

CALIBRATION DE SIMULATIONS ENERGETIQUES DE BATIMENTS RESIDENTIELS EXISTANTS A L'AIDE DE DONNEES DE TERRAIN PROVENANT D'UN RESEAU DE CAPTEURS – ÉTUDE DES ECARTS DE PERFORMANCES ENERGETIQUES

Mathieu **BOURDEAU** ^{a,b,*}, Philippe **BASSET** ^a, Amine **BOUZIDI** ^a, Julien **WAEYTENS** ^c, Elyes **NEFZAOUI** ^{a,*}

^a Univ Gustave Eiffel, CNRS, ESYCOM, 2 Bd Blaise Pascal, F-93160 Noisy-le-Grand, France

^b CAMEO SAS, 55 Rue de Châteaudun, F-75009 Paris, France

^c Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, 14-20 Bd Newton, Marne la Vallée Cedex 2, F-77477, France

RÉSUMÉ

Un réseau de 179 capteurs est déployé dans trois bâtiments résidentiels collectifs pour la collecte de données de consommation énergétique, de qualité de l'environnement intérieur et d'usages à retombées énergétiques. Un échantillon de 8 logements est instrumenté avec 144 capteurs, 26 capteurs sont déployés dans les parties communes et sur les systèmes énergétiques des bâtiments, 9 capteurs sont installés sur une station météo. L'analyse des données collectées aide à la calibration de modèles énergétiques. Des études de sensibilité mettent en avant les paramètres d'entrée des modèles ayant le plus d'impact sur les consommations de chauffage et notamment parmi les données collectées : température des logements, occupation, puissance dissipée, ouverture des fenêtres et utilisation d'eau chaude sanitaire. Les modèles calibrés montrent un écart de consommation énergétique de 4,8% par rapport aux mesures du réseau de capteur et de 16,3% par rapport aux modèles non calibrés. Les écarts observés peuvent alors être rapportés aux caractéristiques de l'enveloppe des bâtiments pour lesquels il n'y a pas eu de vérification et de mesures de terrain.

Mots Clés : Calibrage, modélisation énergétique, bâtiment résidentiel, écart de performance, réseau de capteurs

1. INTRODUCTION

La consommation énergétique des bâtiments résidentiels représente un tiers des consommations énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre européennes [1]. Afin d'atteindre les objectifs fixés en matière de sobriété énergétique et environnementale, la modélisation énergétique des bâtiments est un outil clé [2]. Dans le processus de modélisation, la calibration est une étape obligatoire pour obtenir des simulations précises et fiables [3]. Il est néanmoins fréquemment rapporté la présence d'écarts dits écarts de performance énergétique entre les simulations et les consommations réelles des bâtiments [4]. La littérature présente les différentes origines des écarts de performance énergétique, de la conception à l'exploitation des bâtiments [5]. La

description de l'exploitation des bâtiments dans les modèles énergétiques, notamment les usages énergétiques et les comportements des utilisateurs, a un poids important sur les consommations d'énergie [6] et dans les simulations [7]. C'est également le poste le plus accessible pour l'optimisation des consommations et de la gestion énergétique des bâtiments.

Cette étude présente les résultats de la calibration à l'aide de données de terrain de modèles énergétiques de bâtiments résidentiels collectifs ayant subi une rénovation énergétique lourde. L'étude porte principalement sur les consommations de chauffage pour la période de chauffe 2021-2022. Un réseau de 179 capteurs est déployé sur site pour la collecte de données de consommation d'énergie, de qualité de l'environnement intérieur et d'usages à retombées

* auteur correspondant

Adresse électronique : mathieu.bourdeau@univ-eiffel.fr, elyes.nefzaoui@univ-eiffel.fr

énergétiques. Les modèles énergétiques sont initialement développés à l'aide des documents du dossier des ouvrages exécutés et de scénarios d'usages règlementaires. Une analyse de sensibilité souligne l'impact des paramètres d'entrée des modèles sur les consommations de chauffage. Les scénarios d'usages des modèles sont remplacés par les résultats de l'analyse des données de terrain afin de quantifier l'impact de la calibration des modèles et d'identifier l'origine de potentiels écarts de performance énergétique pour ce cas d'étude.

Ce manuscrit est organisé comme suit : le cas d'étude est présenté en Section 2. La Section 3 détaille les méthodes utilisées pour l'instrumentation des bâtiments, l'analyse des données et la modélisation énergétique. La Section 4 discute les résultats de simulation et leur calibration issue de l'analyse des données collectées.

2. CAS D'ETUDE

Le cas d'étude considéré est un groupe de trois bâtiments résidentiels collectifs, localisés à Noisiel (77) dans l'Est de la région parisienne, et nommés B1, B2 et B3 dans la suite de l'étude. Les bâtiments comprennent 63 logements sociaux, pour une surface habitable totale de 4000 m² et répartis comme suit : treize logements pour B1, vingt-et-un logements pour B2 et vingt-neuf logements pour B3. Construits en 1974, les résidences ont subi une rénovation énergétique lourde en 2021. À la suite des actions de rénovation, les deux principaux postes de consommation énergétique, l'eau chaude de chauffage et l'eau chaude sanitaire (ECS), sont produites par un système géothermique centralisé.

Une campagne d'instrumentation est déployée dans les parties communes des bâtiments, sur les systèmes énergétiques ainsi que dans échantillon de huit ménages. Les principales caractéristiques de ces ménages sont résumées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Description des ménages instrumentés

Bâtiment/ Etage	Type de logement	Surface (m ²)	Orientation	Nombre d'habitants
B1/2	T3	63	Nord-Ouest	2
B1/3	T2	50	Nord-Est	1
B2/0	T3	64	Nord-Ouest	1
B2/1	T2	53	Sud-Est	1
B2/2	T2	53	Sud-Est	1
B2/5	T2	50	Sud-Est	1
B3/0	T4	74	Nord-Est	2
B3/2	T3	64	Nord-Ouest	1

3. MATERIEL ET METHODES

3.1. Plan d'instrumentation et réseau de capteurs

Le réseau de capteurs déployé vise la caractérisation des usages énergétiques (électricité, chauffage et ECS), de la qualité de l'environnement intérieur (QEI), des usages à retombées énergétiques et de la météo locale. Un total de 179 capteurs est installé sur site : 26 capteurs

sont dédiés aux parties communes et aux systèmes énergétiques des bâtiments, 144 capteurs sont déployés dans les ménages participants avec en moyenne 18 capteurs par appartements (Figure 1), 9 capteurs sont dédiés à une station météo. La collecte de données a démarré en février 2019 pour les parties communes et en février 2021 pour la majorité des logements.

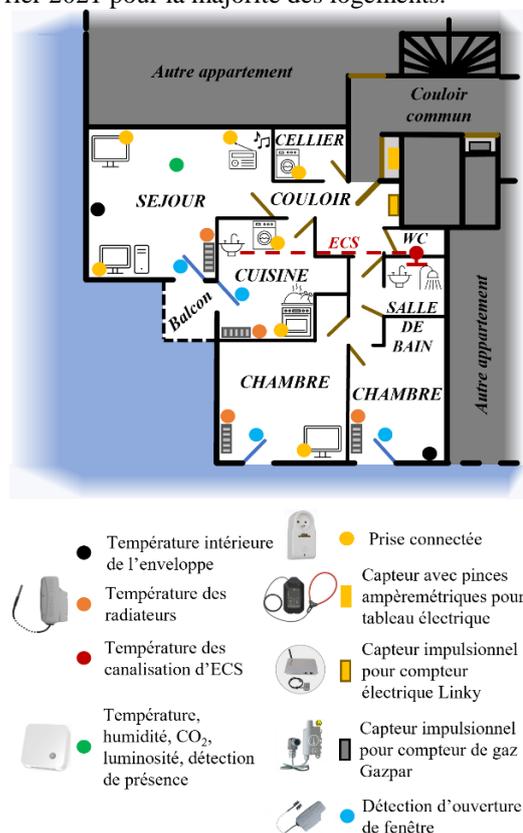


Figure 1 : Illustration d'un appartement témoin instrumenté

La consommation d'électricité est mesurée de trois manières. Des capteurs munis de pinces ampèremétriques (Ewattch Tyness) sont déployés sur les tableaux électriques et des capteurs impulsionnels (Fludia BelSenso FM410e) sont installés sur les compteurs communicants Linky. Spécifiques aux logements, des prises connectées (NKEWatteco Smartplug) sont également utilisées. La consommation d'énergie thermique (chauffage et ECS) est mesurée à l'échelle des bâtiments avec des compteurs thermiques non intrusifs à ultrason avec sortie impulsionnelle (Ultraflow U1000). Dans les ménages, ces deux postes de consommation sont caractérisés par des mesures de température des radiateurs et des canalisations d'ECS (SensingLab TEM-LAB-14NS). La consommation de gaz naturel, utilisé uniquement pour la cuisine, est également mesurée pour les logements concernés (Adeunis Pulse ATEX) et permet de caractériser une partie des apports de chaleur.

La QEI est caractérisée par des mesures de température des logements, d'humidité relative, de CO₂ et de luminosité, combinées dans un seul capteur (ELSYS ERSCO2). S'ajoutent également des mesures de température des parois intérieures de l'enveloppe des bâtiments (SensingLab TEM-LAB-14NS). A l'échelle des bâtiments, des mesures de température et d'humidité (SensingLab THY-LAB-41NS) sont effectuées dans les communs sur trois étages (rez-de-chaussée, étage intermédiaire et dernier étage).

Pour les usages à retombées énergétiques, un décompte du nombre de passages dans la pièce de vie des logements (combiné ELSYS ERSCO2) et à l'entrée des bâtiments (SensingLab PIR-LAB-41NS) est effectué. L'ouverture des fenêtres est également observée (OPE-LAB-41NS). La collecte de données s'effectue à chaque ouverture/fermeture des fenêtres.

Enfin, la météo locale est supervisée à l'aide d'une station météo (DeltaOhm HD33MLT) installée sur le campus à trois kilomètres du cas d'étude. Les données de température, d'humidité relative, de pluviométrie, de rayonnement solaire, de vitesse et de direction du vent sont collectées.

La collecte des données est intégralement réalisée sans fil en utilisant les protocoles de communication LoRaWan et GPRS. Le protocole LoRa est divisé en deux réseaux : un réseau opéré et un réseau privé. Le GPRS est utilisé pour la collecte de données électriques sur compteur Linky et tableaux électriques ainsi que la station météo. La collecte de données à l'échelle du bâtiment est quant à elle déployée sur un réseau LoRa opéré. Les capteurs déployés dans les ménages sont supportés par un réseau LoRa privé. L'ensemble des données collectées sont transférées sur un serveur FTP sous format csv.

3.2. Pré-traitement et analyse des données

Le pré-traitement des données est divisé en quatre étapes. L'ensemble des données est dans un premier nettoyage pour ne retenir que les informations essentielles – date, heure, mesure et unité. Le format des données est ensuite harmonisé pour obtenir une archive sous format csv pour chaque mesure de chaque capteur, mise à jour quotidiennement. La qualité des données est évaluée pour connaître les taux de données manquantes, indiquant quelles données peuvent être exploitées et de quelle manière. Enfin, le pré-traitement s'attache à la transformation de certaines données pour leur exploitation. Les données ayant un pas de temps infra-horaire sont agrégées à pas de temps horaire en vue du remplacement des scénarios dans les modèles énergétiques. Certaines données sont également modifiées pour être exploitées. C'est le cas des données de passages transformée en présence/absence. Les ouvertures de fenêtres n'étant pas à pas de temps fixe, elles sont rééchantillonnées. La température des canalisations d'ECS est retraitée. On cherche à obtenir un

volume d'utilisation horaire à température donnée. Étant donné la configuration des appartements instrumentés, il n'est pas possible de mesurer les consommations volumiques d'ECS ou d'installer un compteur thermique. On se base sur les mesures de l'ADEME [8] qui permettent d'obtenir des consommations journalières moyennes pour une température d'ECS de 40°C. On fixe alors le seuil de 40°C pour les températures et on agrège à pas de temps horaire : chaque point de température au-dessus de 40°C est considéré comme une minute d'utilisation d'ECS. On obtient un temps d'utilisation pour chaque heure de la journée. Le volume journalier moyen est équiréparti sur la journée en respectant les temps d'utilisation obtenus.

Une fois les différentes étapes du pré-traitement effectuées, l'analyse des données permet d'obtenir des informations cruciales sur les usages dans les bâtiments. Pour les mesures de températures intérieure, d'occupation, de température d'ECS, d'ouverture des fenêtres et de puissance dissipée, on cherche à obtenir des scénarios journaliers typiques. Des comparaisons avec les scénarios réglementaires des logiciels de modélisation énergétiques peuvent mettre en lumière des différences significatives. D'autres paramètres sont également étudiés pour caractériser la distribution des données. Par exemple, les températures des radiateurs illustrent la régulation du chauffage dans les bâtiments.

Le pré-traitement et l'analyse des données sont entièrement effectués avec Python 3.7.

3.3. Modélisation énergétique et calibration des modèles énergétiques

La modélisation énergétique et la calibration des modèles sont effectuées à l'aide de la suite de logiciel PLEAIDES [9], notamment les modules de simulation thermique dynamique (STD) et Amapola pour les études de sensibilité. Les modèles énergétiques reprennent les caractéristiques des bâtiments décrites dans le dossier des ouvrages exécutés (DOE).

Les modèles énergétiques suivent une approche multizone [10]. Les bâtiments sont donc divisés en différentes zones thermiques indépendantes : les différents appartements, les zones de circulation et les zones de stockage de chaque étage, les combles et les différents locaux techniques.

Le processus de modélisation et de calibration des modèles se fait en quatre étapes. Les modèles énergétiques sont configurés avec les informations du DOE. Les résultats sont alors comparés aux consommations mesurées par le réseau de capteurs pour mettre en évidence d'éventuels écarts de consommation. Une première étude de sensibilité identifie également les paramètres ayant le plus de poids sur les consommations d'énergie thermique en utilisant la méthode « one-at-a-time » [11]. On fait alors varier tous les paramètres des modèles à de plus ou moins 10% par rapport à leur valeur initiale. La troisième étape permet d'affiner les

paramètres des modèles énergétiques. On remplace les informations règlementaires par les données de terrain. Ces données concernent notamment les scénarios d'usage : ouverture des fenêtres, ECS, occupation, température de consigne et puissances dissipées. Il faut cependant noter que l'étude de sensibilité ne peut pas prendre en compte les scénarios d'ouverture des fenêtres. Les résultats des analyses de données permettent également d'adapter la gestion des systèmes énergétiques comme le chauffage et la ventilation. Les nouveaux résultats des simulations, issus de la calibration, font l'objet d'une nouvelle étude de sensibilité pour mettre en évidence les autres paramètres d'importance, sources potentielles d'écart de performance énergétique.

4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats de l'analyse des données et des modélisations énergétiques présentés dans cette étude concernent un échantillon des logements instrumentés, soit le bâtiment B1. Des analyses sont également conduites pour les bâtiments B2 et B3.

4.1. Comparaison des mesures et modélisation : avant calibration

La première étape consiste à comparer les données de consommation de chauffage avec les résultats issus des modèles. Pour les consommations mesurées, on dispose de deux compteurs opérationnels et ayant collecté suffisamment de données. Les données disponibles sont celles de B3 et du groupement B1+B2+B3, du 24/11/2021 au 08/03/2022. Afin d'estimer la consommation de chauffage de B1, on calcule le ratio par mètre carré chauffé de la consommation de B8 que l'on multiplie par la surface chauffée de B1.

Les modèles énergétiques avant calibration sont développés avec les informations issues du DOE et les scénarios d'utilisation standardisés proposés par le logiciel PLEAIDES. La température intérieure est fixée à 19°C avec régulation jour/nuit à 16°C, les fenêtres sont constamment fermées, et l'occupation, l'utilisation d'ECS et les puissances dissipées sont dimensionnées selon la taille des logements. Les scénarios de ventilation sont calqués sur les pics d'occupation. Les consommations estimées par les simulations reposent aussi sur des fichiers de données météo statistiques provenant d'une station dans une zone climatique considérée. Ces données sont donc différentes des conditions correspondant aux mesures de consommations énergétiques réalisées. On réestime les consommations modélisées par rapport aux DJU du site d'instrumentation. La comparaison montre un écart de +3,8% entre les consommations mesurées et celles modélisées, respectivement de 30 430 kWh et 29 287 kWh.

Afin de mettre en évidence les paramètres ayant le plus d'influence sur la consommation de chauffage, on effectue une analyse de sensibilité. Le Tableau 2 détaille

le poids des cinq paramètres les plus influents. Trois de ces paramètres correspondent à des données collectées par le réseau de capteur : la température intérieure des logements, l'occupation et la puissance dissipée. Parmi les autres mesures du réseau de capteur correspondant à des données d'entrée, on trouve l'utilisation de l'ECS avec une influence négligeable de 0,002%.

Tableau 2 : Impact des données d'entrée sur la consommation de chauffage modélisée avant calibration

Classement d'influence	Donnée d'entrée	Influence sur la consommation de chauffage
1	Température intérieure	65,6%
2	Taille des parois	16,7%
3	Occupation des logements	5,3%
4	Puissance dissipée	5,2%
5	Conductivité des matériaux	4,9%

4.2. Analyse des données et créations des scénarios d'usages

Le paramètre le plus influent ressortant de l'analyse de sensibilité avant calibration est la température intérieure des logements. L'étude des températures intérieures pour la période de chauffe 2021-2022 montre l'absence de régulation basique du système de chauffage centralisé, que ce soit entre le jour et la nuit ou entre les jours de semaine et de weekend (Figure 2). Cette analyse est confirmée par l'étude des températures des radiateurs (Figure 3). De plus, les températures sont particulièrement élevées : 97,7% et 96,9% des valeurs de température sont supérieures au seuil réglementaire de 19°C pour B1/2 le jour et la nuit. Pour B1/3, 100% des valeurs de températures le jour et la nuit sont supérieures à 19°C sur la période de chauffe. Les scénarios de température intérieure des logements sont donc fixés à la température constante, la température moyenne relevée par les capteurs sur la période de chauffe, soit 21,2°C et 23,2°C pour les logements B1/2 et B1/3.

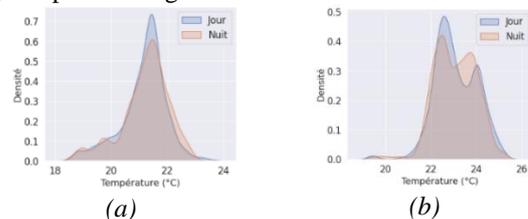


Figure 2 : Courbes de densité de la température intérieure des logements B1/2 (a) et B1/3 (b)

L'occupation et les puissances dissipées sont également étudiées pour obtenir des scénarios journaliers moyens à pas de temps horaire. L'occupation des logements est moyennée pour chaque pas de temps sur la période de chauffe du 2021-2022 (Figure 4). Le capteur étant placé dans la pièce de vie des logements et détectant un nombre de passages, les données traduisent l'activité dans les logements. Pour obtenir une occupation, les

valeurs sont remplacées : s'il y a un passage, on considère que tous les membres du foyer sont présents, autrement ils sont tous absents. On effectue également une correction pour la nuit pour prendre en compte la présence des occupants sans activité. Les puissances dissipées sont calculées sur la base des consommations électriques globales des logements.

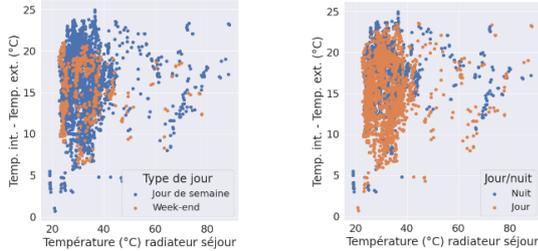


Figure 3 : Delta de température intérieure/extérieure vs. température du radiateur du séjour pour B1/3

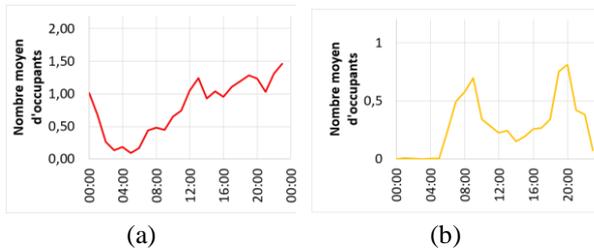


Figure 4 : Profil journalier moyen d'occupation de B1/2 sans (a) B1/3 (b)

L'ouverture des fenêtres et les usages d'ECS sont incorporées aux modèles bien que l'analyse de sensibilité des simulations ne leur accorde pas un impact significatif sur les consommations de chauffage. L'ouverture des fenêtres est traitée pour obtenir un profil journalier moyen par mois. On remarque en effet une différence significative du temps d'ouverture des fenêtres entre les mois d'hiver et les mois d'été (Figure 5). L'ECS est traitée en suivant la méthode décrite en Section 3.3. Enfin, on modifie également les scénarios de ventilation des logements instrumentés pour qu'ils correspondent à l'activité dans ces derniers.

4.3. Comparaison des mesures et modélisation : après calibration

Afin de calibrer les modèles, les données d'entrée standardisées de la modélisation énergétique sont donc remplacées par les données de terrain issues du réseau de capteurs. Les nouvelles données d'entrée concernent uniquement les deux appartements instrumentés du bâtiment B1.

Les différents paramètres sont remplacés un à un afin d'estimer leur impact respectif sur la consommation de chauffage sur la période de chauffe (Tableau 3). En considérant ensuite la personnalisation de tous les paramètres cités ci-dessus, on trouve un écart de +16,3% par rapport au modèle non calibré et de +4,8% par rapport aux mesures.

	mai-21	juin-21	juil-21	août-21	sept-21	oct-21	nov-21	déc-21	jan-22	févr-22
00:00	3	27	22	21	10	0	3	2	0	0
01:00	2	24	24	20	8	0	0	2	0	0
02:00	2	22	24	20	6	0	0	2	1	0
03:00	1	21	24	20	6	0	2	1	4	0
04:00	0	19	24	18	6	0	2	0	4	0
05:00	0	19	24	18	6	0	2	0	4	0
06:00	0	18	24	18	4	0	2	0	0	0
07:00	0	19	25	18	5	0	3	1	1	0
08:00	0	19	26	18	6	0	3	0	0	0
09:00	2	25	24	19	5	4	0	2	1	2
10:00	3	28	26	23	8	3	1	3	4	3
11:00	2	23	27	26	6	5	2	5	4	4
12:00	5	22	30	29	9	9	1	7	9	1
13:00	9	27	29	35	17	9	2	4	6	1
14:00	8	25	29	31	19	2	0	4	4	0
15:00	7	22	30	31	17	0	1	8	1	0
16:00	5	22	32	35	15	3	3	6	3	1
17:00	7	23	31	33	13	5	0	6	4	2
18:00	4	22	29	38	20	4	0	0	8	2
19:00	9	25	30	40	29	3	1	1	9	2
20:00	7	30	28	38	26	1	0	1	5	0
21:00	9	28	19	31	23	0	0	0	8	0
22:00	9	28	18	25	21	0	2	0	9	0
23:00	2	26	23	24	13	0	7	1	5	0
Heures d'ouverture par jour	1,6	9,4	10,4	10,5	5,0	0,8	0,6	0,9	1,6	0,3

Figure 5 : Profils moyennés d'ouverture de la fenêtre du séjour du logement B1/2 (en minutes dans les cellules)

Tableau 3 : Description des ménages instrumentés

	Consommation de chauffage (kWh)	Ecart avec la référence (kWh/m ² chauffé)	Ecart avec la référence
Référence	27 485	35,9	-
Température intérieure	29 984	39,2	9,1%
ECS	27 484	35,9	0,0%
Ouverture des fenêtres	28 921	37,8	5,2%
Puissance dissipée	27 548	36,0	0,2%
Occupation	27 554	36,0	0,3%
Toutes données	31 972	41,8	16,3%

Cette étude de sensibilité après calibration du modèle révèle les mêmes principaux paramètres ayant un impact sur la consommation de chauffage : température intérieure, taille des parois, conductivité des matériaux de l'enveloppe, scénarios d'occupation, et de puissance dissipée avec une influence respective de 39,1%, 11,7%, 4,5%, 3,8% et 3,6%. Les scénarios d'usage étant néanmoins calibrés sur les usages réels des logements instrumentés, ces résultats soulignent l'importance de vérifier également les paramètres de l'enveloppe des bâtiments, qui pourraient expliquer l'écart de 4,8%, même si ce dernier reste raisonnable.

4.4. Limites de l'étude et travaux prévus

La présente étude illustre l'intérêt d'utiliser de données de terrain pour l'étude énergétique de bâtiments résidentiels et la calibration des modèles énergétiques. Cependant, l'utilisation d'un réseau de capteurs sur site présente aussi des limites [12]. Notamment, pour des raisons techniques, il n'a pas été possible de couvrir entièrement la saison de chauffe 2021-2022 pour les trois bâtiments du cas d'étude. Des calculs de ratios doivent

compléter les calculs énergétiques pour effectuer des comparaisons entre modèles et mesures.

L'analyse des données présentée en Section 4.2 peut également être perfectionnée. Une classification plus détaillée des scénarios journaliers est prévue avec l'utilisation de méthodes de classification automatique sur les données de série temporelles [13]. Il faut aussi souligner que la méthode d'analyse de sensibilité « one-at-a-time » ne prends pas en compte d'éventuelle corrélations entre les paramètres que l'on fait varier. Certains paramètres tels que l'occupation des logements, l'ouverture des fenêtres et l'utilisation d'ECS, par exemple, peuvent être corrélés. D'autres méthodes de sensibilité plus sophistiquées pourront être implémentées par la suite.

Enfin, si les données collectées ne concernent qu'un échantillon limité de logements, il peut être envisagé de transférer certains résultats obtenus aux appartements non instrumentés. C'est le cas par exemple des températures intérieures en période de chauffe. L'analyse des données des logements instrumentés a montré des températures bien supérieures aux 19°C des scénarios réglementaires. Il est donc raisonnable d'envisager que la température intérieure est sensiblement la même dans les logements non instrumentés, ce qui d'après les études de sensibilité devrait avoir un impact significatif sur les consommations de chauffage.

5. CONCLUSION

Cette étude présente l'utilisation de données de terrain issues d'un réseau de capteur pour la calibration de modèles énergétiques de bâtiments résidentiels occupés et ayant subi des actions de rénovation énergétique lourde. Dans un premier temps, un modèle énergétique est développé sur la base du dossier des ouvrages exécutés et de scénarios d'usage réglementaires. La consommation d'énergie thermique modélisée pour le chauffage est alors inférieure de 3,8% à celle relevée par les mesures. L'étude de sensibilité du modèle met en évidence les paramètres ayant le plus d'impact sur les consommations de chauffage : température intérieure, taille des parois, occupation des logements, puissance dissipée et conductivité des matériaux de l'enveloppe.

Les données collectées permettent de remplacer les scénarios d'usage figurant parmi les données d'entrée des modèles impactant les consommations de chauffage. Le modèle calibré montre alors un écart de consommation de chauffage supérieure de 4,8% par rapport aux mesures et de 16,3% par rapport au modèle non calibré. La seconde analyse de sensibilité montre qu'une fois les données d'usage calibrées, les écarts de consommation énergétique résiduels peuvent être liés aux caractéristiques de l'enveloppe des bâtiments pour lesquels on ne dispose que de documentation post-rénovation.

L'analyse des données présente cependant des incertitudes du fait de données manquantes sur la période de chauffe étudiée. Il est également envisagé d'affiner le profilage des données à l'aide d'outils de classification automatique et de dupliquer certains résultats issus des mesures aux logements non instrumentés, afin de d'identifier plus précisément et de manière plus fiable les écarts de performance énergétique et leur origine.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été rendu possible par le soutien de l'Initiative I-SITE FUTURE (référence ANR-16-IDEX-0003) dans le cadre du projet ANDRE.

RÉFÉRENCES

- [1] ADEME, Climat, air et énergie | Chiffres clés, (2018).
- [2] BOURDEAU, M., ZHAI, X., NEFZAOU, E., GUO, X., CHATELLIER, P., Modeling and forecasting building energy consumption: A review of data-driven techniques, *Sustainable Cities and Society*, pp. 101533, (2019).
- [3] REDDY, T.A., Literature Review on Calibration of Building Energy Simulation Programs: Uses, Problems, Procedures, Uncertainty, and Tools, *ASHRAE Transactions*, pp. 226-240, (2006).
- [4] KAMELIS, N., GOBAKIS, K., VAGIAS, V., KOLOKOTSA, D., STANDARDI, L., ISIDORI, D., CRISTALLI, C., MONTAGNICO, F.M., PAREDES, F., MURATORE, P., VENEZIA, L., DRACOU, M.K., MONTENON, A., PYRGOU A., KARLESSI, T., SANTAMOURIS, M., Evaluation of the performance gap in industrial, residential & tertiary near-Zero energy buildings, *Energy and Buildings*, pp. 58-73, (2017).
- [5] DE WILDE, P., The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation, *Automation in Construction*, pp. 40-49, (2014).
- [6] PISELLO, A.L., ASDRUBALI, F., Human-based energy retrofits in residential buildings: A cost-effective alternative to traditional physical strategies, *Applied Energy*, pp. 40-49, (2014).
- [7] AHN, K.-U., KIM, D.-W., PARK, C.-S., DE WILDE, P., Predictability of occupant presence and performance gap in building energy simulation, *Applied Energy*, pp. 224-235, (2014).
- [8] ADEME, Guide technique | Les besoins d'eau chaude sanitaire en habitat individuel et collectif, (2017).
- [9] IZUBA, Pléiades | Logiciels d'optimisation énergétique & environnementale, <https://www.izuba.fr/>
- [10] FOUCQUIER, A., ROBERT, S., SUARD, F., STEPHAN, L., JAY, A., State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 272-288, (2013).
- [11] KRISTENSEN, M., PEDERSEN, S., Choosing the appropriate sensitivity analysis method for building energy model-based investigations, *Energy and Buildings*, pp. 166-176, (2016).
- [12] BOURDEAU, M., WERNER, D., BASSET, P., NEFZAOU, E., A Sensor Network for Existing Residential Buildings Indoor Environment Quality and Energy Consumption Assessment and Monitoring - Lessons Learnt from a Field Experiment, *Proceedings of the 9th International Conference on Sensor Networks*, pp. 105-112, (2020).
- [13] BOURDEAU, M., BASSET, P., BEAUCHENE, S., DA SILVA, D., GUIOT, T., WERNER, D., NEFZAOU, E., Classification of daily electric load profiles of non-residential buildings, *Energy and Buildings*, 110670, (2021).