Industrialisation de la rénovation via la méthode ES'OPE : Retour d'expérience sur une maison INCAS

ANGER J. [1], BRUN A. [1], JAY A. [1*], LAMONERIE T. [2], LECONTE A. [1], OUVRIER-BONNAZ O. [1], PIOT A. [1]
[1] Univ Grenoble Alpes, CEA, LITEN, INES, ITE INES.2S, 73370 LE BOURGET DU LAC, France
[2] Enertech, 26160 Pont-de-Barret, France
***arnaud.jay@cea.fr**

RESUME. *La massification de la rénovation est en enjeu clé de la transition énergétique. BPIE estime qu'il faut passer d'un taux de rénovation lourde du parc de bâtiments de 1 à 3% par an pour atteindre les objectifs fixés par les politiques publiques. Cet article est un retour d'expérience de la mise en œuvre d'une solution de rénovation industrialisée via le concept ES'OPE sur une maison expérimentale. Après avoir décrit le concept ES'OPE et son implémentation sur le cas d'étude de la maison expérimentale I-BB de la plateforme INCAS située à l'INES, les scénarios mis en œuvre pour valider la performance des systèmes et de l'enveloppe sont présentés. Les résultats des premières campagnes sont ensuite détaillés et une première comparaison des résultats expérimentaux et des simulations réalisées est détaillée en s'intéressant plus particulièrement au coefficient de déperdition de l'enveloppe (HLC et HTR) et à l'évolution de température intérieure.*

MOTS-CLÉS : rénovation, massification, préfabrication, mesures, simulations.

ABSTRACT. Massification of renovation is a key issue in the energy transition. BPIE estimates that it is necessary to go from a heavy renovation rate of the building stock of 1 to 3% per year to achieve the objectives set by public policies. This article is a feedback on the setup of an industrialized renovation solution via the ES'OPE concept on an experimental house. After having described the ES'OPE concept and its implementation on the case study of the experimental house I-BB of the INCAS platform located at INES, scenario that have been setup in the first months are detailed. Results of the first campaigns are then analysed and a first comparison of the experimental results and the simulations carried out is detailed by focusing more particularly into the loss coefficient of the envelope (HLC and Htr), and the ecolution of the indoor air temperature.

KEYWORDS : retrofit, massification, prefabrication, measurements, simulations.

1. INTRODUCTION

La massification de la rénovation est un enjeu clé de la transition énergétique. (Staniaszek 2021) estime qu'il faut tripler le taux de rénovation lourde du parc de bâtiments en passant de 1 à 3% par an pour atteindre les objectifs fixés par les politiques publiques. L'industrialisation est l'une des voies explorées pour atteindre cet objectif, avec notamment l'approche EnergieSprong (EnergieSprong 2022) visant à réaliser une rénovation complète en un temps limité en conservant les occupants dans leur logement via une approche standardisée et industrialisée. Le projet ESOPE vise à décliner l'approche et concevoir une solution EnergieSprong dédiée au marché français avec ses spécificités techniques et règlementaires pour atteindre un objectif annuel E=0 (production locales d'énergies renouvelables = consommations énergétiques) avec un tissu de PMEs régionales (principalement AURA) et en faire la démonstration sur 4 bâtiments de bailleurs sociaux allant de la maison individuelle au logement collectif

de taille moyenne. Le cœur du projet repose sur le développement de 5 nouvelles briques technologiques clés, permettant la création d'une enveloppe efficace du bâtiment et en associant les besoins énergétiques (production, régulation/consommation) : Bardage préfabriqué multifonctionnel, Menuiserie pluggable, Toiture préfabriquée multifonctionnelle, Module énergie, Local technique préfabriqué. Cet article vise à faire part d'un premier retour d'expérience de la mise en œuvre du concept ES'OPE sur une maison expérimentale et sa première année de fonctionnement et de comparer les mesures avec des simulations numériques.

2. CAS D'ETUDE

2.1. DESCRIPTION DE LA MAISON I-BB RENOVEE

2.1.1. Enveloppe

La maison expérimentale I-BB située à l'INES au Bourget du Lac (73) a été utilisée comme cas d'étude pour tester le concept ES'OPE. Cette maison expérimentale a une structure en béton banché. L'isolation extérieure initiale des parois verticales et la toiture ont été supprimées pour dégrader les performances de la maison et servir de point de départ à l'étude comme « épave thermique ». L'enveloppe rapportée, conçue et développée dans le cadre du projet, a été préfabriquée en usine avec un complexe isolant intégrant les menuiseries. Une de ses spécificités repose sur la création d'une lame d'air de 10 cm entre la paroi existante en béton banché et l'isolant rapporté. L'étanchéité à l'air se fait du côté extérieur de ce vide technique qui se trouve alors d'un point de vue thermique dans le volume chauffé. Ce vide technique permet notamment de faire passer des circuits fluides dont les gaines de ventilation pour intégrer une ventilation double flux en rénovation en minimisant l'impact des travaux à l'intérieur du logement. Les bouches de soufflage d'air neuf sont intégrées aux menuiseries. La résistance thermique de la façade est estimée à 6.1 m².K/W.

Figure 1 : Maison I-BB en cours de rénovation avec le concept ES'OPE

2.1.2. Equipements techniques CVC : module énergie

L'une des spécificités de l'approche EnergieSprong et repris dans le concept ES'OPE est d'intégrer l'ensemble des équipements techniques CVC dans un local positionné à l'extérieur de la maison existante. Dans le cadre de l'expérimentation sur la maison I-BB, celui-ci inclus, une VMC double-flux avec une épingle électrique, une pompe à chaleur double service pour le chauffage et l'ECS. Le chauffage peut donc être assuré de deux manières différentes, via un réseau entre une PAC couplée à des radiateurs hydrauliques, ou via des épingles électriques intégrées au réseau de ventilation.

Figure 2 – A gauche : systèmes du module énergie, A droite, Maison I-BB rénovée avec module énergie

2.1.3. Production ENR

Afin d'atteindre l'objectif E=0 (ie bilan annuel de consommation = production d'énergie sur le bâtiment), des modules photovoltaïques ont été intégrés à l'enveloppe, principalement en toiture avec 16 modules de 320Wc soit 5,12kWc, mais également en façade avec 1 module en façade Sud (320Wc) et 2 modules en façade Ouest (640Wc). Les onduleurs ont été positionné dans le module énergie installé et raccordé au niveau de la façade.

2.2. METROLOGIE MISE EN ŒUVRE

Afin de suivre le comportement thermique de la maison de nombreux capteurs ont été intégrés, à la fois dans les différentes couches de l'enveloppe et dans les composants des équipements CVC, y compris les réseaux aérauliques et hydrauliques. Comme illustré sur les figures ci-dessous, on retrouve notamment des capteurs de température de Type PT100, des thermo hygromètres de type SENSIRION SHT75 et des débitmètres.

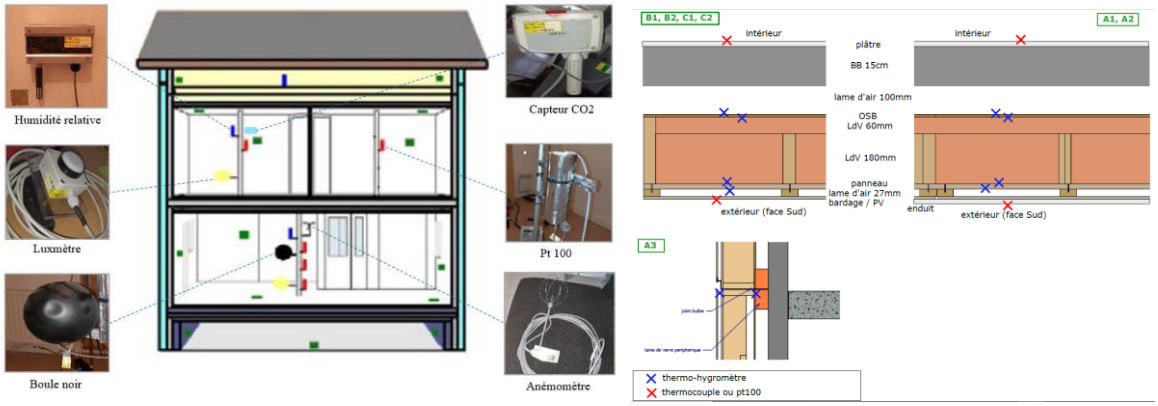

Figure 3 : Instrumentation de la maison I-BB

2.3. SCENARIOS MIS EN ŒUVRE

La maison I-BB est une maison expérimentale non habitée. Un dégagement de chaleur constant de 300W est appliqué pour l'ensemble de la maison pour représenter la présence et les activités des 4 membres de la famille. Une étude numérique préalable a montré que la variation horaire du profil de gains interne a peu d'influence sur le bilan énergétique. Les charges internes dues à l'instrumentation et aux appareils connexes ont été évaluées (100W) et retirées de la valeur de 300 W à appliquer en continu. Ainsi une résistance de 100W par étage a été installée.

Au cours de la première année de fonctionnement, huit campagnes expérimentales ont été réalisées : 3 en période de chauffage, 2 à mi-saison et 3 en période estivale. Sur la période de chauffage Tableau

1, différentes configurations ont été testées comprenant un chauffage via les radiateurs hydrauliques couplés à la PAC ou via un chauffage aéraulique par le biais de la ventilation et de l'épingle électrique. La consigne de température a également été modifiée au cours des essais. En mi-saison, Tableau 2, le focus a été mis sur le fonctionnement de la pompe à chaleur pour la production d'ECS.

Tableau 1 Caractéristiques des 3 campagnes de chauffage

CAMPAGNE	**1**	**2**	**3**
Dates	30/12/2020 – 06/01/2021	02/02/2021 – 21/02/2021	18/03/2021 – 24/03/2021
Source	PAC	PAC	Epingle chauffante
Emission	Radiateurs	Radiateurs	Aéraulique
Consigne Tint	20°C avec réduit de nuit	21°C	21°C
Loi de chauffe	BASIQUE	OPTIMISEE	PID

Tableau 2 Caractéristiques des 2 campagnes de mi saison

CAMPAGNE	**4**	**5**
Dates	11/05/2021-18/05/2021 (8 jours)	19/05/2021 – 01/06/2021 (14 jours)
Température de consigne dans le ballon	50°C	50°C
Programmation horaire de la production PAC	SANS : Recharge du ballon selon sonde interne à 'n'importe quel moment	AVEC Autorisée Entre 15h et 20h

3. MODELE NUMERIQUE

Un modèle STD a été mis en données et les résultats des simulations ont étés confrontés aux mesures. Ces simulations ont été réalisées avec le logiciel COMFIE PLEIADES (v5.21.7.3). Cet outil a été retenu car il très utilisé par les bureaux d'études français et dispose de fonctionnalités étendues (Calcul automatique des masque, modélisation détaillée des fenêtres, calcul thermo-aéraulique, analyse de cycle de vie, algorithme d'optimisation génétique, étude de sensibilité, …). Le modèle comporte 7 zones thermiques : 1 zone au rez-de-chaussée, 4 zones à l'étage, 1 zone de circulation commune au rez-de-chaussée et à l'étage ainsi qu'une zone pour les combles. Le vide sanitaire est spécifié comme type de contact au niveau du plancher bas mais ne constitue pas une zone thermique à proprement dite.

Figure 4 : Modèle numérique de la maison : à gauche faces Ouest et Sud , au centre : faces Est et Nord, à droite : répartition es débits mesurés au points de soufflage et d'extraction

Un composant dit « enveloppe aéraulique » a été utilisé. Il permet un calcul détaillé des débits d'air par résolution du bilan de pression. Dans ce bilan intervient notamment l'indicateur Q4=0.8m^3/(h/m^2)) d'étanchéité à l'air, une description des bouches d'entrée et d'extraction d'air ainsi que des orifices entre zones (détalonnage de porte). La maison est équipée d'une ventilation double flux. Les débits d'insufflation et de reprise mesurées au balomètre (cf Figure 4) ont été reportés dans le modèle.

Une description détaillée de chaque menuiserie a été réalisée afin de calculer les surfaces de vitrage et de cadre ainsi que les longueurs d'intercalaire. Les protections solaires sont restées ouvertes sur la durée des expérimentations, elles n'ont par conséquent pas été modélisées.

Compte tenu des spécificités de l'enveloppe, les ponts thermiques ont été calculés avec le logiciel Conducteo. Nous avons obtenu les valeurs suivantes : $Psi_{Angles\ Sortants}$=0.09 W/(m.K), $Psi_{Plancher\ Intermédiaire}$=0.03 W/(m.K), $Psi_{Plancher\ Bas}$=0.46 W/(m.K).

Afin d'effectuer une comparaison modèle/mesures, nous avons généré le fichier météo de la période considérée. Pour cela, les données provenant de la station météo de l'INES, située à quelques dizaines de mètres de la maison ont été utilisées. D'un pas de temps minute, celles-ci ont été retranscrites avec une résolution horaire afin d'être utilisable par le logiciel Pleiade-Comfie. Un fichier EPW, standard d'Energyplus, a d'abord été créé puis a été importé avec l'onglet d'import de Pleiade-Comfie. La localisation de l'INES a été renseignée afin de prendre en compte des masques liés à la topographie (région montagneuse) via l'utilitaire intégré Carnaval. Les débords de toiture sont décrits par des casquettes équivalentes.

Les trois systèmes PV (PV toiture, PV façade ouest et PV façade Sud) ont étés renseignés mais des difficultés rencontrées lors de la simulation, ne permettent pas de confronter la production calculée avec les mesures.

4. RESULTATS

4.1. ESTIMATION DU HTR

4.1.1. Par simulation

Le coefficient de déperdition de l'enveloppe a été déduit d'un calcul statique en imposant une température extérieure de base de -11°C et une température intérieure de 21°C. Le calcul statique est un mode de calcul proposé par Pleiade-Comfie pour le dimensionnement des émetteurs par pièce suivant la norme EN 12831. La Figure 5 indique la répartition des déperditions entre les parois, les menuiseries et les ponts thermiques. Pour l'ensemble du bâtiment nous avons obtenu un besoin de puissance de 3.09kW pour maintenir le delta T intérieur extérieur de 32°C soit un coefficient HTR = 96.6 W/K.

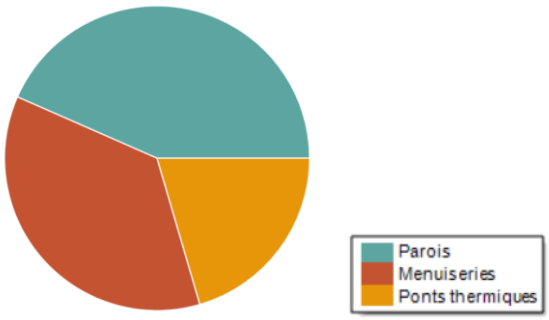

Figure 5 : Répartition des déperditions par les différents éléments de l'enveloppe de la maison

4.1.2. Par la mesure

Des campagnes de tests ont été réalisées pour mesurer la performance thermique de l'enveloppe de la maison I-BB après rénovation (Tableau 1). Les méthodes co-heating (Bauwens et Roels 2014) et PSA (Rouchier, Rabouille, et Oberlé 2018) ont été testées. Ces méthodes consistent à imposer une sollicitation thermique à l'aide de résistances électriques réparties à l'intérieur du bâtiment et de suivre l'évolution des consommations énergétiques, des températures intérieures ainsi que les conditions

extérieures (température et rayonnement). Le test se fait dans les mêmes conditions qu'un test à la porte soufflante d'un point de vue aéraulique (ventilation coupée, bouches d'entrées et de sorties d'air bouchées), sans occupation et volets fermés. Deux coefficients peuvent être calculés grâce à ces méthodes : HLC pour Heat Loss Coefficient [W/K] intégrant à la fois les pertes par conduction à travers l'enveloppe ainsi que les pertes par les infiltrations et HTR n'intégrant que la partie des pertes par conduction, que l'on déduit du HLC en soustrayant les pertes par infiltration estimées à l'aide des résultats d'un test à la porte soufflante, des conditions de vent et d'écart de température intérieur/extérieur. La mesure de co-heating a été réalisée avec une consigne de température fixée à 30°C et a donné une valeur de HLC de 84 W/K.

En complément plusieurs essais de type PSA (Pseudo Aléatoires) avec des sollicitations sur 2 journées alternant des périodes de durées variables avec et sans chauffage ont été réalisés. La Figure 6 illustre l'évolution de la température intérieure moyenne et des puissances dissipées au cours d'un de ces essais et permet de distinguer les périodes de chauffe et de relaxation de la sollicitation. La valeur de HLC est obtenue à l'aide de la chaîne de calibration développée dans le cadre du projet SEREINE (Bouchié et al., s. d.) (Raillon, Rouchier, et Juricic 2019). La Figure 7 montre les différentes estimations obtenues pour la performance de l'enveloppe pour 3 tests différents, le co-heating et 2 tests SEREINE avec la sollicitation PSA6. Les valeurs de HLC obtenues varient entre 78 et 84 W/K avec des incertitudes de l'ordre de +/- 10 à 15W/K. La colonne de droite décompose cette dernière en HTR (déperditions par conduction à travers l'enveloppe) et Hinf (déperditions par infiltrations).

Les valeurs mesurées sont donc plus faibles que la valeur simulée, ce qui semble à priori contre intuitif, compte tenu des simplifications faites sur le modèle (étanchéité à l'air parfaite du vide technique de l'enveloppe, étanchéité parfaite du réseau de ventilation, seuls les principaux ponts thermiques sont pris en compte). A ce stade, aucune erreur humaine de mise en donnée n'a été relevée. Les résultats de mesures tendent à démontrer la bonne mise en œuvre des différents composants de l'enveloppe.

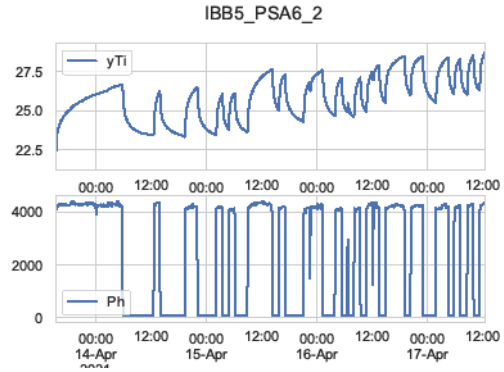

Figure 6 : Evolution des mesures des températures (En haut) et puissances électriques (en bas) pour un test SEREINE PSA6

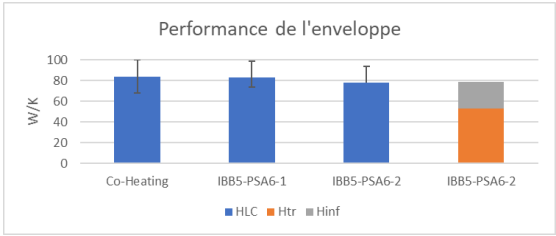

Figure 7 : Mesures du coefficient de déperdition thermique de l'enveloppe

4.2. BILAN ENERGETIQUE DES CAMPAGNES EXPERIMENTALES

Un bilan d'énergie a été calculé pour chaque campagne expérimentale et les résultats sont présentés sur la Figure 8. Cette figure illustre, pour les campagnes 3 à 5, l'énergie fournie par les systèmes à la maison (colonne de gauche), l'énergie consommée par les systèmes (colonne du milieu), et l'énergie produite par les modules photovoltaïques. Cette dernière devient fortement excédentaire en mi-saison, et pourra compenser les besoins en électricité domestique non intégrée dans ce bilan.

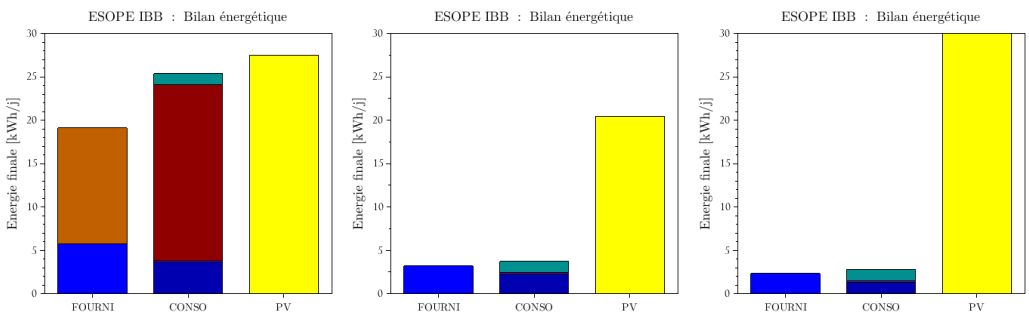

Figure 8 – Bilan énergétique des campagnes de chauffage et de mi saison (de gauche à droite : campagne de 3 à 5)

4.3. COMPARAISON MESURES / SIMULATIONS

Nous avons retenu la campagne expérimentale la plus longue pour réaliser cette comparaison. Il s'agit de la campagne #2 du 2 au 21 Février. Cependant, une opération de maintenance de la station météo du 13 au 16 Février ne permettra pas d'exploiter l'ensemble de la campagne. La simulation est initialisée en débutant la simulation au 1er janvier.

Habituellement lors d'une comparaison des besoins de chauffage entre simulation et mesure nous imposons la température intérieure mesurée comme consigne de chauffage dans le modèle. Cela n'a pas pu être réalisé ici car la version commerciale de Pleiade-Comfie ne permet pas de lire de scénario provenant d'un fichier. Nous avons par conséquent appliqué une température de consigne fixe proche de la moyenne des températures mesurées (19.5°C).

La comparaison de l'intégrale des puissances de chauffage sur la première période (du 2 Février au 12 Février) montre un écart très important, 86.4kW mesurée et 177kW simulée. La différence des températures de consigne provoque une surconsommation du modèle mais ne peut justifier un tel écart. Cet écart va dans le sens de la différence du coefficient de déperdition thermique entre mesure et simulation détaillé au paragraphe précédent et s'ajoute à l'écart de la température de consigne.

La figure ci-dessous montre un extrait des évolutions des températures sur deux périodes distincts par la nature du rayonnement incident. Sur la figure de gauche une période en condition de ciel clair et sur la figure de droite un ciel majoritairement couvert avec quelques éclaircies. On remarque que la réponse du modèle est satisfaisante lors de journées où le rayonnement solaire direct est la principale source d'irradiation. En revanche la température d'air est sous-estimée lors des journées aux conditions de ciel diffus.

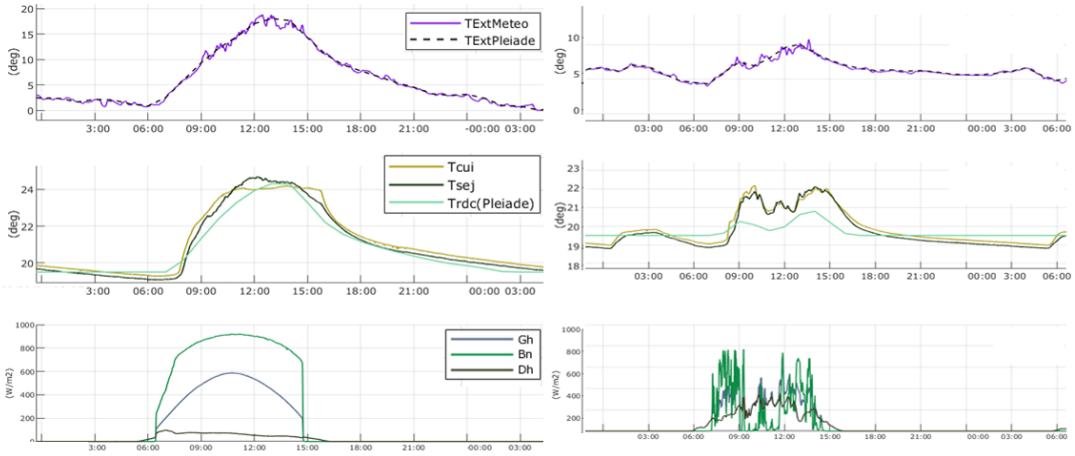

Figure 9 : Evolution des températures intérieures pour 2 typologies de météo (journées ensoleillées à gauche, journées avec nombreux passages nuageux à droite)

5. CONCLUSION

Le travail présenté ici est un retour d'expérience sur les premiers mois d'instrumentation post rénovation de la maison expérimentale INCAS I-BB avec le concept ES'OPE. Des premières campagnes expérimentales ont pu être réalisées et ont permis, après une phase de debug de l'instrumentation, de s'assurer du bon fonctionnement des systèmes et de tirer des premiers bilans de leur performance. Outre la preuve de concept faite par la mise en œuvre de la solution globale de rénovation à l'échelle 1, des mesures de la performance intrinsèque de l'enveloppe ont été réalisées et donnent des résultats cohérant entre méthodes (Co-heating, PSA6-1 et PSA6-2). Le modèle STD réalisé permet de prédire convenablement l'évolution de température intérieure lors des journées ensoleillées hivernales mais ne permet pas de prédire les consommations de chauffages et présente un coefficient déperditif HTR 20% supérieur à ceux mesurés. Une étude approfondie devra être menée afin de mieux comprendre les écarts entre la simulation et les mesures. La courte durée du scénario à disposition pour ces premières campagnes a été un des freins dans cette comparaison. Des campagnes expérimentales plus longues permettront d'affiner ce travail de comparaison, et ainsi apporter une meilleure compréhension du comportement de la maison.

6. REMERCIEMENTS

Les travaux présentés ont été réalisés en grande majorité dans le cadre du projet ES'OPE financé par l'ADEME. Les tests de co-heating et PSA ont été réalisés dans le cadre du projet SEREINE du programme PROFEEL. Ces travaux ont de plus bénéficiés d'une aide de l'Etat au titre du programme d'Investissements d'Avenir portant la référence ANR-10-IEED-0014-01.

7. BIBLIOGRAPHIE

Bauwens, Geert, et Staf Roels. 2014. « Co-Heating Test: A State-of-the-Art ». *Energy and Buildings* 82 (octobre): 163-72. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.039.

EnergieSprong. 2022. « http://www.energiesprong.fr/ ». http://www.energiesprong.fr/.

Raillon, Loïc, Simon Rouchier, et Sarah Juricic. 2019. « pySIP: an open-source tool for Bayesian inference and prediction of heat transfer in buildings ». *Congrés français de thermique*, 2019.

Rémi Bouchié, Alzetto Florent, Brun Adrien, Boisson Pierre, et Thebault Simon. s. d. « SHORT METHODOLOGIES FOR IN-SITU ASSESSMENT OF THE INTRINSIC THERMAL PERFORMANCE OF THE BUILDING ENVELOPE ».

Rouchier, Simon, Mickael Rabouille, et Pierre Oberlé. 2018. « Calibration of Simplified Building Energy Models for Parameter Estimation and Forecasting_ Stochastic versus Deterministic Modelling ». *Building and Environment*, 2018, 134 édition. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.043.

Staniaszek, Dan. 2021. « The road to climate-neutrality. Are national long-term renovation strategies fit for 2050? » *BPIE*, mars 2021. https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2021/03/BPIE_LTRS-_10-1.pdf.