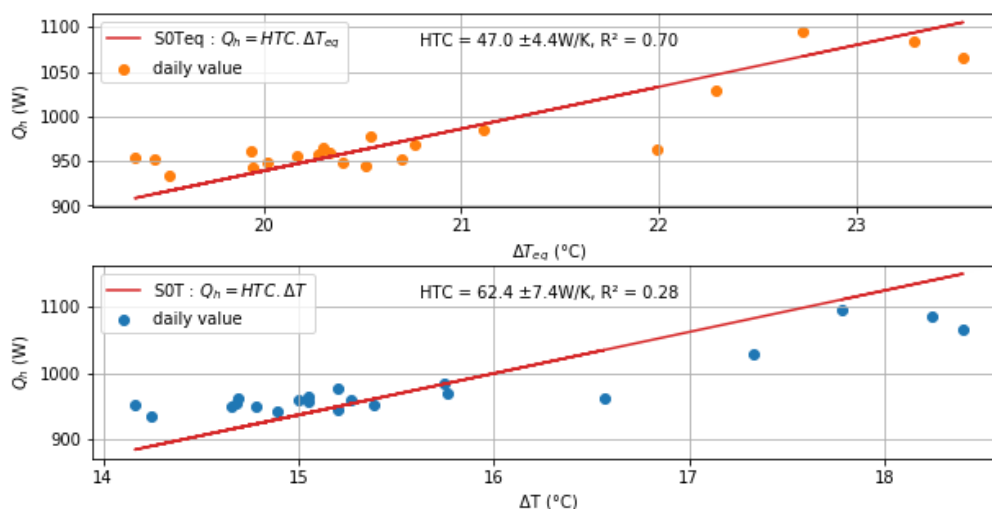


Figure 6-6 - Régression linéaire pour le test de co-cooling de l'enveloppe IBB-47 à Abu Dhabi et une consigne  $T_{int}=18^{\circ}\text{C}$  avec une régression linéaire simple avec en haut :  $\Delta T_{eq}$  (SOTeq) , et en bas : simple  $\Delta T$  (SOT)

### 6.4.3 Influence des conditions météorologiques et du modèle de régression sur les estimations HTC sous le climat d'Abu-Dhabi

La Figure 6-7 montre les valeurs de HTC estimées sur des périodes glissantes de 21 jours (telles qu'introduites dans la section 6.2.4) du 1er juillet au 1er septembre en utilisant différentes méthodes de régression linéaire pour la maison IBB-47 sur le climat d'Abu-Dhabi avec une consigne de climatisation à 18°C. La zone ombrée représente un intervalle de +/-10% autour de la valeur de référence. La régression linéaire simple avec la température extérieure équivalente est la seule méthode dont toutes les évaluations HTC se situent dans l'intervalle de +/-10% de la valeur de référence.

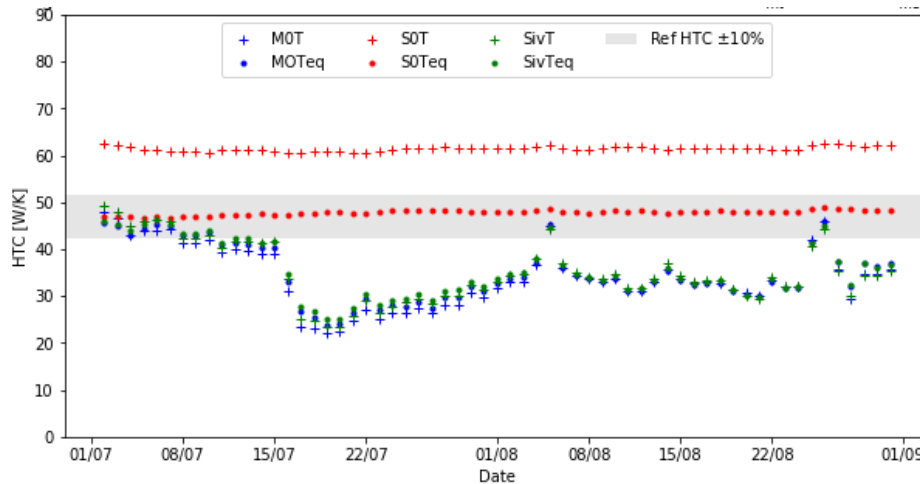


Figure 6-7 – Estimation de HTC pour des périodes glissantes de 21 jours pour différentes régressions linéaires pour le cas IBB-47, Abu-Dhabi, Tint=18°C, pour les mois de juillet et août

Le Tableau 6-6 résume la Figure 6-7, en donnant les valeurs HTC moyennes et les écarts types pour chaque méthode de régression linéaire sur la période des deux mois au cours de laquelle 62 estimations HTC ont été réalisées. Seule la méthode SOTeq donne à la fois une valeur HTC moyenne sur la période de 48 W/K, proche du résultat de référence de 47 W/K et un résultat stable (écart-type de 0,6 W/K). Les autres modèles de régression linéaire, à l'exception de SOT, donnent des résultats HTC très variables, avec un écart-type d'environ 6 W/K sur la période, et sont peu précis, avec un HTC moyen d'environ 35 W/K. La méthode SOT donne un résultat stable mais fortement surestimé par rapport à la référence avec HTC moyen de 61 W/K.

Tableau 6-6 - Synthèse des estimations de HTC pour le cas IBB-47, Abu-Dhabi, Tint=18°C

| Méthode de régression      | Nom de la méthode | HTC moyen [W/K] | HTC écart type [W/K] |
|----------------------------|-------------------|-----------------|----------------------|
| Mul. Reg. $\Delta T$       | MOT               | 34              | 6,4                  |
| Mul. Reg. $\Delta T_{eq}$  | MOTeq             | 35              | 6,0                  |
| Simp. Reg. $\Delta T$      | SOT               | 61              | 0,5                  |
| Simp. Reg. $\Delta T_{eq}$ | SOTeq             | 48              | 0,5                  |
| Siviour $\Delta T$         | SivT              | 35              | 6,4                  |
| Siviour $\Delta T_{eq}$    | SivTeq            | 35              | 5,9                  |

Seule la méthode de régression linéaire simple utilisant la température extérieure équivalente ( $S_{0Teq}$ ) fonctionne dans le cas d'étude IBB-47 avec le climat d'Abu-Dhabi, la prochaine étape présentée dans le paragraphe suivant permet de tester cette méthode pour les autres cas d'étude et climats.

#### 6.4.4 Influence des conditions météorologiques sur l'évaluation du HTC

Pour évaluer la précision d'un test de co-cooling sous les climats du sud de l'Europe, les expériences numériques sont étendues aux climats de Nice et de Chambéry. Le Tableau 6-7 résume les résultats des tests de co-cooling utilisant la méthode de régression linéaire simple avec  $\Delta T_{eq}$  sur une période estivale de deux mois selon les trois climats détaillés dans le paragraphe 6.3.3. On s'intéresse dans ce paragraphe aux premières lignes du tableau pour l'enveloppe IBB-47.

Pour le climat de Nice, qui est moins chaud que le climat d'Abu-Dhabi, avec une différence moyenne de température intérieure/extérieure inférieure à 6°C pour les deux consignes de température, les résultats HTC sont toujours proche de la référence avec un écart relatif de 2% comme pour le climat d'Abu-Dhabi. L'estimation du HTC pour le climat de Nice est un peu plus variable que pour le climat d'Abu-Dhabi. L'écart-type est en effet deux à trois fois plus important que pour le climat d'Abu-Dhabi.

Pour le climat de Chambéry, qui est plus frais que celui de Nice, la différence de température moyenne, à une température de consigne de 18°C, est inférieure à 3°C. Malgré cette faible différence de température, les résultats donnent un résultat moyen du HTC avec moins de 20% d'écart à la valeur de référence pour l'ensemble des tests effectués. Cependant, il semble impossible de réaliser des essais concluants pour une température de consigne de 20°C sur le climat de Chambéry. Les valeurs HTC déterminées sont très éloignées de la valeur de référence (plus de 30% d'écart relatif). La différence de température moyenne entre l'intérieur et l'extérieur sur la période d'essai est proche de zéro, ce qui signifie que la température extérieure est en partie supérieure et en partie inférieure à la température intérieure. Cela implique que le flux de chaleur à travers l'enveloppe s'inverse régulièrement. Par ailleurs, les tests sur le climat de Chambéry présentent la plus grande variabilité temporelle de HTC.

D'une manière générale, plus la différence de température est faible, moins la valeur HTC est précise, plus l'incertitude est grande et moins le HTC est stable selon les tests.

#### 6.4.5 Influence de la performance de l'enveloppe sur l'évaluation du HTC

Les résultats pour les deux autres enveloppes, IBB-100 et IBB-282, sont résumés dans la partie inférieure du Tableau 6-7. Quel que soit la configuration, la méthode développée ( $S_{0Teq}$ ) dans le climat d'Abu-Dhabi donne des résultats très proches de la valeur de référence. Les écarts à la valeur de référence sont inférieurs à 2 % pour IBB-100 et d'environ 10 % pour IBB-282. Dans les deux cas, on observe une grande stabilité des HTC estimés au cours de la période étudiée, avec un écart type, indiquant la variabilité temporelle, inférieur à 1 W/K pour IBB-47 et inférieur à 2 W/K pour IBB-282.

Pour le climat de Nice, les conclusions sont similaires, la méthode parvient à estimer la valeur du HTC dans une fourchette inférieure à 10% avec une différence de 3% pour IBB-100 et de moins de 6% pour IBB-282. Pour les deux enveloppes, l'écart-type est deux à trois fois supérieur à celui d'Abu-Dhabi, mais la valeur HTC se situe toujours dans une fourchette de 10% de différence avec la valeur de référence.

Pour le climat de Chambéry, comme pour IBB-47, les estimations HTC sont plus éloignées de la référence que pour les autres climats en raison des températures extérieures plus faibles. Il convient de noter que dans le cas de IBB-282 sous le climat de Chambéry, l'estimation du HTC est la plus proche de la valeur de référence par rapport à IBB-47 et à IBB-100.

Tableau 6-7 - Synthèse des HTC estimés avec une régression linéaire simple et  $\Delta T_{eq}$  (S0Teq) pour les 3 enveloppes, les 3 climats et 2 consignes de températures  $T_{int}$ .

| House   | Climate  | Setpoint temperature [°c] | Mean $\Delta T_{mean}$ [W/K] | Mean HTC (s0teq) [w/k] | HTC standart deviation [W/K] | Relative gap with reference value [%] |
|---------|----------|---------------------------|------------------------------|------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| IBB-47  | Abudhabi | 18                        | 16,7                         | <b>48</b>              | 0,5                          | 2                                     |
|         |          | 20                        | 14,7                         | <b>48</b>              | 0,6                          | 1                                     |
|         | Nice     | 18                        | 5,5                          | <b>48</b>              | 1,3                          | 2                                     |
|         |          | 20                        | 3,5                          | <b>48</b>              | 1,7                          | 2                                     |
|         | Chambery | 18                        | 2,3                          | <b>41</b>              | 2,8                          | 12                                    |
|         |          | 20                        | 0,4                          | <b>33</b>              | 5,3                          | 30                                    |
| IBB-100 | Abudhabi | 18                        | 16,7                         | <b>102</b>             | 0,8                          | 1                                     |
|         |          | 20                        | 14,7                         | <b>101</b>             | 0,9                          | 1                                     |
|         | Nice     | 18                        | 5,5                          | <b>99</b>              | 1,7                          | 1                                     |
|         |          | 20                        | 3,5                          | <b>97</b>              | 2,3                          | 3                                     |
|         | Chambery | 18                        | 2,3                          | <b>84</b>              | 4,8                          | 16                                    |
|         |          | 20                        | 0,4                          | <b>69</b>              | 8,6                          | 31                                    |
| IBB-282 | Abudhabi | 18                        | 16,7                         | <b>312</b>             | 1,8                          | 11                                    |
|         |          | 20                        | 14,7                         | <b>309</b>             | 1,9                          | 10                                    |
|         | Nice     | 18                        | 5,5                          | <b>296</b>             | 5,2                          | 5                                     |
|         |          | 20                        | 3,5                          | <b>295</b>             | 5,1                          | 4                                     |
|         | Chambery | 18                        | 2,3                          | <b>257</b>             | 9,7                          | 9                                     |
|         |          | 20                        | 0,4                          | <b>232</b>             | 14,7                         | 18                                    |

#### 6.4.6 Influence des conditions climatiques sur l'évaluation du HTC

De même que pour les tests de co-heating (112), (113), la précision de la méthode de régression linéaire semble être liée à la valeur de la différence de température. L'objectif de cette section est d'explorer dans quelle mesure il est possible de réaliser un test de co-cooling en examinant les conditions climatiques et les différences minimales de température entre l'intérieur et l'extérieur. Dans cette optique, un test est réalisé chaque jour de l'année pour les 18 cas étudiés (3 performances d'enveloppes, 3 climats, et 2 consignes de températures intérieures). Seuls les tests avec une moyenne de différence de température extérieure - intérieure positive sont affichés. Pour les analyser, la Figure 6-8 présente des nuages de points dans lesquels chaque point est coloré par la différence relative du HTC estimé par rapport à la valeur de référence et est positionné sur une carte en fonction de l'irradiation moyenne sur l'axe des y et de la différence de température extérieure-intérieure moyenne sur l'axe des x. Seule la méthode de régression linéaire simple utilisant la température extérieure équivalente (S0Teq) est représentée sur ces graphes. Les résultats sont analysés selon deux différences de température extérieure-intérieure: la différence de température moyenne ( $\Delta T_{moy}$ ) (graphiques de gauche) et la différence de température équivalente moyenne,  $\Delta T_{eq,mean}$  (graphiques de droite).

La Figure 6-8 confirme que plus la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur est importante, plus il y a de chances d'obtenir une estimation précise de la valeur HTC. Quel que soit la performance de l'enveloppe, un  $\Delta T_{moy}$  supérieure à 7°C permet d'estimer le HTC avec un écart inférieur à 10% de la valeur de référence. En été, la température extérieure équivalente moyenne  $\Delta T_{eq,mean}$  est supérieure à la différence de température moyenne  $\Delta T_{moy}$  en raison du rayonnement solaire. Avec une

différence de température  $\Delta T_{eq,moy}$  supérieures à 7°C l'erreur relative peut atteindre 15%, et un  $\Delta T_{eq,moy}$  supérieur à 10°C est nécessaire pour réduire l'erreur relative à moins de 10%. Pour mieux appréhender la faisabilité des tests de co-cooling sous les trois climats étudiés, nous pouvons résumer que sur la période de juin à septembre avec une température de consigne de 18°C, la limite opérationnelle de  $\Delta T_{eq,moy}$  supérieure à 7°C s'est produite 72% du temps à Nice, 13% à Chambéry et 100% à Abu Dhabi.

Le lien avec le rayonnement solaire est moins évident. Tout d'abord, il y a peu de points avec une faible irradiance et aucun avec un  $\Delta T_{moy}$  élevé. Néanmoins, il semble qu'à faible irradiance, une différence de température intérieure/extérieure plus faible pourrait être nécessaire pour obtenir une évaluation HTC plus précise. Les points dont l'irradiance est inférieure à 250W/m<sup>2</sup> en moyenne, ont une différence inférieure à 20% par rapport à la valeur de référence pour tous les points sur le graphique avec  $\Delta T_{moy}$  ou  $\Delta T_{eq,moy} > 3^\circ\text{C}$ . Pour la maison la moins isolée, IBB-282, une différence de température intérieure/extérieure plus faible semble nécessaire pour estimer le HTC.

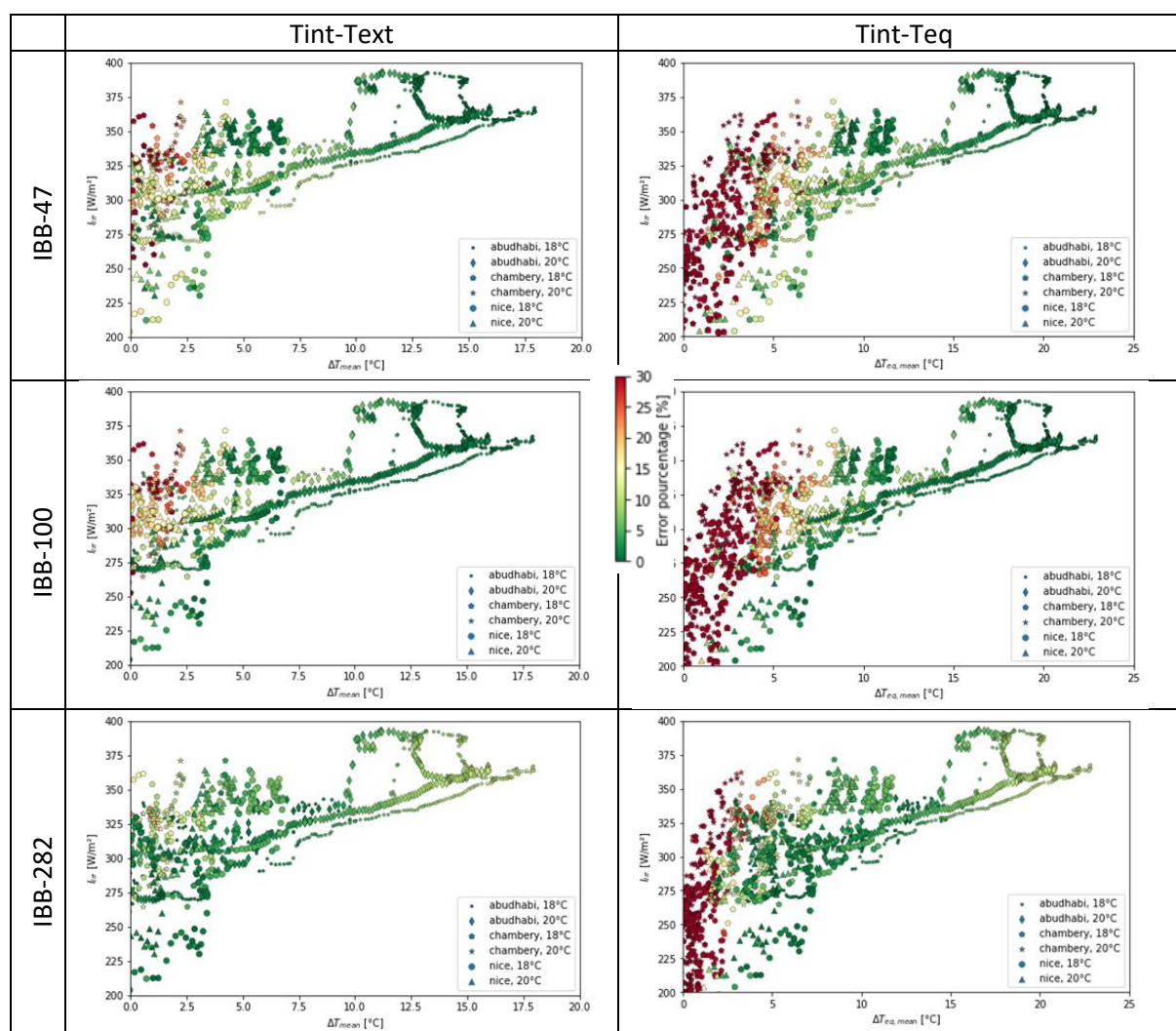


Figure 6-8 - Écarts des HTC estimés avec la méthode S0Teq en fonction des gains solaires et de la différence de température de l'air  $\Delta T_{moy}$  (gauche) et de la différence de température équivalente  $\Delta T_{eq,moy}$  (droite), pour trois maisons IBB-47 (haut), IBB-100 (milieu) et IBB-282 (bas), sous les trois climats (Abu-Dhabi, Nice et Chambéry) et les 2 consignes de température (18°C, 20°C).

## 6.5 Discussions

### 6.5.1 Limites de l'étude

Il est important de garder à l'esprit, dans cette section de discussion, certaines hypothèses importantes qui ont été faites. Tout d'abord, les données utilisées pour déterminer le HTC par régression linéaire proviennent de données simulées générées par des modèles de simulation thermique dynamique. Cela signifie que la température de l'air intérieur est homogène dans chaque zone thermique avec un flux de chaleur homogène à travers chaque morceau de mur décrit dans le modèle. Cela ne tient donc pas compte, entre autres, de l'hétérogénéité de la température intérieure dans une pièce ou de l'hétérogénéité du flux de chaleur à travers une surface en raison de la composition de la paroi, et aucun pont thermique n'est modélisé.

D'autres hypothèses fortes ont été faites, comme l'absence de modélisation des fuites d'air et le plancher du rez-de-chaussée adiabatique. Il est donc probable que dans un cas réel, les résultats soient plus nuancés en termes de précision de la méthode développée.

Une dernière hypothèse à surligner ici concerne l'estimation de la température extérieure équivalente pour laquelle il est nécessaire de connaître le  $U_{\text{paroi}}$  ( $W/(m^2.K)$ ) et l'émissivité de chaque paroi donnant sur l'extérieur, qui sont bien connues dans nos cas simulés. Là encore, dans une application réelle, cette incertitude serait prise en compte et propagée dans l'estimation de l'incertitude, ce qui se traduirait par une incertitude HTC légèrement plus importante.

Les résultats encourageants présentés dans la section précédente doivent être consolidés, tout d'abord par une simulation étendue avec l'intégration modélisée d'une pièce adjacente non climatisée, d'un plancher non adiabatique et d'un débit d'infiltration variant en fonction des conditions météorologiques. Deuxièmement, des expériences sur des maisons réelles seront nécessaires pour poursuivre ce travail et celui présenté au chapitre précédent.

### 6.5.2 Pourquoi la régression linéaire simple avec $\Delta T_{eq}$ semble être l'approche la plus robuste ?

Seule la méthode de régression linéaire simple et l'utilisation de la température extérieure équivalente pour le calcul de  $\Delta T_{eq}$  ( $SOT_{eq}$ ) donne des valeurs cohérentes pour les trois maisons. Ce paragraphe esquisse des explications possibles pour comprendre pourquoi cette méthode semble fonctionner pour le test de co-cooling et pas les autres méthodes testées.

La régression linéaire simple utilisant  $\Delta T$  ( $SOT$ ) surestime le HTC. Cela peut s'expliquer par le fait que cette méthode ne prend pas en compte les gains solaires, qui ont un impact plus important en été. En résumé, une partie de la puissance frigorifique nécessaire pour maintenir le bâtiment à une température constante ne dépend pas de la température extérieure, mais de l'énergie supplémentaire fournie par le soleil sur toutes les parois opaques par transfert radiatif.

Quant aux régressions linéaires multiples et aux méthodes de Siviour, qui prennent en compte l'apport solaire, on peut s'attendre à ce qu'elles soient fortement corrélées aux conditions météorologiques, comme le montre la Figure 6-7. Ces deux méthodes de régression utilisent les mêmes variables (irradiation, température et capacité de refroidissement). Le problème est que ces variables d'entrée sont fortement corrélées en été, ce qui compromet la validité de toute régression multilinéaire. Pour être exploitable, il faut en effet que les variables explicatives de la régression soient indépendantes, ce qui n'est pas toujours le cas en hiver et pas non plus en été. Pour quantifier l'effet de la colinéarité, un facteur d'inflation de la variance (VIF) est calculé. Il donne une mesure de l'influence de la colinéarité sur la variance de l'estimation inférée du HTC. Le modèle de régression multiple a révélé que le VIF de Irr et de  $\Delta T$  dépassait 200. Un VIF supérieur à 5 ou 10 selon (114) et (115) indique un degré élevé de



colinéarité entre les variables explicatives, ce qui se traduit par une faible précision de la valeur estimée et une plus grande variabilité des coefficients. Ce phénomène de multi-colinéarité est également noté dans les travaux d'E. Chard (107), avec des résultats similaires. Selon l'auteur, la multi-colinéarité des variables est l'une des raisons des mauvais résultats du co-cooling avec les méthodes de régression multiple sur les climats australiens.

La méthode de régression linéaire simple utilisant la température extérieure équivalente (S0Teq) remédie à tous ces problèmes en regroupant en une seule variable les transferts radiatifs et convectifs auxquels l'enveloppe du bâtiment est exposée.

### 6.5.3 Impact des conditions climatiques sur le test de co-cooling

Avec les cas d'étude et les hypothèses considérés, un  $\Delta T_{\text{moy}}$  supérieur à 7°C, permet d'estimer le HTC dans une fourchette de 10% de la valeur de référence. Si des écarts de 20 % par rapport à la valeur de référence peuvent être acceptés, il est possible de réaliser des essais de co-cooling jusqu'à un  $\Delta T_{\text{moy}}$  de 5°C. Il est difficile de comparer ces valeurs aux exigences de co-heating car de fortes hypothèses ont été faites dans ce travail d'exploration du co-cooling. Des recherches plus approfondies doivent être menées. Comme pour le co-heating, les tests de co-cooling requièrent des conditions climatiques spécifiques. Celles-ci se rencontrent principalement dans les climats chauds et pendant l'été pour les climats méditerranéens. Le co-cooling pourrait compléter les essais de co-heating, étant donné que le co-heating ne peut pas être réalisé tout au long de l'année et dans tous les climats, en particulier là où le co-heating semble difficile à réaliser : en Australie par exemple, comme mentionné dans (91), dans les pays méditerranéens.

En outre, comme indiqué au paragraphe 6.4.6, en cas de faible irradiation, une différence de température plus faible semble nécessaire pour estimer le HTC avec une précision équivalente. Il pourrait être intéressant d'étudier la possibilité de définir une limite reliant les deux paramètres température et irradiation, telle qu'une fonction affine. Cela permettrait d'étendre le périmètre de validité de la méthode de co-cooling à un plus grand nombre de climats.

### 6.5.4 Contraintes opérationnelles pour le déploiement d'une méthode de co-cooling

En ce qui concerne la configuration opérationnelle, il semble plus difficile de mettre en place un co-cooling qu'un co-heating. Tout d'abord, il est plus difficile de trouver un système de refroidissement qui soit à la fois portable et dont la consommation d'énergie puisse être mesurée avec précision, contrairement au système de chauffage à effet Joule utilisé dans les essais de co-heating. Une méthode possible consiste à injecter un fluide froid dans le réseau de chauffage/refroidissement d'un bâtiment et à déterminer la puissance frigorifique fournie à l'intérieur de la maison en mesurant les températures d'entrée et de sortie du fluide caloporteur et son débit, comme cela a été présentée dans le paragraphe 5.1.1. Une deuxième méthode consiste à utiliser un système de refroidissement qui se trouve déjà dans le bâtiment. Cette méthode présente l'avantage que les systèmes de refroidissement sont souvent déjà présents dans les climats chauds où les tests de co-cooling sont applicables, mais la difficulté reste de mesurer précisément l'énergie de refroidissement transmise au bâtiment.

Pour mettre en place un test de co-cooling, la température extérieure équivalente doit être mesurée. Cela implique l'ajout de capteurs spécifiques tels que les capteurs SENS développés dans le cadre de la méthode SEREINE (100). Cela représente un coût et une complexité supplémentaires par rapport aux essais de co-heating.

## 6.6 Conclusion et perspectives

### 6.6.1 Synthèse de l'étude numérique sur le co-cooling

Ce chapitre a présenté la méthode de co-cooling, une nouvelle méthode de mesure in situ pour déterminer le coefficient de transfert de chaleur (HTC) d'une enveloppe de bâtiment en la refroidissant, et étudié numériquement sa faisabilité. À cette fin, un banc d'essai numérique a été mis en œuvre pour tester une maison individuelle avec trois niveaux d'isolation, sous trois climats différents. Différents modèles de régression linéaire ont été testés pour analyser les données. La méthode développée permet de mesurer la performance réelle des bâtiments dans les climats chauds et en été. Pour ce faire, à l'instar d'un test de co-heating, le bâtiment doit être immobilisé pendant plusieurs semaines, à la différence qu'il est refroidi à une température constante grâce à un système de climatisation et qu'il faut mesurer cette puissance de froid en plus des capteurs de température d'air. Une température extérieure équivalente est utilisée à la place de la température extérieure classique dans les méthodes de régression linéaire afin de prendre en compte les effets de l'ensoleillement sur la façade. A partir des données journalières moyennes, une régression linéaire est effectuée pour estimer le coefficient de transfert de chaleur de l'enveloppe du bâtiment.

Selon ce travail, pour un essai de co-cooling, seule la méthode de régression linéaire simple donne des estimations acceptables, lorsque la température extérieure équivalente est utilisée. Les autres méthodes ont montré une très faible précision, soit parce qu'elles ne tenaient pas compte de manière appropriée des transferts radiatifs, soit en raison de la colinéarité importante entre les variables explicatives de la régression.

Le co-cooling ouvre de nouvelles opportunités pour mesurer la performance énergétique réelle de l'enveloppe des bâtiments sous tous les climats et tout au long de l'année. Avec une différence de température moyenne entre l'extérieur et l'intérieur d'au moins 7°C pour les bâtiments bien isolés et un point de consigne de température de refroidissement d'environ 18°C, cette méthode semble principalement adaptée aux climats très chauds. Le périmètre de validité de cette méthode de co-cooling reste à explorer car les résultats suggèrent qu'une différence de température plus faible pourrait être suffisante pour les climats à faible irradiation.

Il est intéressant de noter que le co-cooling s'est avéré fonctionnel dans les trois variantes de niveaux d'isolation étudiées. Pour confirmer la faisabilité du co-cooling et sa généralisation, des cas d'études plus complexes devront être testés, telles que des cas avec plancher non adiabatique ou avec des zones adjacentes non climatisées. Outre les conditions climatiques requises, il existe d'autres défis, tels que la mise en place d'un système de refroidissement mobile et la détermination précise de sa puissance de refroidissement.

### 6.6.2 Perspectives à ces travaux exploratoires

#### De travaux exploratoires du co-cooling à une méthode robuste et déployable.

Plusieurs verrous restent à lever pour démontrer la validité de cette méthode en conditions réelles et sur un panel de configurations représentatives aussi bien en terme de climats que de typologies de bâtiments. Dans l'exploration numérique réalisée, plusieurs hypothèses fortes faites dans ce travail devront être étudiées pour confirmer son périmètre de validité. Il sera ainsi nécessaire d'étudier l'impact d'un plancher non adiabatique, de l'introduction d'infiltrations d'air, d'autres niveaux d'inertie thermique, de l'impact de l'ajout d'une zone mitoyenne non climatisée, de l'impact d'une connaissance approximative de la composition des parois sur l'évaluation de la température extérieure équivalente.

Des travaux sur le côté opérationnel sont également nécessaire pour rendre la méthode déployable à grande échelle. Rapporther un générateur de froid à positionner à l'extérieur du bâtiment et le



connecter à un réseau hydraulique existant ne semble pas réaliste pour déployer la méthode hors de maisons expérimentales. De plus cela suppose qu'un réseau hydraulique soit en place dans le bâtiment. Des travaux pour le rendre accessible sont donc nécessaires pour étudier ce point. Une autre alternative serait d'utiliser un système de climatisation en place, ce qui rejoint un des verrous actuels des méthodes en chaud sur la précision de la mesure dissipée par un générateur de chaleur en place.

#### Extension du périmètre de validité du co-heating

L'introduction de la température extérieure équivalente dans une méthode de régression linéaire utilisée dans le co-heating introduit une possibilité d'étendre la durée de validité d'un test de co-heating sur les périodes de mi-saison / légèrement plus chaude où les méthodes actuelles utilisées pour l'estimation du co-heating présentent des limites. Des premières études numériques et un retour d'expérience réel sur une maison INCAS ont été esquissés et donnent des perspectives intéressantes à creuser.

---

## CONCLUSION & PERSPECTIVES : Vers la garantie de performance des solutions passives

Ce manuscrit s'est articulé autour de **2 questions**. La première question portait sur la pertinence du bioclimatisme pour les maisons performantes. **Les solutions passives historiquement utilisées sur des bâtiments pas ou peu performants sont-elles toujours efficaces pour répondre aux spécificités des nouvelles exigences de construction ou doivent-elles être adaptées ?** La seconde question portait sur **l'extension des méthodes de mesures de la performance thermique intrinsèque de l'enveloppe des bâtiments aux conditions estivales**. En effet, les méthodes de mesure existantes, qui utilisent des systèmes de chauffage, ne peuvent pas être utilisées quel que soit les conditions météo et notamment pour les périodes chaudes. L'objectif du travail a été d'explorer une méthode en climatisant en lieu et place du chauffage pour s'affranchir de ce verrou.

### Synthèse des principaux enseignements des études présentées

#### Impact du bioclimatisme de maisons performantes sur le confort thermique estival

Pour répondre à la première question, les chapitres 2 à 4 ont été consacrés à l'impact du bioclimatisme et des solutions passives sur le comportement thermique de maisons performantes. Les trois études présentées, mixant simulation et retour d'expériences, ont confirmé l'intérêt de l'approche du bioclimatisme pour le confort estival de maisons bien isolées et avec de grandes baies vitrées. Ceci intègre le couplage entre l'isolation thermique, la ventilation mécanique double flux, la gestion des apports solaires, la ventilation naturelle nocturne et l'inertie thermique. Il a pu être montré qu'**une bonne gestion du bâtiment est le premier facteur pour améliorer le confort dans le logement à commencer par limiter les apports solaires directs** dans la maison en journée. Ensuite lorsque cela est possible et que les nuits sont fraîches, **la sur-ventilation nocturne permet de réduire fortement la température intérieure et ceci aura un impact sur l'ensemble de la journée**. Un focus particulier a été mis sur l'inertie thermique dans ces travaux. Elle **apporte un gain en confort dans une majorité de configurations à iso-sollicitations**. **L'inertie thermique apporte** ainsi au bâtiment **de la robustesse et de la résilience**. **Trois facteurs importants pour que l'inertie thermique ait un impact significatif sont la quantité d'inertie nécessaire, sa répartition et la manière dont elle est sollicitée**. Plusieurs ordres de grandeurs ont pu être esquissés sur les cas d'études. Des premières perspectives à ces travaux ont été détaillées en fin de Chapitre 4 .

#### Co-cooling

Pour répondre à la seconde question, une méthode pour **mesurer la performance thermique d'une enveloppe de bâtiment en période estivale** a été explorée afin d'étendre le domaine de validité des méthodes actuelles qui utilisent un système de chauffage. Ces travaux ont été présentés dans les chapitres 5 et 6. Pour passer en mode climatisation, un système de production de froid est placé à l'extérieur de l'enveloppe dont on veut mesurer les déperditions et la puissance de froid est mesurée à l'aide d'un débitmètre et de deux sondes de températures placés à l'entrée et la sortie du fluide dans l'enveloppe. Les premiers résultats aux échelles de cellules d' $1\text{m}^3$  en climat contrôlé et de  $40\text{m}^3$  en climat réel se sont montrés encourageants. Le passage à l'échelle de la maison n'a pas permis d'aboutir à des résultats concluants, mais principalement du fait d'une météo pas assez chaude sur la période d'étude. Une approche numérique a complété ces expérimentations afin d'explorer le domaine de validité d'une méthode de co-cooling à l'instar du co-heating pour différentes configurations. Cette étude a abouti à une **adaptation de la méthode de régression linéaire de co-heating pour le co-cooling** en substituant la mesure de la température extérieure par la **température extérieure**

**équivalente afin de mieux prendre en compte l'impact du rayonnement solaire sur la façade** qui est plus important en été qu'en hiver. **Le co-cooling ouvre ainsi de nouvelles opportunités pour mesurer la performance thermique réelle de l'enveloppe des bâtiments sous des climats chauds**, pour lesquels les méthodes existantes en chauffage ne permettraient pas de le faire. Des premières perspectives à ces travaux ont été détaillées en fin de Chapitre 6 .

#### Perspectives à ces travaux

##### Résilience, robustesse et flexibilité des réseaux énergétiques

L'un des atouts souvent mis en avant de l'inertie thermique, qui a été étudié dans le premier axe de ce travail, est l'apport de **résilience et de robustesse**. Outre l'effet direct sur le comportement thermique du bâtiment, ceci peut apporter une **contribution aux réseaux énergétiques**. En effet, les tensions sur le réseau électrique, notamment, sont aujourd'hui grandissantes avec des consommations toujours plus élevées et une volonté d'électrifier un certain nombre d'usages pour remplacer les énergies à fort impact sur les GES. La problématique de l'énergie consommée est bien sûr importante, mais un **enjeu** tout aussi important pour les gestionnaires de réseaux électrique est les **pointes de puissances** qui définissent les capacités de production à mettre en œuvre. L'inertie thermique d'un bâtiment peut ainsi apporter une part de **flexibilité** pour décaler ou stopper les consommations que ce soit de chauffage ou de climatisation pour **contribuer à l'écrêtage des pics de consommations à l'échelle nationale**. Il sera de plus nécessaire de pousser les réflexions émergentes sur le lien entre le secteur du bâtiment et les réseaux énergétiques. Avec le développement du photovoltaïque, on est passé des bâtiments uniquement points de consommations des réseaux à des bâtiments nœuds énergétiques, à la fois consommateur et producteur avec de nouvelles questions liées à l'autoconsommation et à l'autoproduction. Ensuite a émergé le concept des bâtiments à énergies positives, avec cette fois la question de la temporalité des bilans réalisés de l'instantanéité au bilan annuel. Aujourd'hui, l'objectif visé est la neutralité carbone du parc de bâtiments. La question des bâtiments consom'acteurs et de ce que peuvent apporter les bâtiments aux réseaux énergétiques décarbonnés se pose alors.

##### Mesure de l'inertie thermique effective

Egalement concernant **l'inertie thermique, la quantification de celle-ci est aujourd'hui assez simpliste** que ce soit dans la réglementation ou dans les DPE, avec des classes d'inertie légère, moyenne ou lourde pour différentes constantes de temps horaires, journalières, et hebdomadaire. **L'inertie effective est donc estimée au dire d'experts se basant sur des tables** mais n'est jamais réellement mesurée. Il semblerait intéressant de **définir des méthodes de mesure de l'inertie effective** à l'instar de ce qui est fait aujourd'hui pour les infiltrations d'air ( $n_{50}$ ,  $Q_{4Pa,surf}$ ) ou l'isolation thermique ( $U_{bat}$ ). On pourrait imaginer un  $I_{bat}$  pour mesurer l'inertie effective d'un bâtiment, avec une approche matricielle pour tenter de répondre à la **complexité de prendre en compte la dimension de temps / fréquences de réponses de l'inertie thermique à différentes sollicitations**. Pour cela les méthodes de calcul tel que SEREINE utilisant une calibration de modèles RC permettraient peut-être une interprétation des capacités thermiques du modèle identifié pour quantifier l'inertie thermique du bâtiment.

##### Vers la garantie de performance en occupation

Comme cela a été montré dans le paragraphe 1.4 , il est important d'être capable de mesurer la performance thermique intrinsèque de l'enveloppe d'un bâtiment. Les méthodes existantes sont principalement en inoccupation et nécessitent d'une part que les occupants quittent leur logement pour une durée de 1 à 21 jours selon les méthodes et d'autre part une instrumentation conséquente à mettre en œuvre. Les méthodes en occupation qui permettent un temps d'étude plus long sans contraindre fortement les occupants est un des autres enjeux de la garantie de performance. A contrario, une instrumentation beaucoup moins intrusive peut être déployée et l'information retirée

sera donc moins riche qu'avec les méthodes sans occupants. Dans les verrous des méthodes en occupation on peut citer la difficulté de connaître l'impact de l'occupant et des apports solaires directs sur le comportement thermique du bâtiment. Pour les occupants, plusieurs facteurs sont à prendre en compte : le nombre de personnes présentes, la durée d'occupation et le dégagement de chaleur des occupants en fonction de leur activité. Des méthodes émergent pour quantifier la présence des occupants dans un logement en fonction du taux de CO<sub>2</sub>, du sous tirage d'eau, des consommations électriques ou de la présence de smartphone dans le logement. Une piste pour répondre à ce verrou pourrait être d'utiliser des périodes où les occupants sont absents ou où leur activité est stable comme la nuit. Pour cela, un des verrous réside dans l'utilisation d'une multitude de séquences non continues ou avec des niveaux d'informations et d'incertitudes différents mais où les apports internes sont relativement constants et les apports solaires sont nuls. L'enjeu serait alors de valoriser ses périodes en connaissant l'état initial de chaque période.

#### De la mesure de performance à réception de travaux au jumeau numérique

La mesure de la performance thermique intrinsèque de l'enveloppe d'un logement ou d'un bâtiment à réception de travaux permet de vérifier la cohérence entre la performance réelle et celle prévue en conception. Cependant lorsqu'il y a un écart important, il est intéressant de pouvoir comprendre d'où proviennent les écarts afin de pouvoir les corriger si cela est possible. Des mesures complémentaires peuvent être nécessaires pour cela, comme une thermographie infrarouge pour détecter des fortes hétérogénéités, des mesures locales de résistance thermique d'une paroi à l'aide de fluxmètres. La seule mesure de la performance thermique intrinsèque de l'enveloppe n'est qu'une brique pour connaître la consommation réelle d'un bâtiment. La méthode SEREINE par exemple a développé une application pour vérifier la bonne mise en œuvre des équipements CVC à réception des travaux qui permet de compléter la mesure enveloppe.

A cette mesure de performance thermique intrinsèque, il sera nécessaire de rajouter l'usage, le pilotage et l'entretien du bâtiment. En effet, la performance énergétique du bâtiment peut varier au cours du temps et dépendre du vieillissement de ses composants et de leur bon entretien. Intégrer ces mesures de performance à réception de travaux à un carnet de bord de suivi du bâtiment dans un premier temps pourra aider à une meilleure connaissance du bâtiment et donc à une utilisation plus vertueuse. A terme ce carnet de bord numérique pourrait prendre la forme d'un jumeau numérique qui permettrait de connaître l'état du bâtiment tout au long de son cycle de vie. En phase de conception, le jumeau numérique, permet de faciliter l'échange d'informations entre les différents corps de métier. En phase travaux, le jumeau numérique peut faciliter la bonne mise en œuvre de l'ensemble des composants par les ouvriers et artisans et de réduire les déchets par un meilleur calepinage. A réception, le jumeau numérique, serait enrichi par la mesure de performance à réception et les détails relevés de commissionnement ou de mesures locales. En usage, le jumeau numérique permettrait d'une part de faciliter l'entretien de tous les composants qui le nécessitent (changement périodique des filtres du système de ventilation, entretien annuel de la chaudière) en embarquant l'ensemble des notices et modes d'emplois de ceux-ci et de leur suivi avec l'historique d'entretien et les rappels de ceux-ci. D'autre part, le jumeau numérique peut être valoriser comme un outil d'aide au pilotage avec son utilisation pour tester différents scénarios de pilotage, en mode « What-If », voire son utilisation couplée à des algorithmes d'optimisation réactifs ou prédictifs pour assurer le pilotage en fonction des critères retenus (énergétique, économique, environnemental).

Pour en revenir à la mesure de la performance thermique de l'enveloppe, l'intérêt de l'intégrer dans un jumeau numérique serait de pouvoir appréhender de potentielles dérives (lentes ou rapides) et d'apporter une meilleure connaissance du bâtiment. On peut reprendre l'exemple du projet SEREINE, pour le logement collectif cette fois-ci. La mesure de la performance globale d'un bâtiment de

logements collectifs ne semble pas réalisable dans bien des configurations. Plusieurs raisons l'expliquent. Premièrement, la méthode SEREINE nécessite que les occupants soient absents, il n'est pas toujours possible d'avoir l'ensemble des logements vacants et disponible au même moment. Deuxièmement, suivant la taille des bâtiments, la mise en œuvre nécessiterait un nombre trop important d'équipements et de main d'œuvre. Dans la méthode SEREINE logement collectif, l'option envisagée est donc de faire des mesures par échantillonnage complétée par un certain nombre de mesures locales. Différentes vagues de mesures de performances peuvent donc être réalisées, et leur intégration dans un jumeau numérique serait donc particulièrement pertinente pour capitaliser celles-ci et construire pas à pas le puzzle de la performance mesurée d'un bâtiment existant. Cela serait particulièrement pertinent dans le cadre d'un immeuble de logements collectifs en copropriété, où des mesures peuvent être réalisées au fil des changements de propriétaires qui peuvent mettre en œuvre des travaux de rénovation intérieur non coordonnées avec le reste des logements.

#### La garantie de performance des solutions passives en climat chaud.

Mesurer la performance thermique intrinsèque de l'enveloppe est nécessaire mais cela ne permet de traiter que le critère isolation thermique. Les autres solutions passives telles que la gestion des apports solaires, l'inertie thermique, la ventilation naturelle ou le brassage d'air en période estivale sont autant de points pour lesquels il n'existe pas forcément d'indicateurs pour en évaluer la performance. L'évaluation de l'inertie thermique effective a été évoqué plus tôt dans ce chapitre.

De plus, quand on s'intéresse à la garantie de performance en période estivale, la GPE (garantie de performance énergétique) seule n'est plus suffisante et ne peut être décorélée du confort des occupants et du service rendu spécialement quand le bâtiment est en évolution libre, non climatisé et donc non thermiquement conditionné. La notion de confort adaptatif prend tout son sens. Et il est important d'intégrer la dimension confort à celle purement thermique/énergétique dans les indicateurs à mesurer. Ceci ajoute un degré de complexité supplémentaire à la garantie de performance.

Concernant la ventilation naturelle, de nombreux travaux visent à mesurer les débits d'air. Non seulement, il reste encore des verrous pour arriver à une méthode d'évaluation du débit en toutes conditions mais également, le débit seul ne suffit pas forcément pour quantifier l'impact de la ventilation naturelle sur le comportement thermique du bâtiment, notamment du fait du fort couplage entre inertie thermique et ventilation naturelle comme cela a pu être constaté dans ces travaux. Des travaux sont encore nécessaires pour en arriver à un indicateur de performance afin de caractériser la capacité d'un bâtiment dans son environnement à valoriser la ventilation naturelle et les systèmes passifs en général pour améliorer le confort thermique des occupants et éviter de recourir à la climatisation ou en limiter la consommation. Il ne sera d'ailleurs peut-être pas nécessaire d'évaluer des débits à travers les ouvrants pour définir et mesurer un indicateur de performance de la ventilation naturelle. Des méthodes indirectes avec des modèles de types boîtes noires, d'intelligence artificielle (pour placer le mot à la mode du moment) qui s'appuient sur les conditions climatiques extérieures et intérieures (vitesse de vent, températures extérieures et intérieures, taux de CO<sub>2</sub>, ...) et de la position des fenêtres pourraient permettre de construire un modèle de réponse du bâtiment à la ventilation naturelle.

Comme il a pu être mentionné plus tôt, la ventilation naturelle présente certaines limites notamment liées à la sécurité et aux problématiques acoustiques ou d'air pollué en extérieur. De plus avec le réchauffement climatique, le potentiel de la ventilation naturelle va décroître, et ne pourra pas toujours se suffire à elle-même pour garantir un confort acceptable. Une voie pour ne pas basculer directement dans une systématisation de la climatisation en permanence est de coupler la ventilation naturelle avec des brasseurs d'air et d'utiliser l'un ou l'autre en fonction des moments de la journée

où le potentiel de la ventilation naturelle est positif ou non. En dernier recours, l'utilisation de la climatisation couplée également à des brasseurs d'air pourra être utilisée. Le couplage de la climatisation à des brasseurs d'air permettrait d'augmenter la consigne de climatisation sans pour autant dégrader le confort des occupants. Cette utilisation en cascade de système de rafraîchissement passif (ventilation naturelle), doux (brasseurs d'air) puis actif (climatisation) en dernier recours peut permettre de réduire les besoins d'énergie. La mesure de la performance des solutions passives et le pilotage optimisé des systèmes de rafraîchissement en cascade font d'ailleurs l'objet du projet ANR COOLDOWN (46) en cours pour lequel j'ai contribué au montage et je coordonne le lot sur la partie garantie de performance.

La quantification d'un indicateur de potentiel de la ventilation naturelle d'un bâtiment est une étape importante pour connaître la performance intrinsèque du bâtiment à valoriser cette solution passive. Quantifier un tel indicateur ne garantit cependant pas sa bonne mise en œuvre. Dans le cas d'un bâtiment où l'ouverture de menuiseries est automatisée cet indicateur peut être valorisé dans un algorithme de pilotage pour optimiser celui-ci soit de façon réactive en fonction des conditions du bâtiment et de son environnement à l'instant présent et de son historique soit de façon prédictive en prenant en compte des prévisions météo et d'usage du bâtiment par exemple. Cependant, tous les bâtiments n'ont pas une ouverture de menuiseries automatisées notamment de par des contraintes économiques mais aussi de par l'importance pour les occupants de pouvoir contrôler soit même son environnement(116). Dans ce cas, ce sont les occupants qui ont un rôle à jouer pour valoriser la ventilation naturelle pour améliorer leur confort. Il n'est cependant pas toujours évident de savoir si l'ouverture d'une fenêtre peut être bénéfique pour améliorer son confort thermique (la température extérieure est-elle plus élevée à l'extérieur qu'à l'intérieur ?). De plus, l'ouverture des fenêtres ne joue pas que sur la seule composante thermique, mais aussi peut être bénéfique sur la composante qualité de l'air intérieure (QAI). Développer des outils d'aide à la décision pour les occupants pour les guider dans la bonne utilisation de l'ouverture / fermeture des menuiseries est donc une autre piste pour valoriser au mieux la ventilation naturelle. Cette dernière perspective présentée ici fait d'ailleurs l'objet d'un travail en cours de développement avec des collègues avec un premier prototype WIND'ose (45).



---

## Références

1. Jay A, Brun A, Leroux G, Joubert P. BIPV cooling with natural convection. Numerical Model and experimental campaign comparison. 27th Eur Photovolt Sol Energy Conf EU PVSEC - Frankf. 2012;
2. Leroux G, Brun A, Jay A, Joubert P. Rafrâchissement de panneaux photovoltaïques intégrés en toiture par convection naturelle. Modélisation et comparaison avec des campagnes expérimentales. Conf IBPSA 2012 Chambéry. 2012;
3. Jay A, Clerc S, Boillot B, Bontemps A, Jay F. Use of Phase Change Material in Order to Maintain the Temperature of Integrated PV Modules at a Reasonable Level. 25th Eur Photovolt Sol Energy Conf Exhib 5th World Conf Photovolt Energy Convers. 2010;4125–8.
4. Jay A, Clerc S, Boillot B, Bontemps A, Jay F. Utilisation de matériaux à changement de phase pour réduire la température de panneaux PV intégrés au bâti. Conférence IBPSA Fr 2010. 2010;
5. Assoa B, Guiot T, Gaillard L, Boillot B, Ménézo C, Jay A. A validated model to predict the thermal and electrical performance of residential rooftop BIPV systems. 27th Eur Photovolt Sol Energy Conf EU PVSEC - Frankf. 2012 Sep;
6. Tsanakas JA, Lokhat I, Jay A, Gregoire C, Schnierer B, Russnak J, et al. State-of-play and emerging challenges in PV energy yield simulations: A multi-case multi-model benchmarking study. WCPEC-8 39th EU PVSEC - Milan. 2022 Sep;
7. Tsanakas JA, Lokhat I, Jay A, Gregoire C, Schnierer B, Rusnak J, et al. State-of-Play and Emerging Challenges in Photovoltaic Energy Yield Simulations: A Multi-Case Multi-Model Benchmarking Study. Sol RRL. 2022 Nov 15;2200582.
8. Stéphane L, Wurtz E, Bastide A, Brangeon B, Jay A, Goffaux C, et al. Benchmark de ventilation naturelle traversante (ADNBATI). Conf IBPSA Fr 2010. 2010 Jan;
9. Brangeon B, Pons M, Bastide A, Wurtz E, Stéphane L, Goffaux C, et al. The test case ADNBATI, a benchmark on natural ventilation in a room. Conf Fifth Int Conf Adv Comput Methods Eng ACOMEN 2011. 2011 Nov;
10. Pons M, Bastide A, Brangeon B, Wurtz E, Stéphane L, Jay A, et al. Ventilation nocturne traversante, le cas-test numérique ADNBATI. Conf XXXe Rencontres AUGC-IBPSA. 2012;
11. Pons M, Bastide A, Brangeon B, Stéphane L, Wurtz E, Jay A, et al. Le cas-test ADNBATI, un benchmark sur la ventilation naturelle dans une pièce d'habitation. Conf Congrès Français Therm. 2012 May;
12. Piot A, Jay A, Barnes-Davin L, Rogat D, Wurtz E. Observation of the energy exchanged by a concrete slab submitted to solar radiation in winter: small scale experimentation. CLIMA 2016 - Proc 12th REHVA World Congr. 2016;2.



- 
13. Jay A, Brun A, Pacquaut A, Maréchal P, Bernaud P, Wurtz E. Impact of bioclimatism and passive solutions on thermal performance: Feedback from an experimental wood-concrete house in a Mediterranean climate. *Build Environ.* 2023 Aug;110757.
  14. Lagesse A, Barthelme AF, Jay A, Wurtz E. Impact of thermal mass on summer comfort in building: A numerical approach leading to a decision support tool. *BS 2013 13th Conf Int Build Conf BS2013 - Chambéry.* 2013;
  15. Truchet S, Jay A, Wurtz E, Anger J, Brun A, Bernaud P. Impact of thermal inertia coupled to natural night ventilation. A case study for a high performance building in continental climate. *Int J Vent.* 2023 Mar 20;1–14.
  16. Bejat T, Jay A, Lagesse A, Piot A. Hygrothermal behavior of a hemp concrete wall: experimental and numerical approach. *BS 2013 13th Conf Int Build Conf BS2013 - Chambéry.* 2013;
  17. Piot A, Bejat T, Jay A, Bessette L. Hygrothermal behavior of a hemp concrete wall: experimental and numerical study of coating. *ICBBM 2015 Proc 1st Int Conf Bio-Based Build Mater Clermont-Ferrand Fr.* 2015 Jun;
  18. Bejat T, Piot A, Jay A, Bessette L. Study of Two Hemp Concrete Walls in Real Weather Conditions. *Energy Procedia.* 2015 Nov;78:1605–10.
  19. Piot A, Béjat T, Jay A, Bessette L, Wurtz E, Barnes-Davin L. Study of a hempcrete wall exposed to outdoor climate: Effects of the coating. *Constr Build Mater.* 2017 May;139:540–50.
  20. Piot A, Jay A. Évaluation du taux de renouvellement d'air sous un bardage ventilé à l'aide de calculs hygrothermiques et de mesures. *Conf IBPSA Fr 2022.* 2022 May;
  21. Jay A, Barnes-Davin L, Wurtz E. Concrete as a multi-functional material serving Building energy efficiency, thermal comfort and recyclability. 5 years of collaboration between VICAT and CEA – INES. 17th Advanced Building Skins Conferenc presented at; 2017 Oct; Bern - Suisse.
  22. Jay A. Exploitation of thermal inertia in detached houses: Summer comfort. 17th Advanced Building Skins Conferenc presented at; 2017 Oct; Bern - Suisse.
  23. Jay A. Exploitation of thermal inertia in detached houses: Winter evaluation. 17th Advanced Building Skins Conferenc presented at; 2017 Oct; Bern - Suisse.
  24. Merlet Y, Rouchier S, Jay A, Cellier N, Woloszyn M. Integration of phasing on multi-objective optimization of building stock energy retrofit. *Energy Build.* 2022 Feb;257:111776.
  25. Merlet Y, Rouchier S, Jay A, Woloszyn M. Couplage de l'optimisation multi-objectif avec la simulation thermique dynamique pour la rénovation de parcs de bâtiments. Conférence IBPSA Fr 2018 [Internet]. 2018 May; Available from: <https://hal.univ-smb.fr/hal-01824244>
  26. Merlet Y, Rouchier S, Jay A, Woloszyn M. Elaboration of the decision space for an optimization of building retrofit. *Int Build Phys Conf Sep 2018 Syracuse U S.* 2018;

27. Fouquier A, Robert S, Suard F, Stéphan L, Jay A. State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review. *Renew Sustain Energy Rev.* 2013 Jul;23:272–88.
28. Spitz C, Mora L, Wurtz E, Jay A. Practical application of uncertainty analysis and sensitivity analysis on an experimental house. *Energy Build.* 2012 Dec;55:459–70.
29. Stefanoiu AM, Woloszyn M, Jay A, Wurtz E, Buhé C. A Methodology to Assess the Ambient Temperature of a Building using a Limited Number of Sensors. *Energy Procedia.* 2015 Nov;78:1944–9.
30. Stefanoiu AM, Woloszyn M, Wurtz E, Jay A. Comparaison mesures – simulations et analyse de sensibilité. *Conf IBPSA Fr 2014 - Arras.* 2014;
31. Stefanoiu AM, Woloszyn M, Wurtz E, Jay A, Buhé C, Gondian L, et al. Comparison between the design phase and the real behavioral measurements of an Energy Efficient Building. *Conf IBPSA Fr 2016.* 2016;
32. Stefanoiu AM, Gondian L, Schneuwly P, Buhé C, Woloszyn M, Jay A. How To Assess Energy Performance of an Occupied Building ? *BS 2017 15th Conf Int Build Conf - San Franc.* 2017;
33. Pacquaut A, Rouchier S, Jay A, Challansonnex A, Juricic S, Wurtz E. Numerical test bench to evaluate the influence of heat gains on the estimation of Heat Transfer Coefficient under occupied conditions. In: *Journal of Physics: Conference Series,*. Aalborg, Denmark; 2023.
34. Jay A, Fares H, Rabouille M, Oberle P, Thebault S, Challansonnex A, et al. Evaluation of the intrinsic thermal performance of an envelope in the summer period. *J Phys Conf Ser.* 2021 Nov 1;2069(1):012093.
35. Juricic S, Rabouille M, Challansonnex A, Jay A, Thebault S, Rouchier S, et al. The Sereine test: Advances towards short and reproducible measurements of a whole building heat transfer coefficient. *Energy & Buildings* [Internet]. Volume 299. 2023; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113585>
36. Faure G, Juricic S, Rabouille M, Rouchier S, Challansonnex A, Jay A. Towards automated stochastic Grey-Box Model Calibration for Heat Transfer Coefficient Inference. In: *Journal of Physics: Conference Series.* Aalborg, Denmark; 2023.
37. Juricic S, Goffart J, Rouchier S, Jay A, Oberlé P. Design of a short perturbation method for on-site estimation of a building envelope thermal performance. *Energy & Buildings* [Internet]. 2022 May; Available from: [10.1016/j.enbuild.2022.112211](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112211)
38. Jay A, Brun A, Thébault S. Dynamic infiltration airflow rate measurement thanks to tracer gas method : a case study at a dwelling scale. *15th ROOMVENT Conf - 2020 - Torino.* 2020;
39. Fares H, Jay A, Anger J, Thébault S, Rabouille M, Oberlé P, et al. Mesure de la performance thermique d'une enveloppe en période estivale. In *Virtuelle;* 2020.

- 
40. Tanchou M, Jay A, Fares H. Evaluation de la performance thermique d'une enveloppe en période estivale. Test sur une cellule expérimentale en conditions extérieures. In Reims; 2022.
  41. Jay A, Tanchou M, Fares H. Evaluation of the intrinsic thermal performance of an envelope in hot period. Outdoor experiment at a 40m<sup>3</sup> test cell. CLIMA 2022 - Rotterdam. 2022 May;
  42. Campagna K, Jay A, Pacquaut A, Juricic S. Co-cooling, simulation-based exploration of a new method to measure the Heat Transfer Coefficient of a building envelope in hot climate and summer period. *Journal of Building Performance Simulation* [Internet]. 2024 Apr 10 [cited 2024 Mar 14]; Available from: 10.1080/19401493.2024.2338767
  43. Jay A, Campagna K, Pacquaut A, Juricic S, Challansonnex A. Extending the validity of co-heating tests to warmer and sunnier weather conditions using an equivalent exterior temperature. PrePrint under review [Internet]. 2024; Available from: 10.13140/RG.2.2.22404.33927
  44. Anger J, Brun A, Jay A, Lamonerie T, Leconte A, Ouvrier-Bonnaz O, et al. Industrialisation de la rénovation via la méthode ES'OPE : Apports de la simulation et retour d'expérience sur une maison INCAS. Conf IBPSA Fr 2022. 2022 May;
  45. Jay A, Bernaud P, ALESSI F. An IAQ and thermal comfort coach prototype to improve comfort and energy consumption thanks to adequate management of natural ventilation: development and first feedback results. In: *Ventilation, IEQ and health in sustainable buildings*. Aalborg University, Copenhagen, Denmark; 2023. p. 122–3.
  46. Jay A, Fouquier A, Boulinguez M, Haese G, Thebault S, Chantepie V, et al. Towards an alternative cooling: Optimisation of the successive use of the cooling systems from passive to active - Development of design and control strategies of the hybrid cooling. In: *Ventilation, IEQ and health in sustainable buildings*. Aalborg University, Copenhagen, Denmark; 2023. p. 124–33.
  47. Francois E, Piot A, Wurtz E, Jay A. Evaluation du confort d'été dans les bâtiments (cas réels) : discussion sur la mesure d'un indicateur degrés-heures. Conf IBPSA Fr 2022. 2022 May;
  48. Gouy-Pailler C, Najmeddine H, Mouraud A, Suard F, Spitz C, Jay A, et al. Distance and similarity measures for sensors selection in heavily instrumented buildings: application to the INCAS platform. Conf CIB 2011. 2011;
  49. Najmeddine H, Suard F, Jay A, Marechal P, Robert S. Mesures de similarité pour l'aide à l'analyse des données énergétiques de bâtiments. Conf RFIA 2012 Reconnaiss Formes Intell Artif. 2012;
  50. EUROPEAN COMMISSION. In focus: Energy efficiency in buildings [Internet]. 2020 Feb. Available from: [https://commission.europa.eu/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-02-17\\_en](https://commission.europa.eu/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-02-17_en)
  51. EUROPEAN COMMISSION. A Clean Planet for all A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy [Internet].

2018. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0773&from=EN>
52. The Future of Cooling Opportunities for energyefficient air conditioning [Internet]. International Energy Agency; 2018. Available from: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/0bb45525-277f-4c9c-8d0c-9c0cb5e7d525/The\\_Future\\_of\\_Cooling.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/0bb45525-277f-4c9c-8d0c-9c0cb5e7d525/The_Future_of_Cooling.pdf)
  53. Olgyay V. Design with climate, bioclimatic approach to architectural regionalism. Princeton Univesity Press; 1963.
  54. Roulet CA. Passive Means to Improve the Indoor Thermal Comfort. In: Chiesa G, editor. Bioclimatic Approaches in Urban and Building Design [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2021 [cited 2023 Mar 14]. p. 369–82. (PoliTO Springer Series). Available from: [https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-59328-5\\_19](https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-59328-5_19)
  55. Porritt SM, Cropper PC, Shao L, Goodier CI. Ranking of interventions to reduce dwelling overheating during heat waves. *Energy Build.* 2012 Dec;55:16–27.
  56. Oropeza-Perez I, Østergaard PA. Active and passive cooling methods for dwellings: A review. *Renew Sustain Energy Rev.* 2018 Feb;82:531–44.
  57. Rodrigues E, Fernandes MS, Gaspar AR, Gomes Á, Costa JJ. Thermal transmittance effect on energy consumption of Mediterranean buildings with different thermal mass. *Appl Energy.* 2019 Oct;252:113437.
  58. Blondeau P, Spérandio M, Allard F. Night ventilation for building cooling in summer. *Sol Energy.* 1997 Nov;61(5):327–35.
  59. Zhou J, Zhang G, Lin Y, Li Y. Coupling of thermal mass and natural ventilation in buildings. *Energy Build.* 2008 Jan;40(6):979–86.
  60. Holford JM, Woods AW. On the thermal buffering of naturally ventilated buildings through internal thermal mass. *J Fluid Mech.* 2007 Jun 10;580:3–29.
  61. Fosas D, Coley DA, Natarajan S, Herrera M, Fosas de Pando M, Ramallo-Gonzalez A. Mitigation versus adaptation: Does insulating dwellings increase overheating risk? *Build Environ.* 2018 Oct;143:740–59.
  62. Gupta R, Kapsali M. Empirical assessment of indoor air quality and overheating in low-carbon social housing dwellings in England, UK. *Adv Build Energy Res.* 2016 Jan 2;10(1):46–68.
  63. Artmann N, Jensen RL, Manz H, Heiselberg P. Experimental investigation of heat transfer during night-time ventilation. *Energy Build.* 2010 Mar;42(3):366–74.
  64. Kuczyński T, Staszczuk A, Gortych M, Stryjski R. Effect of thermal mass, night ventilation and window shading on summer thermal comfort of buildings in a temperate climate. *Build Environ.* 2021 Oct;204:108126.
  65. Givoni B. Effectiveness of mass and night ventilation in lowering the indoor daytime temperatures. Part I: 1993 experimental periods. *Energy Build.* 1998 Aug;28(1):25–32.

- 
66. Fan X, Li X. Performance comparison analysis for different single-zone natural ventilation building indoor temperature prediction method combined thermal mass. *Energy*. 2022 Sep;255:124518.
  67. Kuczyński T, Staszczuk A. Experimental study of the influence of thermal mass on thermal comfort and cooling energy demand in residential buildings. *Energy*. 2020 Mar;195:116984.
  68. Shaviv E, Yezioro A, Capeluto IG. Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy. *Renew Energy*. 2001 Nov;24(3–4):445–52.
  69. Albayyaa H, Hagare D, Saha S. Energy conservation in residential buildings by incorporating Passive Solar and Energy Efficiency Design Strategies and higher thermal mass. *Energy Build*. 2019 Jan;182:205–13.
  70. Calama-González CM, León-Rodríguez ÁL, Suárez R. Indoor environmental assessment: Comparing ventilation scenarios in pre- and post-retrofitted dwellings through test cells. *J Build Eng*. 2021 Nov;43:103148.
  71. Izard JL. L'inertie thermique dans le bâtiment. In 2006. Available from: [https://www.enviroboite.net/IMG/pdf/0607\\_Inertie\\_thermique\\_batiment\\_Izard\\_V1.pdf](https://www.enviroboite.net/IMG/pdf/0607_Inertie_thermique_batiment_Izard_V1.pdf)
  72. Lavigne P. Comprendre les inerties thermiques dans les bâtiments [Internet]. Centre de Ressources Envirobat Méditerranée; 2010. Available from: [https://www.enviroboite.net/IMG/pdf/1003\\_Inertie\\_thermique\\_Lavigne\\_V1.pdf](https://www.enviroboite.net/IMG/pdf/1003_Inertie_thermique_Lavigne_V1.pdf)
  73. Gregory K, Moghtaderi B, Sugo H, Page A. Effect of thermal mass on the thermal performance of various Australian residential constructions systems. *Energy & Buildings*. 40(4). 2008 Dec;459–65.
  74. Tonelli C, Grimaudo M. Timber buildings and thermal inertia: Open scientific problems for summer behavior in Mediterranean climate. *Energy Build*. 2014 Nov;83:89–95.
  75. Geetha N, Velraj R. Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage - A review. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*. 2012;29, 913–46.
  76. Pfafferott J, Herkel S, Wapler J. Thermal building behaviour in summer: long-term data evaluation using simplified models. *Energy Build*. 2005 Aug;37(8):844–52.
  77. Amos-Abanyie S, Akuffo FO, Kutin-Sanwu V. Effects of Thermal Mass, Window Size, and Night-Time Ventilation on Peak Indoor Air Temperature in the Warm-Humid Climate of Ghana. *Sci World J*. 2013;2013:1–9.
  78. Balaras CA. The role of thermal mass on the cooling load of buildings. An overview of computational methods. *Energy Build*. 1996 Jan;24(1):1–10.
  79. Evola G, Marletta L, Costanzo V, Caruso G. Different Strategies for Improving Summer Thermal Comfort in Heavyweight Traditional Buildings. *Energy Procedia*. 2015 Nov;78:3228–33.

80. Delzendeh E, Wu S, Lee A, Zhou Y. The impact of occupants' behaviours on building energy analysis: A research review. *Renew Sustain Energy Rev.* 2017 Dec;80:1061–71.
81. Thebault Simon. Contribution à l'évaluation in situ des performances d'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments [Thèse de Doctorat]. INSA Lyon; 2017.
- [81] S. Thébault, "Contribution à l'évaluation in situ des performances d'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments". Thèse de doctorat, INSA Lyon, 2017
83. Bell M, Wingfield J, Miles-Shenton D, Seavers J. This report sets out the findings from a low carbon housing trial at Elm Tree Mews, York, and discusses the technical and policy issues that arise from it.
84. Lowe RJ, Wingfield J, Bell M, Bell JM. Evidence for heat losses via party wall cavities in masonry construction. *Build Serv Eng Res Technol.* 2007 May;28(2):161–81.
85. Bauwens G. Reliability of co-heating measurements. IBPSA England; 2012.
86. Bauwens G, Roels S. Co-heating test: A state-of-the-art. *Energy Build.* 2014 Oct;82:163–72.
87. Baker PH, van Dijk HAL. PASLINK and dynamic outdoor testing of building components. *Build Environ.* 2008 Feb;43(2):143–51.
88. Rouchier S, Rabouille M, Oberlé P. Calibration of simplified building energy models for parameter estimation and forecasting\_ Stochastic versus deterministic modelling. *Building and Environment.* 134th ed. 2018;181–90.
89. Jack R, Loveday D, Allinson D, Lomas K. First evidence for the reliability of building co-heating tests. *Build Res Inf.* 2018 May 19;46(4):383–401.
90. Herrada H, Jiménez MJ. First reliability assessment of the coheating test in a semi-desert climate. Identification of the performance gap regarding the Spanish regulation calculations. *Energy Build.* 2022 Jul;266:112140.
91. Law A, Wong JPC. Application of the Co-heating test in Australian climates. *Energy Build.* 2020 Oct 1;224:110153.
92. Spitz C. Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments [Thèse de doctorat]. 2012.
93. Boyano A, Hernandez P, Wolf O. Energy demands and potential savings in European office buildings: Case studies based on EnergyPlus simulations. *Energy Build.* 2013 Oct;65:19–28.
94. Henninger RH, Witte MJ, Crawley DB. Analytical and comparative testing of EnergyPlus using IEA HVAC BESTEST E100–E200 test suite. *Energy Build.* 2004 Aug;36(8):855–63.
95. Tronchin L, Fabbri K. A Round Robin Test for buildings energy performance in Italy. *Energy Build.* 2010 Oct;42(10):1862–77.

- 
96. Manz H, Loutzenhiser P, Frank T, Strachan PA, Bindi R, Maxwell G. Series of experiments for empirical validation of solar gain modeling in building energy simulation codes—Experimental setup, test cell characterization, specifications and uncertainty analysis. *Build Environ.* 2006 Dec;41(12):1784–97.
  97. López-Cabeza VP, Rivera-Gómez C, Roa-Fernández J, Hernandez-Valencia M, Herrera-Limonés R. Effect of thermal inertia and natural ventilation on user comfort in courtyards under warm summer conditions. *Build Environ.* 2023 Jan;228:109812.
  98. <https://fr.climate-data.org/europe/france/provence-alpes-cote-d-azur/saint-paul-lez-durance-640206/>.
  99. <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/ressources-pedagogiques/notice/view/oai%253Aiu.tengligne.net%253A908>.
  - [100] R. Bouchié, S. Derouineau, C. Abele, and J.-R. Millet, “Conception et validation d’un capteur de mesure de la température extérieure équivalente d’une paroi opaque d’un bâtiment”. Conférence IBPSA Fr., 2006
  101. Raillon L, Rouchier S, Juricic S. pySIP: an open-source tool for Bayesian inference and prediction of heat transfer in buildings. *Congrès français de thermique.* 2019;
  102. Thébault S, Bouchié R. Refinement of the ISABELE method regarding uncertainty quantification and thermal dynamics modelling. *Energy Build.* 2018 Nov;178:182–205.
  103. Bouchié R, Alzetto F, Brun A, Boisson P, Thebault S. Short methodologies for in-situ assessment of the intrinsic thermal performance of the building envelope. In: *Conference: Sustainable Places 2014.* 2014.
  104. Schetelat P, Bouchié R. ISABELE : a method for performance assessment at acceptance stage using bayesian calibration. In: *Proceedings of the ninth international conference on system simulation building.* Liège; 2014.
  105. Boisson P, Bouchié R. ISABELE method : in-situ assessment of the building envelope performances. In: *Proceedings of the ninth international conference on system simulation building.* Liège; 2014.
  106. Sherman MH. Estimation of infiltration from leakage and climate indicators. *Energy Build.* 1987 Feb 1;10(1):81–6.
  107. Chard E. Developing an Alternative Method to Determine the Heat Transfer Coefficients of Dwellings in Warmer Climates [Internet]. 2022. Available from: <https://salford-repository.worktribe.com/output/1561994/developing-an-alternative-method-to-determine-the-heat-transfer-coefficients-of-dwellings-in-warmer-climates>
  108. Li, Matthew. Thermal performance of UK dwellings: assessment of methods for quantifying whole-dwelling heat loss in occupied homes. 2022;12284773 Bytes.
  109. Martin M, Berdahl P. Characteristics of infrared sky radiation in the United States. *Sol Energy.* 1984;33(3–4):321–36.

- 
110. Walton GN. Thermal Analysis Research Program Reference Manual. NBSSIR 83-2655. National Bureau of Standards.; 1983.
  111. Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorol Z. 2006 Jul 10;259–63.
  112. Johnston D, Miles-Shenton D, Farmer D, Wingfield J. Whole House Heat Loss Test Method (Coheating). 2013.
  113. Gori V, Johnston D, Bouchié R, Stamp S. Characterisation and analysis of uncertainties in building heat transfer estimates from co-heating tests. Energy and Buildings. Volume 295. 2023;
  114. Haan CT. Statistical Methods in Hydrology. 2e édition. Ames, Iowa: Wiley–Blackwell. 2002.
  115. Montgomery DC. Introduction to Statistical Quality Control. 8th Edition, EMEA. Hoboken, NJ: John Wiley&Sons. 2019.
  116. Scanu L. Vers des archétypes de modèles auto-configurables pour le bâtiment connecté [Thèse de doctorat]. Université de Grenoble Alpes; 2017.





# ANNEXES



---

# Annexe A Prérequis du dossier de soutenance d'un doctorat en VAE.

## A.1 Etapes du doctorat en VAE

La procédure VAE suit les règles de l'USMB. Elle implique la constitution successive de deux dossiers correspondant aux étapes d'admissibilité et d'admission :

1) Au titre de l'admissibilité, un dossier de recevabilité. Il comportera un rapport d'activités de recherche et de production scientifique, précisant les développements réalisés et les résultats, comprenant une liste recensant l'intégralité des publications hiérarchisée et organisée avec pertinence. Ce rapport sera complété d'une copie d'extraits des documents les plus marquants. Ce dossier sera étudié par le Conseil de l'ED qui en évaluera la recevabilité scientifique. L'accord ou le refus motivé de recevabilité est prononcé par le conseil de l'ED.

2) Au titre de l'admission, un dossier de soutenance dont l'objectif est de démontrer la maîtrise du sujet de recherche ainsi que sa capacité à développer une stratégie de recherche scientifique, à la mettre en œuvre et en exploiter les résultats. Ce dossier sera examiné par le jury d'admission dont les règles de constitution sont identiques à celles d'un doctorat par voie classique.

## A.2 Prérequis du dossier de soutenance d'un doctorat en VAE.

Au titre de l'admission, un dossier de soutenance dont l'objectif est de démontrer la maîtrise du sujet de recherche ainsi que sa capacité à développer une stratégie de recherche scientifique, à la mettre en œuvre et en exploiter les résultats. Il est constitué de deux parties:

1) Une présentation du parcours professionnel et personnel du chercheur démontrant la pertinence de la demande au travers de l'analyse des activités scientifiques et de l'identification des compétences. L'objectif est de dégager le ou les principaux axes de recherche, de cerner la cohérence, la complexité et l'originalité des travaux de recherche réalisés.

2) Une analyse du travail et des méthodes d'une ou plusieurs recherches déjà effectuées : argumentation sur les résultats scientifiques, présentation de travaux et développement par le candidat selon des critères méthodologiques explicités... (livres, ouvrages, publications nationales et internationales dans des revues à comité de lecture, communications dans des congrès nationaux et internationaux avec publication des actes, communications sans publication des actes, autres communications type séminaires, colloques, rapports scientifiques, rapports techniques, rapports d'études, brevets et innovations...).



---

## Annexe B Dossier de recevabilité

Le manuscrit ci-dessus, s'inscrit dans la seconde étape d'une démarche d'obtention de doctorat en VAE. La première étape consistait en la rédaction d'un dossier de recevabilité qui a été examiné et approuvé par l'école doctorale en amont de la seconde étape. Cette annexe reprend le dossier de recevabilité déposé à la première étape.

### B.1 Rapport d'activités de recherche et de production scientifique

Cette partie a été reprise dans la partie principale du dossier de soutenance et fait l'objet de la Partie I

### B.2 Encadrement

J'ai encadré ou co-encadré 6 doctorants (trois ayant soutenus, trois en cours) et 14 stagiaires.

- Co-encadrement de thèses
- Clara SPITZ
  - Titre : Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments
  - Thèse de l'Université Savoie Mont Blanc soutenue le 9 mars 2012
  - Directeur de thèse : Etienne Wurtz
  - Co-encadrement : Laurent Mora (Université de Bordeaux I), Arnaud Jay
- Ana Maria STEFANOIU
  - Titre : Vers l'évaluation de la performance des bâtiments à haute efficacité énergétique
  - Thèse de l'Université Savoie Mont Blanc soutenue le 20 mars 2017
  - Co-directeur de thèse : Monika Woloszyn, Etienne Wurtz
  - Co-encadrement : Catherine Buhé, Arnaud Jay
- Yannis Merlet
  - Titre : Elaboration de stratégies optimales de rénovation de parcs de bâtiments. Intégration du phasage et des contraintes
  - Thèse de l'Université Savoie Mont Blanc soutenue le 15 juillet 2020
  - Directrice de thèse : Monika Woloszyn
  - Co-encadrement : Simon Rouchier, Arnaud Jay
- Anaïs Pacquaut
  - Titre : Mesure et quantification de la performance énergétique de l'enveloppe d'un bâtiment en site occupé
  - Thèse démarrée à l'USMB en Janvier 2022.
  - Co-directeurs de thèse : Etienne Wurtz, Simon Rouchier
  - Co-encadrement : Arnaud Challansonnex, Sarah Juricic (CSTB), Arnaud Jay
- Paula Peddraza
  - Titre : Evaluation technico-économique d'un bouquet de solutions CVC solaires pour une offre de forfait énergétique à « empreinte carbone minimale
  - Thèse démarrée à l'USMB à l'automne 2022.
  - Co-directeurs de thèse : Etienne Wurtz, Monika Woloszyn
  - Co-encadrement : Arnaud Jay, Aude Pommeret
- Simon Bal-Fontaine
  - Titre : Garantie de performance du rafraîchissement hybride des bâtiments
  - Thèse démarrée à l'USMB à l'automne 2023.
  - Directeur de thèse : Simon Rouchier
  - Co-encadrement : Arnaud Jay

- 
- Encadrement et co-encadrement de stages de fin d'études
  - Ségolène Clerc
    - Titre : Modélisation thermique et aéraulique des systèmes photovoltaïques intégrés au bâtiment
    - Année / Durée : 2010 / 6 mois
  - Corinne Bachelet
    - Titre : Outil CFD dans le domaine du bâtiment : Etat de l'art et applications
    - Année / Durée : 2011 / 6 mois
  - Sylvain Maillefaud
    - Titre : Analyse de données énergétiques mesurées sur des maisons expérimentales
    - Année / Durée : 2013 / 6 mois
  - Joao ANDRADE (co-encadrement avec Virginie Renzi et Jocelyn Anger)
    - Titre : Optimisation de boucliers thermiques pour sonde de températures
    - Année / Durée : 2013
  - Sarah Truchet
    - Titre : Comparaison mesures / simulations de quatre maisons expérimentales
    - Année / Durée : 2014 / 6 mois
  - Victor GAUTIER (co-encadrement avec Aurélie Fouquier)
    - Titre : Génération d'une base de données de Bâtiments typiques
    - Année / Durée : 2015 / 6 mois
  - Anais Pacquaut
    - Titre : Exploitation d'une maison expérimentale bois-béton et comparaison mesures / simulations
    - Année / Durée : 2018 / 6 mois
  - Merveil Muanda (co-encadrement avec Pierre Bernaud)
    - Titre : Algorithme et IHM pour l'optimisation d'ouverture / fermeture des ouvrants
    - Année / Durée : 2020 / 6 mois
  - Hafsa Fares
    - Titre : Caractérisation de la performance thermique de l'enveloppe d'un bâtiment en été
    - Année / Durée : 2020 / 6 mois
  - Marie Tanchou
    - Titre : Caractérisation de la performance thermique de l'enveloppe d'un bâtiment en été – à l'échelle d'une cellule Passys (40m<sup>3</sup>)
    - Année / Durée : 2021 / 6 mois
  - David Willemy
    - Titre : Caractérisation de la performance thermique de l'enveloppe d'un bâtiment en été – à l'échelle d'une maison
    - Année / Durée : 2022 / 6 mois
  - Antonin Parpillon (co-encadrement avec Pierre Bernaud et Franck Alessi)
    - Titre : Réalisation d'un prototype de solution de conseil aux occupants d'un bâtiment sur la gestion des ouvrants
    - Année / Durée : 2022 / 6 mois
  - Kevin Campagna
    - Titre : Exploration numérique d'une méthode de co-cooling
    - Année / Durée : 2023 / 6 mois

### B.3 Enseignement / activités pédagogiques

J'ai eu plusieurs activités d'enseignement. L'une des 3 composantes de mon premier poste d'ingénieur CFD était la formation des nouveaux clients aux logiciels GAMBIT (modeleur géométrique et maillage) et Fluent. Le public était pour la plupart des ingénieurs en activité qui se formaient ou se

---

perfectionnaient à la CFD. J'ai été responsable du support de formation pour la partie pré-traitement, et également dispensé des formations avancées pour les thématiques des écoulements multiphasiques et des UDF (User Defined Functions) permettant la personnalisation de certaines fonctionnalités du logiciel Fluent.

En parallèle de mon activité d'ingénieur de recherche, j'ai dispensé plusieurs enseignements dans des cursus universitaires liés aux transferts thermiques dans les bâtiments et à la simulation (STD et CFD) à l'université Savoie Mont-Blanc et à l'université Grenoble Alpes.

Le détail de ces enseignements est listé ci-dessous :

- Formateur à Fluent France & ANSYS France (public : ingénieur.e.s en activité) (2004-2009)
  - o Formateur à l'utilisation des logiciels FLUENT (CFD) & GAMBIT (Géométrie et maillage)
  - o Formation spécifique sur les modèles multiphasiques dans Fluent
  - o Responsable du support de cours GAMBIT pour sa mise à jour au fil des versions
- Enseignement à l'USMB
  - o 2011/2012 : TD de Transferts thermiques appliqués au bâtiment
  - o 2019 à 2022 : ENER912 Master ESB et Polytech EN TP introduction à la CFD - Fluent (16h de TP / groupe, 2 groupes/an)
  - o 2021/2022 : M1 Solar Academy Introduction à la CFD/MFN : 3hCM, + 12h TD
  - o 2022/2023 : M1 Solar Academy Introduction à la CFD/MFN : 3hCM
  - o 2023/2024 : M2 Polytech : 3 h CM
- Enseignement à l'ENSE3
  - o 2012/2013 : TP de thermique du bâtiment
  - o 2013/2014 : 10h de TD, Comfie Pleiades
- Univ Grenoble Alpes : Licence BP3E Grenoble
  - o 2013/2014 : 4h les enjeux de l'énergétique des bâtiments
  - o 2014/2015 : 4h les enjeux de l'énergétique des bâtiments

#### B.4 Divers

- Communauté scientifique

Je suis membre depuis 8 ans du comité scientifique de la communauté IBPSA France qui organise une conférence biannuelle nationale

Je participe à la Review des articles pour la conférence international Building Simulation organisée tous les 2 ans.

J'ai participé à l'organisation de la conférence BS2013 qui s'est déroulée à Chambéry en 2013 et aux écoles scientifiques SIMUREX 2018 et GENSIM.

J'ai échangé avec un large panel de chercheurs de la communauté française et européenne au travers des projets de recherche auquel j'ai contribué ou participé au montage. J'ai notamment coordonné un projet ANR CoolPV, contribué à 5 autres projets ANR (REHAPARCS, FIABILITE, REZOSRPING, PLUMES, SIMINTHEC).

1 Review réalisée pour le journal Building and Environment.

- Brevets

Je suis co-inventeur de 3 brevets (1 en cours d'examen, 2 déposés) :



- Installation de protection vis-à-vis de polluants présents dans l'air au sein d'un bâtiment industriel - Date de dépôt: 22/11/2021 (en cours d'examen)
- Procédé et système pour conseiller sur l'opportunité d'actionner un ouvrant en vue d'améliorer le confort thermique et/ou la qualité de l'air - Date de dépôt: 21/9/2020
- Procédé et système de pilotage automatique d'au moins un système pilotable équipant un local - 28/07/2016- EP 3239791 A1

- **Management**

J'ai eu diverses expériences d'encadrement dont une fonction de 5 ans de chef du laboratoire de gestion énergétique du bâtiment au CEA où j'ai animé une équipe d'une douzaine de personnes intégrant des techniciens, des ingénieurs, des docteurs en formation (stage, doctorants, jeunes diplômés ou expérimentés). J'ai de plus encadré ou co-encadré directement 4 doctorants (3 ayant soutenue, une en cours), 8 stagiaires et plusieurs CDD.

- **Formation continue suivie**

- Avr. 2007 : 5<sup>th</sup> Short Course - Multiphase flow : Simulation, experiment and Application (2 jours – Ansys)
- **Fev. 2008 : 25<sup>th</sup> Short courses – Modelling and Computation of Multiphase Flows (5 j. – ETH)**
- Janv. 2010 : Conception bâtiments à haute performance énergétique (2 j. - INES-PFE)
- Mai 2010 : Archiwizard - Initiation à la conception bioclimatique des bâtiments (1 j. - Raycreatis)
- Oct. 2010 : Formation sur la mesure des infiltrations a la porte soufflante (1 j.)
- **2010 - Simurex : Conception optimisée du bâtiment par la simulation et le retour d'expérience, Ecole Thématique CNRS Du 18 Au 24 Avril 2010, Cargèse, Corse (5 j.)**
- Fev. 2011 : Intégrer la propriété industrielle dans son activité professionnelle (1 j. - CEA Grenoble)
- Sept. 2011 Formation à la thermographie infrarouge appliquée au bâtiment (3 j. - Institut De La Thermographie)
- **2012 – Dynastee Summer School On “Dynamic Calculation Methods For Building Energy Assessment” 18-22 June Denmark (5 j. – DTU)**
- Sep. 2015 : Encadrer et valoriser la thèse, (3 j. - CEA)
- Mai 2015 : Management et droit du travail (20h - Suter Catherine - Avocat A La Cour)
- 2016 : Sauveteur secouriste du travail (16h - CEA Grenoble)
- **2016 – Gensim: New generation building energy simulation tools, Scientific School 24 To 28 October 2016 Porticcio, Corsica (France) (4 j.)**
- Mar 2017 : Python découverte (2 j. - Atp Formation)
- Juil 2019 : Le Projet photovoltaïque raccordé au réseau (1 j. - INESPFE)
- Déc. 2021 : Réseaux électriques : introduction - mix énergétique - stabilité et marchés de l'énergie (1.5 j. - INPG)

- **Distinctions**

Lauréat de 2 prix au Hackathon CO2 Industrie Renault : 3ième prix du jury + Prix de l'innovation pour l'équipe AdjustAir auquel j'ai contribué et formée pour l'occasion avec 2 Experts techniques énergie et santé au travail de Bureau Veritas, le CEO de la Start-Up Istya spécialisée en métrologie de la qualité de l'air et d'un étudiant de MinesParisTech.

- Membre invité à une soutenance de thèse

Membre invité à la soutenance de thèse de Yacine Aït Ouméziane portant sur « Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique : Application aux parois en béton de chanvre. » Mars 2013

- Autres thématiques de recherches abordées

Au cours de ces 14 années à l'INES, j'ai pu aborder de nombreux autres sujets en lien avec l'efficacité énergétique des bâtiments et la production d'énergie solaire : Le confort /QEI (47) et l'utilisateur au centre, data mining (48) (49).

## B.5 Curriculum Vitae Court

### SUMMARY OF QUALIFICATIONS

- 20 years experience as an engineer in building science and building energy efficiency, computational fluid dynamics, thermal transfer, NZEB
- Technical skills: modelling (CFD : Ansys-Fluent), testing and building monitoring, energy performance gap, fluid mechanics, thermal transfer, Data treatment (Python)
- Project and team management
- Instructor: Ansys-Fluent

### PROFESSIONAL EXPERIENCE

#### Research Engineer in Building Energy Efficiency, CEA at INES

July 2009 –

Le Bourget du Lac - France

- Participation in a range of research projects linked to [building energy efficiency, reliability of simulations and project proposal set up](#) (Europe (FP7, H2020, LIFE), France), including:
- Contribution to national project REHA-PARCS dealing with Interactive decision-making for [building stock retrofitting](#): Multi-objective optimisation, building stock modelling
- Contribution to a national project to improve and standardize existing methods to evaluate the building envelop performance through dynamic method – Experimental set up, data treatment ([Python](#)), [energy performance gap](#) analysis.
- Management of a research project for a French cement industry (Project budget +€2M, 10-member team). Three topics analysed using modelling, experiments and demonstration:
  - Evaluate [thermal inertia in residential buildings](#) (Simulation EnergyPlus, Matlab,
  - Develop innovative components coupling PV (photovoltaic) panels and concrete
  - Characterize thermal and hydric transfer of [hemp concrete](#)

#### Head of the Building Energy Management Laboratory, Alternative and Atomic Energy Centre (CEA) at the French Institute for Solar Energy (INES)

January 2014 – December 2018

Le Bourget du Lac - France

- **Team management** (six engineers/scientists, two technicians and four PhD students): meeting facilitation, workload dispatch, reporting, project portfolio follow up (~20 ongoing projects), project proposal set up
- **Lab topics**: control strategy, performance guarantee, design optimization, inform and advise users and energy manager, indoor air quality, ventilation
- **Lab tools**: monitoring (4 experimental houses and more than 40 demonstrator buildings, semi-virtual test benches), modelling (EnergyPlus, Matlab, Python, Fluent, WUFI, TRNSYS)

- **Scale:** from single component to district

### Computational Fluid Dynamic (CFD) Engineer, **ANSYS Fluent**

February 2004 – July 2009

Montigny-Le-Bretonneux - France.

- Technical support (hotline) for **Fluent** and Gambit software
- Consultant on **CFD** projects
- Instructor (Gambit and Fluent)

### Research Engineer Internship, McMaster University

February 2003 – August 2003 (six months)

Hamilton (ON) - Canada

- Adaptation, testing of a DNS wavelet code (Fortran90) from 2D to 3D to simulate turbulent flows, and improvement of a post-processing program (Matlab)

### Research Engineer Internship, UMIST

June 2002 – August 2002 (three months)

Manchester - United Kingdom

- CFD for Land Rover simulating the impact of sunroof parameters on airflow in a car

### EDUCATION

Sept. 2011 Training in IR thermography for buildings at *Institut de la thermographie*

Oct. 2010 Training in building and blower door air leakage testing

### Ecole MATMECA

Bordeaux - France

Graduate engineering school in mathematics and mechanics modelling.

**June 2003** Masters degree in Mechanics, with honours

**June 2002** Bachelors degree in Engineering Mathematics

## B.6 Production scientifique : Liste classée des publications

### B.6.1 Publications dans des revues internationales à comité de lecture (A)

- i. **Jay A**, Brun A, Pacquaut A, Maréchal P, Bernaud P, Wurtz E. Impact of bioclimatism and passive solutions on thermal performance: Feedback from an experimental wood-concrete house in a Mediterranean climate. *Build Environ.* 2023 Aug;110757.
- ii. Campagna K, **Jay A**, Pacquaut A, Juricic S. Co-cooling, simulation-based exploration of a new method to measure the Heat Transfer Coefficient of a building envelope in hot climate and summer period. *Journal of Building Performance Simulation [Internet]*. 2024 Apr 10 [cited 2024 Mar 14]; Available from: 10.1080/19401493.2024.2338767
- iii. Truchet S, **Jay A**, Wurtz E, Anger J, Brun A, Bernaud P. Impact of thermal inertia coupled to natural night ventilation. A case study for a high performance building in continental climate. *Int J Vent.* 2023 Mar 20;1–14.
- iv. Piot A, Béjat T, **Jay A**, Bessette L, Wurtz E, Barnes-Davin L. Study of a hempcrete wall exposed to outdoor climate: Effects of the coating. *Constr Build Mater.* 2017 May;139:540–50.
- v. Merlet Y, Rouchier S, **Jay A**, Cellier N, Woloszyn M. Integration of phasing on multi-objective optimization of building stock energy retrofit. *Energy Build.* 2022 Feb;257:111776.

- 
- vi. Spitz C, Mora L, Wurtz E, **Jay A**. Practical application of uncertainty analysis and sensitivity analysis on an experimental house. *Energy Build.* 2012 Dec;55:459–70.
  - vii. Juricic S, Rabouille M, Challansonnex A, **Jay A**, Thebault S, Rouchier S, et al. The Sereine test: Advances towards short and reproducible measurements of a whole building heat transfer coefficient. *Energy & Buildings* [Internet]. Volume 299. 2023; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113585>
  - viii. Juricic S, Goffart J, Rouchier S, **Jay A**, Oberlé P. Design of a short perturbation method for on-site estimation of a building envelope thermal performance. *Energy & Buildings* [Internet]. 2022 May; Available from: [10.1016/j.enbuild.2022.112211](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112211)
  - ix. Fouquier A, Robert S, Suard F, Stéphan L, **Jay A**. State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review. *Renew Sustain Energy Rev.* 2013 Jul;23:272–88.
  - x. Tsanakas JA, Lokhat I, **Jay A**, Gregoire C, Schnierer B, Rusnak J, et al. State-of-Play and Emerging Challenges in Photovoltaic Energy Yield Simulations: A Multi-Case Multi-Model Benchmarking Study. *Sol RRL.* 2022 Nov 15;2200582.

Under review:

- xi. **Jay A**, Campagna K, Pacquaut A, Juricic S, Challansonnex A. Extending the validity of co-heating tests to warmer and sunnier weather conditions using an equivalent exterior temperature. PrePrint under review [Internet]. 2024; Available from: [10.13140/RG.2.2.22404.33927](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22404.33927)

### B.6.2 Chapitre de livre et Livre

Contribution au livre de Bruno Peuportier. Livre blanc sur les recherches en énergétique des bâtiments. Presses des MINES, pp.238, 2013

### B.6.3 Publications dans des congrès internationaux avec comité de lecture et actes (B)

- i. **Jay A**, Brun A, Leroux G, Joubert P. BIPV cooling with natural convection. Numerical Model and experimental campaign comparison. 27th Eur Photovolt Sol Energy Conf EU PVSEC - Frankf. 2012;
- ii. **Jay A**, Clerc S, Boillot B, Bontemps A, Jay F. Use of Phase Change Material in Order to Maintain the Temperature of Integrated PV Modules at a Reasonable Level. 25th Eur Photovolt Sol Energy Conf Exhib 5th World Conf Photovolt Energy Convers. 2010;4125–8.
- iii. Assoa B, Guiot T, Gaillard L, Boillot B, Ménézo C, **Jay A**. A validated model to predict the thermal and electrical performance of residential rooftop BIPV systems. 27th Eur Photovolt Sol Energy Conf EU PVSEC - Frankf. 2012 Sep;
- iv. Tsanakas JA, Lokhat I, **Jay A**, Gregoire C, Schnierer B, Rusnak J, et al. State-of-play and emerging challenges in PV energy yield simulations: A multi-case multi-model benchmarking study. WCPEC-8 39th EU PVSEC - Milan. 2022 Sep;
- v. Brangeon B, Pons M, Bastide A, Wurtz E, Stéphan L, Goffaux C, et al. The test case ADNBTI, a benchmark on natural ventilation in a room. Conf Fifth Int Conf Adv Comput Methods Eng ACOMEN 2011. 2011 Nov;
- vi. Piot A, **Jay A**, Barnes-Davin L, Rogat D, Wurtz E. Observation of the energy exchanged by a concrete slab submitted to solar radiation in winter: small scale experimentation. CLIMA 2016 - Proc 12th REHVA World Congr. 2016;2.

- 
- vii. Lagesse A, Barthelme AF, **Jay A**, Wurtz E. Impact of thermal mass on summer comfort in building: A numerical approach leading to a decision support tool. BS 2013 13th Conf Int Build Conf BS2013 - Chambéry. 2013;
  - viii. Bejat T, Jay A, Lagesse A, Piot A. Hygrothermal behavior of a hemp concrete wall: experimental and numerical approach. BS 2013 13th Conf Int Build Conf BS2013 - Chambéry. 2013;
  - ix. Piot A, Bejat T, **Jay A**, Bessette L. Hygrothermal behavior of a hemp concrete wall: experimental and numerical study of coating. ICBBM 2015 Proc 1st Int Conf Bio-Based Build Mater Clermont-Ferrand Fr. 2015 Jun;
  - x. Bejat T, Piot A, **Jay A**, Bessette L. Study of Two Hemp Concrete Walls in Real Weather Conditions. Energy Procedia. 2015 Nov;78:1605–10.
  - xi. Merlet Y, Rouchier S, Jay A, Woloszyn M. Elaboration of the decision space for an optimization of building retrofit. Int Build Phys Conf Sep 2018 Syracuse U S. 2018;
  - xii. Stefanoiu AM, Woloszyn M, **Jay A**, Wurtz E, Buhé C. A Methodology to Assess the Ambient Temperature of a Building using a Limited Number of Sensors. Energy Procedia. 2015 Nov;78:1944–9.
  - xiii. Stefanoiu AM, Gondian L, Schneuwly P, Buhé C, Woloszyn M, **Jay A**. How To Assess Energy Performance of an Occupied Building ? BS 2017 15th Conf Int Build Conf - San Franc. 2017;
  - xiv. Pacquaut A, Rouchier S, **Jay A**, Challansonnex A, Juricic S, Wurtz E. Numerical test bench to evaluate the influence of heat gains on the estimation of Heat Transfer Coefficient under occupied conditions. In: Journal of Physics: Conference Series,. Aalborg, Denmark; 2023.
  - xv. **Jay A**, Fares H, Rabouille M, Oberle P, Thebault S, Challansonnex A, et al. Evaluation of the intrinsic thermal performance of an envelope in the summer period. J Phys Conf Ser. 2021 Nov 1;2069(1):012093.
  - xvi. Faure G, Juricic S, Rabouille M, Rouchier S, Challansonnex A, **Jay A**. Towards automated stochastic Grey-Box Model Calibration for Heat Transfer Coefficient Inference. In: Journal of Physics: Conference Series. Aalborg, Denmark; 2023.
  - xvii. **Jay A**, Brun A, Thébault S. Dynamic infiltration airflow rate measurement thanks to tracer gas method : a case study at a dwelling scale. 15th ROOMVENT Conf - 2020 - Torino. 2020;
  - xviii. **Jay A**, Tanchou M, Fares H. Evaluation of the intrinsic thermal performance of an envelope in hot period. Outdoor experiment at a 40m3 test cell. CLIMA 2022 - Rotterdam. 2022 May;
  - xix. Gouy-Pailler C, Najmeddine H, Mouraud A, Suard F, Spitz C, **Jay A**, et al. Distance and similarity measures for sensors selection in heavily instrumented buildings: application to the INCAS platform. Conf CIB 2011. 2011;

#### B.6.4 Conférences Nationales

- i. Leroux G, Brun A, **Jay A**, Joubert P. Rafraîchissement de panneaux photovoltaïques intégrés en toiture par convection naturelle. Modélisation et comparaison avec des campagnes expérimentales. Conf IBPSA 2012 Chambéry. 2012;
- ii. **Jay A**, Clerc S, Boillot B, Bontemps A, Jay F. Utilisation de matériaux à changement de phase pour réduire la température de panneaux PV intégrés au bâti. Conférence IBPSA Fr 2010. 2010;
- iii. Stéphan L, Wurtz E, Bastide A, Brangeon B, **Jay A**, Goffaux C, et al. Benchmark de ventilation naturelle traversante (ADNBATI). Conf IBPSA Fr 2010. 2010 Jan;
- iv. Pons M, Bastide A, Brangeon B, Wurtz E, Stéphan L, **Jay A**, et al. Ventilation nocturne traversante, le cas-test numérique ADNBATI. Conf XXXe Rencontres AUGC-IBPSA. 2012;

- 
- v. Pons M, Bastide A, Brangeon B, Stéphan L, Wurtz E, **Jay A**, et al. Le cas-test ADNBATI, un benchmark sur la ventilation naturelle dans une pièce d'habitation. Conf Congrès Français Therm. 2012 May;
  - vi. Piot A, **Jay A**. Évaluation du taux de renouvellement d'air sous un bardage ventilé à l'aide de calculs hygrothermiques et de mesures. Conf IBPSA Fr 2022. 2022 May;
  - vii. Merlet Y, Rouchier S, **Jay A**, Woloszyn M. Couplage de l'optimisation multi-objectif avec la simulation thermique dynamique pour la rénovation de parcs de bâtiments. Conférence IBPSA Fr 2018 [Internet]. 2018 May; Available from: <https://hal.univ-smb.fr/hal-01824244>
  - viii. Stefanoiu AM, Woloszyn M, Wurtz E, **Jay A**. Comparaison mesures – simulations et analyse de sensibilité. Conf IBPSA Fr 2014 - Arras. 2014;
  - ix. Stefanoiu AM, Woloszyn M, Wurtz E, **Jay A**, Buhé C, Gondian L, et al. Comparison between the design phase and the real behavioral measurements of an Energy Efficient Building. Conf IBPSA Fr 2016. 2016;
  - x. Fares H, **Jay A**, Anger J, Thébault S, Rabouille M, Oberlé P, et al. Mesure de la performance thermique d'une enveloppe en période estivale. In Virtuelle; 2020.
  - xi. Tanchou M, Jay A, Fares H. Evaluation de la performance thermique d'une enveloppe en période estivale. Test sur une cellule expérimentale en conditions extérieures. In Reims; 2022.
  - xii. Anger J, Brun A, **Jay A**, Lamonerie T, Leconte A, Ouvrier-Bonnaz O, et al. Industrialisation de la rénovation via la méthode ES'OPE : Apports de la simulation et retour d'expérience sur une maison INCAS. Conf IBPSA Fr 2022. 2022 May;
  - xiii. Francois E, Piot A, Wurtz E, **Jay A**. Evaluation du confort d'été dans les bâtiments (cas réels) : discussion sur la mesure d'un indicateur degrés-heures. Conf IBPSA Fr 2022. 2022 May;
  - xiv. Najmeddine H, Suard F, **Jay A**, Marechal P, Robert S. Mesures de similarité pour l'aide à l'analyse des données énergétiques de bâtiments. Conf RFIA 2012 Reconnaiss Formes Intell Artif. 2012;

#### B.6.5 Workshop, Colloques, Séminaires, Conférences

- I. Organisation & co-chairman d'une Session à Advanced Building Skin 2017 à Bern
  - i. **Jay A**, Barnes-Davin L, Wurtz E. Concrete as a multi-functional material serving Building energy efficiency, thermal comfort and recyclability. 5 years of collaboration between VICAT and CEA – INES. 17th Advanced Building Skins Conferenc presented at; 2017 Oct; Bern - Suisse.
  - ii. **Jay A**. Exploitation of thermal inertia in detached houses: Summer comfort. 17th Advanced Building Skins Conferenc presented at; 2017 Oct; Bern - Suisse.
  - iii. **Jay A**. Exploitation of thermal inertia in detached houses: Winter evaluation. 17th Advanced Building Skins Conferenc presented at; 2017 Oct; Bern - Suisse..
- II. Organisation & co-chairman d'une Session à AIVC2023, Aalborg Univ. Copenhagen, intitulée « Summer comfort and energy efficiency in hot periods: interest of mixed mode cooling and need of occupant feedback”
  - iv. **Jay A**, Bernaud P, ALESSI F. An IAQ and thermal comfort coach prototype to improve comfort and energy consumption thanks to adequate management of natural ventilation: development and first feedback results. In: Ventilation, IEQ and health in sustainable buildings. Aalborg University, Copenhagen, Denmark; 2023. p. 122–3.
  - v. **Jay A**, Foucquier A, Boulinguez M, Haese G, Thebault S, Chantepie V, et al. Towards an alternative cooling: Optimisation of the successive use of the cooling systems from passive to active - Development of design and control strategies of the hybrid

---

cooling. In: Ventilation, IEQ and health in sustainable buildings. Aalborg University, Copenhagen, Denmark; 2023. p. 124–33.

III. Invité au webinaire Venticool intitulé “Window opening behaviour

vi. Invité à la table ronde : “Focus on the technologies for achieving nearly zero energy and climate resilient buildings”. LIFE Platform Meeting on Climate Action and the Building Sector, Brussels, Tuesday, 18 June 2019.

#### B.6.6 Information Scientifique & Technique et Vulgarisation

Conférence invité « Enjeux énergétiques et environnementaux du secteur du bâtiment pour le futur proche » au Colloque Science et architecture 30 mars 2021 pour la maison de la science à l’université de Clermont-Ferrand

#### B.6.7 Liste Complète

La liste complète des publications scientifiques auxquelles j’ai contribué est listé au début de la section références



# Annexe C Annexe du Chapitre 1

## C.1 Définition du cas d'étude et du plan d'expérience numérique

### La géométrie

La géométrie retenue est basée une maison INCAS. Sa conception a été optimisée afin de maximiser les apports solaires en hiver tout en essayant de limiter l'inconfort d'été ; De plus, plusieurs comparaisons mesures / simulations ont été réalisés

- **Caractéristiques architecturales**



Figure C-1 : Photo de la maison I-BB

### **Côtes intérieures**

RDC : 6.50 x 7.50 x 2.5 m ht.

Etage : 6.50 x 7.50 x 2.5 m ht.

Les hauteurs sous plafond sont calculées entre la face supérieure du plancher bas et la face inférieure du plancher haut. Etant donné l'usage d'habitation du bâtiment, aucun faux-plafond au RDC ou à l'étage n'a été pris en considération.

### **Surface habitable**

La surface habitable de la maison est de 97.50m<sup>2</sup> SHAB.

Tableau C-0-1- Surfaces d'échanges (murs et planchers)

| Murs  | Orientation Nord    | Orientation Est     | Orientation Sud     | Orientation Ouest   | Total                |
|-------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| RDC   | 19.0 m <sup>2</sup> | 16.4 m <sup>2</sup> | 10.0 m <sup>2</sup> | 14.1 m <sup>2</sup> | 59.5 m <sup>2</sup>  |
| R+1   | 18.5m <sup>2</sup>  | 15.3 m <sup>2</sup> | 13.1 m <sup>2</sup> | 14.4 m <sup>2</sup> | 61.3 m <sup>2</sup>  |
| Total | 37.5 m <sup>2</sup> | 31.7 m <sup>2</sup> | 23.1 m <sup>2</sup> | 28.5 m <sup>2</sup> | 120.8 m <sup>2</sup> |

La surface des dalles RDC et R+1 est de 48.7m<sup>2</sup>



Tableau C-0-2 - Surfaces d'échanges (parois vitrées)

| Murs  | Orientation Nord    | Orientation Est     | Orientation Sud     | Orientation Ouest  | Total               |
|-------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| RDC   | 0.84 m <sup>2</sup> | 0.84 m <sup>2</sup> | 9.9 m <sup>2</sup>  | 3.1 m <sup>2</sup> | 14.7 m <sup>2</sup> |
| R+1   | 0.63 m <sup>2</sup> | 1.3 m <sup>2</sup>  | 6.0 m <sup>2</sup>  | 2.1 m <sup>2</sup> | 10.1 m <sup>2</sup> |
| Total | 1.5 m <sup>2</sup>  | 2.1 m <sup>2</sup>  | 15.9 m <sup>2</sup> | 5.2 m <sup>2</sup> | 24.7 m <sup>2</sup> |

### Aménagements intérieurs

La maison est composée de deux niveaux :

- Un niveau rez-de-chaussée, où se trouvent les espaces de vie diurne (salon, salle à manger, cuisine)
- Un niveau R+1 où se trouvent les espaces de vie nocturne (trois chambres, salle de bain, WC).

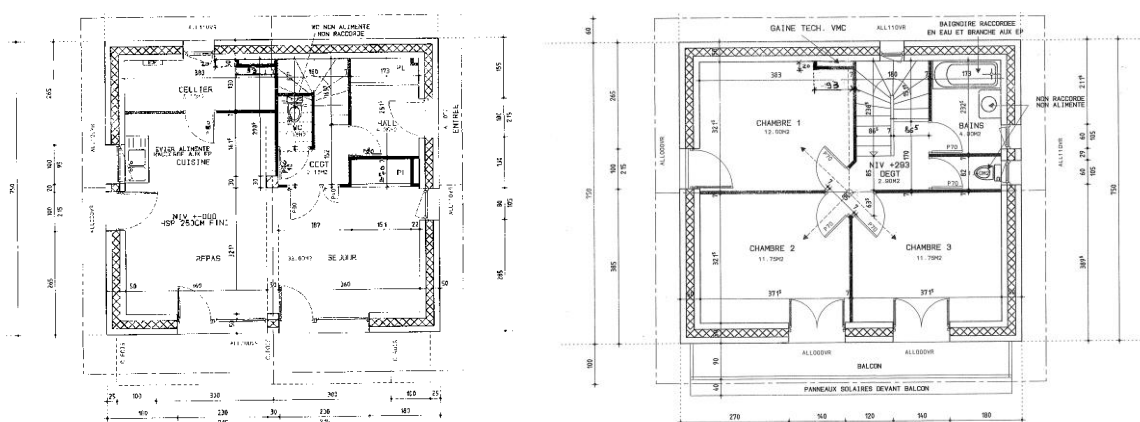


Figure C-2 : Plans de la Maison I-DM (RDC à gauche, 1<sup>er</sup> étage à droite)

Le niveau R+1 est bordé d'un balcon en façade Sud, de dimensions 7.50m x 1.30m ; Il permet de limiter les apports solaires en été.

La maison dispose également d'un vide sanitaire de 80cm de hauteur et de combles non chauffés.

### Géométrie et disposition des surfaces vitrées

Les figures ci-après montrent une vue 3D du modèle d'étude réalisée sous le logiciel Google Sketchup ; les caractéristiques géométriques des surfaces vitrées sont décrites par la suite.

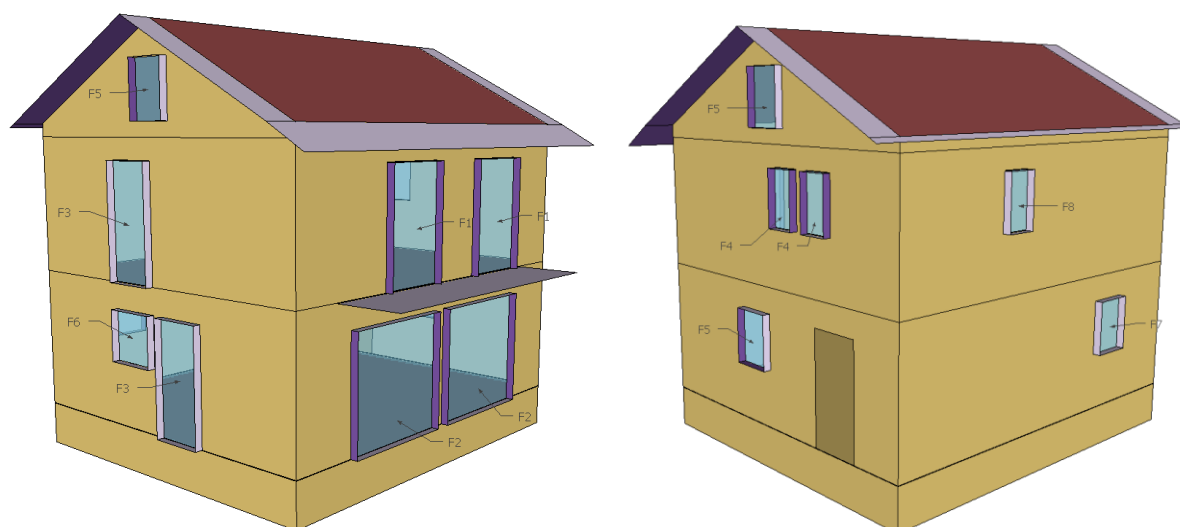


Figure C-3 : Vue 3D du modèle d'étude de la maison INCAS (Façades Sud et Ouest)

Figure C-4 : Vue 3D du modèle d'étude de la maison INCAS (Façades Nord et Est)

Détails concernant la géométrie des fenêtres :

Tableau C-0-3 - Détails de la géométrie des fenêtres

| Désignation de la fenêtre        | F1   | F2   | F3   | F4   | F5   | F6   | F7   | F8   |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Nombre d'éléments                | 2    | 2    | 2    | 2    | 3    | 1    | 1    | 1    |
| Hauteur (m)                      | 2,15 | 2,15 | 2,15 | 1,05 | 1,05 | 9,5  | 1,05 | 1,05 |
| Largeur (m)                      | 1,4  | 2,3  | 1    | 0,6  | 0,8  | 1    | 0,8  | 0,6  |
| Surface vitrée (m <sup>2</sup> ) | 3,01 | 4,95 | 2,15 | 0,63 | 0,84 | 0,95 | 0,84 | 0,63 |
| Surface totale (m <sup>2</sup> ) | 6,02 | 9,9  | 4,3  | 1,26 | 1,68 | 0,95 | 0,84 | 0,63 |

### Masques

Les masques proches de type végétation, bâtiments voisins, etc. ont été négligés. Les masques intégrés à la construction (débords de fenêtres, balcon et débords de toit) ont quant à eux été considérés.

Les menuiseries sont considérées en retrait de 20cm par rapport à la face externe des parois. Pour cela, des casquettes horizontales (linteaux, appuis) et verticales (tableaux) ont été modélisées (représentées en violet sur la Figure C-3 et la Figure C-4).

Les portes fenêtres du RDC (façade sud) sont surmontées par un balcon, situé à hauteur de la face supérieure de la dalle du plancher bas de l'étage. Le débord équivalent du balcon est modélisé par une casquette de 1m.

De même, les masques engendrés par la toiture ont été modélisés en dimensions équivalentes.

### Infiltrations

Le débit de renouvellement d'air dû aux infiltrations implémenté dans les modèles EnergyPlus est de 0,25 Vol/h.

Cette valeur se base sur le label BBC Effinergie qui impose une valeur limite de débit de renouvellement d'air dû aux infiltrations de  $I_4 \leq 0.6$  (m<sup>3</sup>/h)/m<sup>2</sup>. Nous avons donc considéré pour le calcul du débit d'infiltrations, un n50 de 2.5Vol/h.

Le calcul de renouvellement d'air est normalisé :

$$V_{\text{infiltrations}} = 2 \times n50 \times e \times \square$$

Avec :

- e, classe d'exposition au vent des maisons de valeur 0,05 (Site non abrité & espace chauffé à expositions multiples),
- , hauteur de l'espace chauffé au-dessus du sol de valeur 1 (Hauteur de l'espace chauffé comprise entre 0 et 10m).

- [Composition des parois](#)

Pour chaque type de paroi (verticale ou horizontale), différentes compositions sont proposées : différents matériaux, différentes épaisseurs ; Et de ce fait, une inertie plus ou moins grande. Le détail des parois est détaillée en Annexe C.1

### Parois vitrées

Les vitrages considérés dans le modèle de référence sont de type double vitrage dont les caractéristiques sont détaillées ci-dessous :

Tableau C-0-4 - Caractéristiques thermiques des fenêtres

|                           |         |
|---------------------------|---------|
| Désignation de la fenêtre | F1 à F8 |
| Type                      | Double  |

|                                 |      |
|---------------------------------|------|
| U fenêtre (W/m <sup>2</sup> /K) | 1.4  |
| g (facteur solaire fenêtre)     | 0.52 |

Le modèle de vitrage utilisé dans EnergyPlus est le « Simple Glazing System ». Sur la base du coefficient de transmission thermique U et du facteur solaire du vitrage réel, EnergyPlus génère un système vitré aux caractéristiques équivalentes. L'ensemble « menuiserie + vitrage » a été pris en compte pour le calcul des coefficients.

### Hypothèses de simulation

Le bâtiment a été modélisé via 4 zones thermiques, une par niveau : le vide sanitaire, le rez-de-chaussée, l'étage et les combles.

Deux scénarii d'occupation ont été modélisés : occupation continue et occupation intermittente. Les apports internes associés ont également été modélisés. Ces scénarii sont représentés sur les Figure C-5 et Figure C-6.

#### Occupation continue

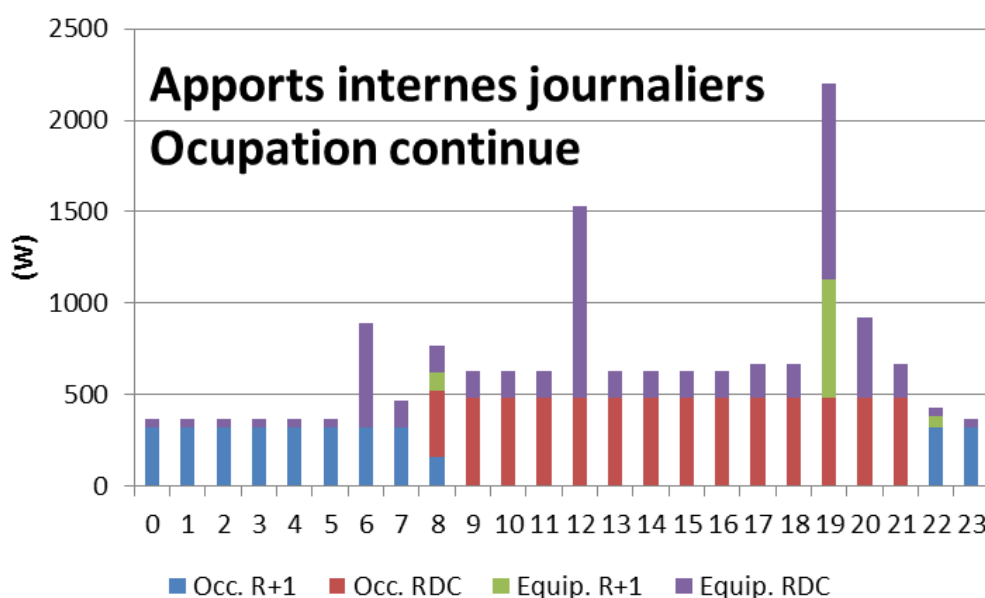


Figure C-5 : Appports internes journaliers en occupation continue

#### Occupation intermittente

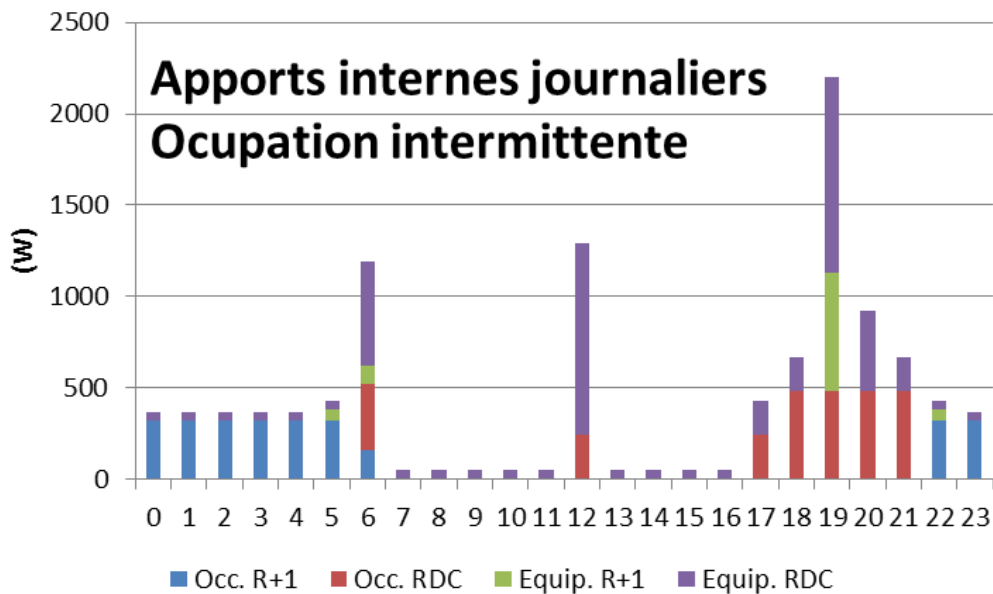


Figure C-6 : Apports internes journaliers en occupation intermittente

## Régulation

### Ventilation et sur-ventilation nocturne

Un système de ventilation double flux avec échangeur et by-pass est considéré dans le modèle de référence. Le débit nominal est de  $135\text{m}^3/\text{h}$ , réparti équitablement entre RDC et R+1 (soit  $67.5\text{m}^3/\text{h}$  dans chaque zone). Le rendement de l'échangeur est estimé à  $\eta = 80\%$ .

Le scénario échange / by-pass utilisé est le suivant (fournisseur Atlantic Duolix Max).

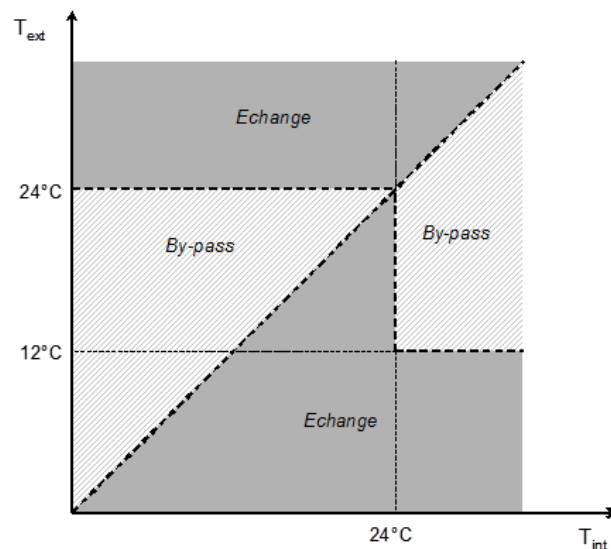


Figure C-7 : Fonctionnement VMC double Flux - ByPass

Ce scénario a été implémenté dans EnergyPlus sur la base d'un « Energy Management System », valable pour les zones occupées : rez-de-chaussée et étage.

5 variantes de débits de sur-ventilation nocturne ont été simulées : pas de sur-ventilation nocturne, 1, 3, 5 ou  $10\text{ Vol/h}$  de 20h à 7h sous certaines conditions de température.

### Volets roulants

Les scénarii d'ouverture/fermeture des volets envisagés, tiennent compte d'un comportement intelligent de l'occupant vis à vis de la prévention des surchauffes estivales par la fermeture quotidienne des volets roulants « critiques », i.e. orientés Est et Ouest. Les volets orientés Est et Ouest sont ainsi considérés fermés toute la journée.

Les scénarii de gestion des volets Nord et Sud proposés sont binaires : volets ouverts 24h/24 ou fermés 24h/24.

Caractéristiques des variantes des parois opaques

| Type de paroi          | Matériau             | Epaisseur (cm) | Conductivité (W/m/K) | Masse volumique (kg/m3) | Chaleur spécifique (J/kg/K) | Coefficient U (W/m²/K) |
|------------------------|----------------------|----------------|----------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------|
| <b>PAROIS OPAQUES</b>  |                      |                |                      |                         |                             |                        |
| Mur ext. Sans Inertie  | Enduit ext.          | 1.5            | 1                    | 1450                    | 500                         | 0.17                   |
|                        | Laine de Verre 0.035 | 20             | 0.035                | 12                      | 840                         |                        |
| Mur ext. Ossature Bois | Enduit ext.          | 1.5            | 1                    | 1450                    | 500                         | 0.17                   |
|                        | Laine de Verre 0.035 | 20             | 0.035                | 12                      | 840                         |                        |
|                        | OSB                  | 2.2            | 0.13                 | 640                     | 1700                        |                        |
| Mur ext. 1cm Béton     | Enduit ext.          | 1.5            | 1                    | 1450                    | 500                         | 0,17                   |
|                        | Laine de Verre 0.035 | 20             | 0.035                | 12                      | 840                         |                        |
|                        | Béton 1cm            | 1              | 2.5                  | 2500                    | 1000                        |                        |
| Mur ext. 3cm Béton     | Enduit ext.          | 1.5            | 1                    | 1450                    | 500                         | 0,17                   |
|                        | Laine de Verre 0.035 | 20             | 0.035                | 12                      | 840                         |                        |
|                        | Béton 3cm            | 3              | 2.5                  | 2500                    | 1000                        |                        |
| Mur ext. 5cm Béton     | Enduit ext.          | 1.5            | 1                    | 1450                    | 500                         | 0,17                   |
|                        | Laine de Verre 0.035 | 20             | 0.035                | 12                      | 840                         |                        |
|                        | Béton 5cm            | 5              | 2.5                  | 2500                    | 1000                        |                        |

|  |                      |     |       |      |      |      |
|--|----------------------|-----|-------|------|------|------|
| Mur ext. 10cm Béton  | Enduit ext.          | 1.5 | 1     | 1450 | 500  | 0,17 |
|  | Laine de Verre 0.035 | 20  | 0.035 | 12   | 840  |      |
|  | Béton 10cm           | 10  | 2.5   | 2500 | 1000 |      |
| Mur ext. 20cm Béton  | Enduit ext.          | 1.5 | 1     | 1450 | 500  | 0,17 |
|  | Laine de Verre 0.035 | 20  | 0.035 | 12   | 840  |      |
|  | Béton 20cm           | 20  | 2.5   | 2500 | 1000 |      |
| Mur ext. Parpaing  | Enduit ext.          | 1.5 | 1     | 1450 | 500  | 0,17 |
|  | Laine de Verre 0.035 | 20  | 0.035 | 12   | 840  |      |
|  | Parpaing             | 15  | 0.74  | 800  | 648  |      |
| Mur ext. Brique creuse                                     | Enduit ext.          | 1.5 | 1     | 1450 | 500  | 0,16 |
|  | Laine de Verre 0.035 | 20  | 0.035 | 12   | 840  |      |
|  | Brique creuse        | 20  | 0.4   | 675  | 660  |      |
| PLANCHERS BAS - PLANCHERS HAUTS – PLANCHERS INTERMEDIAIRES |                      |     |       |      |      |      |
| Plancher bas RDC ou haut R+1. Sans Inertie                 | Laine de Verre 0.035 | 20  | 0.035 | 12   | 840  | 0,18 |
| Plancher bas RDC ou haut R+1. Bois                         | Laine de Verre 0.035 | 20  | 0.035 | 12   | 840  | 0,17 |
|  | OSB                  | 2.2 | 0.13  | 640  | 1700 |      |
| Plancher bas RDC ou haut R+1. 1cm Béton                    | Laine de Verre 0.035 | 20  | 0.035 | 12   | 840  | 0,17 |
|  | Béton 1cm            | 1   | 2.5   | 2500 | 1000 |      |
| Plancher bas RDC ou haut R+1. 3cm Béton                    | Laine de Verre 0.035 | 20  | 0.035 | 12   | 840  | 0,17 |
|  | Béton 3cm            | 3   | 2.5   | 2500 | 1000 |      |

|  |   |     |       |      |      |      |
|--|---|-----|-------|------|------|------|
| Plancher bas RDC ou haut R+1. 5cm Béton  | Laine de Verre 0.035                              | 20  | 0.035 | 12   | 840  | 0,17 |
|  | Béton 5cm   | 5   | 2.5   | 2500 | 1000 |      |
| Plancher bas RDC ou haut R+1. 20cm Béton | Laine de Verre 0.035                              | 20  | 0.035 | 12   | 840  | 0,17 |
|  | Béton 20cm  | 20  | 2.5   | 2500 | 1000 |      |
| Plancher Intermédiaire. Bois             | OSB   | 2.2 | 0.13  | 640  | 1700 | -    |
| Plancher Intermédiaire. 1cm Béton        | Béton 1cm   | 1   | 2.5   | 2500 | 1000 | -    |
| Plancher Intermédiaire. 3cm Béton        | Béton 3cm   | 3   | 2.5   | 2500 | 1000 | -    |
| Plancher Intermédiaire. 5cm Béton        | Béton 5cm   | 5   | 2.5   | 2500 | 1000 | -    |
| Plancher Intermédiaire. 20cm Béton       | Béton 20cm  | 20  | 2.5   | 2500 | 1000 | -    |
| Toiture                                  | Tuiles  | 1.5 | 0.7   | 1700 | 1059 | -    |
|  | Charpente Bois                                    | 1   | 0.16  | 500  | 2400 |      |
| Porte                                    | Matériau sans masse – R = 0.8 m <sup>2</sup> .K/W |     |       |      |      |      |

## Débits de ventilation

Tableau C-0-5 - Débits de ventilation

| <i>Débits de sur-ventilation nocturne (Vol/h)</i> | <i>Débits équivalents (m<sup>3</sup>/s)</i> |
|---|---|
| 1   | 0.03403                                     |
| 3   | 0.10208                                     |
| 5   | 0.17014                                     |
| 10  | 0.34028                                     |

## Caractéristiques des volets roulants

Tableau C-0-6 - Caractéristiques des volets roulants

|                         |      |
|-------------------------|------|
| Facteur de transmission | 0,02 |
| Facteur de réflexion    | 0,66 |
| Emissivité              | 0,92 |

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| Epaisseur (m)           | 0,008 |
| Conductivité (W/(m.K))  | 0,17  |
| Distance du vitrage (m) | 0,03  |

### Météo des différents climats classique avant le jour caractéristique

La température de sol, qui caractérise également le lieu d’implantation, est calculée grâce à une fonctionnalité d’EnergyPlus. L’hypothèse formulée pour ce calcul concerne la composition du sol : nu et humide.

Les températures de sol mensuelles spécifiques au climat sont les suivantes :

Tableau C-0-7- températures de sol moyennes

| <i>Type de climat</i> | <i>Ville associée</i> | <i>Températures mensuelles de sol</i> |             |
|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------|-------------|
|                       |                       | <i>Juillet</i>                        | <i>Aout</i> |
| Continental           | Strasbourg            | 16.5°C                                | 15.8°C      |
| Semi-continental      | Cadarache             | 23.6°C                                | 22.1°C      |
| Océanique             | Nantes                | 18.2°C                                | 17.6°C      |
| Méditerranéen         | Nice                  | 23.2°C                                | 22.1°C      |



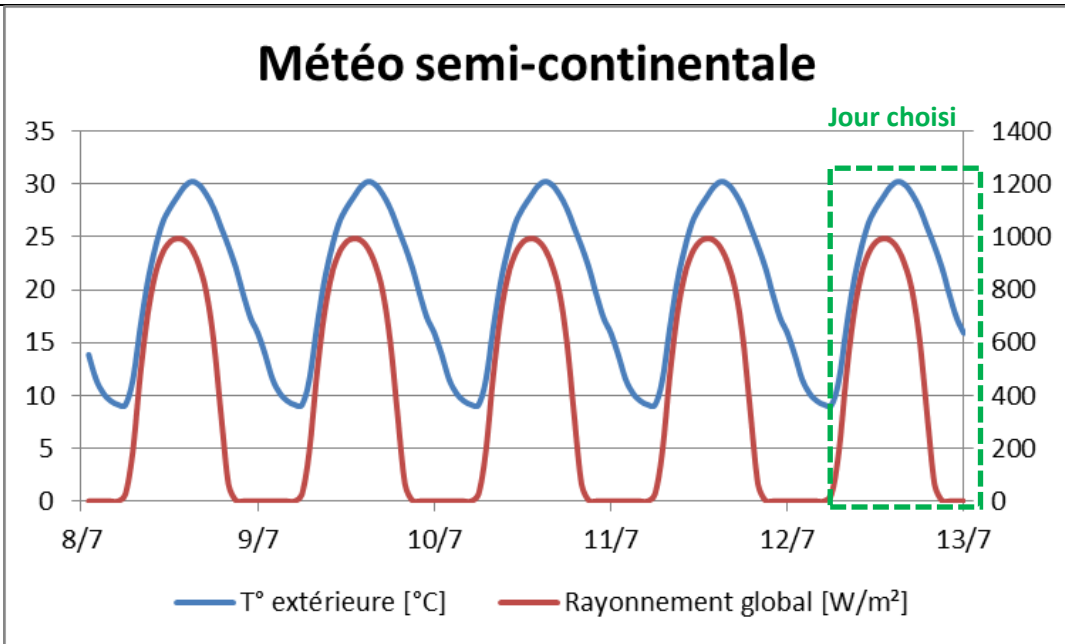


Figure C-8 : Météo semi-continentale - Zoom du 08 au 13/07

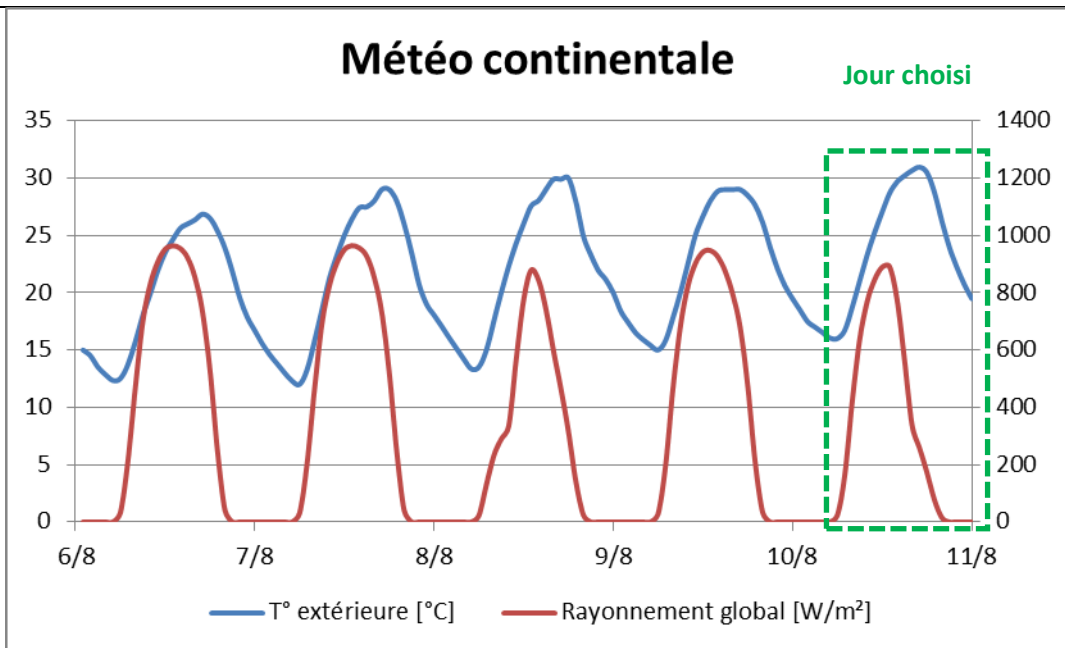


Figure C-9 : Météo continentale - Zoom du 06 au 11/08

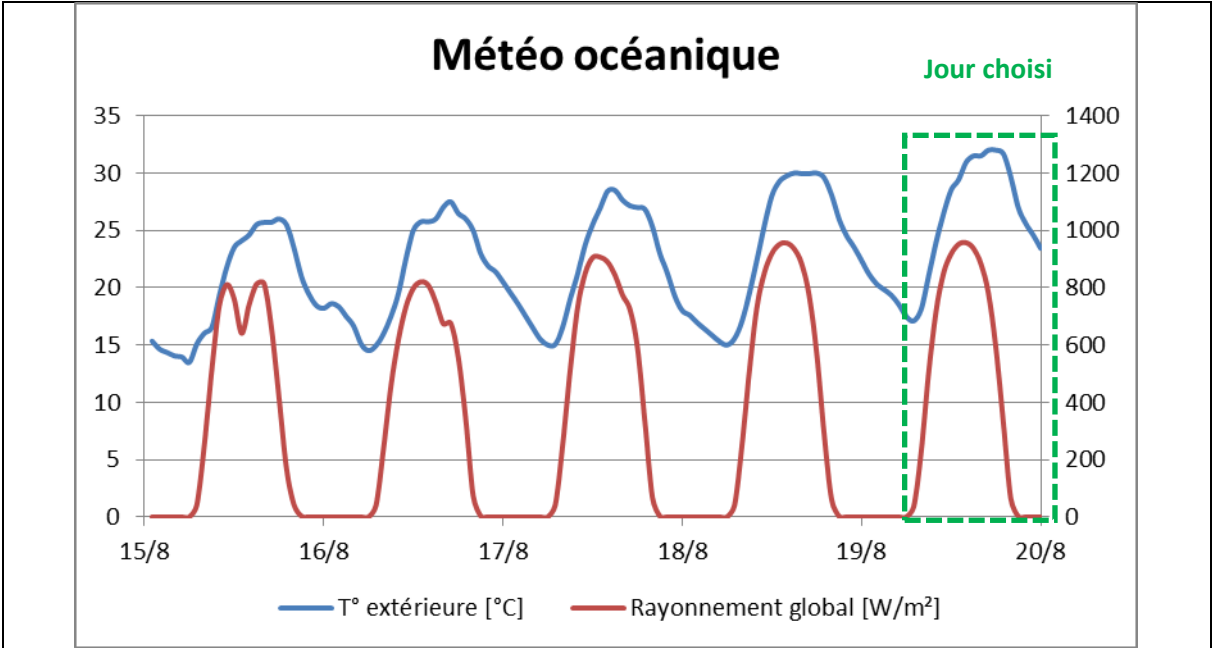


Figure C-10 : Climat océanique - Zoom du 15 au 20/08

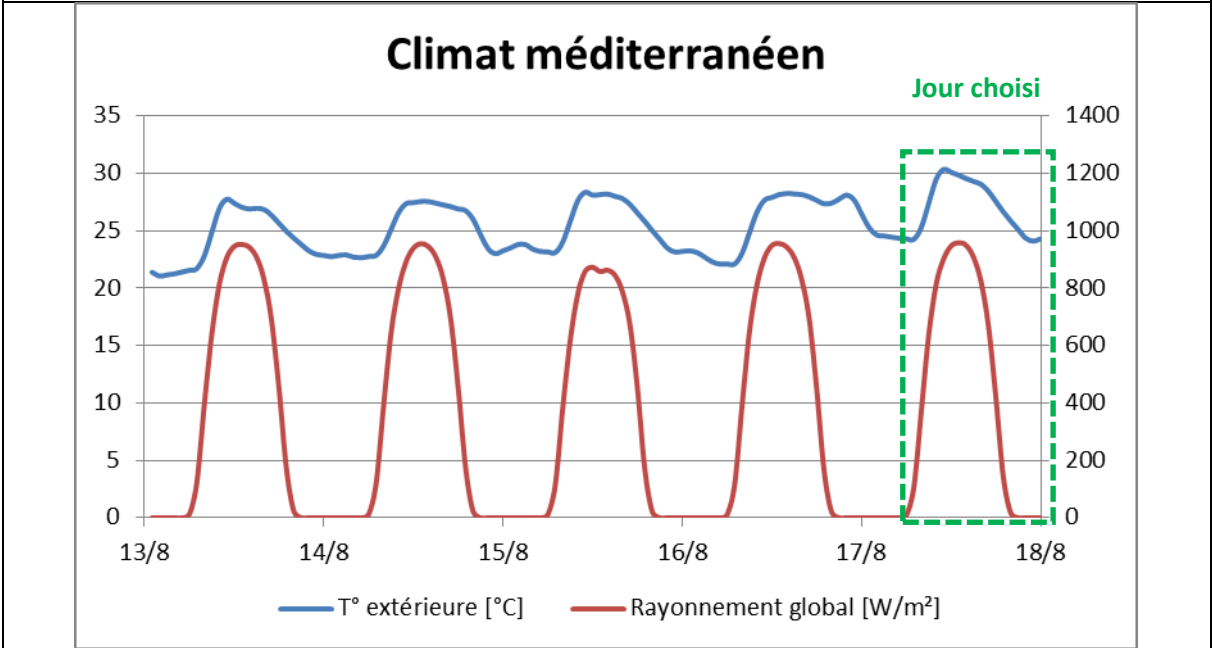


Figure C-11 : Climat méditerranéen - Zoom du 13 au 18/08

## C.2 Résultats - Inertie thermique et confort thermique estival

L'étude menée sur l'inertie thermique a permis de confirmer son impact positif sur l'amélioration du confort dans de nombreuses configurations. L'ajout de masse thermique est souvent synonyme de gain en confort thermique estival. Cette conclusion doit cependant être pondérée par plusieurs facteurs, notamment : le climat, la quantité et répartition de la masse, et la façon dont celle-ci est sollicitée. Dans ce paragraphe, l'influence de différents paramètres va être étudié.

### Gestion du bâtiment : Sur-ventilation nocturne

- Approche globale

L'inertie thermique permet l'amortissement et le déphasage des « vagues de chaleur » extérieures pour améliorer le confort en emmagasinant l'énergie dans sa masse aux heures les plus chaudes. Afin de rendre cette inertie plus efficace, il est nécessaire de faciliter son refroidissement : La masse pourra ainsi « se décharger » des calories emmagasinées dans la journée pour retrouver un état proche de son état initial (dans la mesure du possible). La sur-ventilation nocturne est pour ce faire un paramètre clé lorsque les températures nocturnes le permettent : i.e. températures extérieures plus fraîches que les températures de la masse thermique et de l'air intérieur.

L'ensemble des graphiques suivants montre l'impact de la sur-ventilation selon divers climats.

Quelle que soit l'inertie du bâtiment (forte, modérée ou faible), la mise en œuvre de sur-ventilation nocturne permet d'augmenter le confort ; Plus le débit de sur-ventilation nocturne est important, plus l'inconfort sera réduit (Figure 2-7).

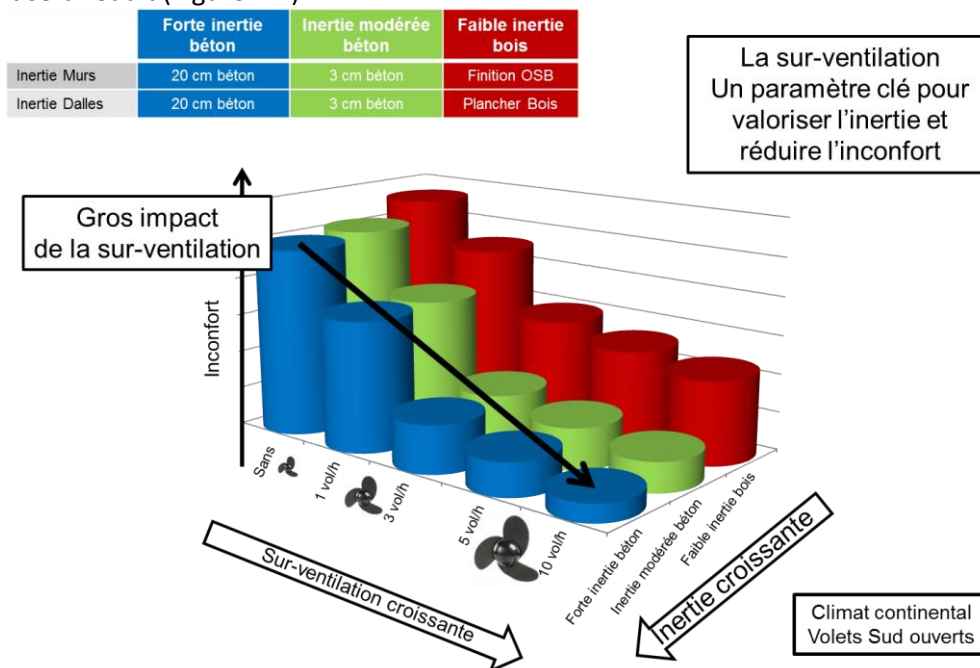


Figure C-12 : Impact de la sur-ventilation nocturne

- Analyse détaillée

Pour l'étude du paramètre « sur-ventilation nocturne » sur les post-traitements détaillés, les trois cas ci-dessous ont été testés en climat classique et caniculaire.

| CAS ETUDIÉS                      | Cas 1 | Cas 2     | Cas 3 |
|----------------------------------|-------|-----------|-------|
| <b>Composition des parois</b>    |       |           |       |
| Murs                             |       | 3cm béton |       |
| Planchers (RDC et intermédiaire) |       | 3cm béton |       |
| <b>Régulation</b>                |       |           |       |

|                            |               |         |         |
|----------------------------|---------------|---------|---------|
| Sur-ventilation nocturne   | Sans          | 1 Vol/h | 3 Vol/h |
| Volets roulants (Nord/Sud) | Ouverts       |         |         |
| Occupation                 | Intermittente |         |         |

Tableau C-0-8 : Configurations testées

- Impact sur le confort en climats classiques

Quel que soit le climat réel étudié (continental, semi-continental, océanique ou méditerranéen), la mise en œuvre de sur-ventilation nocturne permet d'abaisser la température intérieure tout au long de la journée de l'ordre de  $-1^{\circ}\text{C}/(\text{Vol}/\text{h})$  de sur-ventilation pour des débits compris entre 0 à 3Vol/h. Les Figure C-13, Figure C-14, et Figure C-15, issues de résultats de divers climats, illustrent bien cette conclusion ; On y observe une translation des courbes proportionnelle au taux de sur-ventilation nocturne mis en œuvre.

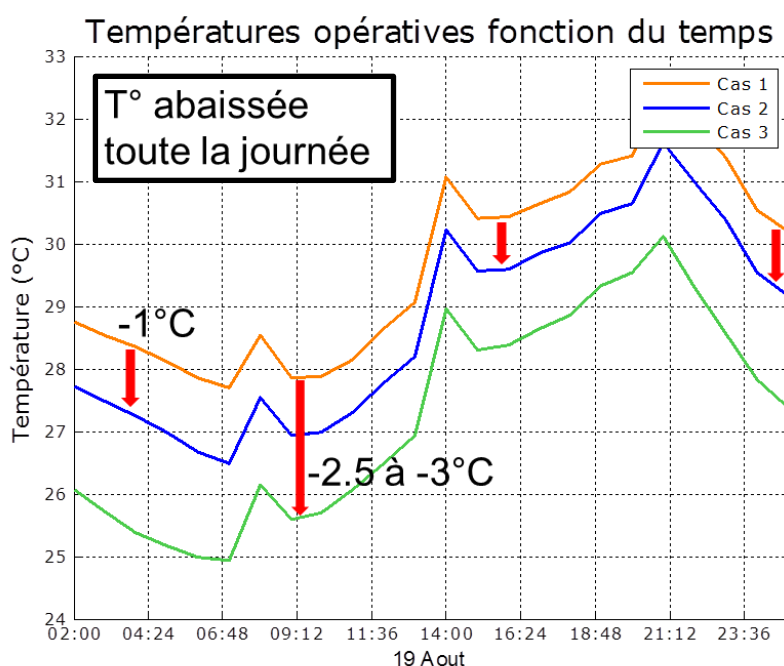


Figure C-13 : Evolution de températures opératives au cours d'une journée – Climat océanique.

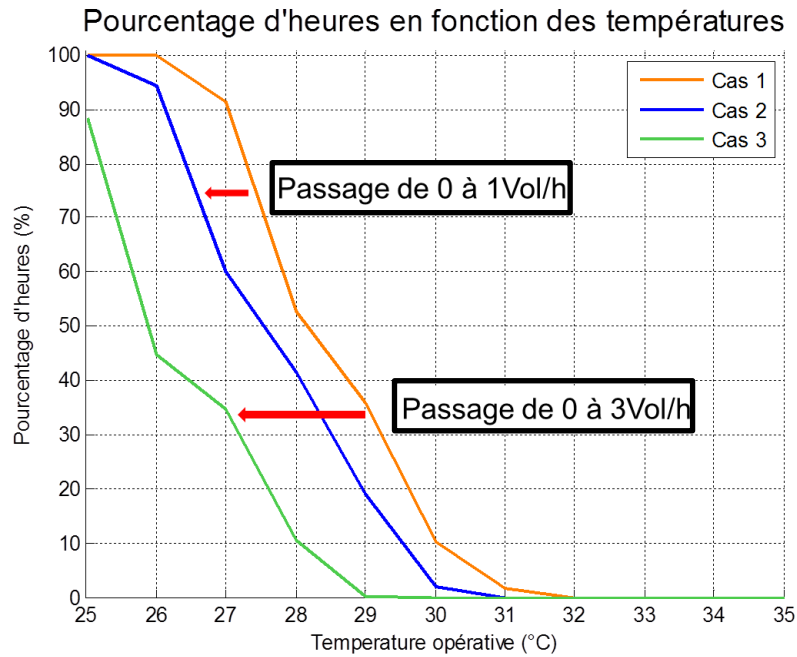


Figure C-14 : Pourcentages d’heures d’inconfort fonction de la température – Climat continental.

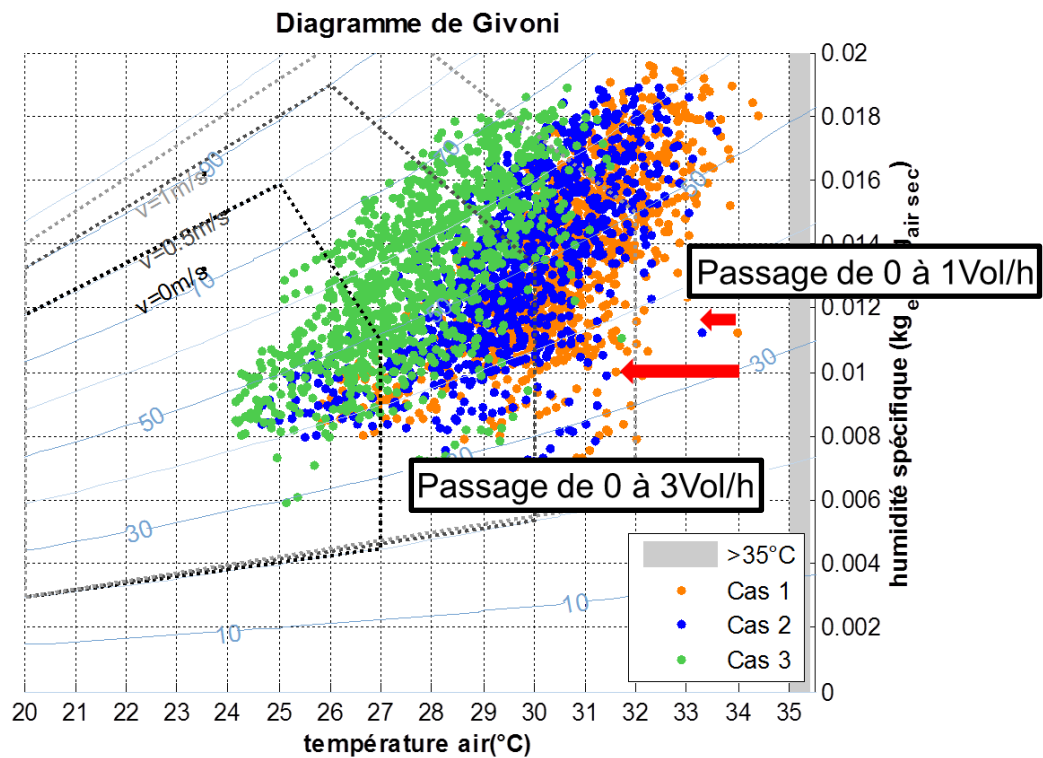


Figure C-15 : Diagramme de Givoni – Climat méditerranéen.

- Impact sur le confort en climat caniculaire

De même qu’en climat classique, en période de canicule, la sur-ventilation nocturne permet d’abaisser les températures de façon significative tout au long de la période de l’ordre de  $-1^{\circ}\text{C}$  sur les températures maximales par Vol/h de sur-ventilation pour des débits compris entre 0 à 3 Vol/h.

La Figure 2-9 illustre cette conclusion ; On y observe une translation des courbes de températures maximales et minimales, proportionnelle au taux de sur-ventilation nocturne mis en œuvre.

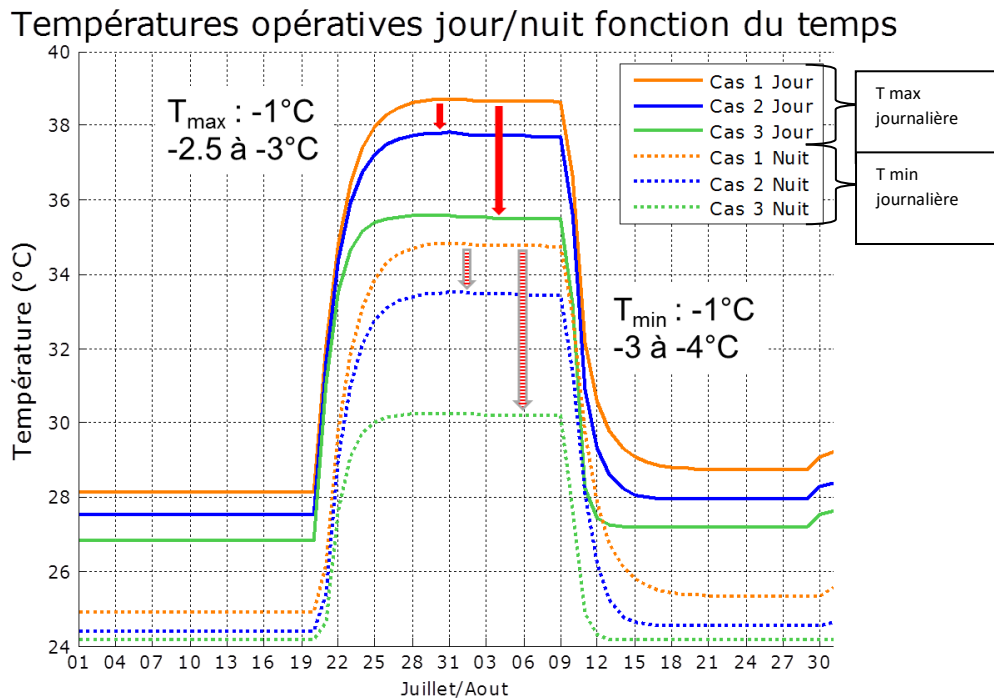


Figure C-16 : Evolution des températures (minimale et maximale) en période caniculaire

#### Gestion du bâtiment : Ouverture/Fermeture des volets roulants

- Analyse globale

De même que la sur-ventilation nocturne, une bonne gestion des volets roulants permettra de gagner en confort. La fermeture des volets roulants au Sud permet de diminuer les apports solaires à l'intérieur de la maison, non négligeables au mois d'août malgré les masques présents dans le modèle (balcon et débords de toiture).

La fermeture des volets roulants améliore ainsi le confort quelle que soit l'inertie du bâtiment. On peut cependant se rendre compte que la non fermeture des volets roulants (oubli de l'utilisateur, ou nécessité pour celui-ci d'avoir accès à la lumière naturelle) aura un impact beaucoup plus néfaste pour un bâtiment sans inertie que pour un bâtiment à forte inertie.

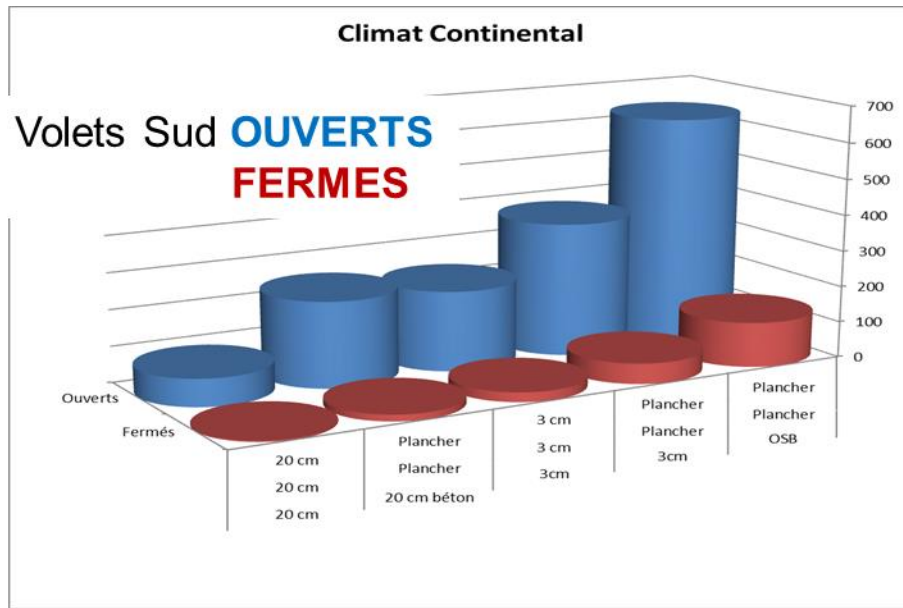


Figure C-17 : Impact de la non fermeture des volets roulants

- Analyse détaillée

Afin d'évaluer l'impact du paramètre « Ouverture/Fermeture des volets roulants », les deux cas ci-dessous ont été testés en climats classiques et caniculaire.

| CAS ETUDIÉS                      | Cas 1         | Cas 2  |
|----------------------------------|---------------|--------|
| <b>Composition des parois</b>    |               |        |
| Murs                             | 3cm béton     |        |
| Planchers (RDC et intermédiaire) | 3cm béton     |        |
| <b>Régulation</b>                |               |        |
| Sur-ventilation nocturne         | 3 Vol/h       |        |
| Volets roulants (Nord/Sud)       | Ouverts       | Fermés |
| <b>Occupation</b>                | Intermittente |        |

Tableau C-0-9 : Configurations testées

- Impact sur le confort en climats classiques

Quel que soit le climat classique étudié (continental, semi-continental, océanique ou méditerranéen), la fermeture des volets roulants permet d'abaisser la température intérieure jusqu'à -2°C la journée.

Les

Figure 2-11 et Figure 2-12, issues de résultats de divers climats, illustrent cette conclusion ; On y observe :

- Sur l'ensemble de la période estivale, une translation des courbes de 1 à 2°C (Figure 2-12),
- Pour une journée type (
- **Figure 2-11**), une baisse significative des surchauffes au plus chaud de la journée (après-midi).

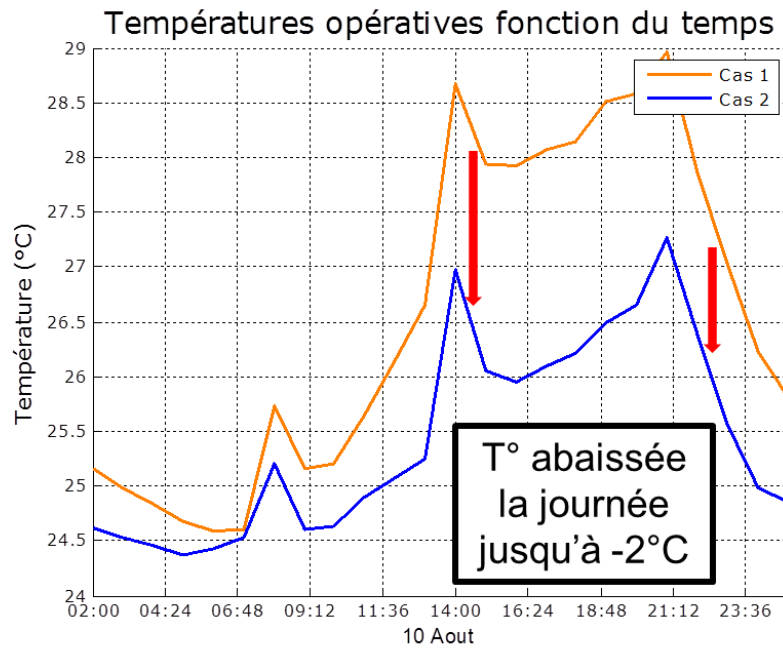


Figure C-18 : Evolution de températures opératives au cours d'une journée – Climat continental.

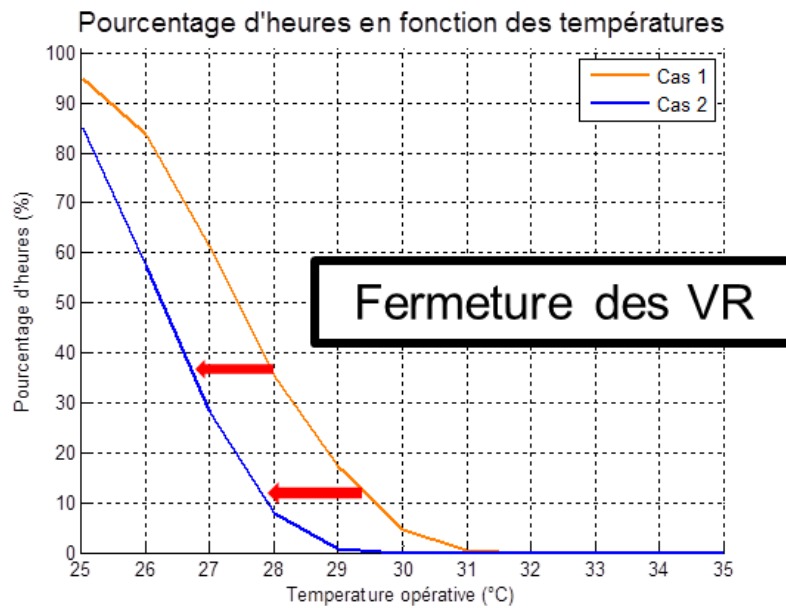


Figure C-19 : Pourcentages d'heures d'inconfort fonction de la température – Climat continental.

- Impact sur le confort en climat caniculaire

De même qu'en climat classique, fermer les volets roulants en période de canicule permettra de maîtriser les apports solaires et ainsi, d'abaisser les températures et de limiter les surchauffes.



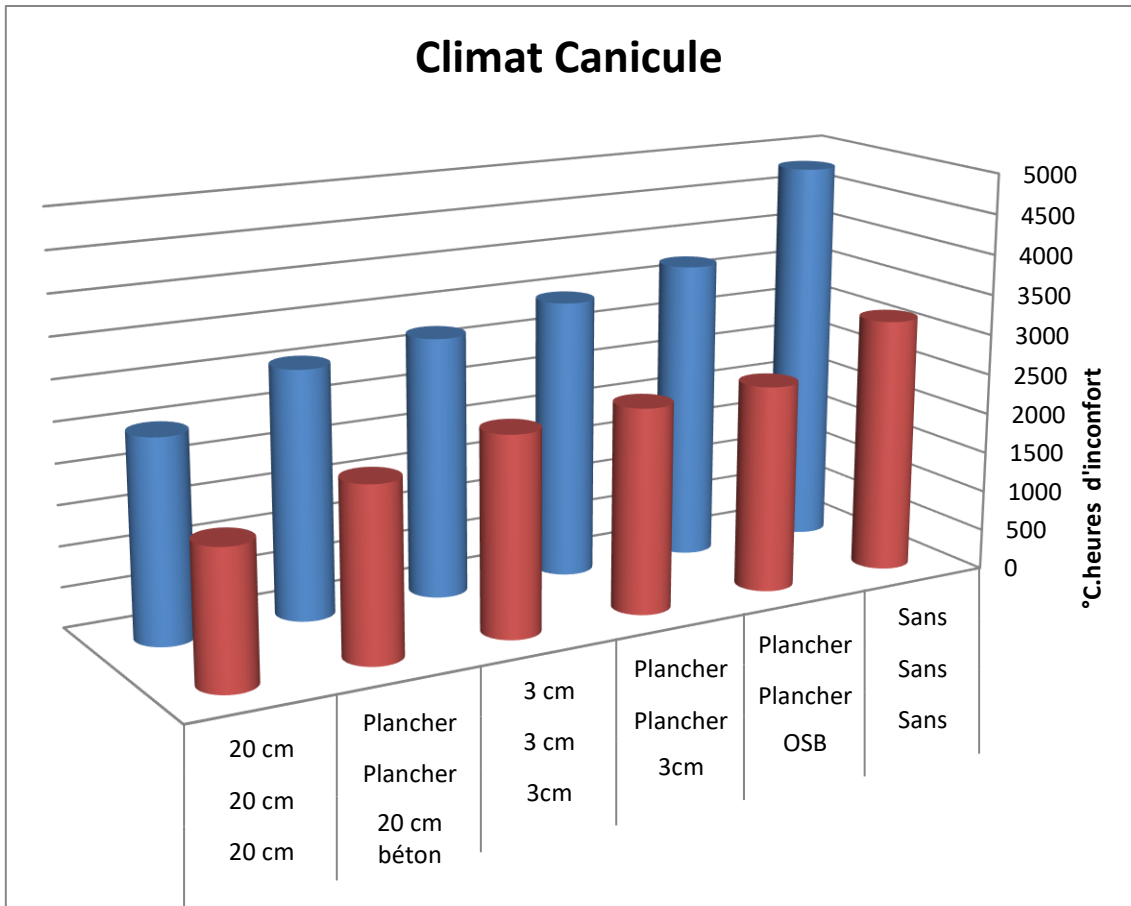


Figure C-20 : Impact de la gestion des volets roulants en climat caniculaire

## Quantité d'inertie

Les cas d'étude ont montré qu'en climat dit « classique », les premiers centimètres de masse thermique sont les plus efficaces pour diminuer l'inconfort, comme illustré en Figure 2-14. Quand il est soumis à une sollicitation journalière au cours de laquelle la masse thermique pourra être refroidie.

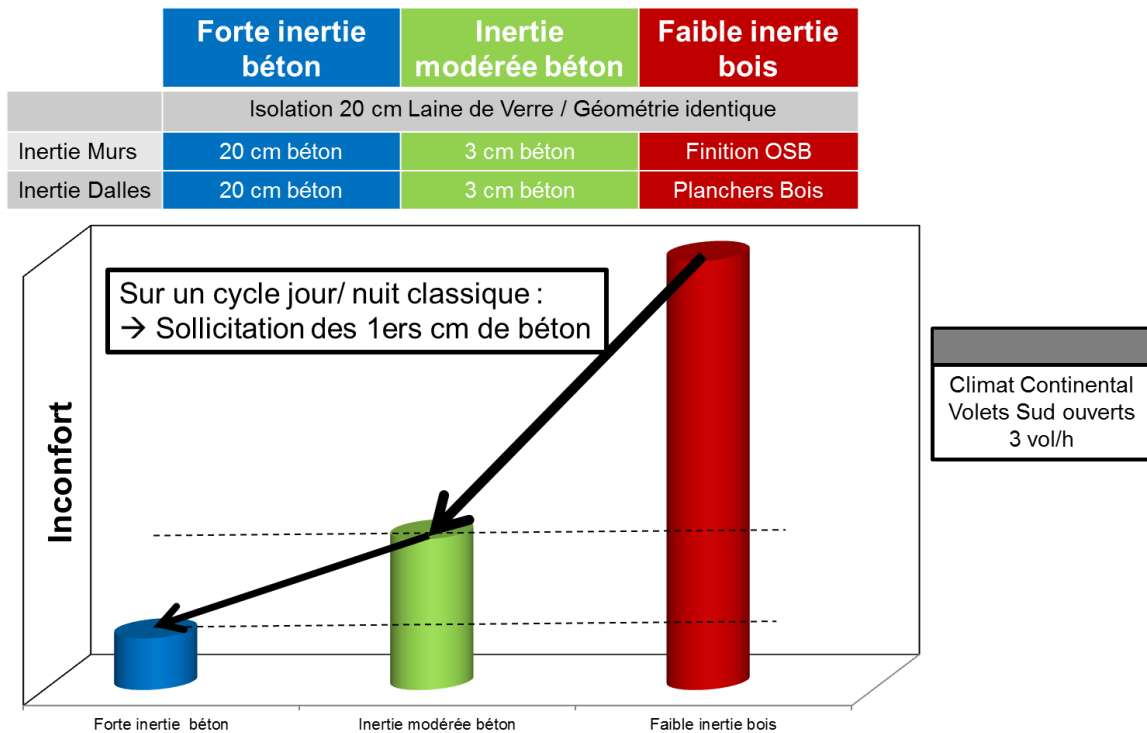


Figure C-21 : Impact de la quantité d'inertie en climat classique

Dans des climats où la masse thermique ne peut être suffisamment refroidie la nuit, i.e. climat caniculaire, la quantité totale de masse thermique jouera un rôle primordial. Plus la masse thermique est importante, meilleur sera le confort (à gestions de bâtiment équivalentes et appropriées) comme illustré en Figure 2-15.

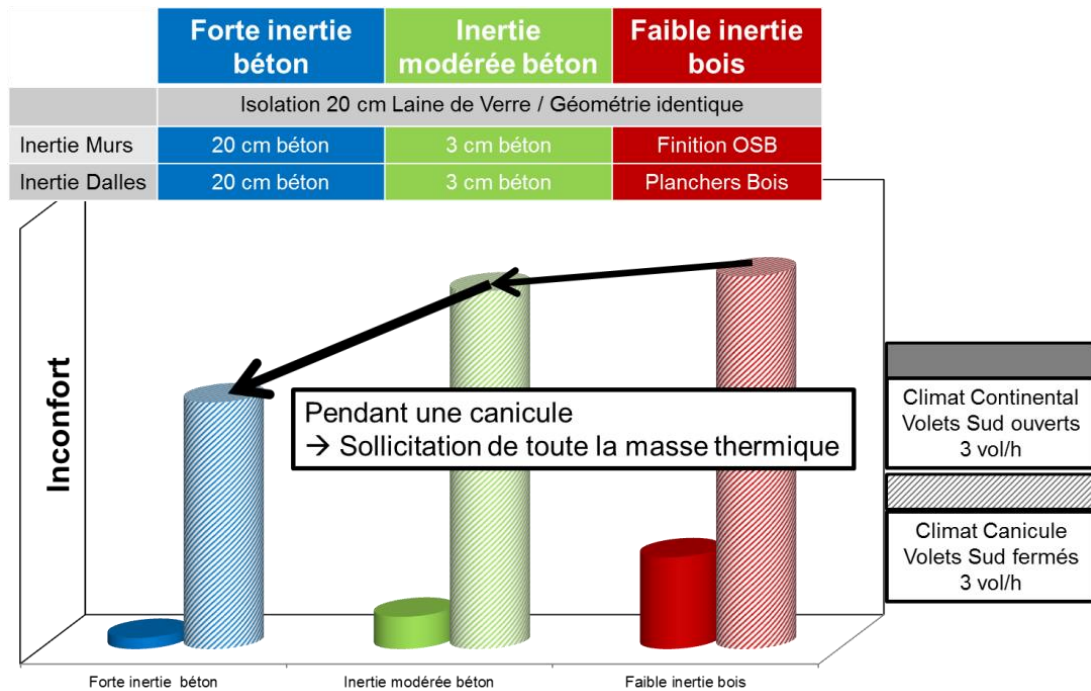


Figure C-22 : Impact de la quantité d'inertie en climat caniculaire

- **Approche globale**

La Figure 2-16 illustre à nouveau le fait qu'en climat classique, les premiers centimètres de béton sont ceux qui auront le plus d'impact sur l'amélioration du confort alors qu'en période de canicule l'ensemble de la masse est sollicitée.

Les degrés heures d'inconfort en fonction de l'épaisseur de béton mise en œuvre sont représentés (celle-ci étant autant que possible disposée de façon homogène entre dalles et murs); Les configurations ont une sur-ventilation nocturne de 3vol/h et les volets roulants Sud ouverts. Il apparaît clairement qu'au-delà de 3cm de béton mis en œuvre dans les murs et planchers, le gain sur l'inconfort est faible en climat classique; En période de canicule, l'augmentation de la masse thermique permettra de diminuer encore l'inconfort.

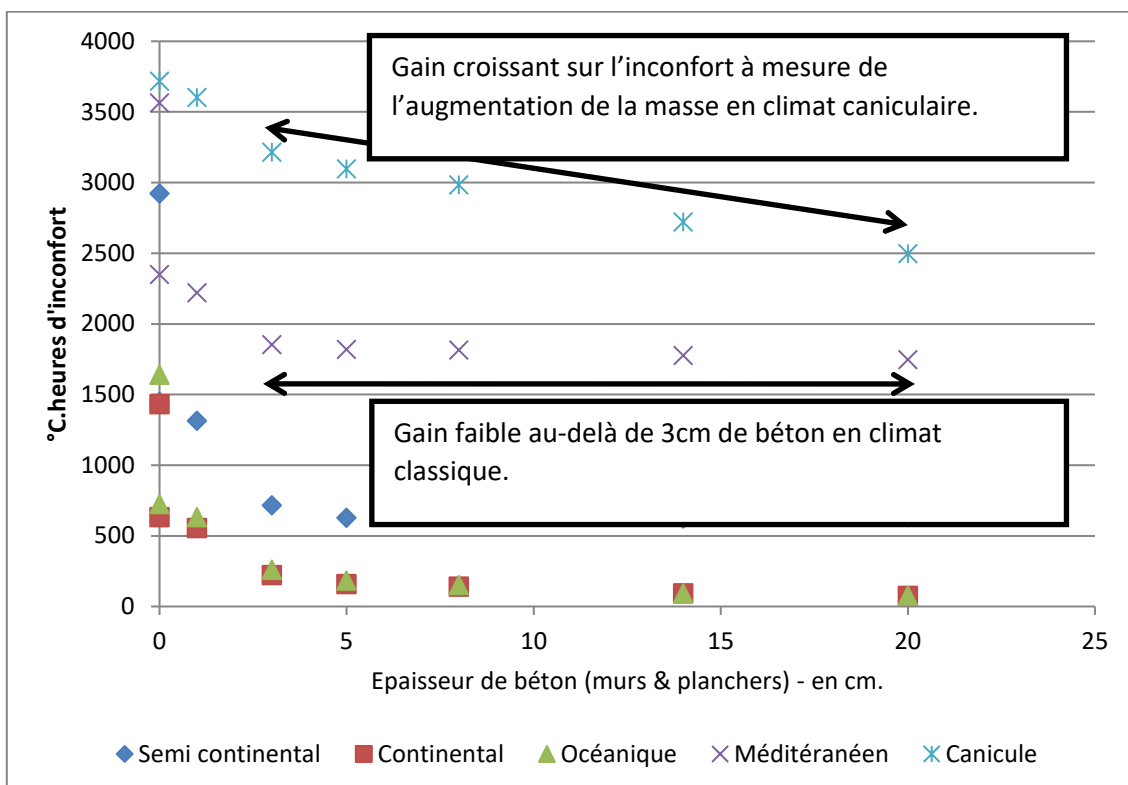


Figure C-23 : °C.heures d'inconfort en fonction de la quantité d'inertie

- Analyse détaillée

Pour étudier l'influence de la quantité d'inertie sur le comportement thermique d'un bâtiment grâce aux post-traitements détaillés, les trois cas ci-dessous ont été testés en climats classiques et caniculaire :

| <b>CAS ETUDIÉS</b>               | <b>Cas 1</b> | <b>Cas 2</b>  | <b>Cas 3</b> |
|----------------------------------|--------------|---------------|--------------|
| <b>Composition des parois</b>    |              |               |              |
| Murs                             | Sans inertie | 3cm béton     | 20cm béton   |
| Planchers (RDC et intermédiaire) | Sans inertie | 3cm béton     | 20cm béton   |
| <b>Régulation</b>                |              |               |              |
| Sur-ventilation nocturne         |              | 3 Vol/h       |              |
| Volets roulants (Nord/Sud)       |              | Ouverts       |              |
| <b>Occupation</b>                |              | Intermittente |              |

Tableau C-0-10 : Configurations testées

- Impact sur le confort en climats classiques

Comme le montre la Figure C-24, à l'échelle de la période étudiée (deux mois d'été), la mise en œuvre d'une quantité modérée d'inertie (3cm) dans une construction permet de se rapprocher du comportement d'un bâtiment à forte inertie. Ce résultat est valable pour l'ensemble des climats classiques (océanique, continental, méditerranéen, semi-continentale).

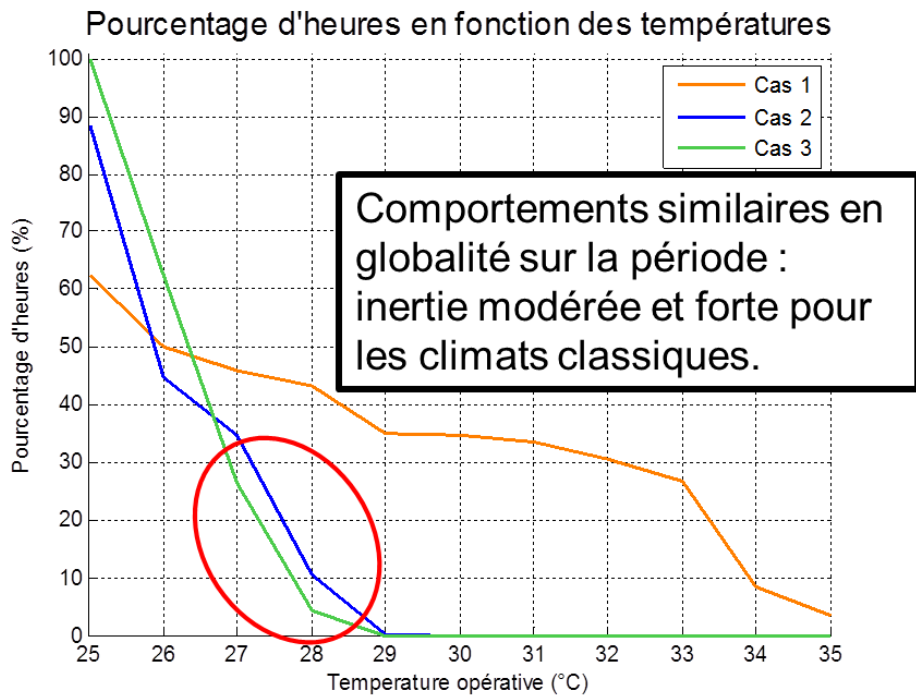


Figure C-24 : Pourcentages d'heures d'inconfort fonction de la température – Climat semi-continentale.

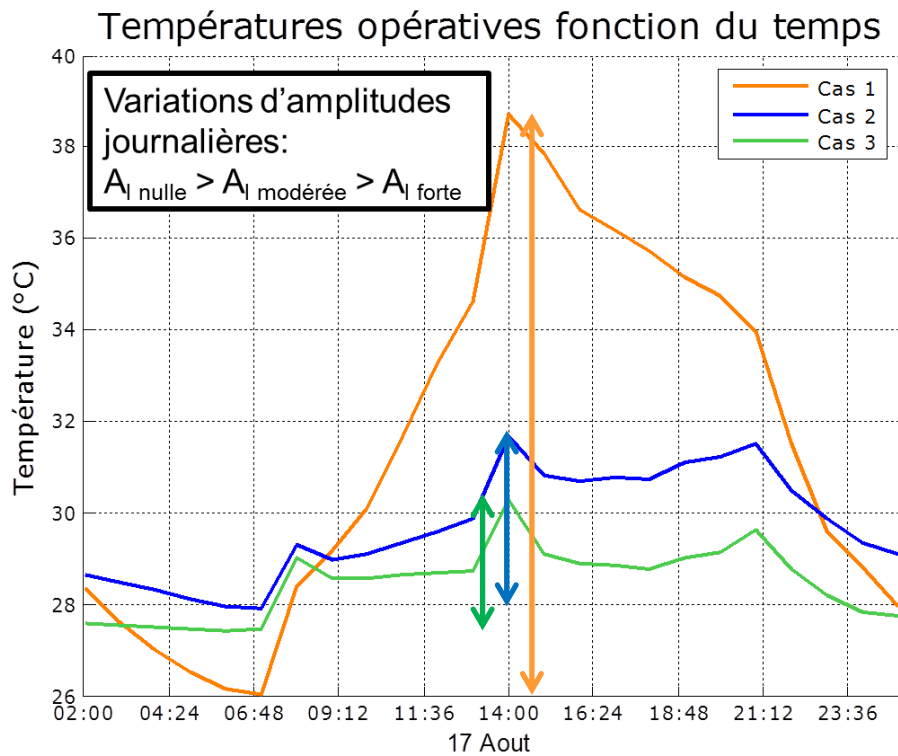


Figure C-25 : Evolution de températures opératives au cours d'une journée – Climat méditerranéen.

La Figure C-25 montre l'évolution journalière des températures dans trois bâtiments à différents niveaux d'inertie. L'amplitude journalière du bâtiment sans inertie est nettement supérieure à celles des bâtiments à inertie modérée et forte, ces dernières étant relativement proches.

Le gain de la forte inertie sera visible sur la température maximale lors de journées très chaudes :  $-1^{\circ}\text{C}$  par rapport à la configuration à inertie modérée.

Le confort dans le bâtiment à inertie modérée pourra être assuré par la mise en œuvre d'un brassage d'air (Figure C-26).

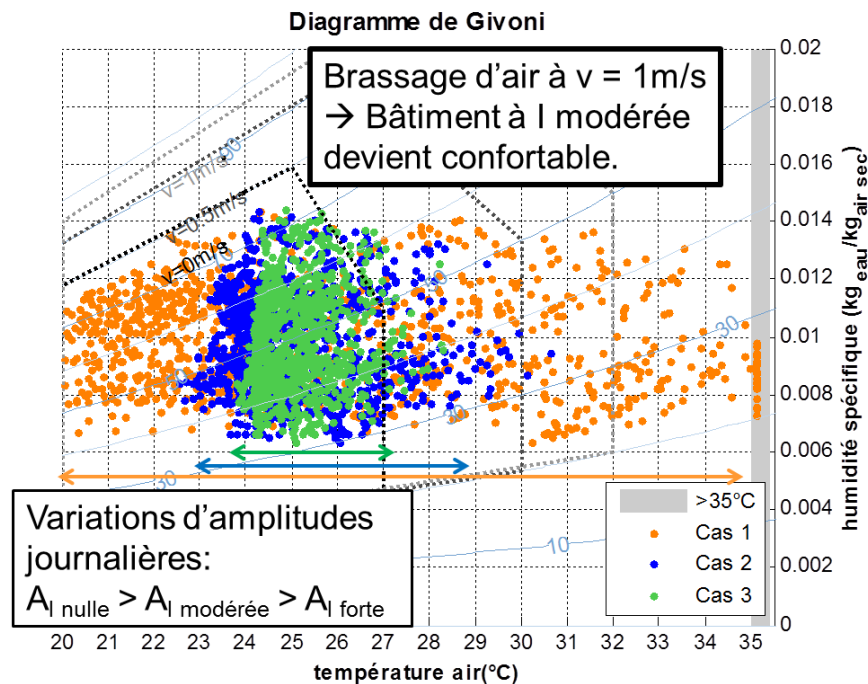


Figure C-26 : Diagramme de Givoni – Climat océanique.

- Impact sur le confort en climat caniculaire

En période de canicule, sur la base d'une bonne sollicitation de la masse (sur-ventilation nocturne à  $3\text{Vol/h}$ ), une quantité croissante d'inertie permettra d'assurer un confort croissant dans le bâtiment.

La Figure 2-17 illustre cette conclusion ; On y observe, avec l'augmentation de l'inertie :

- Des températures maximales en baisse significative.

*N.B.* Les valeurs absolues de baisse des températures sont à considérer avec prudence ; En effet, l'ouverture des fenêtres n'est pas considérée dans les simulations, dans la réalité, l'occupant ouvrira probablement ses fenêtres lorsque la température intérieure dépassera la température extérieure.

- Un déphasage croissant : Comparativement au bâtiment sans inertie, le bâtiment à inertie modérée mettra une journée supplémentaire pour atteindre  $32^{\circ}\text{C}$ , contre 7 jours supplémentaires pour le bâtiment à forte inertie.

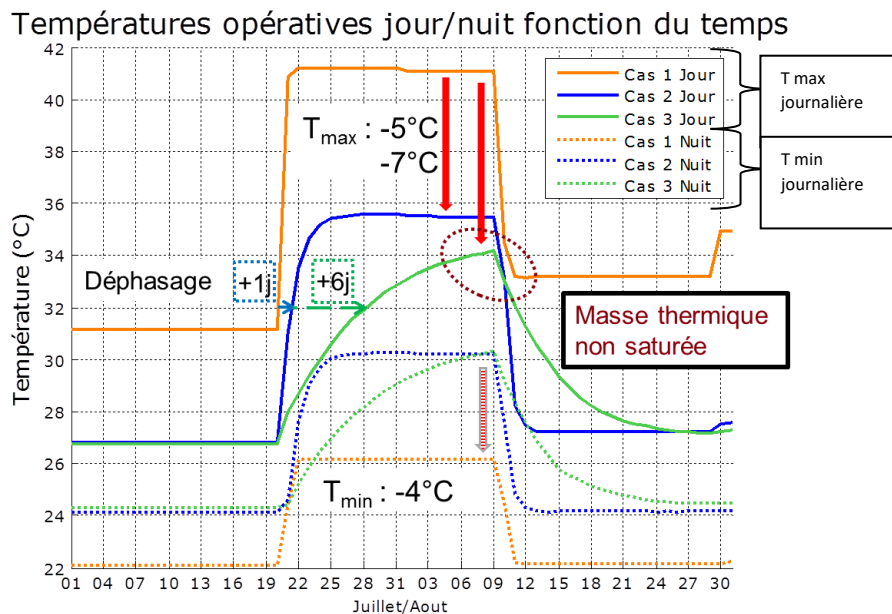


Figure C-27 : Evolution des températures (minimale et maximale) en période caniculaire

Ce graphique montre également, pendant la canicule, la rapide saturation de la masse thermique dans le bâtiment à inertie modérée ; Dans le bâtiment à forte inertie, en fin de période caniculaire, la masse thermique n'est pas saturée et pourra encore stocker de la chaleur pour maintenir une température intérieure la plus basse possible dans de telles conditions météorologiques. Cependant, pour la période post canicule, le cas avec forte inertie mettra plus de temps à retrouver une température « normale » que les autres cas. Le modèle utilisé a tendance à sous-estimer les coefficients d'échanges air / paroi qui tendraient à défavoriser l'apport de l'inertie dans cette configuration.

### Répartition de la masse

- Approche globale

Comme le précisait l'état de l'art, la quantité d'inertie est une condition nécessaire mais non suffisante pour l'amélioration du confort. La répartition de la masse au sein du bâtiment devra notamment être prise en compte dès la phase de conception en fonction du climat dans lequel le bâtiment se situe. Comme le montre la Figure 2-18, un bâtiment disposant d'une forte masse d'inertie placée en un seul endroit pourra être moins confortable qu'un bâtiment avec une masse thermique globale plus faible mais répartie de façon plus homogène.

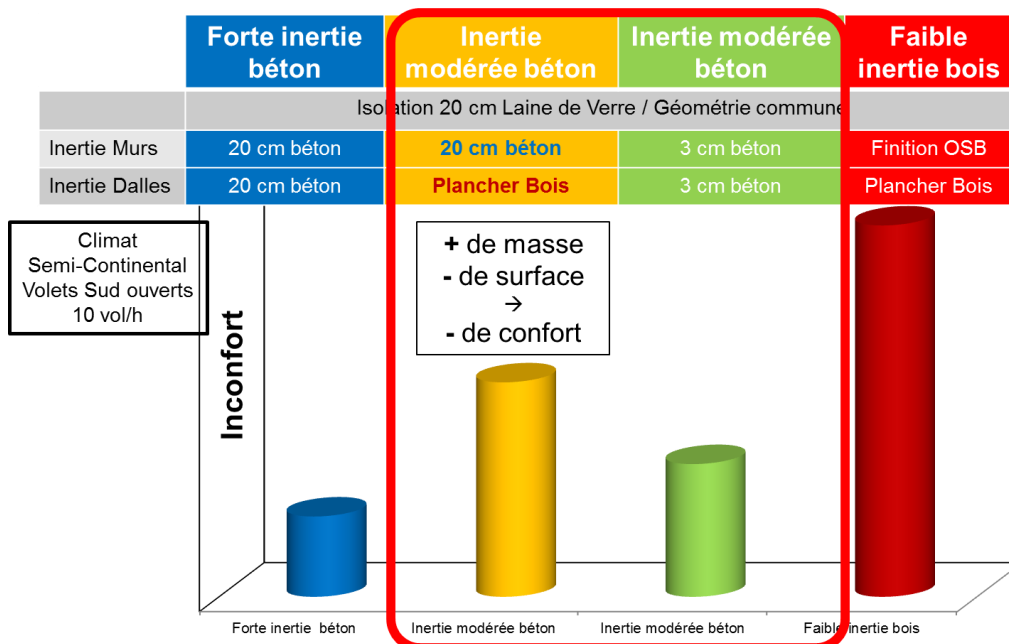


Figure C-28 : Impact de la répartition de la masse

- Analyse détaillée

Pour étudier l'influence de la position de l'inertie sur le comportement thermique d'un bâtiment, les résultats des trois cas ci-dessous illustrent les conclusions observées en climats classiques :

| <b>CAS ETUDIÉS</b>              | <b>Cas 1</b> | <b>Cas 2</b>  | <b>Cas 3</b>  |
|---------------------------------|--------------|---------------|---------------|
| <b>Composition des parois</b>   |              |               |               |
| Murs                            | 3 cm béton   | OSB           | 20cm béton    |
| Planchers (RDC & Intermédiaire) | 3 cm béton   | 20cm béton    | Plancher Bois |
| <b>Régulation</b>               |              |               |               |
| Sur-ventilation nocturne        |              | 3 Vol/h       |               |
| Volets roulants (Nord/Sud)      |              | Ouverts       |               |
| <b>Occupation</b>               |              | Intermittente |               |

Tableau C-0-11 : Configurations testées

Les exemples présentés ici sont supposés sur-ventilés la nuit avec un débit de 3 Vol/h. Les configurations sont testées volets roulants ouverts afin d'observer la robustesse apportée par la quantité d'inertie sur le comportement du bâtiment. Si ce scénario n'est pas optimal en termes de confort, il semble cependant réaliste dans de nombreuses situations.

Dans cette étude, la répartition de la quantité d'inertie a été différenciée entre les cas étudiés. Le cas 1 représente ainsi une répartition homogène d'une masse thermique modérée (3cm) et inférieure à celles des cas 2 et 3 ; Ces derniers illustrent la mise en œuvre d'une quantité d'inertie importante (20cm) mais répartie de façon non homogène (dans les planchers pour le cas 2 - dans les murs pour le cas3).

La Figure C-29 montre pour ces trois configurations, l'évolution des températures opératives pour un jour très chaud du climat semi-continental. Si les températures dans les trois cas sont similaires lors de la mise en œuvre de la sur-ventilation nocturne (de 21h à 7h), la configuration ayant le moins d'inertie mais la répartition la plus homogène sera en revanche la plus confortable la quasi-totalité de la journée, avec un gain en température jusqu'à 1°C par rapport aux deux configurations à forte masse thermique ponctuelle (répartie de façon non homogène). Le diagramme de Givoni (Figure C-30) affiche également des résultats similaires avec un confort sans brassage d'air plus évident dans le cas d'une bonne répartition de la masse.



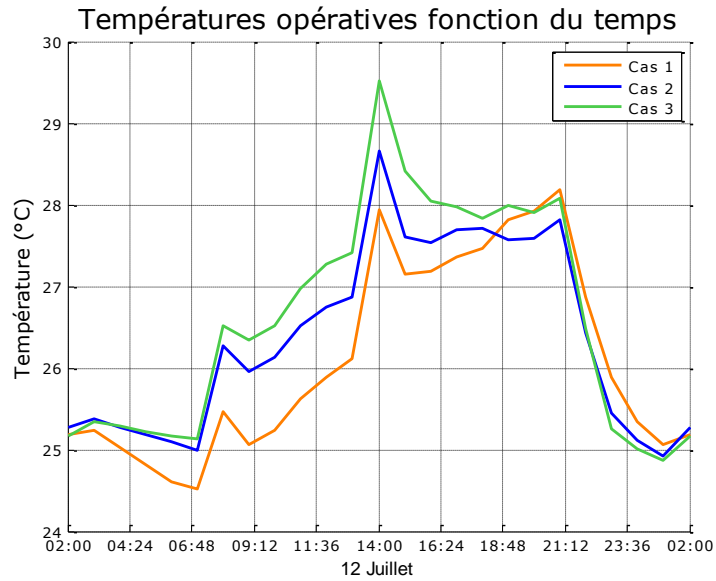


Figure C-29 : Evolution de températures opératives au cours d'une journée – Climat semi-continental

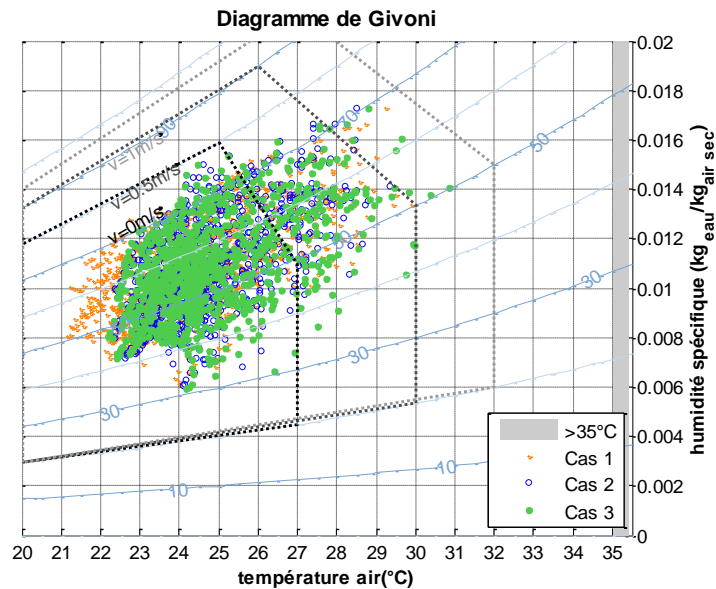


Figure C-30 : Diagramme de Givoni – Climat continental

### Position de la masse – Mise en œuvre d'inertie dans le plancher intermédiaire

Pour illustrer l'influence sur le comportement thermique d'un bâtiment, de la quantité d'inertie dans le plancher intermédiaire, les résultats des trois cas ci-dessous sont présentés en climats classiques et caniculaire :

| <b>CAS ETUDIES</b>            | <b>Cas 1</b>  | <b>Cas 2</b>  | <b>Cas 3</b> |
|-------------------------------|---------------|---------------|--------------|
| <b>Composition des parois</b> |               |               |              |
| Murs                          | Sans inertie  | Sans inertie  | Sans inertie |
| Plancher RDC                  | 20cm béton    | 20cm béton    | 20cm béton   |
| Plancher intermédiaire        | Plancher bois | 3cm béton     | 20cm béton   |
| <b>Régulation</b>             |               |               |              |
| Sur-ventilation nocturne      |               | 3 Vol/h       |              |
| Volets roulants (Nord/Sud)    |               | Ouverts       |              |
| <b>Occupation</b>             |               | Intermittente |              |

Tableau C-0-12 : Configurations testées

Les exemples présentés ici sont supposés sur-ventilés la nuit avec un débit de 3Vol/h. Les configurations sont testées volets roulants ouverts afin d'observer la robustesse apportée par la quantité d'inertie sur le comportement du bâtiment. Si ce scénario n'est pas optimal en termes de confort, il semble cependant réaliste dans de nombreuses situations.

La quantité d'inertie dans les planchers bas et intermédiaire a été différenciée afin d'étudier l'impact d'une inertie plus ou moins forte dans le plancher intermédiaire.

- Impact sur le confort en climats classiques

Quel que soit le climat classique étudié (océanique, continental, méditerranéen, semi-continental), on observe un niveau de confort croissant dans le bâtiment avec l'augmentation de l'inertie dans le plancher intermédiaire. Avec la mise en place de 3cm d'inertie dans le plancher intermédiaire, la « moitié du travail » est réalisée dans l'amélioration du confort, en comparaison entre une configuration plancher intermédiaire sans inertie et un à forte inertie (Figure C-31).

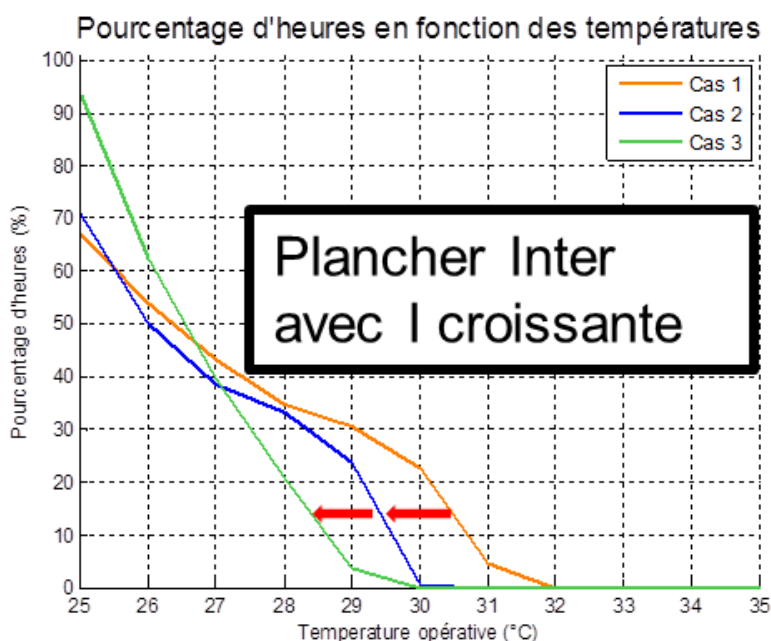


Figure C-31 : Pourcentages d'heures d'inconfort fonction de la température – Climat semi-continental.

La mise en œuvre d'un plancher intermédiaire à inertie modérée ou forte représente un atout lors des journées estivales chaudes, et participera à la limitation des surchauffes aux heures les plus chaudes de la journée, l'après-midi notamment.

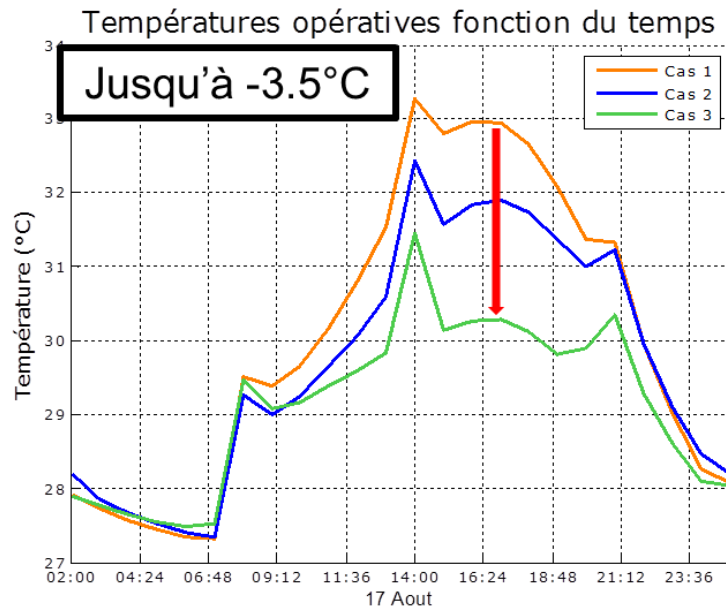


Figure C-32 : Evolution de températures opératives au cours d'une journée – Climat méditerranéen.

Pour tous les climats classiques (sauf méditerranéen), des conditions de confort acceptables sont possibles par l'ajout de brassage d'air plus ou moins important en fonction de l'inertie du plancher intermédiaire (Figure C-33).

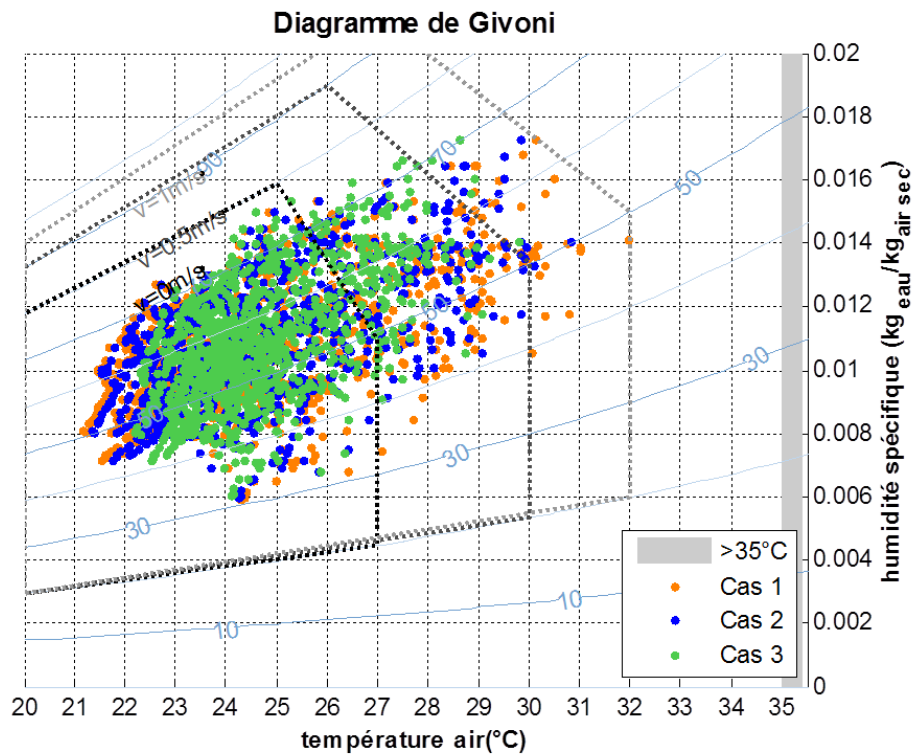


Figure C-33 : Diagramme de Givoni – Climat continental.

- Impact sur le confort en climat caniculaire

Quelle que soit l'inertie du plancher intermédiaire et la sollicitation de la masse (sur-ventilation/brassage d'air/volets roulants fermés), le bâtiment sera toujours inconfortable pendant une partie de la période caniculaire.

En période de canicule, sur la base d'une bonne sollicitation de la masse (sur-ventilation nocturne à 3Vol/h), une quantité croissante d'inertie dans le plancher intermédiaire permettra cependant d'assurer un confort croissant dans le bâtiment.

La Figure C-34 illustre cette conclusion ; On y observe, avec l'augmentation de l'inertie :

- Des températures maximales en baisse.

*N.B.* Les valeurs absolues de baisse des températures sont à considérer avec prudence ; En effet, l'ouverture des fenêtres n'est pas considérée dans l'outil, dans la réalité, l'occupant ouvrira ses fenêtres lorsque la température intérieure dépassera la température extérieure.

- Un déphasage croissant : Un bâtiment à plancher intermédiaire à forte inertie mettra trois jours supplémentaires pour atteindre 32°C, contre une montée en température quasi-instantanée pour des bâtiments à plancher intermédiaire sans inertie ou à inertie modérée.

Températures opératives jour/nuit fonction du temps

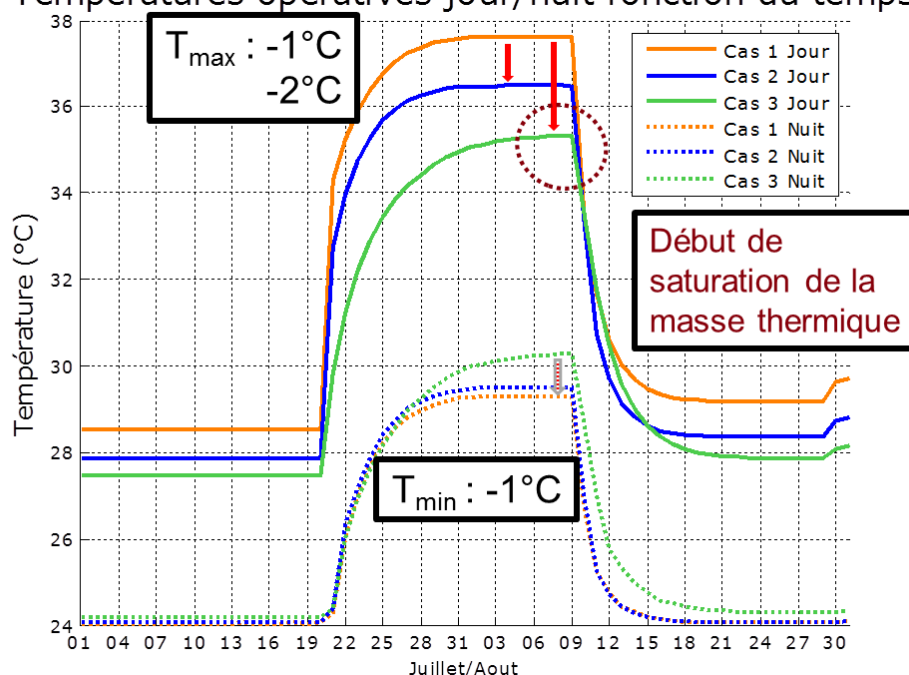


Figure C-34 : Evolution des températures (minimale et maximale) en période caniculaire

Dans le bâtiment à forte inertie, en fin de période caniculaire, la masse thermique débute sa saturation ; Elle a cependant joué un rôle primordial de stockage de la chaleur pour maintenir une température intérieure la plus basse possible dans de telles conditions météorologiques.