



Projet UserGap

Partie HEIG-VD : Analyse de l'écart de performance lié à la demande de chauffage du bâtiment B1.2 de l'éco-quartier Eikenott à Gland (VD)

Rapport final du 5 décembre 2019

Auteurs :

P. Padey, G. Wagner, B. Périsset, S. Lasvaux
(HES-SO | HEIG-VD | IGT-LESBAT)

Résumé

Le projet UserGap propose une approche novatrice combinant ingénierie, économétrie et innovation ouverte pour analyser les écarts de performances (EdP) des bâtiments collectifs. Après avoir décomposé l'EdP et isolé le rôle des utilisateurs, un laboratoire vivant a testé des mesures ciblées de réduction de consommation. Ce projet a pour but de permettre, dans le futur, de mieux calibrer les modèles de prévision pour adapter le label Minergie et étudier la construction de futurs quartiers durables.

Ce rapport présente les résultats et conclusions de l'étude de la HEIG-VD sur l'évaluation de l'écart de performance du besoin de chaleur d'un bâtiment de l'éco-quartier Eikenott à Gland (VD) et des facteurs techniques et humains qui l'influencent. Dans un premier temps, le besoin de chaleur du bâtiment B1.2 est caractérisé à partir des résultats du calcul SIA 380/1 et de la demande Minergie. Ces résultats sont ensuite comparés en énergie utile avec les valeurs mesurées par les boîtiers de mesure eSmart. L'écart de performance est caractérisé pour différents besoins de chaleur correspondant au mode de calcul SIA 380/1 *Justificatif* ou SIA 380/1 *Comparaison* lorsque les données climatiques du site, la température intérieure et la consommation électrique sont utilisées. Cette première étape confirme l'écart de performance substantiel entre le calcul et la mesure. Le bilan thermique en mode *Comparaison* ne permet pas de réduire l'écart. Dans un deuxième temps, un calcul probabiliste du besoin de chaleur est proposé pour expliquer de manière systématique l'écart de performance. Chaque paramètre de la norme SIA 380/1 est pris comme incertains ou mis à sa valeur mesurée par les boîtiers eSmart. Les résultats montrent finalement que deux paramètres principaux sont responsables de l'écart de performance : le facteur de voilage (gestion des stores) et le débit d'air thermiquement actif (gestion de la ventilation mécanique). Une campagne de mesures complémentaire sur le bâtiment confirme que ces deux aspects sont responsables de l'écart de consommation. Des mesures correctives sont proposées et permettent de fournir des éléments pour le deuxième volet du projet UserGap (analyse socio-démographique des usagers du quartiers et analyse économétrique). La méthodologie proposée est désormais reproductible sur d'autres typologies de bâtiments et permet de rendre systématique la compréhension de l'écart de performance énergétique.

Liste des tableaux

Tableau 1: Structuration du rapport selon les étapes de la méthode développée.....	12
Tableau 2: Données de modélisation du bilan thermique.....	14
Tableau 3: Bilan thermique SIA 380/1 <i>Justificatif</i> (Q_h).....	16
Tableau 4: Bilan thermique de la demande Minergie ($Q_{h, eff}$).....	16
Tableau 5: Demande de chauffage mesurée.....	19
Tableau 6: Demande de chaleur pour la production d'ECS.....	21
Tableau 7: Température moyenne annuelle période de chauffage.....	24
Tableau 8: Débit d'air de la ventilation.....	25
Tableau 9: Consommation spécifique d'électricité.....	27
Tableau 10: Synthèse des paramètres mesurées et comparaison avec ceux de la demande Minergie.	31
Tableau 11: Besoin de chaleur annuel pour la production d'ECS pour le calcul normatif (SIA 380/1) et les années de mesure 2014 à 2017.....	32
Tableau 12: Consommation électrique annuel pour le calcul normatif (SIA 380/1) et pour les années de mesure 2014 à 2017.....	33
Tableau 13: Besoin de chaleur (Q_h) annuel pour le chauffage selon le bilan thermique (BT) normatif (SIA 380/1) et la demande Minergie et les années de mesure 2014 à 2017.....	34
Tableau 14: Besoin de chaleur annuel pour le chauffage avec les données météorologiques de la station de Nyon/Changins (scénario S1).....	36
Tableau 15: Besoin de chaleur annuel pour le chauffage avec les données météorologiques de la station de Nyon/Changins et la température intérieure mesurée par les smart meters (scénario S2).....	37
Tableau 16: Besoin de chaleur annuel pour le chauffage avec les données météorologiques de la station de Nyon/Changins, la température intérieure et la consommation électrique mesurées par les smart meters (scénario S3).....	38
Tableau 17 : Caractérisation des paramètres du modèle stochastique de calcul.....	44
Tableau 18: Evolution de l'écart de performance en fonction des scénarios d'harmonisation et du modèle probabiliste.....	46

Liste des figures

Figure 1: Représentation de l'écart de performance énergétique entre calcul théorique et consommation réelle pour un bâtiment (les parts sont données à titre d'illustration à la problématique).....	9
Figure 2: Structure du travail d'analyse des performances énergétiques du bâtiment.....	11
Figure 3: Présentation du cas d'étude.....	13
Figure 4: Schéma du système de suivi énergétique.....	17
Figure 5: Schéma de principe du suivi énergétique.....	18
Figure 6: Demande de chauffage mensuelle mesurée par le système de suivi.....	19
Figure 7 Profil journalier de demande de chaleur typique pour le chauffage.....	20
Figure 8: Demande de chaleur pour l'ECS mesurée par le système de suivi.....	21
Figure 9: Profil journalier typique de la demande de chaleur pour la production d'ECS.....	22
Figure 10: Température moyenne mensuelle par appartement.....	22
Figure 11: Température zone jour moyenne mesurée par le système de suivi.....	23
Figure 12: Température moyenne de la zone nuit mesurée par le système de suivi.....	24
Figure 13: Débit d'air au monobloc de ventilation mesuré par le système de suivi.....	25
Figure 14: Consommation d'électricité spécifique du bâtiment (somme des 20 compteurs des logements).....	26
Figure 15: Consommation d'électricité spécifique du bâtiment en fonction de l'irradiation reçue sur la façade sud-ouest.....	27
Figure 16: Signature énergétique du bâtiment B1.2 d'Eikenott.....	28

Figure 17: Diagramme H-M du bâtiment B1.2 d'Eikenott.....	30
Figure 18: Besoin de chaleur mensuel pour la production d'ECS pour le calcul normatif (SIA 380/1) et les années de mesure 2014 à 2017.....	32
Figure 19: Consommation électrique mensuel pour le calcul normatif (SIA 380/1) et pour les années de mesures 2014 à 2017.....	33
Figure 20: Besoin de chaleur mensuel pour le chauffage selon le bilan thermique (BT) normatif (SIA 380/1) et la demande Minergie et les années de mesure 2014 à 2017.....	34
Figure 22: Comparaison de l'irradiation (gauche) et de la température extérieure (droite) pour la station de référence de la SIA 380/1 <i>Justificatif</i> (Payerne) et pour la station à proximité du bâtiment pour 2014 à 2017 (Nyons Changins).....	35
Figure 23: Besoin de chaleur mensuel pour le chauffage avec les données météorologiques de la station de Nyon/Changins (scénario S1).	36
Figure 24: Besoin de chaleur mensuel pour le chauffage avec les données météorologiques de la station de Nyon/Changins et la température intérieure mesurée par les smart meters (scénario S2).....	37
Figure 25: Besoin de chaleur mensuel pour le chauffage avec les données météo de Nyon/Changins, la température intérieure et la consommation électrique mesurées par les smart meters (scénario S3).	38
Figure 26: Evolution de l'écart de performance en fonction des différents scénarios (S0, S1, S2, S3).	39
Figure 27 : Modèle déterministe de simulation énergétique selon la SIA 380/1.....	40
Figure 28 : Etapes de calcul d'un modèle probabiliste permettant de définir la distribution de probabilité de la consommation énergétique du bâtiment selon la SIA 380/1.....	42
Figure 29 : Distribution de la demande de chaleur spécifique du cas d'étude obtenu par le modèle probabiliste développé.	45
Figure 30 : Evolution de l'écart de performance en fonction des scénarios d'harmonisation et du modèle probabiliste.	46
Figure 31 : Résultats de la demande de chaleur probabiliste, calculée selon la norme SIA 380/1 <i>Justificatif</i> ("Qh eff Minergie") et mesurée ("Qh mesuré") de 2014 à 2017.....	47
Figure 32: Décomposition de la variance incluant le climat des années 2014 à 2017 comme variable.	49
Figure 33: Décomposition de la variance pour l'année 2016.....	50
Figure 34 : Photographies des façades du bâtiment.....	52
Figure 35: Position des stores pour des jours types chaque mois par fenêtre, un graphique par appartement (100% : store ouvert, 0% store baissé).....	54
Figure 36: Orientation des stores pour des jours types chaque mois par fenêtre, un graphique par appartement (100% : store ouvert, 0% store baissé).....	55
Figure 37: Débits d'air pulsé ("supply") et repris sur l'air vicié ("exhaust") mesurés à l'aide de l'acquisiteur initial installé.	56
Figure 38: Débits d'air mesurés à l'aide à l'aide du capteur de pression différentielle (air pulsé, fourni au bâtiment).....	57
Figure 39: Comparaison des débits mesurés selon le capteur de pression différentielle et ceux collectés via le système de suivi connecté en Modbus à l'automate de régulation (côté air pulsé, fournit au bâtiment).....	57
Figure 40: Comparaison des données du capteur de pression différentielle avec le débit (en fait pression différentielle) collecté sur l'automate de régulation.	58
Figure 41: Débits d'air d'après les données Losinger Marazzi une fois le calcul du débit effectué à partir de la valeur de la pression différentielle.....	58
Figure 42: Rendement de la récupération de chaleur.....	60
Figure 43: Débit d'air thermiquement actif calculé à partir des données du système de suivi.	61
Figure 44: Résultat du bilan thermique probabiliste avec ajustement du débit d'air thermiquement actif calculé pour l'année 2015.	62
Figure 45: Facteur de voilage moyen mensuel permettant d'obtenir la meilleure approximation de la demande de chauffage mesurée du bâtiment.....	63

Figure 46: Fenêtres ouvertes en imposte sur la façade nord-est à 5h30 le 27.02.2019. 64
 Figure 47: Façade nord-est 65
 Figure 48: Façade nord-ouest 65
 Figure 49: Façade sud-est 66
 Figure 50: Façade sud-ouest 66
 Figure 51 : Influence visible d'une fenêtre ouverte 66
 Figure 52: Système de mesure des valeurs U 67
 Figure 53: Mesure de la valeur U à l'aide d'un fluxmètre..... 68
 Figure 54: Installation des capteurs dans l'abri PC..... 69
 Figure 55: Température du dépôt de l'abri PC..... 69

Liste d'abréviations

EdP	Ecart de performance
Ex-Ante	Evaluation énergétique antérieure à une construction/rénovation
Ex-Post	Evaluation énergétique postérieure à une construction/rénovation
CPE	Contrat de performance énergétique
SRE	Surface de référence énergétique
SIA	Société suisse des ingénieurs et architectes
ECS	Eau chaude sanitaire
BT	Bilan thermique

Table des matières

RÉSUMÉ	2
LISTE DES TABLEAUX	3
LISTE DES FIGURES	3
LISTE D'ABREVIATIONS	5
TABLE DES MATIÈRES	6
INTRODUCTION	8
1 MÉTHODE	10
2 CARACTÉRISATION DU BESOIN DE CHALEUR	13
2.1 Présentation du bâtiment B1.2 de l'éco-quartier Eikenott	13
2.2 Besoins de chaleur calculé selon la norme SIA 380/1	14
2.2.1 Hypothèses de calculs	14
2.2.2 Résultats	16
2.3 Besoin de chaleur mesuré sur le bâtiment	16
2.3.1 Schéma de mesure	17
2.3.2 Analyse descriptive des données du système de suivi	19
2.3.3 Réponse thermique du bâtiment	27
2.3.4 Synthèse des performances mesurées	31
2.4 Comparaison des besoins de chaleur calculés et mesurés	31
2.4.1 Ecart de performance du besoin de chaleur pour l'ECS	32
2.4.2 Ecart de performance pour la consommation d'électricité	33
2.4.3 Ecart de performance du besoin de chaleur pour le chauffage	33
2.4.4 Harmonisation du besoin de chaleur calculé avec les données mesurées (mode SIA 380/1 <i>Comparaison</i>)	35
2.4.5 Synthèse sur la comparaison des besoins de chaleur calculés et mesurés	39
3 MODÈLE DE CALCUL SIA 380/1 PROBABILISTE DU BESOIN DE CHALEUR DU BÂTIMENT	40
3.1 Méthode	40
3.1.1 Description de l'approche	40
3.1.2 Caractérisation des données du modèle	43
3.2 Résultats du calcul SIA 380/1 probabiliste	45
3.3 Analyse globale de sensibilité	48
3.4 Synthèse sur l'analyse probabiliste	51
4 ANALYSE DÉTAILLÉE DE PARAMÈTRES AVEC VISITES/MESURES IN- SITU COMPLÉMENTAIRES	52
4.1 Facteur de voilage	52
4.1.1 Analyse qualitative	52
4.1.2 Analyse quantitative (approximée)	53
4.2 Analyse du monobloc de ventilation	56
4.3 Bilan thermique ajusté par les mesures	62
4.4 Thermographie	64
4.4.1 Contexte	64
4.4.2 Mesures	64
4.4.3 Analyses	65
4.4.4 Synthèse de la thermographie	67

4.5	Analyse des valeurs U des éléments d'enveloppe	67
4.5.1	Contexte	67
4.5.2	Mesures	67
4.5.3	Analyses	69
4.5.4	Synthèse des mesures de valeurs U	70
5	SYNTHÈSE DES PRINCIPAUX RÉSULTATS	71
6	DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS	73
6.1	Besoin de chaleur (SIA 380/1 <i>Justificatif</i>) vs. demande mesurée	73
6.2	Cas de l'aide à la conception et de marché avec contrats de performance énergétique (CPE, GPE)	74
6.3	Perspective du calcul probabiliste pour le bilan énergétique des bâtiments	75
7	RECOMMANDATIONS POUR L'AUTRE VOLET DU PROJET USERGAP	76
8	CONCLUSIONS.....	77
	RÉFÉRENCES.....	78

Introduction

En Suisse, les exigences légales de même que les labels de performances énergétiques (p.ex. Minergie®) se basent sur des calculs de besoins d'énergie reposant sur des conditions standards. La méthode de calcul du bilan thermique des bâtiments est, actuellement, définie par la norme SIA 380/1. Les paramètres de calcul sont standardisés en fonction de la catégorie d'ouvrage (cf. annexe A norme SIA 380/1:2009) afin de comparer les bilans de chaque bâtiment à des valeurs limites. L'utilisation de valeurs standards permet d'assurer une homogénéité de calcul pour le parc de bâtiments et une reproductibilité des résultats. Ces calculs normés sont alors repris dans le cadre des Lois sur l'Energie dans les Cantons et sont demandés dans le cadre d'une demande de permis de construire (p.ex. bilan thermique SIA 380/1 *Justificatif*).

Cependant, ces calculs normatifs ne sont pas toujours réalistes et représentatifs du fonctionnement lors de la phase d'exploitation du bâtiment. Le comportement thermique et les scénarios d'occupation réels du bâtiment peuvent différer des valeurs retenues dans les normes. Ces différences peuvent alors entraîner une variation importante de la demande énergétique des bâtiments par rapport au besoin énergétique normatif simulé. De nombreux retours d'expériences ont ainsi déjà mis en évidence un écart de performance (EdP) entre la consommation énergétique simulée lors des phases de conception des bâtiments (évaluation Ex-Ante) et la consommation énergétique mesurée lorsque le bâtiment est occupé (évaluation Ex-Post) (Menezes et al., 2012 ; Khoury 2015). Ce constat est également valable à l'échelle internationale.

Pour expliquer l'écart de performance, il est possible d'ajuster le modèle de bilan thermique à partir des données réelles du bâtiments (collectées par mesures). Pour les bâtiments anciens non rénovés (i.e. faiblement, voir non isolés), la performance énergétique est majoritairement influencée par les conditions climatiques et la température intérieure. Ils sont considérés comme fortement thermosensibles. Dans ce type de bâtiment, l'écart de performance est donc généralement principalement lié à des différences de données climatiques et de température intérieure. En ajustant le climat et la température intérieure dans le bilan thermique, il est donc généralement possible d'expliquer l'écart de performance. Cependant, pour les bâtiments récents, la performance énergétique est plus élevée grâce à une meilleure isolation et à la mise en place d'installations techniques efficaces. Cela permet de réduire fortement la demande de chaleur. La conception du bâtiment ainsi que la valorisation des apports de chaleur passives (solaire, appareils et personnes) permettent d'atteindre, entre autre, l'objectif d'une faible consommation énergétique. Dans ces bâtiments, de nombreux paramètres influencent la demande de chaleur. L'écart de performance est souvent multifactoriel (usage, climat, installations techniques, etc.). L'ajustement d'un bilan SIA 380/1 avec les valeurs mesurées nécessite l'accès à une quantité importante de données. La thermosensibilité du bâtiment n'est - en effet - plus forcément la principale source de l'écart de performance énergétique. Ainsi, de faibles déviations de l'ensemble des paramètres de modélisation, par rapports aux hypothèses prises pour les modélisations énergétiques, peuvent induire des écarts très importants. Au niveau Suisse, les résultats d'un projet de comparaison des consommations énergétiques *Ex-Ante / Ex-Post* de bâtiments ayant obtenus le label Minergie ou respectant le MoPEC ont été publiés par l'OFEN en 2016 (Demo SCOPE AG, et al. 2016). Les auteurs de ce projet ont montré une grande variabilité des consommations d'énergie entre les valeurs planifiées – en phase d'étude de projet – et les valeurs mesurées – en phase d'exploitation. Par exemple, les consommations effectives des bâtiments résidentiels multifamiliaux neufs certifiés Minergie, dépassent la valeur limite du label. Quelques pistes expliquant les écarts liés au bâtiment (fonctionnement des installations techniques) ou liés à l'occupant ont été mises en avant mais celles-ci ont permis d'expliquer seulement 25% des différences observées¹.

Il est donc nécessaire d'étudier plus en détail l'écart de performance énergétique des bâtiment à haute performance énergétique pour deux raisons. D'une part, dans le cadre de la stratégie énergétique 2050, les objectifs de réduction de la demande de chauffage des bâtiments reposent sur les valeurs limites fixées dans les normes (SIA 380/1). Une surconsommation du parc de bâtiments, par rapport à ces

¹ Les auteurs de ce projet n'avaient pas reçu pour mandat d'étudier les raisons des écarts observés.

valeurs limites, rendrait difficile l'atteinte de ces objectifs. D'autre part, de nouveaux modèles d'affaires dans le bâtiment (p. ex. les contrats de performance énergétique (CPE), la garantie de performance énergétique (GPE) ou le contracting énergétique) nécessitent de vérifier que les consommations énergétiques simulées (servant comme base de calcul pour le contrat) soient bien celles observées lors de l'exploitation (de Wilde, 2014).

Pour étudier l'écart de performance, il est nécessaire de comprendre ses origines. Une part peut être attribuée aux pratiques des utilisateurs, une autre partie, aux caractéristiques techniques du bâtiment et des systèmes en fonctionnement (IEA Annex 58, 2016) et une dernière part aux interactions entre le comportement des occupants et les installations techniques, Figure 1 :

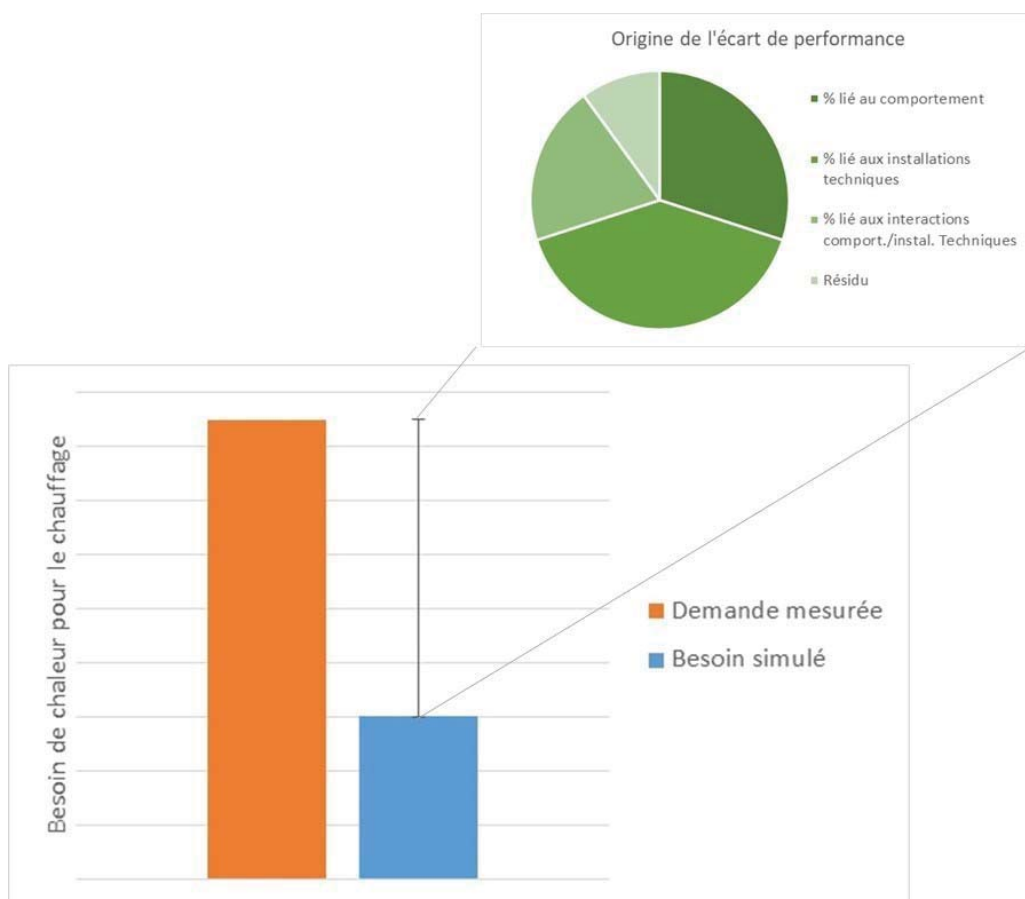


Figure 1: Représentation de l'écart de performance énergétique entre calcul théorique et consommation réelle pour un bâtiment (les parts sont données à titre d'illustration à la problématique).

Ce volet du projet UserGap, coordonné par la HEIG-VD, a pour objectif d'effectuer une analyse détaillée de l'origine de l'écart de performance sur le besoin de chaleur pour le chauffage (norme SIA 380/1) sur un bâtiment résidentiel multifamilial (B1.2) situé à Gland (VD) dans l'écoquartier Eikenott construit par Losinger Marazzi.

Ce bâtiment, labellisé Minergie®, dispose d'un système de suivi énergétique. Un premier objectif consiste à caractériser la demande de chaleur du bâtiment : comparaison entre valeurs calculées par les normes et valeurs fournies par le système de suivi. Puis, un modèle probabiliste de calcul de la norme SIA 380/1 est ensuite développé pour tenir compte de l'incertitude des paramètres du modèle. Il permet de quantifier l'influence de chaque paramètre sur la variabilité de la demande de chauffage. Les paramètres les plus influents sont ensuite étudiés en détail. Ils permettent de définir des actions pour réduire l'EdP au moyen, par exemple, de campagnes de sensibilisations énergétiques ciblées, auprès des usagers du bâtiment.

1 Méthode

La norme SIA 380/1 (§ 0.3.2) propose trois modes d'utilisation du bilan thermique d'un bâtiment :

- Optimisation : pour la planification et l'optimisation des variantes durant la définition du projet ;
- Justification : pour la comparaison avec les performances requises et exigences légales ;
- Comparaison : pour la comparaison avec des valeurs mesurées (en rénovation ou pour suivre la performance effective du bâtiment en exploitation).

La méthode d'analyse de l'écart de performance du bâtiment B1.2 de l'écoquartier Eikenott à Gland est décrite dans la Figure 2. Cinq étapes principales sont suivies dans ce rapport.

Dans un premier temps (étape 1), les données disponibles sont collectées : besoins de chaleur issus du bilan thermique SIA 380/1 (mode *Justificatif*²) et demandes mesurées issues du système de suivi énergétique (boitiers smart meters). Ces données ont ensuite été analysées. Dans ce projet, l'écart de performance se définit alors comme la différence entre le besoin de chaleur utile de chauffage (mode SIA 380/1 *Justificatif*) et la demande de chauffage mesurée du bâtiment.

A partir de ce constat initial, le bilan thermique en mode *Justificatif* (selon la SIA 380/1) est graduellement modifié en substituant les valeurs des paramètres normatifs par les données mesurées par le système de suivi. Du bilan thermique SIA 380/1 en mode *Justificatif*, l'analyse passe donc en bilan SIA 380/1 (mode *Comparaison*). L'évolution de l'écart de performance est ainsi caractérisée.

Pour dépasser les limites du bilan thermique SIA 380/1 *Comparaison*, un modèle de calcul probabiliste du besoin de chaleur est mis en place à l'étape 2 (voir description détaillée dans le chapitre 3). Dans le cadre d'une évaluation *Ex-Post*, il permet d'étudier l'influence de paramètres incertains ou variables lors de la conception, et non mesurés par le système de suivi. L'analyse d'incertitude est également associée à une analyse de sensibilité globale par décomposition de la variance. Elle permet d'identifier les paramètres du modèle ayant la plus grande influence sur la variance du besoin de chaleur de la demande de chauffage du bâtiment (Q_h) et *in fine* sur l'écart de performance.

L'étape 2 (calcul probabiliste) permet de mettre en évidence les « paramètres clefs » pour lesquels des campagnes d'observations et de mesures complémentaires sont nécessaires (étape 3). Ces campagnes servent à confirmer les observations issues de l'analyse probabiliste et les nouvelles données mesurées peuvent ensuite remplacer les valeurs conventionnelles dans le modèle de calcul SIA 380/1 pour réduire l'écart de performance en évaluation *Ex-Post*.

Finalement, des recommandations à destination des autres volets du projet UserGap sont proposées (étape 4). L'approche développée et les résultats obtenus ont également été mis en perspective avec les résultats des bilans thermiques en mode *Justificatif*.

² La norme SIA 380/1 distingue trois types d'application : *Optimisation* (pour la planification et l'optimisation des variantes durant la définition du projet), *Justification* (pour la comparaison avec les performances requises et exigences légales) et *Comparaison* (pour la comparaison avec des valeurs mesurées, soit en rénovation ou soit pour suivre la performance effective d'un bâtiment en exploitation)

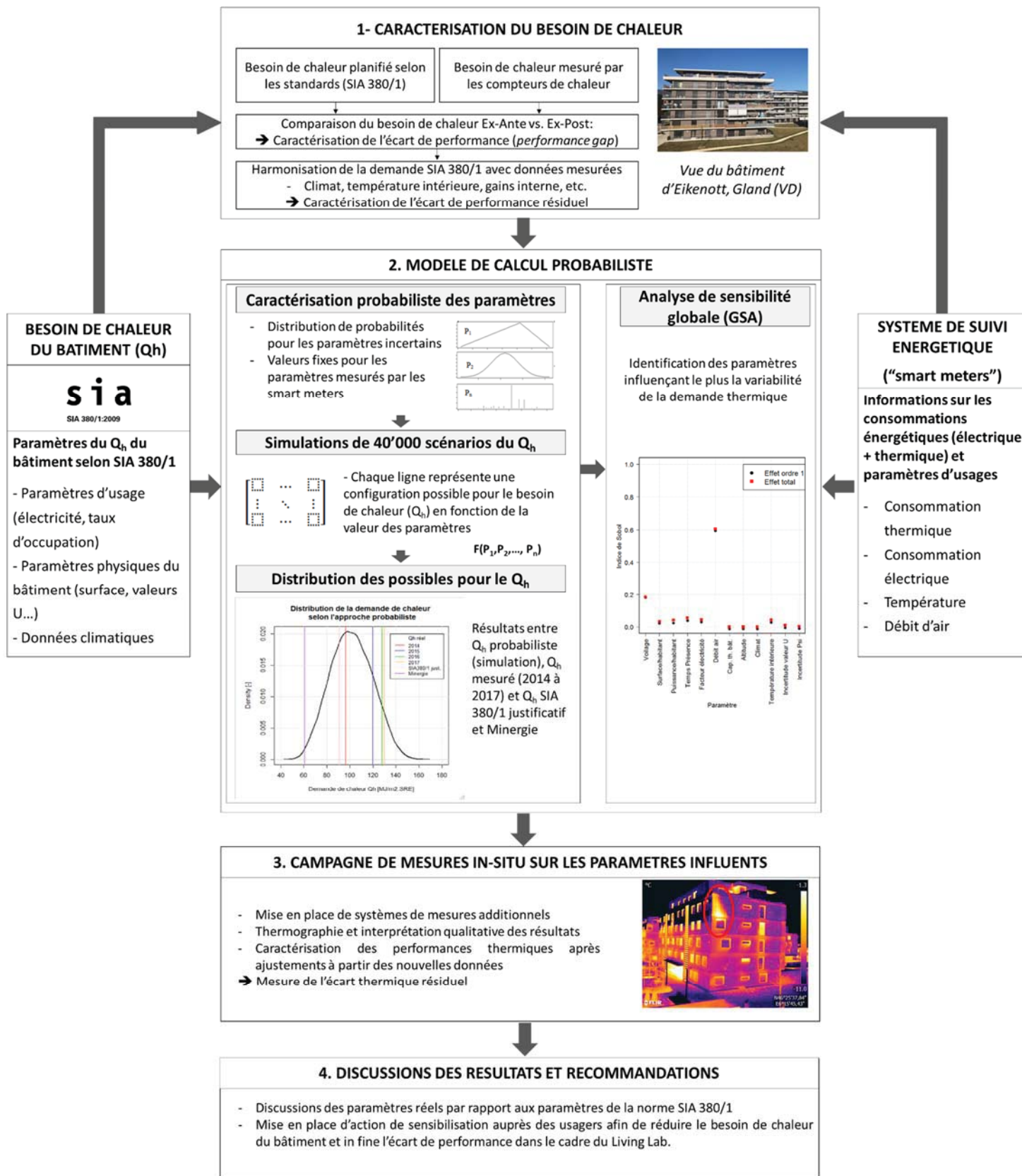


Figure 2: Structure du travail d'analyse des performances énergétiques du bâtiment.

Ce rapport UserGap (volet HEIG-VD : analyse du bâtiment B1.2) a été rédigé selon la structure de travail présentée ci-après, Tableau 1.


HEIG-VD (IGT-LESBAT)	
Bâtiment B1.2 de l'éco-quartier Eikenott, Gland (VD)	
Numéros de chapitres	
Chapitres 2.2 à 2.3	Analyse des données existantes : bilan SIA 380/1 <i>Justificatif</i> et système de suivi : smart meters
Chapitre 2.4	Ajustement du bilan thermique avec les données issues du système de suivi (passage du mode SIA 380/1 <i>Justificatif</i> au mode comparatif)
Chapitre 3	Modèle SIA 380/1 probabiliste et analyse de sensibilité globale (décomposition de la variance)
Chapitre 4	Analyse détaillée de paramètres du bilan avec visites/mesures in-situ complémentaires
Chapitre 5 et 6	Discussions des résultats et recommandations pour les autres volets du projet UserGap

Tableau 1: Structuration du rapport selon les étapes de la méthode développée.

2 Caractérisation du besoin de chaleur

Dans ce chapitre, le besoin de chaleur du bâtiment servant de cas d'étude est caractérisé à partir du bilan selon la norme SIA 380/1³ et la demande Minergie (également dénommée données *Ex-Ante*), mais également à partir des données mesurées et collectées dès la mise en service du bâtiment (également dénommée données *Ex-Post*). La différence entre le besoin de chaleur calculée et la demande mesurée correspond à l'écart de performance (EdP) ou "*Performance gap*".

2.1 Présentation du bâtiment B1.2 de l'éco-quartier Eikenott

Le cas d'étude retenu est un bâtiment d'habitation multifamilial situé dans le quartier d'Eikenott à Gland (Figure 3). Le quartier d'Eikenott a été construit par Losinger Marazzi entre 2011 et 2014 et se veut exemplaire en matière de consommation énergétique. A ce titre, les bâtiments ont obtenu le label Minergie® sur le volet énergétique et Minergie-Eco® sur le volet écologique. Le bâtiment étudié correspondant est le B1.2⁴, dont les façades principales sont orientées Sud-Ouest / Nord-Est. Il se compose d'un sous-sol (cave, locaux techniques), d'un rez-de-chaussée, de quatre étages et d'un attique le tout formant un ensemble de 20 logements pour une surface de référence énergétique (SRE) de 2'663 m².



Figure 3: Présentation du cas d'étude.

Au niveau de ses installations techniques, le bâtiment B1.2 est connecté au réseau de chauffage à distance alimentant le quartier fonctionnant au bois (80%) et au gaz (20%). Le chauffage des logements est assuré par une distribution au sol. Le bâtiment est équipé d'une installation de ventilation mécanique contrôlée (VMC) double flux avec récupération de chaleur (rendement⁵ fabricant ~ 80%). Il n'est pas équipé d'installations de production d'énergie décentralisée (solaire thermique, photovoltaïque, etc.). Le facteur de forme du bâtiment est de 1.095 traduisant une bonne compacité.

³ Edition 2009

⁴ Numéro Minergie VD-063-ECO

⁵ Rendement de récupération de chaleur (correspondant à l'efficacité), ci-après seulement rendement.

Le coefficient de transfert thermique spécifique (coefficient H) est de 1.55 kW/K en considérant le débit d'air thermiquement actif du calcul Minergie®. L'enveloppe thermique se compose de façades ventilées et les isolants (polystyrène ou polyuréthane) ont des épaisseurs variant entre 20 et 30 cm. Le bâtiment se caractérise également par une large proportion de surfaces vitrées (triple vitrage, coefficient de transmission thermique moyen de 0.8 W/(m²·K), g = 0.51) représentant une surface totale de 605 m² permettant un captage important de l'énergie solaire.

2.2 Besoins de chaleur calculé selon la norme SIA 380/1

2.2.1 Hypothèses de calculs

A partir des bilans thermiques mis à disposition par le Maître de l'Ouvrage dans le cadre du projet, les principales hypothèses de calcul ont été extraites et sont synthétisées dans le Tableau 2 :

Habitat collectif	Unité	SIA 380/1: 2009	Demande Minergie pour le bâtiment B12 de Eikenott
Besoin de chaleur utile pour le chauffage			
Station météorologique de référence	-		Payerne
Surface de référence énergétique	m²		2662.9
Température ambiante	°C		20
Majoration de la température ambiante : Régulation par pièce et/ou température de départ ≤ 30°C	K		0
Surface par personne	m² _{SRE} /P		40
Chaleur dégagée par personne	W/P		70
Durée de présence journalière des personnes	h		12
Facteur de voilage (occultation des fenêtres)	%		0
Besoins d'électricité (hors ECS)	MJ/m² _{SRE}		100
Facteur de réduction des besoins d'électricité	-		0.7
Débit d'air thermiquement actif	m³/(h·m² _{SRE})	0.7	0.33
Débit d'air moyen	m³/h	-	2400
Rendement de récupération de chaleur	%	-	80
Présence d'un puits canadien	-	-	Non
Infiltration de base Minergie	m³/(h·m² _{SRE})	-	0.15
Température de départ du chauffage	°C	-	30
Température de l'ECS	°C	-	60
Besoin d'énergie finale pour le chauffage et l'ECS			
Besoin de chaleur utile pour le chauffage (Q _h)	MJ/m² _{SRE}	90.8	-
Besoin de chaleur efficace (Q _{h,eff})	MJ/m² _{SRE}	-	60.7
Besoin de chaleur utile pour l'ECS	MJ/m² _{SRE}	75	75
<i>Rendement des installations techniques pour le chauffage et énergie finale consommée pour le chauffage</i>			
Chauffage au bois	%	65	85
Gaz à condensation	%	85-95	95
<i>Taux de couverture pour le chauffage</i>			
Chauffage au bois	%	-	80
Gaz à condensation	%	-	20
<i>Energie finale consommée pour la production de chauffage</i>			
Chauffage au bois	kWh/m² _{SRE}	-	15.8
Gaz à condensation	kWh/m² _{SRE}	-	3.5
<i>Rendement des installations techniques pour l'ECS et énergie finale consommée pour la production d'ECS</i>			
Chauffage au bois	%	56	85
Gaz à condensation	%	85-95	92
<i>Taux de couverture pour l'ECS</i>			
Chauffage au bois	%	-	80
Gaz à condensation	%	-	20
<i>Energie finale consommée</i>			
Chauffage au bois	kWh/m² _{SRE}	-	19.6
Gaz à condensation	kWh/m² _{SRE}	-	4.5

Tableau 2: Données de modélisation du bilan thermique.

Dans les deux calculs (SIA 380/1 en mode *Justificatif* et Minergie), le bilan thermique est calculé en considérant comme station météorologique de référence, la station de Payerne. Cette station est utilisée pour les bilans en mode *Justificatif* dans le canton de Vaud (VD) pour des altitudes inférieures ou égales à 800m⁶. Les données de température et d'irradiation sont définies mensuellement. Elles sont issues d'une année météorologique standard dont les valeurs sont décrites dans le cahier technique SIA 2028. Les données d'occupation sont également identiques. La température intérieure est fixée à 20°C sans majoration puisque la distribution de chauffage au sol est régulée par pièce (thermostat). Les besoins d'électricité et le facteur de réduction ou part pouvant être valorisée comme apport interne sont fixés respectivement à 100 MJ/m²_{SRE} et 70%. En dehors des paramètres climatiques, qui varient mensuellement, toutes les valeurs des paramètres du bilan thermique selon la norme 380/1 sont fixes toute l'année.

Le label Minergie en vigueur jusqu'à fin 2017 se base sur deux exigences principales. La première exigence évalue la qualité de l'enveloppe thermique appelée « Exigence primaire posée à l'enveloppe thermique du bâtiment ». Cette exigence impose des valeurs limites renforcées plus ou moins importantes en fonction du label visé aux besoins de chaleur pour le chauffage en mode *Justificatif*. La seconde exigence se nomme « Indice Minergie ». Elle exprime le besoin en énergie finale pondérée nécessaire afin de couvrir les besoins de chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, le besoin en électricité pour la ventilation et la climatisation. Cette exigence permet de tenir compte de l'efficacité énergétique des installations techniques du bâtiment pour la production de chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire (ECS), du système de ventilation mécanique contrôlé obligatoire ainsi que du système de climatisation en cas de présence. Dans le cadre du calcul de l'indice Minergie, les besoins de chaleur pour le chauffage correspondent aux besoins de chaleur spécifique ou effectif⁷ ($Q_{h,eff}$) du bâtiment tenant compte du débit d'air thermiquement actif propre au système de ventilation mécanique installé.

La différence entre la demande de label Minergie, notamment au niveau de l'Indice Minergie et le bilan thermique *Justificatif* par performance globale requis dans le cadre des formulaires énergétiques des mises à l'enquête se situe niveau du débit d'air thermiquement actif représentatif du système de ventilation. En effet, dans le cadre du bâtiment étudié, la norme SIA 380/1 en mode *Justificatif* fixe un débit d'air thermiquement actif de 0.7 m³/(m²·h) sans tenir compte d'une quelconque efficacité de récupération liée à l'installation technique de ventilation. A contrario, le calcul de l'Indice Minergie tient compte d'une part d'un taux de renouvellement d'air plus important que la norme (~0.9 m³/(m²·h)) et également d'autre part, du rendement de récupération de chaleur du monobloc de ventilation (80%). Ces deux valeurs permettent de calculer un débit d'air thermiquement actif (~0.33 m³/m²·h) qui sera pris en compte pour le calcul des déperditions par ventilation. Finalement, le calcul Minergie tient compte du rendement des producteurs de chaleur pour calculer la demande en énergie finale du bâtiment afin de se conformer aux seuils du label.

Remarque :

Dans la suite du rapport, les résultats de la demande Minergie seront uniquement présentés en chaleur utile (besoins) en tenant compte du débit d'air thermiquement actif lié au système de ventilation mais sans tenir compte des rendements des producteurs de chaleur⁸.

⁶ Station météorologique de référence définie par le canton de Vaud, Règlement d'application de la loi sur l'énergie (RLVEne, 730.01.1), article 19

⁷ Instruction concernant le formulaire Justificatif MINERGIE®, version 2015 selon SIA 380/1 :2009

⁸ Le choix de présenter les résultats en chaleur utile s'explique par le fait que les données mesurées dans le bâtiment sont également exprimées en chaleur utile car mesurées au niveau des compteurs de chaleur (cf. chapitre sur le besoin de chaleur mesuré sur le bâtiment)

2.2.2 Résultats

A partir des hypothèses de modélisation présentées dans le chapitre 2.2.1, le besoin de chaleur utile pour le chauffage est calculé selon la procédure de calcul décrite dans la norme SIA 380/1. Les résultats du bilan thermique SIA 380/1 *Justificatif* sont donnés dans le Tableau 3 – par la suite nommé Bilan « SIA 380/1 (*Justificatif*) » - et les résultats pour les besoins de chaleur spécifiques pour le chauffage ($Q_{h,eff}$) utilisés pour le calcul de l'indice Minergie sont donnés dans le Tableau 4 – par la suite nommé Bilan « *Justificatif* Minergie ».

	Perte transmission QT [MJ/m ² _{SRE}]	Perte ventilation QV [MJ/m ² _{SRE}]	Apport de chaleur			Fraction utile η_g	Besoin de chaleur Qh [MJ/m ² _{SRE}]
			Apport interne Qi [MJ/m ² _{SRE}]	Apport solaire Qs [MJ/m ² _{SRE}]	Total apports chaleur [MJ/m ² _{SRE}]		
Janvier	25.4	11.8	8.3	5	13.2	1	23.9
Février	21.4	10	7.5	7.3	14.8	1	16.6
Mars	18.7	8.7	8.3	12	20.3	1	7.2
Avril	14.7	6.8	8	13.2	21.2	0.9	1.6
Mai	8.7	4	8.3	15.6	23.9	0.5	0
Juin	4.7	2.1	8	16.5	24.6	0.3	0
Juillet	1.9	0.8	8.3	17.4	25.7	0.1	0
Août	2	0.8	8	16.2	24.5	0.1	0
Septembre	7.5	3.4	8.3	12.4	20.4	0.5	0
Octobre	13.1	6.1	8	8.4	16.7	1	2.9
Novembre	19.7	9.2	8.3	4.7	12.7	1	16.2
Décembre	23.6	11	8	3.2	12.1	1	22.4
Total	161.4	74.7	97.3	131.9	230.1	-	90.8

Tableau 3: Bilan thermique SIA 380/1 *Justificatif* (Q_h).

La valeur limite SIA 380/1 pour le besoin de chauffage du bâtiment est de 105 MJ/m²_{SRE}. Les besoins de chaleur pour le chauffage sont de 90.8 MJ/m²_{SRE} (soit 13.5% inférieur à la limite). Ce besoin de chaleur permet de remplir l'exigence primaire Minergie posée à l'enveloppe thermique ($Q_{h,SIA380/1} \leq 90\% Q_{hi,SIA380/1}$).

	Perte transmission QT [MJ/m ² _{SRE}]	Perte ventilation QV [MJ/m ² _{SRE}]	Apport de chaleur			Fraction utile η_g	Besoin de chaleur Qh [MJ/m ² _{SRE}]
			Apport interne Qi [MJ/m ² _{SRE}]	Apport solaire Qs [MJ/m ² _{SRE}]	Total apports chaleur [MJ/m ² _{SRE}]		
Janvier	25.4	5.5	8.3	5	13.2	1	17.7
Février	21.4	4.7	7.5	7.3	14.8	1	11.3
Mars	18.7	4.1	8.3	12	20.3	1.0	2.9
Avril	14.7	3.2	8	13.2	21.2	0.8	0.5
Mai	8.7	1.8	8.3	15.6	23.9	0.4	0.0
Juin	4.7	0.9	8	16.5	24.6	0.2	0.0
Juillet	1.9	0.3	8.3	17.4	25.7	0.1	0.0
Août	2	0.3	8	16.2	24.5	0.1	0.0
Septembre	7.5	1.5	8.3	12.4	20.4	0.4	0.0
Octobre	13.1	2.7	8	8.4	16.7	0.9	0.5
Novembre	19.7	4.2	8.3	4.7	12.7	1	11.2
Décembre	23.6	5.1	8	3.2	12.1	1	16.6
Total	161.4	34.3	97.3	131.9	230.1	-	60.7

Tableau 4: Bilan thermique de la demande Minergie ($Q_{h,eff}$).

Les deux bilans thermiques ne diffèrent que par les différences liées aux déperditions par ventilation. Le débit d'air thermiquement actif est de 0.7 m³/m²·h dans le bilan « SIA 380/1 » et de 0.33 m³/m²·h dans le cas du bilan « Minergie ». La prise en considération du système de ventilation double flux avec récupération de chaleur dans le bilan thermique, à travers le débit d'air thermiquement actif, permet de réduire de près de 33% les besoins utiles de chaleur pour le chauffage par rapport à la norme SIA 380/1.

2.3 Besoin de chaleur mesuré sur le bâtiment

Le bâtiment B1.2 est fortement instrumenté. Le système de suivi, prévu dès la phase de conception du bâtiment, a été implémenté par la société eSmart. L'ensemble des données de suivi sont, en principe, disponibles depuis la mise en service du bâtiment. Dans les faits, seules les années 2015 à 2017 sont les plus complètes (voir discussion dans les chapitres à suivre). Les bilans des consommations énergétiques mesurés sont présentés pour des pas de temps mensuels et annuels pour les faire correspondre aux bilans calculés par la norme SIA 380/1. En complément, des profils de demandes énergétiques horaires ont été utilisés (cf. chapitre 2.3.2). Ils permettent d'illustrer le comportement dynamique du bâtiment (influence de l'irradiation solaire reçue notamment).

2.3.1 Schéma de mesure

Les données mesurées par le système de suivi eSmart sont représentées dans la Figure 4 :

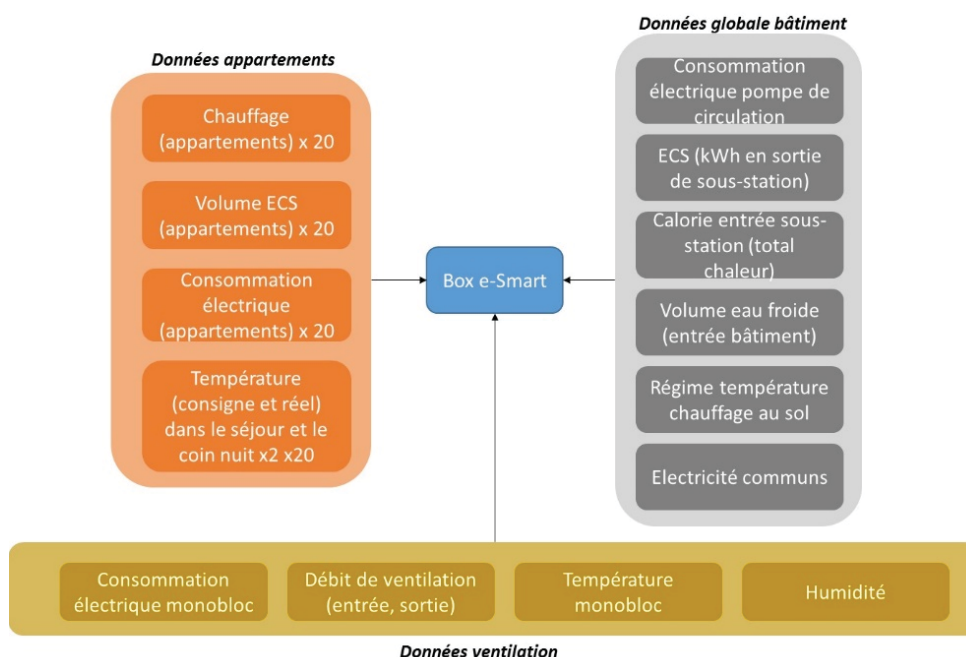


Figure 4: Schéma du système de suivi énergétique.

Le système de suivi collecte trois catégories de données :

- Les données relatives aux logements (partie orange) : Celles-ci se composent des relevés individuels de chaque appartement. Les mesures des compteurs de chaleur, d'électricité, du volume d'ECS soutiré ainsi que les températures des zones jour et nuit sont enregistrées. Pour ces dernières, les températures de consignes ainsi que les températures réelles sont enregistrées.
- Les données relatives au monobloc de ventilation (partie jaune) : Celles-ci se composent des données d'opération du monobloc, i.e., débit, consommation électrique de fonctionnement, température et humidité. Elles sont remontées au système de suivi par interface modbus⁹ provenant de l'automate de gestion du monobloc.
- Les données globales du bâtiment (partie grise) : Celles-ci se composent des données mesurées au niveau du local technique, i.e. débit, températures de la sous-station d'échange de chaleur, consommation électrique des pompes et des communs.

Le schéma de principe des points de mesures est présenté dans la Figure 5. Les données mesurées sont présentées dans le chapitre suivant.

⁹ Protocole de communication non-propriétaire utilisé pour des réseaux d'automates programmables

2.3.2 Analyse descriptive des données du système de suivi

Ce chapitre présente une analyse descriptive des données énergétiques mesurées par le système de suivi. Elles seront ensuite mises en perspective avec les données du bilan thermique Ex-Ante (i.e., selon la SIA 380/1 et la demande Minergie) dans le chapitre suivant.

La demande de chauffage totale du bâtiment est obtenue en sommant la demande de chauffage de chaque compteur de chaleur des 20 logements, Figure 6 :

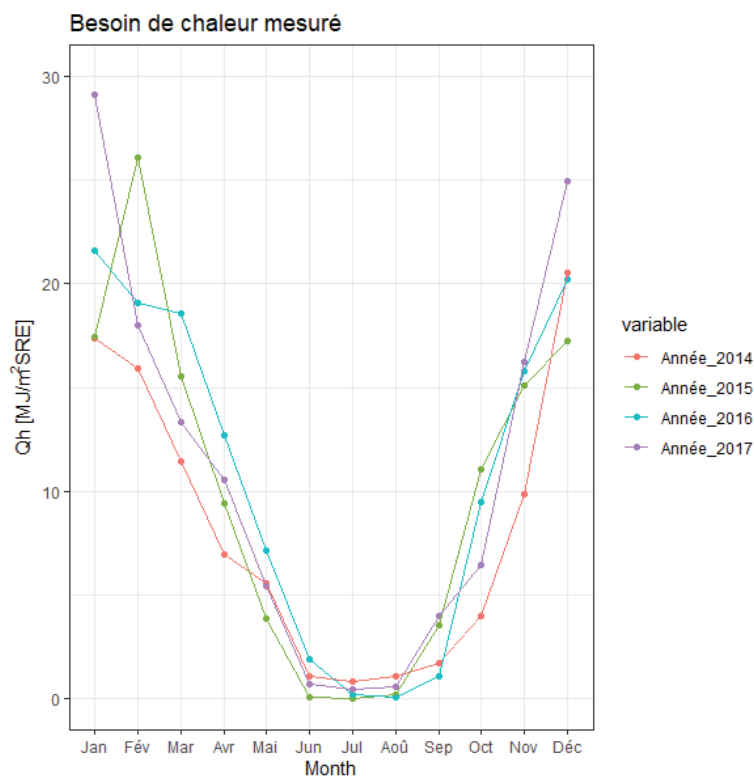


Figure 6: Demande de chauffage mensuelle mesurée par le système de suivi

La demande de chauffage présente un profil typique avec des pointes de consommation lors des mois d’hiver (période de chauffe). En intersaison, cette demande décroît fortement. Les données mesurées montrent également que la demande du bâtiment entre mai et septembre n’est pratiquement jamais totalement nulle contrairement au bilan SIA 380/1 où la demande est nulle pour ces cinq mois (cf. Figure 20). La demande de chauffage moyenne annuelle est présentée dans le Tableau 5 :

Demande de chaleur pour le chauffage Q_h [MJ/m²SRE]				
	2014	2015	2016	2017
Total	96.4	119.6	127.8	129.8

Tableau 5: Demande de chauffage mesurée

La demande annuelle présente un saut important entre l'année 2014 (première année complète d'utilisation du bâtiment) et les trois années suivantes (2015, 2016, 2017) avec une augmentation de 24%. Il est possible que l'année de mise en service ait nécessité des réglages suite aux premiers mois d'habitation du bâtiment (problématique d'inconfort thermique par exemple). Ces ajustements pourraient expliquer ce saut de consommation. Pour les trois autres années (2015 à 2017), une légère tendance à la hausse est observée, +6.8% entre 2015 et 2016 puis 1.5% entre 2016 et 2017. La demande, bien que dépendante des conditions climatiques semblent néanmoins se stabiliser autour d'une valeur moyenne de 125 MJ/m²_{SRE}.

Des profils moyens journaliers pour la demande de chaleur peuvent être établis selon la segmentation été (1^{er} Juin au 1^{er} Septembre)/hiver (1^{er} Décembre au 1^{er} Mars) et semaine/week-end (Figure 7). Ceux-ci se basent sur les quatre années de mesures et présentent une valeur moyenne heure par heure.

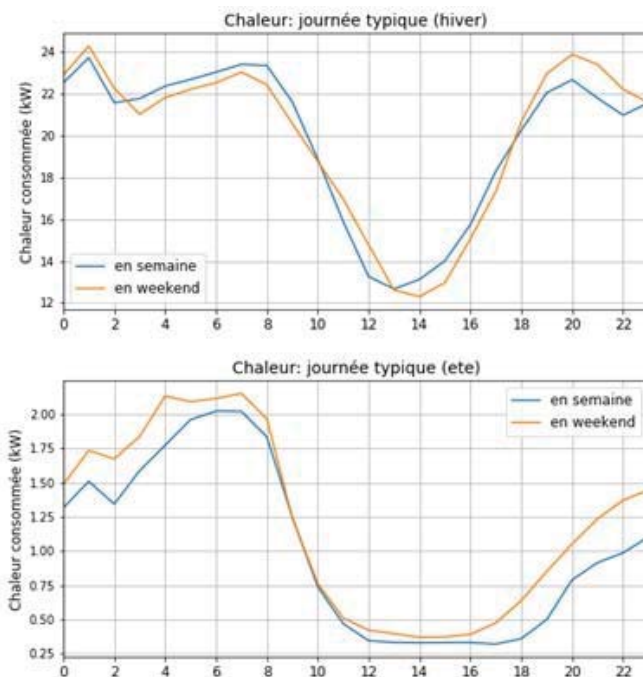


Figure 7 Profil journalier de demande de chaleur typique pour le chauffage.

Les profils de demande énergétique pour le chauffage sont identiques entre la semaine et le weekend. Ils traduisent une régulation identique tous les jours de l'année. Ce constat est confirmé par la comparaison des profils hiver/été. Ceux-ci présentent des formes relativement similaires. Les différences sont uniquement dues à l'augmentation des heures d'ensoleillement estivales. Pour la période estivale, la demande de chaleur est voisine de 2.00 kW en pointe la nuit. Le chauffage semble donc fonctionner ce qui est très surprenant. Cette demande estivale traduit peut-être un besoin de régulation. La demande de chauffage reste néanmoins très faible avec une consommation dix fois moindre pour la pointe nocturne entre l'été et l'hiver. Cependant, cette demande estivale interroge car elle est probablement superflue au regard des conditions météo mesurées.

La demande de chaleur pour la production d'ECS est obtenue en sommant les données des 20 logements, Figure 8. À la différence des données de chauffage, la demande pour l'ECS est déduite par calcul. En effet, le système de suivi mesure le volume d'ECS. L'estimation de la demande se fait en supposant une différence de température entre l'eau froide et l'eau chaude de 50°C.

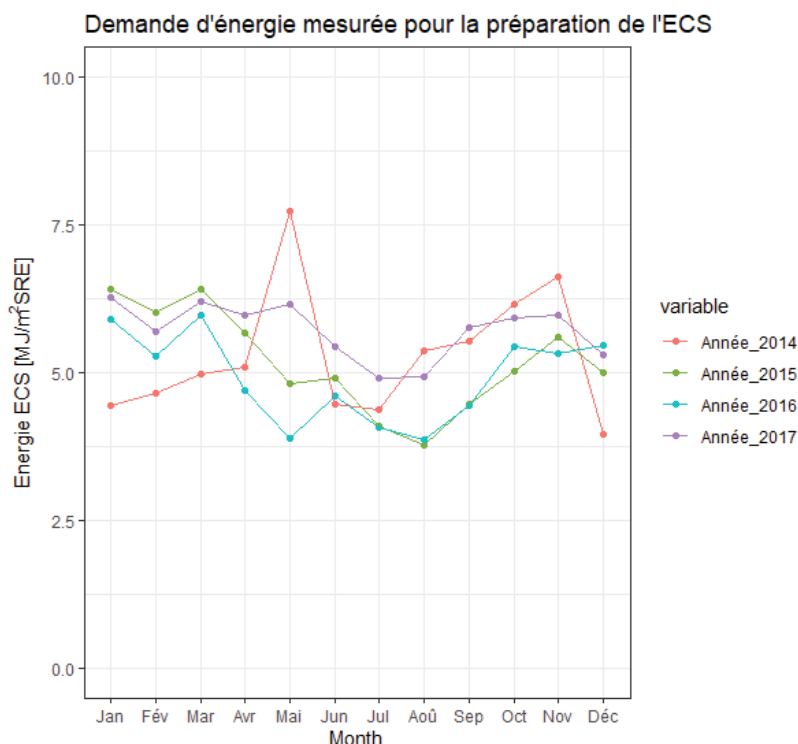


Figure 8: Demande de chaleur pour l'ECS mesurée par le système de suivi.

La demande pour la production d'ECS présente un profil homogène sur les quatre années considérées. Le profil de l'année 2014 présente néanmoins un pic inexpliqué en mai. Cependant, comme cette année correspond à la première année d'utilisation complète du bâtiment, il est possible que des ajustements de régulation et de gestion aient été effectués. Pour les trois autres années, le profil de demande présente moins de variation interannuelle, Tableau 6. Finalement, un léger creux de demande est observé en période estivale. Il est probablement lié aux conditions climatiques plus clémentes (douche plus courte ou plus froide) et à une présence moindre (congés). La demande annuelle pour la production d'ECS ne présente donc que peu de variation interannuelle (moyenne 63.3 MJ/m²_{SRE}, écart type 3.9 MJ/m²_{SRE}).

Demande de chaleur pour l'ECS [MJ/m² _{SRE}]				
	2014	2015	2016	2017
Total	63.4	62.2	59.0	68.5

Tableau 6: Demande de chaleur pour la production d'ECS

Des profils moyens journaliers de demande pour la production d'ECS ont été également définis selon la segmentation été/hiver et semaine/week-end, Figure 8. Ceux-ci se basent sur les quatre années de mesures et présentent une valeur moyenne heure par heure.

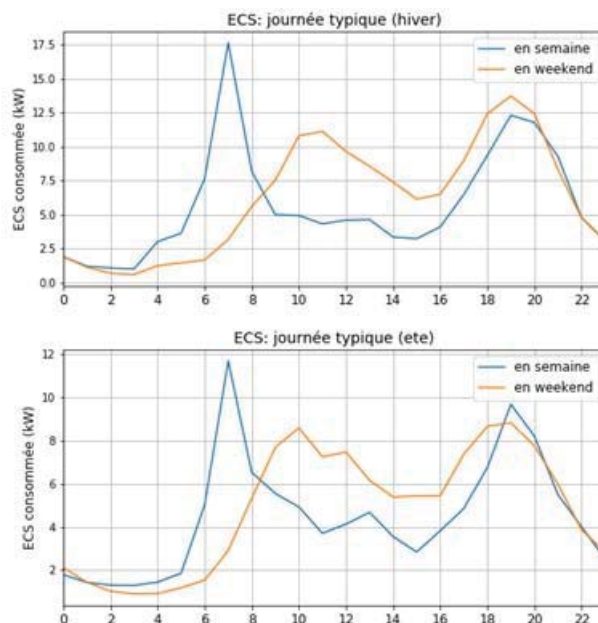


Figure 9: Profil journalier typique de la demande de chaleur pour la production d'ECS.

Les profils moyens montrent des tendances similaires entre été et hiver (profils identiques). Néanmoins, la demande de chaleur pour l'ECS est plus faible en été qu'en hiver. La segmentation semaine/weekend montre une demande différente au cours de ces deux types de journée. En semaine, la demande est marquée entre 6 et 8h du matin puis le soir entre 19 et 21h. Le weekend, le pic du matin est décalé autour de 10h et celui du soir est, par contre, très peu décalé, mais légèrement plus étalé, entre 18 et 21h. Finalement, les profils (été/hiver, semaine/weekend) montrent cependant tous une consommation résiduelle autour de 2kW pendant la nuit entre minuit et 2h du matin. Ils correspondent aux pertes du ballon de stockage et de la boucle de recirculation.

La température des zones nuit et jour sont mesurées par le système de suivi pour chaque appartement. Dans un premier temps, la température moyenne mensuelle de la zone jour de chaque appartement a été calculée, Figure 10 :

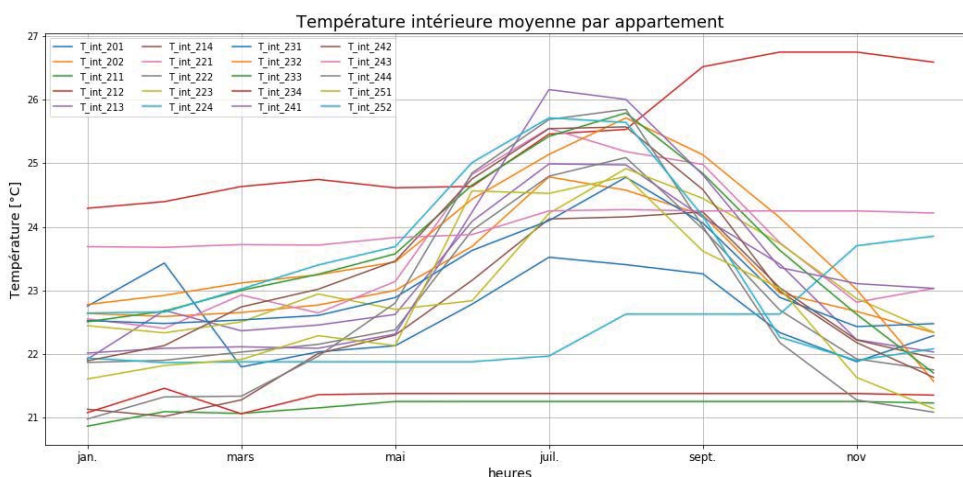


Figure 10: Température moyenne mensuelle par appartement.

Pour chaque appartement, la température intérieure moyenne de la zone jour apparait comme élevée puisque systématiquement supérieure à 20°C, en particulier en période de chauffage. Sur les 20

logements, trois d'entre eux semblent fournir des données aberrantes qui doivent être exclues de l'analyse :

- Deux ont un profil de température constant à 21°C y compris en période estivale ce qui semble indiquer un défaut des capteurs de mesures.
- Un appartement a un profil de température très élevé (jusqu'à près de 27°C en hiver) ce qui semble aussi être un défaut de capteurs.

Pour les 17 logements restants, la température intérieure en période de chauffage est homogène. Elle présente en profil de courbe en cloche partant de 21°C-23°C les mois d'hiver avec une élévation de la température l'été vers 24°C-26°C sous l'effet des conditions météorologiques. Pour ces logements, il est alors possible de déterminer un profil de température intérieure moyenne du bâtiment.

De fait, pour chaque mois, pour une année donnée, la valeur moyenne des températures des zones jour et nuit du bâtiment (moyenne des logements présentés ci-avant) est calculée et représentée dans la Figure 11 et la Figure 12 :

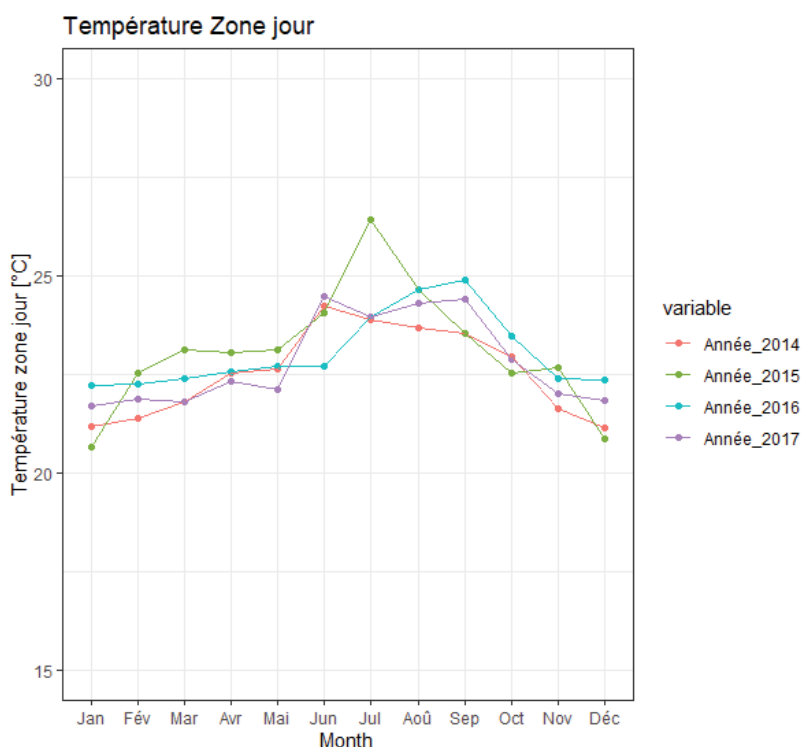


Figure 11: Température zone jour moyenne mesurée par le système de suivi.

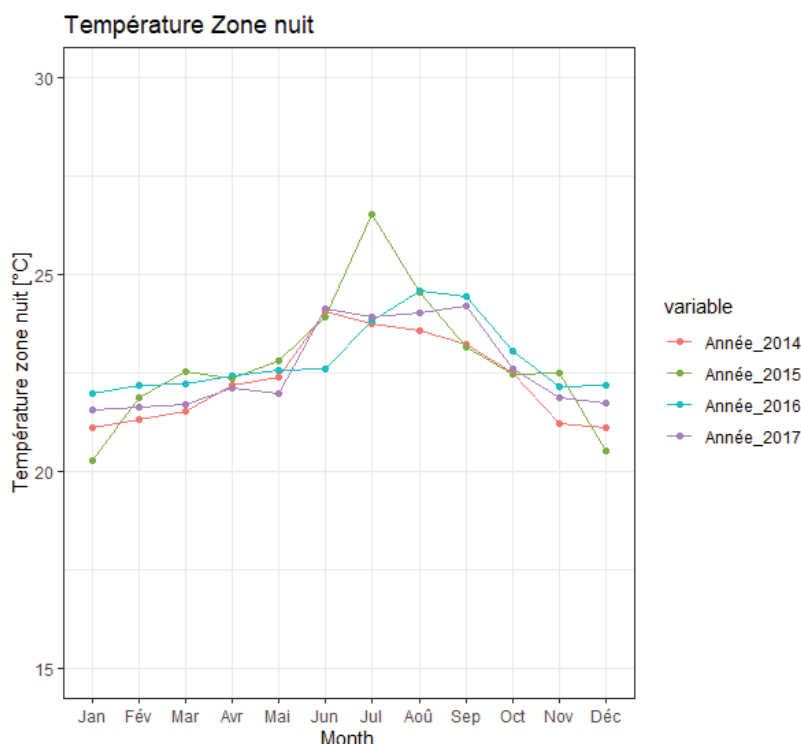


Figure 12: Température moyenne de la zone nuit mesurée par le système de suivi.

Les températures des zones nuit et jour sont similaires (1.2% d'écart moyen). Les chambres (zone nuit) ne sont donc pas moins chauffées que le séjour (zone jour). De même, la température moyenne pendant la période de chauffage (Octobre à Avril) varie peu entre 2014 et 2017 (moyenne 22°C, écart type 0.3°C). La température moyenne intérieur en hiver est élevée avec environ 2°C de plus que la température conventionnelle utilisée dans les calculs SIA 380/1 (Tableau 7).

	Température moyenne en période de chauffage [°C]			
	2014	2015	2016	2017
Zone jour	21.8	22.2	22.5	22.1
Zone nuit	21.6	21.8	22.3	21.9

Tableau 7: Température moyenne annuelle période de chauffage

Le débit d'air du monobloc de ventilation a également été mesuré, Figure 13. Celui-ci conditionne les pertes par ventilation du bâtiment. Les données sont collectées par le système de suivi via un boîtier d'interfaçage connecté à l'automate de gestion du monobloc. Les deux boîtiers communiquent à l'aide du protocole de communication modbus.

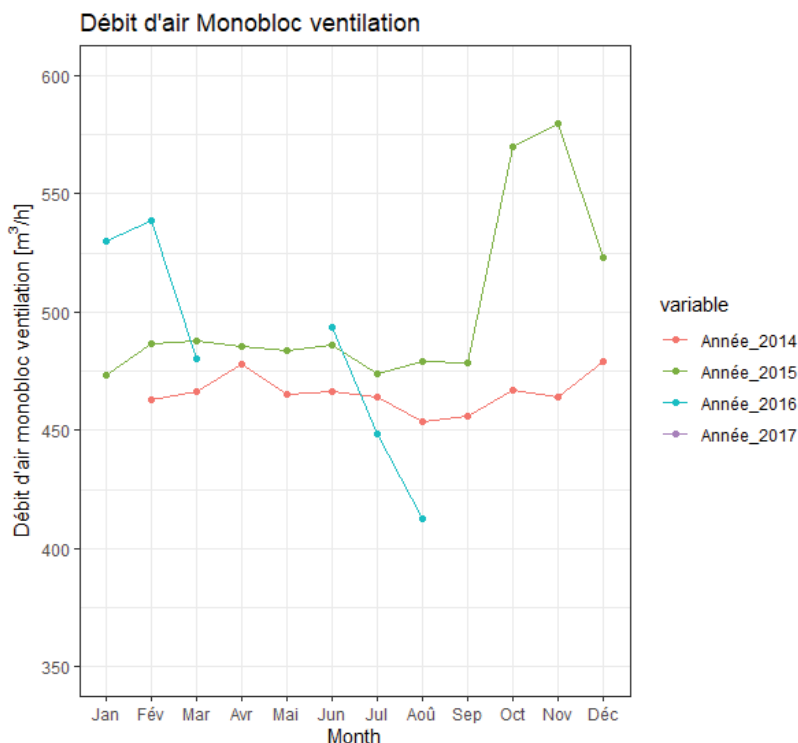


Figure 13: Débit d'air au monobloc de ventilation mesuré par le système de suivi.

Les données collectées sont lacunaires. En effet, les données ont commencé à manquer, tout d'abord sur une période de trois mois en 2016 (mars à juin) puis disparaître complètement à partir de septembre 2016. Depuis cette date, les données ne sont plus remontées¹⁰.

De février 2014 à septembre 2015, le débit d'air mesuré est dans un premier temps stable voisin de 475 m³/h. Puis, en octobre 2015, une augmentation du débit de 19% (soit +100m³/h environ) est observée jusqu'en février 2016 avant de chuter en mars 2016 d'environ 11%.

Le débit moyen annuel et son écart type est présenté dans le Tableau 8 :

	Débit d'air monobloc ventilation [m ³ /h]			
	2014	2015	2016	2017
Débit moyen	466	501	484 (6 mois de mesure)	NA
Ecart type	7.7	36.9	48.0	NA

Tableau 8: Débit d'air de la ventilation.

Les valeurs mesurées sont très basses en particulier en comparaison avec le débit de la demande Minergie (cf. discussion de cet écart dans le chapitre 2.4). Par ailleurs, le manque de fiabilité du boîtier d'interface entre le système de suivi et l'automate du monobloc de la ventilation rend l'analyse des résultats, d'une part complexe, et d'autre part peu robuste. Il n'a pas été possible d'identifier clairement le mode de fonctionnement de ce boîtier sans l'aide de l'entreprise installatrice. Néanmoins, ce problème lié à la ventilation sera étudié plus en détail dans les chapitres suivants.

¹⁰ L'absence de mesure n'a pas été observée avant le début de projet Usergap. L'entreprise, ayant installé le boîtier entre le système de suivi et le monobloc de ventilation, ayant disparue, il n'a pas été possible de savoir si les données manquantes avaient été stockées directement dans la mémoire interne.

Finalement, la demande d'électricité spécifique du bâtiment est caractérisée, Figure 14. Elle est étudiée plus en détail dans les autres volets du projet UserGap. Dans ce rapport, sa caractérisation est, *in fine*, utilisée pour la définition des apports internes dans le calcul du bilan thermique. Les données sont issues des 20 compteurs électriques des logements remontés au système de suivi ainsi que des mesures pour les communs de l'immeuble (pompes de circulation et monobloc de ventilation). Ces consommations se répartissent à 35% pour les usages hors appartement et à 65% pour les usages domestiques.

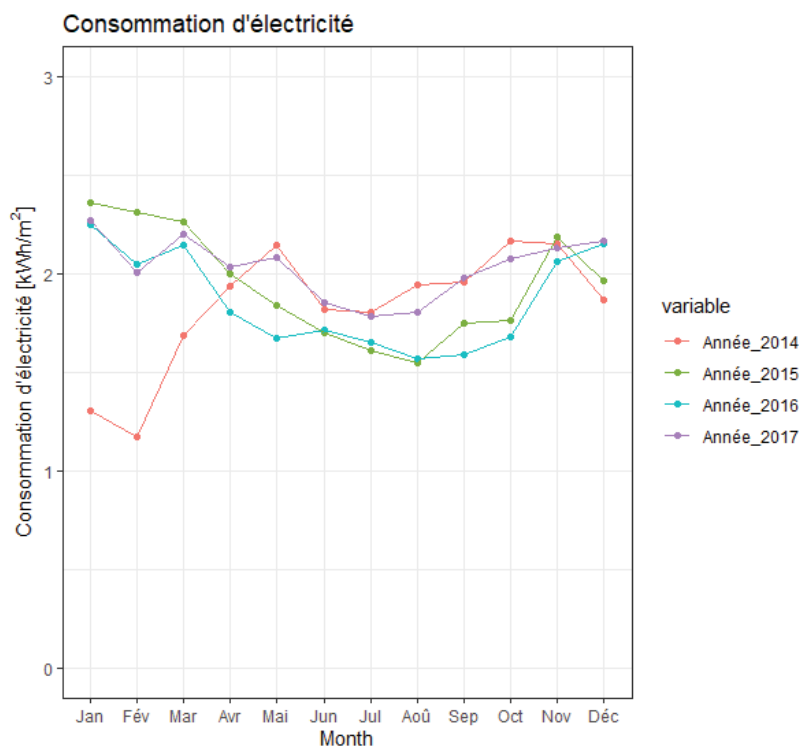


Figure 14: Consommation d'électricité spécifique du bâtiment (somme des 20 compteurs des logements).

Note : L'année 2014 est difficilement interprétable car en début d'année, les mesures de consommation des communs, du monobloc de ventilation et des pompes de circulation n'étaient pas disponibles.

La demande d'électricité présente un profil caractéristique avec une diminution en été (recours plus faible à l'électricité notamment pour l'éclairage (durée du jour est plus importante), la cuisson et le lavage/séchage des habits) et une consommation plus importante en hiver.

En observant la consommation électrique spécifique mensuelle en fonction de l'irradiation spécifique (en kWh/m²) sur la façade principale sud-ouest, la dépendance de la consommation d'électricité à l'ensoleillement semble se confirmer, Figure 15:

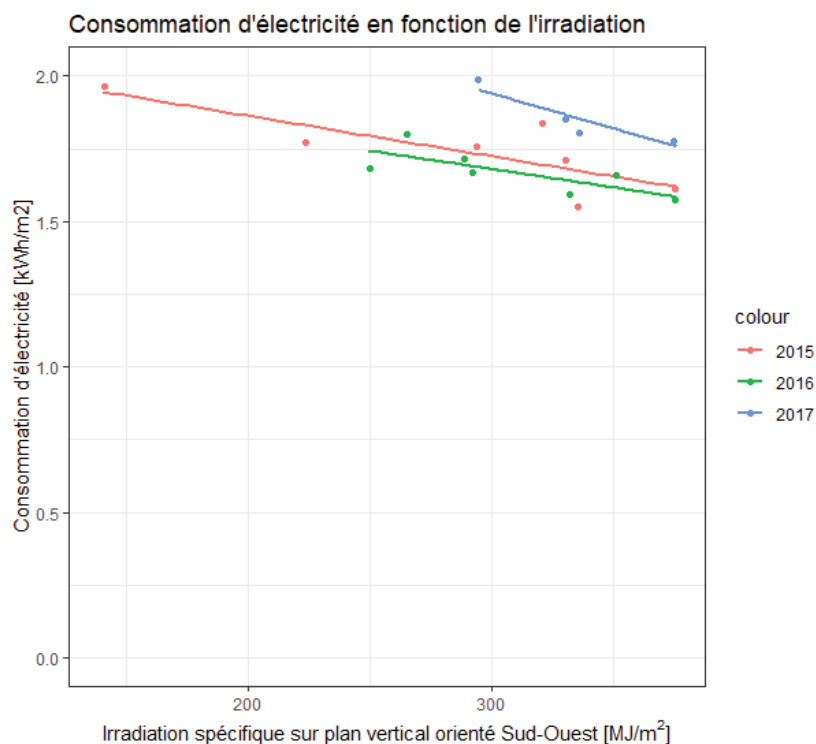


Figure 15: Consommation d'électricité spécifique du bâtiment en fonction de l'irradiation reçue sur la façade sud-ouest.

En moyenne sur les quatre années, la consommation spécifique d'électricité est homogène (moyenne = 23 kWh/m²_{SRE}, écart type = 1.1 kWh/m²_{SRE}), Tableau 9.

	Demande d'électricité [kWh/m ² _{SRE}]			
	2014	2015	2016	2017
Total	21.9	23.3	22.3	24.4

Tableau 9: Consommation spécifique d'électricité.

2.3.3 Réponse thermique du bâtiment

Au-delà de l'analyse descriptive des données mesurées par le système de suivi, le comportement énergétique du bâtiment peut être étudié de manière dynamique en regard des conditions climatiques extérieures. Pour ce faire, deux approches sont proposées :

- La signature énergétique du bâtiment (caractérisation de la thermo-sensibilité du bâtiment à la température extérieure) ;
- Le diagramme H-M (caractérisation de la sensibilité du bâtiment à l'irradiation reçue).

2.3.3.1 Signature énergétique du bâtiment

La signature énergétique d'un bâtiment est une méthode pour représenter graphiquement la consommation d'un bâtiment en fonction de la température extérieure. Les points ainsi placés permettent ensuite de définir, par un modèle de régression, la thermosensibilité du bâtiment. Selon la littérature, la régression est linéaire. Le modèle est donc caractérisé comme suit :

$$\text{Puissance bâtiment [W]} = H \cdot T_{\text{ext}} + P_0$$

Variable	Description	Unité
P	Puissance de chauffage bâtiment	W
H	Besoin thermique brut spécifique du bâtiment	W/K
P ₀	Puissance nécessaire pour les autres usages (p.ex. ECS) indépendant de la température extérieure	W
T _{ext}	Température extérieure	K

Néanmoins, des comportements non-linéaires pourrait traduire des défauts de régulation ou de mise en œuvre du bâtiment. Elle permet également de calculer les besoins thermiques bruts spécifiques du bâtiment pour les mettre en relation avec celui pour être calculé dans les modélisations énergétiques.

Afin de calculer la signature énergétique du bâtiment, les données météorologiques horaires de la station météorologique de Météo Suisse la plus proche, i.e., Changins/Prangins ont été utilisées (issues de la plateforme Idaweb de MétéoSuisse). Les données de consommation sont celles issues du système de suivi énergétique. La signature énergétique est définie sur une base journalière (i.e. agrégation des données horaires par 24h) en supprimant les points de consommation énergétiques aux températures supérieures à 18°C puisqu'il a été observé que la demande de chauffage était toujours nulle au-delà. Les résultats sont présentés dans la Figure 16 :

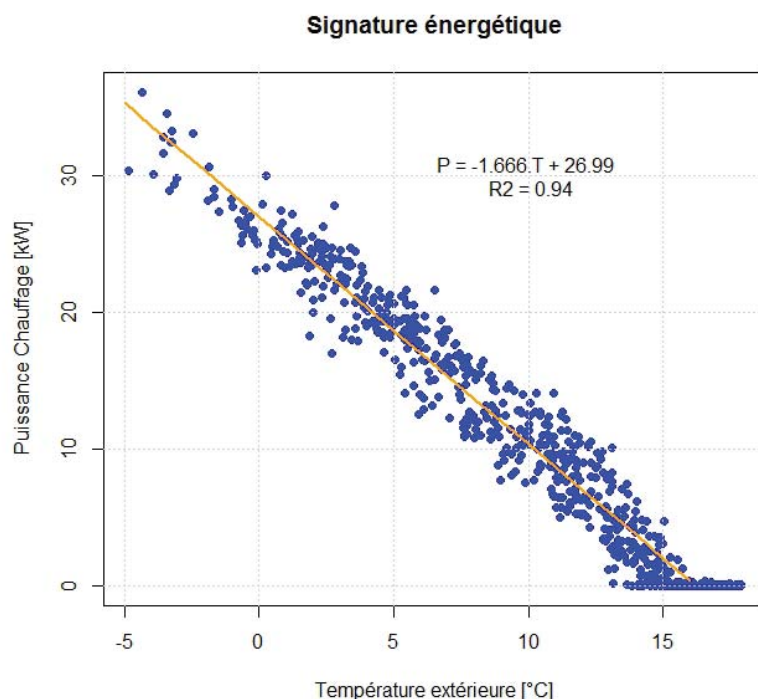


Figure 16: Signature énergétique du bâtiment B1.2 d'Eikenott.

La signature énergétique obtenue présente visuellement une grande linéarité confirmée par la valeur élevée du coefficient de détermination ($R^2=0.94$). La bonne adéquation des points sur la droite de signature énergétique montre une dépendance forte de la demande de chauffage à la température extérieure. Le besoin thermique brut spécifique (pente de la droite de régression) est de 1.67 kW/K. La puissance nécessaire aux autres usages (P_0) est quant à elle de 27 kW. La thermo sensibilité apparaît dès lors comme faible en raison de la très bonne performance de l'enveloppe thermique.

La signature énergétique théorique du bâtiment, à partir des données du bilan thermique normatif, présente un besoin thermique brut spécifique de 1.55 kW/K (écart de 8% avec la donnée issue des mesures). Le bâtiment présente donc des résultats cohérents entre théorie et réalité.

La faible dispersion des points sur le graphique montre, en général, que le bâtiment est peu sensible aux apports solaires. Cependant, pour les températures supérieures à 13°C en moyenne journalière, une rupture de linéarité est observée. Dans ce cas, le bâtiment est plus sensible aux apports solaires lorsque ceux-ci sont importants. C'est le cas pendant l'intersaison, ou en fin de période de chauffage. La question de la dépendance aux apports solaires doit donc être étudiée plus en détails. Ils peuvent avoir une grande influence sur la demande de chauffage pour ce type de bâtiment (Minergie).

2.3.3.2 Diagramme H-M du bâtiment

La réponse thermique du bâtiment est maintenant étudiée plus en détails en fonction de l'ensoleillement (Meldem, 1991). Pour ce faire, l'approche du diagramme H-M a été utilisée. Le diagramme H-M permet de visualiser la relation entre le besoin de chauffage et l'ensoleillement dont bénéficie le bâtiment. Pour définir ce calcul, il est nécessaire de repartir de l'équation du bilan thermique du bâtiment¹¹ :

$$P = H_0 \cdot (T_{int} - T_{ext}) + P_a - A_e \cdot q_s$$

Variable	Description	Unité
P	Puissance bâtiment	W
H ₀	Besoins thermiques bruts spécifiques du bâtiment	W/K
T _{in}	Température intérieure	K
T _{ext}	Température extérieure	K
P _a	Puissance nécessaire aux autres usages (ECS) indépendant de la température extérieure	W
A _e	Surface efficace de captage solaire ¹²	m ²
q _s	Flux de rayonnement solaire	W/m ²

En divisant par la différence de température (T_{int} - T_{ext}), nous obtenons :

$$\frac{P - P_a}{(T_{int} - T_{ext})} = H_0 - \frac{q_s}{(T_{int} - T_{ext})} \cdot A_e$$

En posant H ("demande spécifique de chauffage") pour le terme de gauche et M ("Météo") pour le terme de droite, nous obtenons :

$$H = H_0 - M \cdot A_e$$

Avec:

$$H \left[\frac{W}{K} \right] = \frac{Q_{int}}{T_{int} - T_{ext}} ; M \left[\frac{W}{K \cdot m^2} \right] = \frac{q_s}{T_{int} - T_{ext}}$$

Variable	Description	Unité
Q _{int}	Puissance dédiée au chauffage	W

¹¹ La méthode de calcul employée est tirée du livre de Claude-Alain Roulet « Energétique du bâtiment II », Presses Polytechniques Romandes 1987.

¹² Surface équivalente sur le bâtiment qui profiterait à 100% des apports solaires (pas de réductions liées aux ombrages, à la transmittance du verre, etc.)

Grâce à cette approche, en reportant la demande spécifique H en fonction de la variable météo M, nous obtenons des points alignés le long d'une droite dont l'ordonnée à l'origine correspond aux besoins thermiques sans apports solaires. La pente, quant à elle, correspond à la surface effective de captage.

Par cette approche, il est donc possible d'étudier la dépendance du bâtiment à l'irradiation solaire reçue¹³. Plus celle-ci est élevée, plus le facteur M devient extrêmement grand. Cette remarque est surtout valable pour de faibles différences de températures entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment (correspondant à l'été ou à la fin des saisons de chauffe). Aussi, pour rendre l'interprétation de la demande de chauffage du bâtiment en fonction de l'ensoleillement pertinente, les valeurs de M supérieures à 10 W/m²·K ont été supprimées. Le diagramme H-M ainsi obtenu est présenté dans la Figure 17. Il a été réalisé selon une approche hebdomadaire en agrégeant les données sur la semaine.

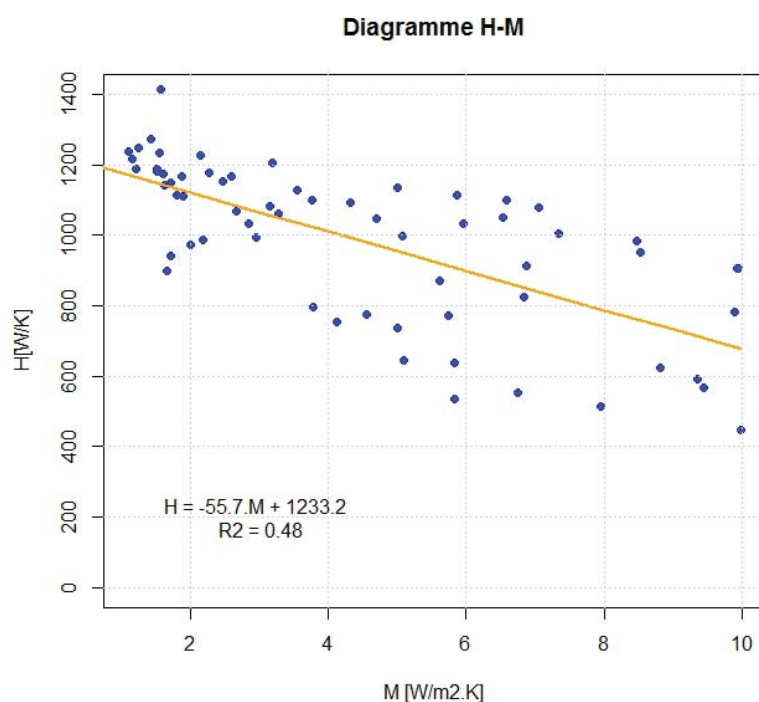


Figure 17: Diagramme H-M du bâtiment B1.2 d'Eikenott.

Le diagramme H-M montre une dispersion importante des points avec un coefficient de détermination de la régression faible ($R^2 = 0.48$). Cela traduit une grande fluctuation de la réponse thermique du bâtiment à l'ensoleillement. Par exemple, lorsque le terme H est au-dessus de la droite de régression, cela montre que les apports solaires sont mal valorisés. A l'inverse, lorsqu'il est en dessous de la droite, les apports solaires sont mieux valorisés. Cependant, la pente de la droite de régression, correspondant à la surface effective de captage solaire, reste faible (55.7m²). En comparaison, la surface totale de fenêtre du bâtiment est de 605 m².

A partir de la surface totale de vitrage du bâtiment, il est également possible de calculer une « surface de captage solaire équivalent » correspondant à la surface totale à laquelle la fraction de cadre, la fraction d'ombrage et la transmittance du verre sont retranchées. Ainsi, par exemple, une fenêtre de 2m² avec une fraction de cadre de 15%, un facteur total de réduction des apports solaire F_s de 0.8 et un g de 0.5 aura une surface effective de captage de 0.68m². En tenant compte de la transmittance, des facteurs d'ombrage et des cadres, la surface effective de captage du bâtiment serait de 177.8m². Il apparaît donc que la dépendance solaire du bâtiment est plus faible que la théorie.

¹³ Les données d'irradiation solaire en série horaire ont été transmises gracieusement par l'entreprise TRANSVALOR responsable de l'atlas solaire SoDa, <http://www.soda-pro.com/>

2.3.4 Synthèse des performances mesurées

Le tableau suivant présente une synthèse des paramètres mesurés du bâtiment et les différences observées par rapport au bilan normatif (SIA 380/1) et à la demande Minergie.

Paramètre	Synthèse
Demande de chauffage	Consommation mesurée (125 MJ/(m ² _{SRE} .an)) supérieure à celle planifiée pour le bilan thermique <i>Justificatif</i> SIA 380/1 (besoin de 91 MJ/(m ² _{SRE} .an)) et Minergie (Q _{n,eff} = 61 MJ/(m ² _{SRE} .an))
Demande d'ECS	Homogène avec un creux estival (moyenne mesurée de 63 MJ/(m ² _{SRE} .an)) inférieure à la valeur de calcul selon la norme SIA 380/1 et Minergie (75 MJ/(m ² _{SRE} .an))
Température intérieure	Valeurs mesurées (21°C-23°C en période hivernale) systématiquement supérieure à 20°C (valeur de calcul SIA 380/1) mais pas d'écart notable entre la zone jour et nuit des appartements
Débit du monobloc de ventilation	Faible (autour de 500 m ³ /h) et inférieur à celui nécessaire pour assurer le débit d'air thermiquement actif de la demande Minergie
Consommation d'électricité spécifique	Homogène pour les 4 années de mesure (23 kWh/(m ² _{SRE} .an)) et plus faible que la consommation utilisée dans la SIA 380/1 (28 kWh/(m ² _{SRE} .an))
Signature énergétique	Grande linéarité de la demande de chaleur à la température extérieure. Coefficient de transfert thermique global du bâtiment apparaît comme bon et correspondant à un bâtiment à haute performance énergétique.
Diagramme H-M	Le bâtiment semble être peu influencé par l'irradiation solaire reçue. Ce point est remarquable puisque le bâtiment est fortement vitré. Il aurait été, à priori, logique de voir une dépendance plus marquée.

Tableau 10: Synthèse des paramètres mesurés et comparaison avec ceux de la demande Minergie.

2.4 Comparaison des besoins de chaleur calculés et mesurés

Les données de suivi énergétique présentées dans le chapitre 2.3 sont maintenant comparées aux valeurs de calcul (SIA 380/1 *Justificatif* et demande Minergie) présentées dans le chapitre 2.2. Cette comparaison va permettre de caractériser l'écart de performance entre le besoin de chaleur calculé et celui mesuré dans le bâtiment pour la période 2014-2017. Deux comparaisons sont effectuées :

- Comparaison du besoin de chaleur pour l'ECS
- Comparaison du besoin de chaleur pour le chauffage

En complément, la consommation électrique utilisée pour le calcul des apports internes dans la norme SIA 380/1 est également comparée à la consommation électrique mesurée.

2.4.1 Ecart de performance du besoin de chaleur pour l'ECS

Pour la demande d'énergie liée à la consommation d'ECS, les données du système de suivi sont mesurées en litre d'ECS. Elles ont été converties par l'entreprise (Losinger Marazzi) afin d'estimer la consommation énergétique afférente. La norme SIA 380/1 estime la demande de chaleur pour l'ECS à 75 MJ/m²_{SRE}, cette valeur est ensuite répartie par mois en fonction de leur nombre de jour. Les résultats sont présentés dans la Figure 18 et Tableau 11 :

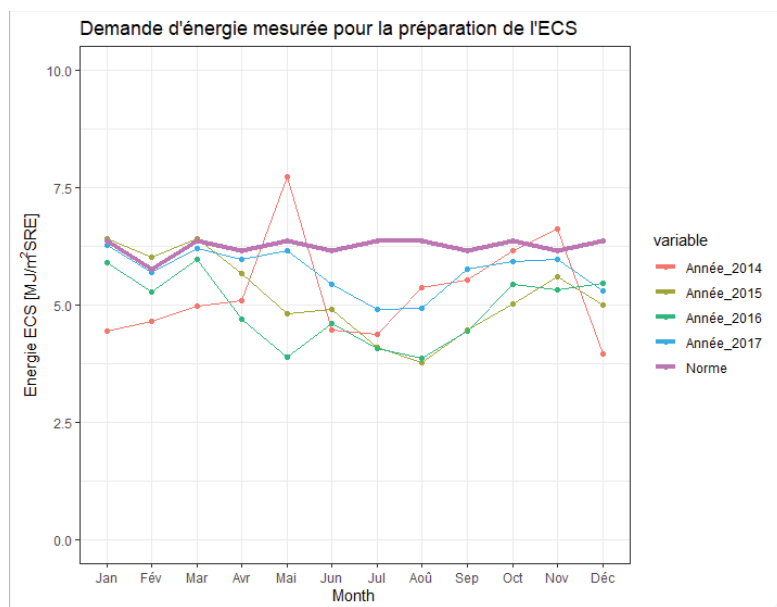


Figure 18: Besoin de chaleur mensuel pour la production d'ECS pour le calcul normatif (SIA 380/1) et les années de mesure 2014 à 2017.

	Besoin de chaleur mesuré pour la production d'ECS [MJ/(m ² _{SRE} .an)]	Valeur normative [MJ/(m ² _{SRE} .an)]	Ecart [%]
2014	64	75	-14.7
2015	62		-17.3
2016	59		-21.3
2017	69		-8.0

Tableau 11: Besoin de chaleur annuel pour la production d'ECS pour le calcul normatif (SIA 380/1) et les années de mesure 2014 à 2017.

La comparaison entre valeurs issues de la norme et mesures montre que l'énergie mesurée est systématiquement plus faible que la valeur normative. Les écarts varient de -8.0% pour l'année 2017 à -21.3% pour l'année 2016. Il est nécessaire de rappeler que la valeur de la consommation énergétique « mesurée » pour l'ECS est en fait recalculée à partir du volume d'eau chaude. Cette demande énergétique présuppose (hypothèse du maître d'ouvrage) un écart de température entre l'eau froide et l'eau chaude de 50°C (température froide : 10°C, chaude : 60°C). Cette hypothèse induit donc une incertitude sur la demande de chaleur pour la production d'ECS. Néanmoins, la demande mesurée pour la production d'ECS se situe entre la valeur normative pour les habitations individuelles (50 MJ/m²_{SRE}) et celle des habitations multifamiliales (75 MJ/m²_{SRE}).

2.4.2 Ecart de performance pour la consommation d'électricité

La consommation électrique a été comparée entre les données du système de suivi et la valeur de la norme SIA 380/1 précisant un chiffre qui doit être utilisé pour calculer les apports internes¹⁴. Les résultats sont présentés dans la Figure 19 et le Tableau 12 :

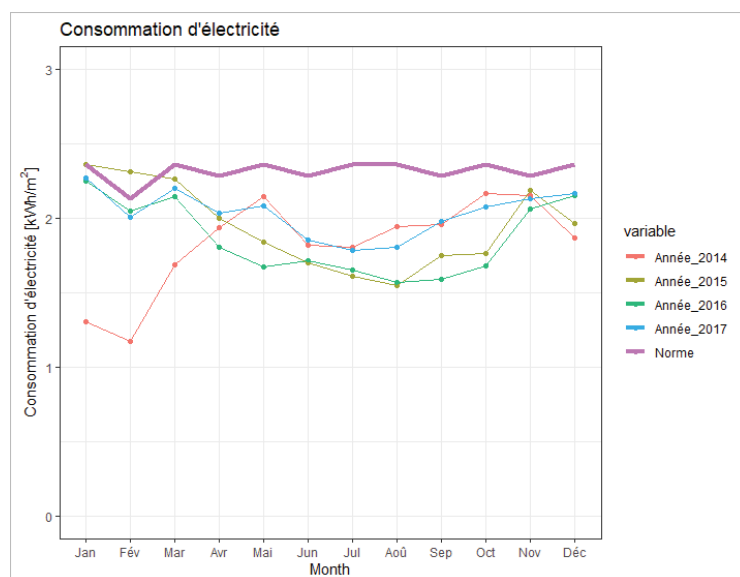


Figure 19: Consommation électrique mensuelle pour le calcul normatif (SIA 380/1) et pour les années de mesures 2014 à 2017.

	Consommation d'électricité mesurée [kWh/(m ² _{SRE} .an)]	Valeur normative pour les apports internes [MJ/(m ² _{SRE} .an)]	Ecart [%]
2014	21.9	27.8	-21 %
2015	23.3		-16 %
2016	22.3		-20 %
2017	24.4		-12 %

Tableau 12: Consommation électrique annuelle pour le calcul normatif (SIA 380/1) et pour les années de mesure 2014 à 2017.

Dans le cas de la demande électrique, le bâtiment consomme moins que la valeur fournie dans la norme SIA 380/1. Il est nécessaire de préciser que la norme SIA 380/1 n'a pas pour objectif de caractériser précisément la consommation électrique. Elle fournit uniquement une valeur utile pour la prise en compte des gains internes dans le bilan thermique. La faible consommation peut être liée au recours à des appareils énergétiquement efficaces. Les travaux menés dans les autres volets du projet UserGap devront étudier ce point plus en détails. Dans la suite, l'origine de l'écart sur la consommation électrique ne sera pas approfondie.

2.4.3 Ecart de performance du besoin de chaleur pour le chauffage

Dans cette partie, le besoin de chaleur calculé selon la norme SIA 380/1 (*Justificatif*) et la demande Minergie est comparé avec le besoin de chaleur mesuré mensuellement par le système de suivi. La Figure 20 et le Tableau 13 présentent les résultats mensuels et annuels:

¹⁴ Une étude plus spécifique de la demande d'électricité mesurée a également été réalisée dans le projet UserGap (cf. rapport dédié)

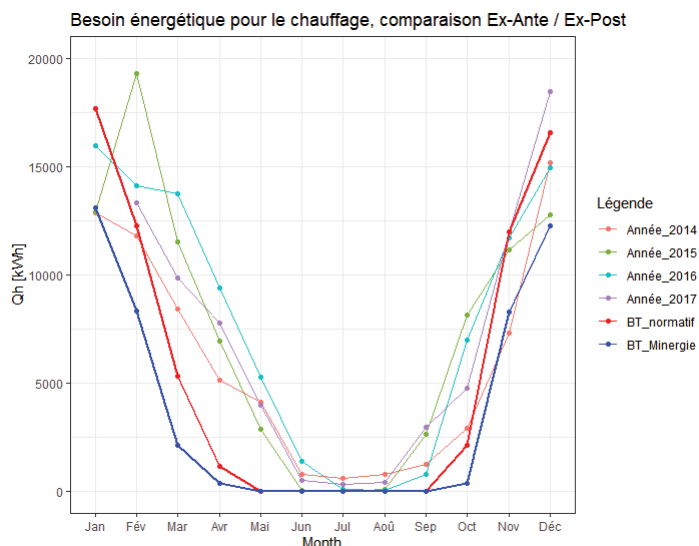


Figure 20: Besoin de chaleur mensuel pour le chauffage selon le bilan thermique (BT) normatif (SIA 380/1) et la demande Minergie et les années de mesure 2014 à 2017.

	Q_h mesuré [kWh]	Q_h (SIA 380/1) avec débit d'air normatif [kWh]	Q_h (demande Minergie) avec débit d'air thermiquement actif [kWh]¹⁵	Ecart mesuré / SIA 380/1 (chaleur utile)	Ecart mesuré / demande Minergie (chaleur utile)
2014	71 273	67 164	44 899	6.1%	58.7%
2015	88 477			31.7%	97.1%
2016	94 509			40.7%	110.5%
2017	95 999			42.9%	113.8%

Tableau 13: Besoin de chaleur (Q_h) annuel pour le chauffage selon le bilan thermique (BT) normatif (SIA 380/1) et la demande Minergie et les années de mesure 2014 à 2017.

Les résultats montrent que les bilans thermiques ex-ante sous-estiment le besoin de chaleur réel pour le chauffage (Tableau 13). Les écarts varient de 6% à 43% par rapport au bilan SIA 380/1 et de 59% à 114% pour la demande Minergie. Les écarts sont plus faibles en 2014 que pour les années suivantes qui, elles, présentent une stabilité. Ce constat s'explique de la manière suivante :

- Tous les logements n'étaient pas occupés en 2014.
- Un ajustement des conditions de chauffage a pu être effectué suite à l'inconfort des utilisateurs.
- Ces paramètres modifiés n'ont ensuite pas été reconstruits ou réajustés. Ils ont pu provoquer une perte d'efficacité du système (p. ex. courbe de chauffage remontée durant une période de froid extrême, mais plus diminuée ensuite provoquant une mauvaise régulation du bâtiment).

En période d'intersaison, l'écart de performance relatif mensuel est le plus marqué (cf. Figure 20). Par exemple, en mars ou octobre, l'écart entre bilan normatif et valeur mesurée est d'un facteur 15 et 18 respectivement. D'après le bilan SIA 380/1 et la demande Minergie, les besoins du bâtiment sont très limités en intersaison (période de mars à mai et septembre/octobre) grâce à une bonne valorisation des apports internes et des apports solaires. Or, en pratique, durant ces cinq mois d'intersaison, la demande mesurée est non négligeable. Elle confirme la faible valorisation des apports solaires notamment démontré par les résultats du diagramme H-M dans la partie précédente (cf. § 2.3.3.2).

¹⁵ Débit d'air pris dans les demandes Minergie (cf. Tableau 2).

2.4.4 Harmonisation du besoin de chaleur calculé avec les données mesurées (mode SIA 380/1 Comparaison)

Dans cette partie, les valeurs standards du besoin de chaleur SIA 380/1 *Justificatif* vont être graduellement remplacées par les valeurs mesurées du système de suivi ou par la station météo à proximité. Les bilans SIA 380/1 ainsi obtenus seront donc en mode *Optimisation/Comparaison*.

Une harmonisation (ou correction) climatique est effectuée à partir des relevés météorologiques mesurés sur les années 2014 à 2017 à proximité du quartier d'Eikenott. Grâce aux boîtiers de mesures ('smart meters'), deux autres corrections du bilan normatif sont également effectuées : température intérieure et consommation électrique.

A partir de l'état initial (S0), l'harmonisation se fait par trois étapes successives :

- Harmonisation du climat (S1).
- Harmonisation du climat et température intérieure du bâtiment (S2).
- Harmonisation du climat, température intérieure du bâtiment et consommation électrique pour calcul des apports internes (S3).

La première source d'écart provient du climat. Pour les bilans thermiques SIA 380/1 (mode *Justificatif*), le climat de la station météorologique de référence du canton de Vaud, situé à Payerne, est utilisé. Elle se situe à 70 km du bâtiment dans un lieu géographique présentant des caractéristiques d'ensoleillement et de températures différentes de l'arc Lémanique. De plus, les données de températures et d'irradiations sont issues d'une année météorologique standard basée sur les valeurs des dernières décennies. La station météorologique de Nyon/Changins, située à 5 km du bâtiment, met à disposition les données de température extérieure pour les années 2014 à 2017. Pour l'irradiation, les données issues de la base de données SoDa (Solar radiation Data) ont été mises à disposition sur la même période. Ces données climatiques à proximité du bâtiment B1.2 d'Eikenott (notées "GLA") sont représentées dans la Figure 21 en comparaison avec les données de la station climatique de référence Payerne (notée "PAY") :

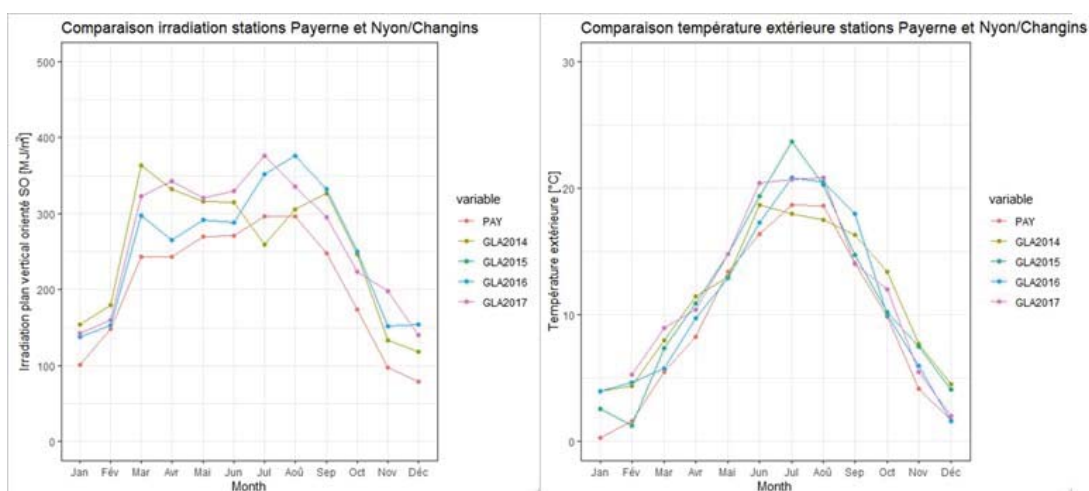


Figure 21: Comparaison de l'irradiation (gauche) et de la température extérieure (droite) pour la station de référence de la SIA 380/1 *Justificatif* (Payerne) et pour la station à proximité du bâtiment pour 2014 à 2017 (Nyons Changins).

Les données climatiques varient significativement entre la station de référence les quatre années de mesures sur site. Les résultats du bilan thermique de la demande Minergie (avec un débit d'air thermiquement actif de $0.33 \text{ m}^3/\text{m}^2_{\text{SRE}}$) tenant compte des données climatiques mensuelles mesurées (scénario S1) sont présentés dans la Figure 22:

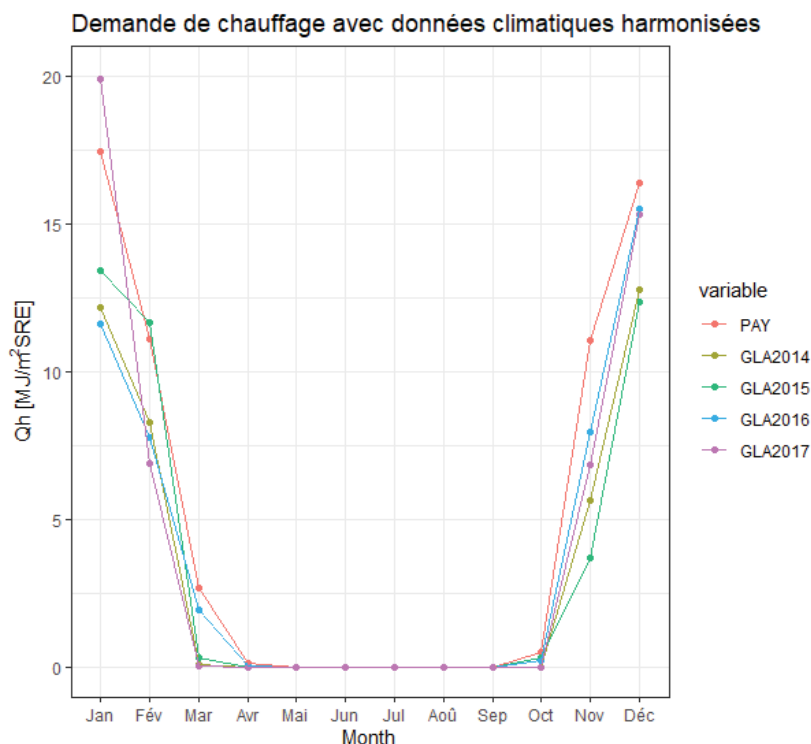


Figure 22: Besoin de chaleur mensuel pour le chauffage avec les données météorologiques de la station de Nyon/Changins (scénario S1).

En utilisant les données météorologiques mesurées, le besoin de chaleur calculé devrait logiquement diminuer. En effet, la température et l'irradiation¹⁶ sont plus importantes à Nyon/Changins par rapport à l'année de référence située à Payerne. De même, la proportion élevée de surface vitrée contribue à maximiser les gains solaires notamment pendant la période d'intersaison (printemps et début de l'automne). Or ce point n'est pas vérifié à la lecture des mesures. C'est même l'inverse qui est observée. L'EdP annuel est encore plus marqué lorsque les données climatiques sont ajustées dans le calcul du bilan thermique, Tableau 14 :

	Q _h réel [kWh]	Q _h avec débit d'air thermiquement actif et données météo réelles [kWh], S1	Ecart [%]
Climat de référence SIA 2028	-	44 899	-
2014	71 273	21 790	227%
2015	88 477	26 066	239%
2016	94 509	27 002	250%
2017	95 999	30 661	213%

Tableau 14: Besoin de chaleur annuel pour le chauffage avec les données météorologiques de la station de Nyon/Changins (scénario S1).

La correction climatique implique donc une augmentation de l'écart de performance (moyenne de l'écart 232% entre les quatre années de suivi, écart type 16%).

Une deuxième source d'écart à considérer provient de la température intérieure du bâtiment (cf. premiers résultats présentés à la Figure 11, Figure 12 et Tableau 7). En utilisant les données de température mesurées à l'intérieur du bâtiment, le bilan thermique mensuel a été recalculé pour les

¹⁶ Mesurée sur le plan vertical en orientation sud-ouest

quatre années de suivi (scénario S2 incluant également le climat extérieur de la station de Nyon/Changins). Les résultats sont présentés à la Figure 23 et dans le Tableau 15.

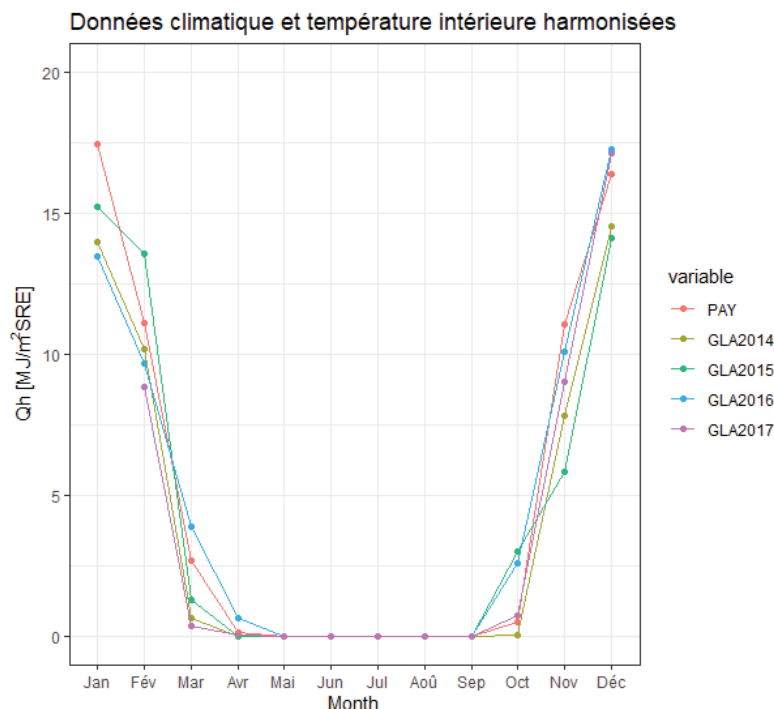


Figure 23: Besoin de chaleur mensuel pour le chauffage avec les données météorologiques de la station de Nyon/Changins et la température intérieure mesurée par les smart meters (scénario S2).

	Q _h réel [kWh]	Q _h avec débit d'air thermiquement actif, données météo réelles et climat intérieur réel, S2 [kWh]	Ecart [%]
2014	71 273	27 599	158%
2015	88 477	34 218	159%
2016	94 509	40 066	136%
2017	95 999	38 958	146%

Tableau 15: Besoin de chaleur annuel pour le chauffage avec les données météorologiques de la station de Nyon/Changins et la température intérieure mesurée par les smart meters (scénario S2).

Les résultats montrent un écart de 136% à 159% pour les simulations S2 sur les quatre années. Cet écart reste conséquent mais plus faible que pour l'harmonisation S1 (écart de 232%).

Le système de suivi permet également de connaître la consommation électrique des appartements du bâtiment. Cette consommation est valorisée sous forme d'apports internes qui réduisent la demande de chauffage. La demande d'électricité des logements¹⁷ est, en moyenne annuelle, de 23 kWh/m²_{SRE} (Tableau 9), mais varie d'un mois à l'autre (Figure 14). Cette valeur est inférieure à celle de la norme SIA 380/1 qui spécifie une demande de 27.8 kWh/m²_{SRE}¹⁸ dont 70% peuvent être valorisés comme gains internes, c'est-à-dire 19.5 kWh/m²_{SRE}. Les gains internes basés sur la consommation d'électricité réelle du bâtiment sont donc à prendre en compte. Le niveau suivant d'harmonisation (S3) consiste donc à

¹⁷ Celle-ci ne tient pas compte de la consommation des communs et de la consommation liée à la ventilation.

¹⁸ La norme SIA 380/1:2009 donne une valeur de 100 MJ/m²_{SRE}. Cette dernière a été convertie en kWh/m²_{SRE}.

remplacer la valeur de référence de la norme SIA 380/1 pour la consommation électrique (27.8 kWh/m²SRE) avec les données mensuelles mesurées, Figure 24 et Tableau 16.

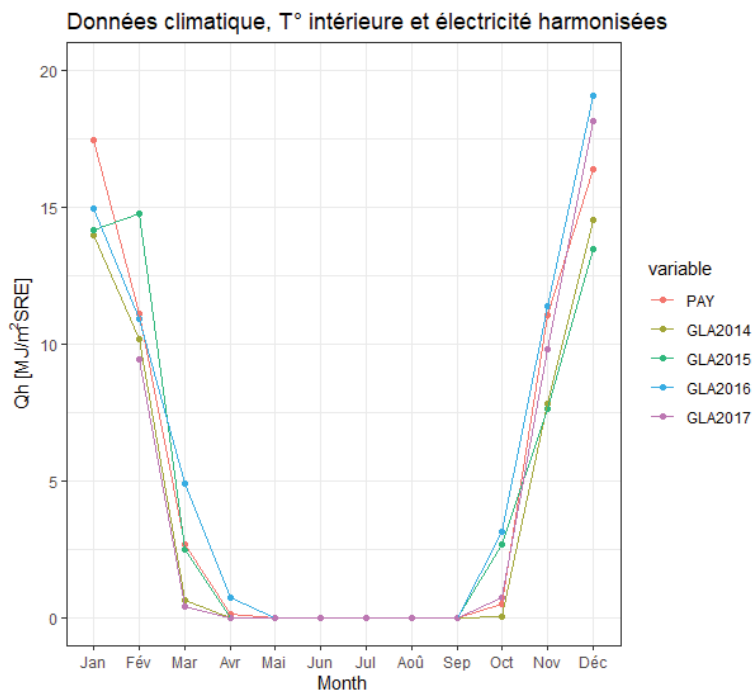


Figure 24: Besoin de chaleur mensuel pour le chauffage avec les données météo de Nyon/Changins, la température intérieure et la consommation électrique mesurées par les smart meters (scénario S3).

	Q _h mesuré [kWh]	Q _h selon scénario S3 [kWh]	Ecart [%]
2014	71 273	34 981	104%
2015	88 477	40 893	116%
2016	94 509	48 177	96%
2017	95 999	45 204	112%

Tableau 16: Besoin de chaleur annuel pour le chauffage avec les données météorologiques de la station de Nyon/Changins, la température intérieure et la consommation électrique mesurées par les smart meters (scénario S3).

Les résultats du scénario d'harmonisation S3 montre que l'écart de performance se réduit. Il est désormais de 107% plus élevé (écart type de 9%).

A ce stade, il est intéressant de noter que le bilan thermique harmonisé (scénario S3) aboutit à un EdP similaire à celui du bilan thermique de la SIA 380/1 (considérant le climat de référence de Payerne, une température intérieure de 20°C chaque mois et des apports internes de l'électricité de 19.5 kWh/m²SRE) (cf. Figure 25). L'explication de l'écart de performance observé est donc à chercher sur les autres paramètres de calcul de la SIA 380/1 (p. ex. usage du bâtiment).

Un dernier scénario d'harmonisation a été également considéré, incluant le débit d'air du monobloc de ventilation. Toutefois lors de l'analyse des données mesurées, il est apparu que les données de débit relevées par le système de suivi d'une part n'étaient pas complètes, Figure 13 et, d'autre part, pour les périodes où les données étaient collectées, étaient aberrantes. En effet, le débit nominal du bâtiment a été calculé à 2400 m³/h (Tableau 2). Or, les données mesurées indiquent un débit moyen de 484 m³/h, soit 5 fois moins que le calcul. Ce débit ne permet pas d'assurer un environnement sain dans le bâtiment permettre de conclure qu'elles ne sont pas correctes. De ce fait, une analyse détaillée, étayée par des mesures, a été effectuée (cf. chap. 4.2).

2.4.5 Synthèse sur la comparaison des besoins de chaleur calculés et mesurés

Dans ce chapitre, l'écart de performance entre la demande Minergie et les consommations mesurées a été caractérisé. Il est de 107% (écart type 8.8%). L'utilisation de bilans thermique SIA 380/1 en mode *Comparaison*, c'est-à-dire en substituant graduellement des paramètres du mode *Justificatif* par des valeurs mesurées a également été proposé pour étudier l'évolution de l'écart de performance. Ainsi, les harmonisations S1 (climat), S2 (climat + température intérieure) puis S3 (climat + température + consommation électrique) n'ont pas permis de baisser cet écart par rapport au bilan thermique de la demande Minergie. Au contraire, les écarts étaient soit supérieurs soit proches du bilan thermique initial comme le reporte la Figure 25 :

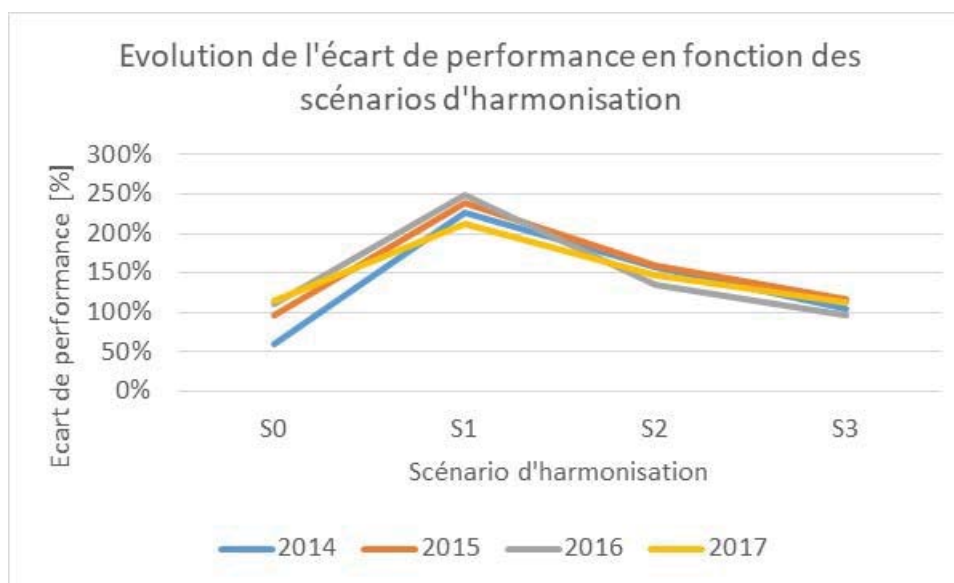


Figure 25: Evolution de l'écart de performance en fonction des différents scénarios (S0, S1, S2, S3).

Même si ces trois harmonisations successives n'ont pas permis de réduire l'écart de performance, elles contribuent à limiter la dispersion de l'écart entre les quatre années (cf. figure ci-dessus). Le comportement du bâtiment est alors plus homogène au cours du temps.

Ces résultats montrent que l'explication de l'écart de performance dans un bâtiment performant sur le plan énergétique est à rechercher dans les autres paramètres du calcul du bilan thermique que les seuls climat, température intérieure et consommation électrique.

Ce constat permet de différencier les bâtiments neufs très bien isolés des bâtiments anciens non rénovés. Pour ces derniers, la prise en compte de la température intérieure réelle du bâtiment ainsi que les données climatiques réelles permettent, en général, d'expliquer en grande partie les écarts de performance entre mesure et simulation¹⁹.

Les performances des bâtiments neufs répondant à la norme et aux exigences Minergie sont donc influencées par beaucoup plus de paramètres que dans le cas de bâtiments peu performant et thermosensible.

¹⁹ Le bâtiment est dit thermo-sensible.

Conclusion intermédiaire :

La correction du besoin de chaleur calculé (SIA 380/1 *Justificatif*) sur les paramètres climat, température intérieure ou consommation électrique ne permet pas d'expliquer l'écart de performance sur un bâtiment à faible besoin de chaleur et énergétiquement performant.

Une nouvelle approche de calcul du besoin de chaleur est donc proposée pour identifier les paramètres explicatifs de l'écart de performance observé (cf. chapitre suivant).

3 Modèle de calcul SIA 380/1 probabiliste du besoin de chaleur du bâtiment

La compréhension des sources de l'écart de performance énergétique n'a pas été rendu possible par la prise en compte des paramètres facilement mesurables comme la température intérieure ou le climat extérieur (cf. chapitre 2.4). Une approche systématique d'analyse de l'écart doit être employée pour analyser conjointement l'effet de chaque paramètre de calcul du bilan thermique SIA 380/1 et Minergie. Ces paramètres, comme par exemple le facteur de voilage caractérisant l'occultation des fenêtres et influençant les apports solaires, restent mal connus et incertains. Ce chapitre présente une approche probabiliste du bilan énergétique d'un bâtiment, basée sur la norme SIA 380/1.

3.1 Méthode

3.1.1 Description de l'approche

Le modèle standard de calcul du bilan thermique d'un bâtiment est basé sur un ensemble de paramètres d'usage selon la norme 380/1 (consommation électrique, température intérieure, etc.) et de climats selon la norme SIA 2028. Les valeurs de ces paramètres sont déterministes i.e., aucune incertitude n'est considérée. Le principe du calcul est schématiquement représenté dans la Figure 26 :

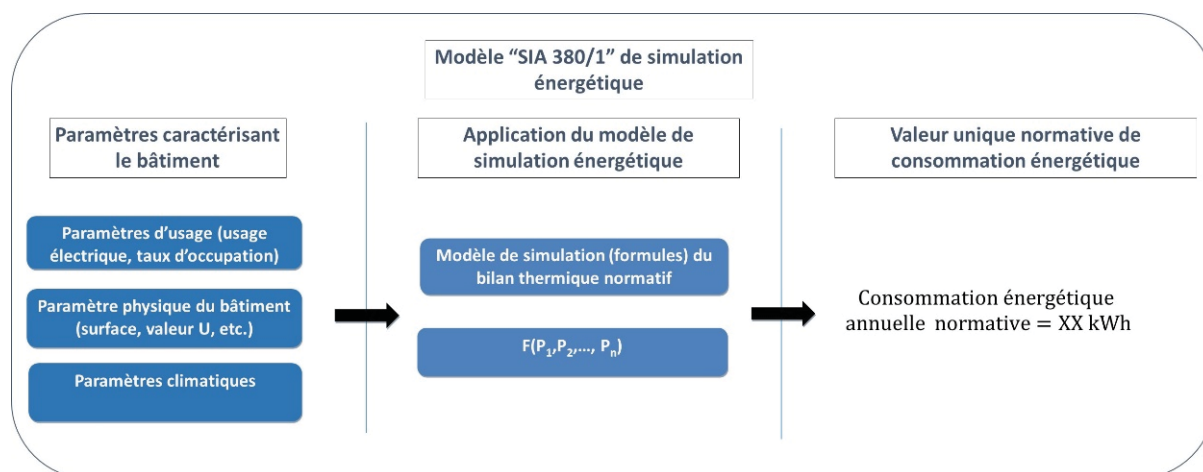


Figure 26 : Modèle déterministe de simulation énergétique selon la SIA 380/1.

Le modèle de calcul de la norme SIA 380/1 a pour objectif de pouvoir comparer les bâtiments sur une base commune par rapport à une valeur limite fixant la consommation énergétique admissible pour le bâtiment et ses caractéristiques. En pratique, le bâtiment aura des usages et des conditions d'utilisation qui peuvent différer fortement de la norme impliquant donc une consommation énergétique réelle différente de celle obtenue par le calcul normatif.

Idéalement, pour estimer au mieux la consommation future du bâtiment, il faut ajuster chaque paramètre aux conditions réelles connues ou estimées de ce bâtiment.

Les approches de simulations énergétiques dynamiques peuvent être employées. Toutefois, elles requièrent de caractériser de nombreux paramètres incertains (heures de présence, gestion de l'occultation des stores, etc.) et reposent donc régulièrement sur des données normatives, issues par exemple du cahier technique SIA 2024. Il est donc, en pratique, difficile d'identifier clairement l'ensemble de paramètres permettant d'obtenir, avec une précision acceptable, la consommation énergétique observée du bâtiment. En effet, ce travail nécessiterait de connaître exactement les habitudes et les équipements des résidents (équipements électriques, taux de présence, utilisation, recours aux stores, etc.). Par ailleurs, les simulations énergétiques dynamiques sont beaucoup plus chronophages et énergivores que les simulations énergétiques statiques proposées par le biais de la méthode de calcul de la norme SIA 380/1.

Dans le cadre du projet, un modèle de simulation énergétique probabiliste, basé sur les équations du modèle normatif de la norme SIA 380/1 a donc été développé. Il permet de caractériser une plage de variation de la consommation énergétique d'un bâtiment. Plus les informations disponibles pour caractériser le bâtiment (i.e. par des valeurs déterministes plutôt que probabilistes) sont nombreuses, plus l'intervalle de demande de chaleur (l'incertitude sur la demande du bâtiment) sera réduit et le calcul précis.

Ce modèle peut s'utiliser dans plusieurs contextes et répond à plusieurs objectifs :

- *Dans le cadre d'une analyse ex-ante (phase de conception) :*
Le recours au calcul stochastique permettra de quantifier dans quelle mesure la consommation énergétique de l'objet en cours de conception peut varier, et identifier, par exemple, des configurations de bâtiment dont la consommation d'énergie est moins sensible aux comportements des utilisateurs. Cette information pourra également être utilisée dans le cadre de nouveaux modèles d'affaires, par exemple les contrats de performances énergétiques notamment en permettant de quantifier la probabilité pour un bâtiment de consommer plus que la valeur contractuellement fixée (probabilité de risque de défaut pour le contracteur).
Objectif du modèle probabiliste : Etudier le champ des possibles de la consommation énergétique du bâtiment en fonction de l'incertitude des paramètres le caractérisant. Ainsi, pour un bâtiment donné, le besoin de chaleur ne sera plus une valeur unique déterministe, mais une distribution de valeurs possibles.
- *Dans le cadre d'une analyse ex-post (situation du projet UserGap) :*
Objectif du modèle probabiliste : Identifier les conditions d'utilisation du bâtiment qui permettent d'expliquer la demande de chauffage mesurée du bâtiment. Une fois identifiée, il sera possible de proposer des mesures correctrices soit par adaptation des systèmes techniques, soit par des campagnes de sensibilisation auprès des utilisateurs.

La méthode employée dans le projet UserGap est représentée dans la Figure 27 :

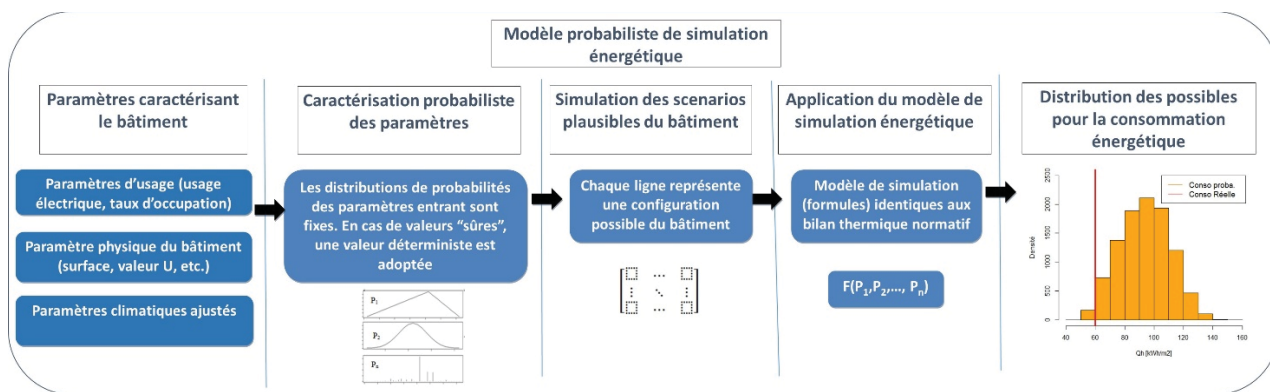


Figure 27 : Etapes de calcul d'un modèle probabiliste permettant de définir la distribution de probabilité de la consommation énergétique du bâtiment selon la SIA 380/1.

La première étape de la méthode proposée est identique à l'approche standard. Le bâtiment est caractérisé en termes de surfaces d'éléments et de niveau d'isolation. Ces éléments permettent donc une modélisation initiale du besoin de chaleur du bâtiment.

Dans une deuxième étape (cf. Figure 27), les paramètres ne sont plus fixés selon la valeur standard déterministe. Ils sont fixés soit :

- Selon une valeur ajustée à la mesure in-situ :
 - o Par exemple, dans le bâtiment B1.2 d'Eikenott, la température intérieure réelle mensuelle est connue, c'est cette information qui sera utilisée pour le calcul.
- Selon un intervalle de variation et une distribution de probabilité :
 - o Par exemple, dans le bâtiment B1.2 d'Eikenott, le pourcentage d'ouvertures et/ou fermetures des stores (influençant les gains solaires) n'est pas enregistré par le système de suivi eSMART. La conséquence est de ne pas pouvoir connaître le facteur de voilage (c'est-à-dire le pourcentage d'occultation des fenêtres par l'utilisation des stores) en détail. De ce fait, un intervalle et une distribution de probabilité sera fixée pour ce paramètre.

La caractérisation ainsi réalisée permet de définir, par simulation Monte Carlo (étape 3), une matrice de milliers de configurations possibles du bâtiment étudié. Chaque ligne (N lignes) de cette matrice comporte l'ensemble des paramètres (M colonnes) de calcul du besoin de chaleur spécifique (Q_h) sous ces conditions (étape 4). A l'issue du calcul des besoins de chaleur pour chaque ligne de la matrice, un intervalle et une distribution de probabilité de la consommation énergétique du bâtiment sont obtenus (étape 5).

De cette manière, il est possible de quantifier dans quelle mesure la consommation énergétique du bâtiment varie, et de voir, *in fine*, si les consommations réelles du bâtiment sont plausibles ou, alternativement, aberrantes (défaut de mise en œuvre du bâtiment). La méthode de simulation probabiliste, employée dans le cadre du projet UserGap, se positionne, donc, comme une solution intermédiaire entre l'analyse énergétique déterministe basée sur la norme SIA 380/1 et l'analyse dynamique détaillée.

Le modèle de calcul probabiliste a été réalisé à l'aide du logiciel libre R en reprenant les données de modélisation initiales du bilan thermique (transmis par le maître d'ouvrage) et les équations de bilan thermique décrites dans la norme SIA 380/1.

3.1.2 Caractérisation des données du modèle

La caractérisation des paramètres de calcul du bilan SIA 380/1 pour le bâtiment B1.2 d'Eikenott est donnée dans le Tableau 17. Les plages de variation des paramètres ont été définies en partant de la valeur définie dans la norme SIA 380/1. Dans un premier cas, une variation de 10% autour de la valeur standard est considérée (cas des valeurs U ou Psi, de la capacité thermique du bâtiment). Pour les autres paramètres, des variations plus importantes sont retenues (p.ex. surface d'occupation par habitant, puissance dégagée par habitants). Dans le cas du facteur de voilage, une variation de 0% à 100% est retenu, alors que la norme SIA 380 considère 0%. Le facteur de réduction de l'électricité varie de 70% (valeur SIA 380/1) à 100%. Enfin, le débit d'air thermiquement actif varie de 0.3 à 0.6 m³/m²_{SRE}·h soit des bornes proches de la demande Minergie (0.33 m³/m²_{SRE}·h) et de la norme SIA 380/1 (0.7 m³/m²_{SRE}·h).

Paramètre	Description	Intervalle	Remarque
Facteur de voilage	Facteur d'occultation des vitrages limitant les apports solaires	[0; 100] %	Pour chaque fenêtre de l'immeuble (43 au total), un tirage aléatoire uniforme est effectué
Surface par habitant	Surface utilisée par habitant, fixant le nombre d'habitants donc la puissance totale des habitants	[30; 50] m ² /hab	Uniforme
Puissance dégagée par les habitants	La puissance dégagée par les habitants pour calculer les apports internes	[50; 90] W/hab	Uniforme
Présence habitant	Le nombre d'heures de présence des habitants dans le bâtiment	[8; 16] h/j	Uniforme
Valeurs incertaines			
Facteur de réduction électrique	La part de la consommation électrique qui peut être valorisée en apport thermique interne	[70; 100] %	Uniforme
Débit d'air thermiquement actif	La quantité d'air entrante dans le bâtiment pour calculer les déperditions de ventilation	[0.3; 0.6] m ³ /m ² -SRE-h	Uniforme
Capacité thermique du bâtiment	Capacité effective de stockage de chaleur de l'espace chauffé par Kelvin	[0.45; 0.555] MJ/m ² -K	Uniforme
Valeur U des éléments d'enveloppe	Prise en compte de l'incertitude de la valeur U de chaque élément d'enveloppe	± 10% de la valeur du BT normatif	Une valeur U tirée pour chaque élément d'enveloppe (68 au total par configuration)
Valeur Psi des ponts thermiques	Prise en compte de l'incertitude de la valeur Psi de chaque pont thermique linéique	± 10% de la valeur du BT normatif	Une valeur Psi tirée pour chaque pont thermique (7 au total par configuration)
Consommation électrique			
La consommation électrique du bâtiment		-	
Valeurs issues de mesures Ex-Post			
Conditions climatiques externes (température)	La température extérieure sur site	-	Issue des mesures transmises par les partenaires pour les années d'études (en fonction de l'année tirée aléatoirement, les valeurs afférentes sont sélectionnées)
Conditions climatiques externes (ensoleillement)	Les données d'irradiation sur les plans verticaux	-	
Température intérieure	La température moyenne mensuelle dans le bâtiment	-	

Tableau 17 : Caractérisation des paramètres du modèle stochastique de calcul.

3.2 Résultats du calcul SIA 380/1 probabiliste

A partir de la caractérisation présentée dans le Tableau 17, les simulations énergétiques ont été réalisées. Pour chaque année, 10'000 simulations ont été réalisées, représentant autant de configuration possible pour le bâtiment. La distribution du besoin de chaleur spécifique annuelle (en MJ/m²_{SRE}) est donnée dans la Figure 28 :

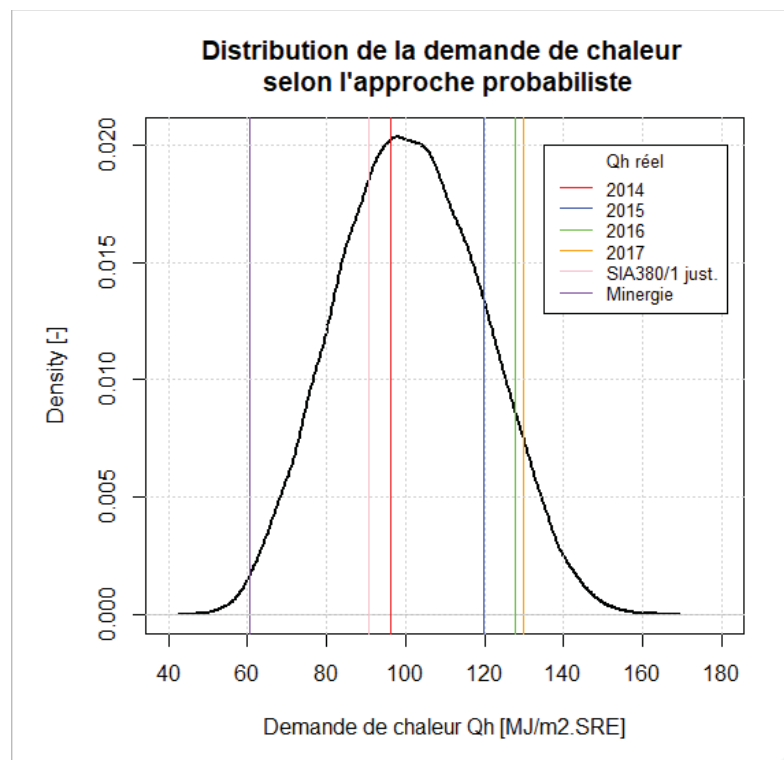


Figure 28 : Distribution de la demande de chaleur spécifique du cas d'étude obtenu par le modèle probabiliste développé.

La distribution du besoin de chaleur annuelle (40'000 simulations, i.e. 10'000 pour chaque année), montre une grande plage de variation (min = 50 MJ/m²_{SRE}, médiane = 105 MJ/m²_{SRE}, max = 171 MJ/m²_{SRE}). La distribution calculée regroupe à la fois les quatre demandes de chauffage mesurées de 2014 à 2017 de même que les besoins de chaleur selon la norme SIA 380/1 (91 MJ/m²_{SRE}) et selon la demande Minergie exprimée en chaleur utile (61 MJ/m²_{SRE}). Les valeurs calculées par la norme se trouvent dans la partie basse de la distribution tandis que les valeurs mesurées se situent dans la partie haute, à l'exception de 2014 correspondant à l'année de mise en service du bâtiment.

Ce premier résultat montre l'intérêt du calcul probabiliste. Il permet d'encadrer les différents besoins de chaleur calculés selon la norme et les demandes qui ont été mesurées *ex-post*. Ce résultat montre que les plages de variations des paramètres (cf. Tableau 17) ne sont pas aberrantes et que le bâtiment ne présente pas de défaut de conception majeur.

Le modèle probabiliste permet de sensiblement réduire l'écart de performance entre le calcul et la mesure du besoin de chaleur comme le montre la Figure 29 et le Tableau 18 :

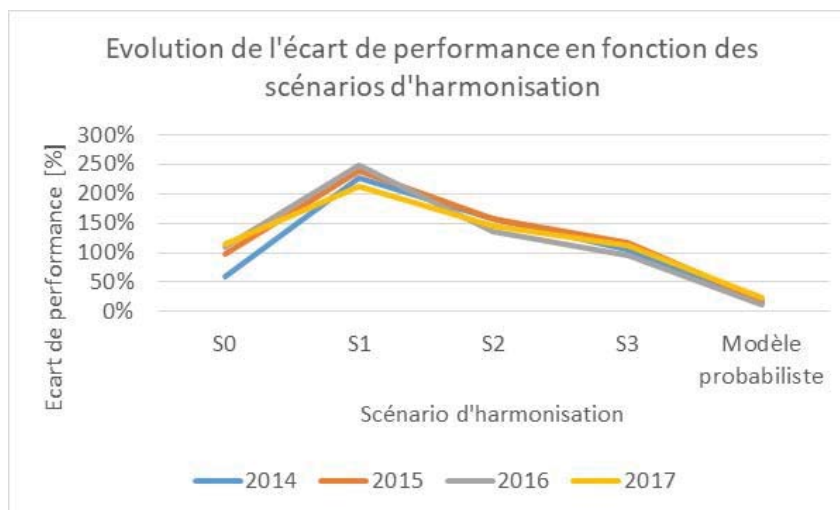


Figure 29 : Evolution de l'écart de performance en fonction des scénarios d'harmonisation et du modèle probabiliste.

	2014	2015	2016	2017
S0 : bilan thermique, demande Minergie	59%	97%	111%	114%
S1 : S0 + correction climatique	227%	239%	250%	213%
S2 : S1 + correction température intérieure	158%	159%	136%	146%
S3 : S2 + correction conso. électrique	104%	116%	96%	112%
Modèle probabiliste (valeur médiane)	14%	19%	12%	23%

Tableau 18: Evolution de l'écart de performance en fonction des scénarios d'harmonisation et du modèle probabiliste.

Le calcul probabiliste, qui tient compte de manière simultanée de l'incertitude de l'ensemble des paramètres non mesurés, réduit de manière significative l'écart de performance. L'EdP passe de 107% dans le scénario 3 d'harmonisation (cf. chapitre 2.4.4 page 35) à seulement 17% en moyenne dans le modèle probabiliste. Ces résultats montrent l'intérêt de ne pas se limiter aux paramètres usuels (climat, température intérieure) lors de l'étude de l'EdP.

La demande de chaleur probabiliste est maintenant comparée mensuellement avec le besoin calculé par la SIA 380/1 avec le débit d'air thermiquement actif (dénommé " $Q_{h\text{ eff}}$ (Minergie)") dans la figure suivante) et la demande mesurée de chaque année, Figure 30 :

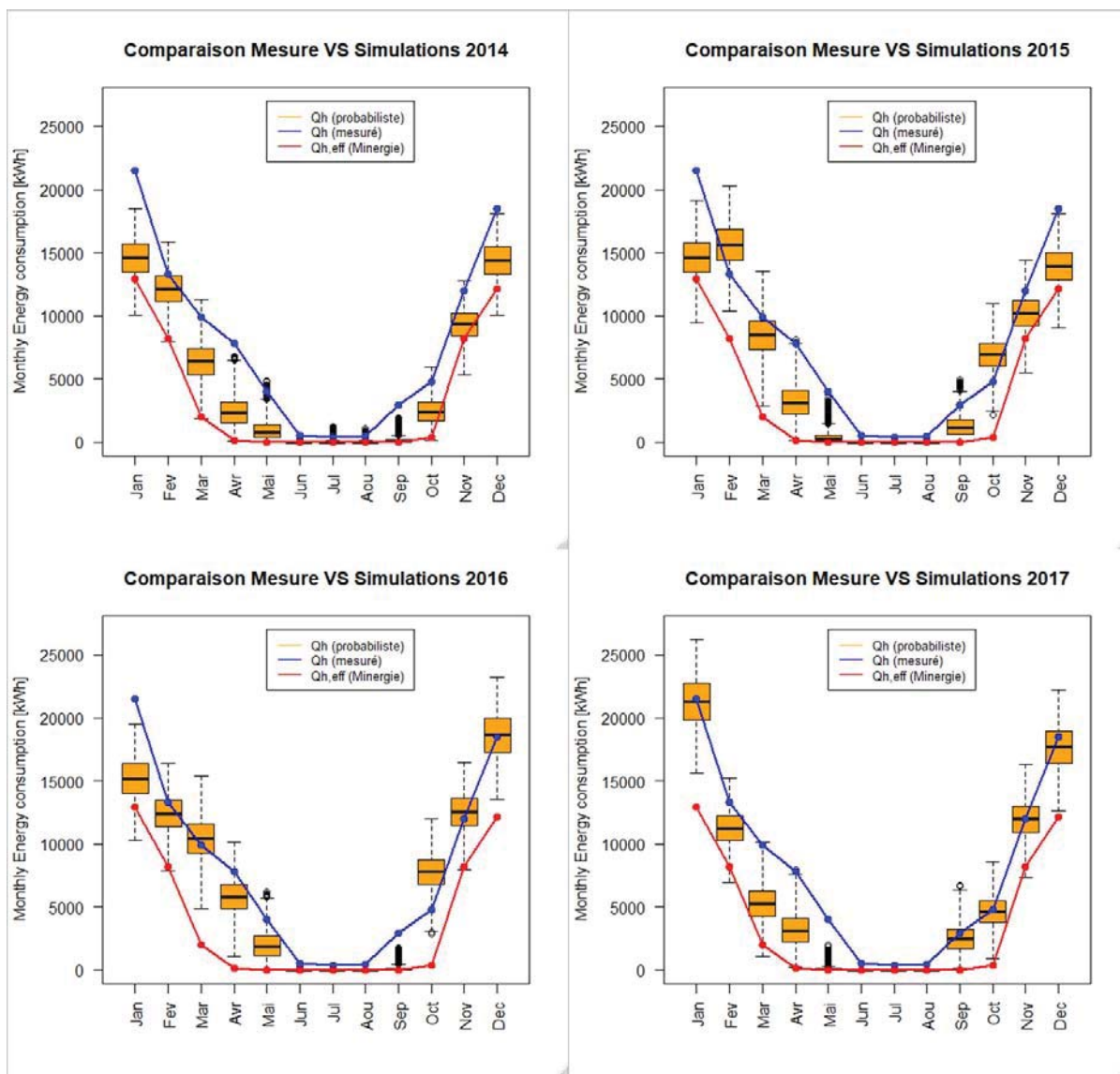


Figure 30 : Résultats de la demande de chaleur probabiliste, calculée selon la norme SIA 380/1 *Justificatif* ("Qh eff Minergie") et mesurée ("Qh mesuré") de 2014 à 2017.

Note : Dans la Figure 30, la boîte à moustache (*boxplot*) de couleur orange représente 50% des demandes de chaleur simulées. Elle est également appelée intervalle interquartile. Le trait inférieur horizontal de la boîte représente la valeur du premier quartile, le trait horizontal noir au milieu, la médiane (également appelé deuxième quartile) et la partie supérieure au troisième quartile. Les moustaches sont définis comme 1.5 fois l'écart interquartile et les points restant sont les « outliers ».

Les résultats montrent que la distribution statistique du modèle probabiliste encadre à nouveau les valeurs mesurées (ligne bleue). En fonction des mois, la valeur mesurée est située soit dans la boîte à moustache (regroupant 50% des simulations probabilistes) ou soit dans la moustache supérieure. En revanche, les résultats du bilan thermique calculé dans la demande Minergie (ligne rouge) sont rarement situés dans la boîte à moustache. Ils sont plutôt situés soit dans la moustache inférieure soit en dehors. C'est le cas, par exemple, pour Janvier 2017 où la valeur calculée s'écarte très nettement de la boîte à moustaches et de la valeur mesurée. A ce stade, les résultats de l'approche probabiliste semblent donc plus en phase avec la demande de chaleur effectivement observée chaque année (ligne bleue).

Plusieurs points intéressants découlent de ces résultats :

- D'une part, l'écart de performance entre calcul (ligne rouge) et mesure (ligne bleue) semble plus prononcé en période d'intersaison (printemps et automne) qu'en hiver où les résultats semblent présenter une meilleure adéquation avec la demande de chaleur mesurée.
- D'autre part, la simulation probabiliste semble présenter des résultats plus proches (en valeur médiane) des mesures pour la seconde partie de l'année (septembre à décembre). En effet, pour le printemps, la simulation probabiliste semble sous-estimer (en valeur médiane), la demande de chauffage mesurée.

Concernant l'écart de performance plus important en intersaison, cette observation pourrait s'expliquer par deux facteurs. Durant cette période, le bâtiment est supposé bénéficier fortement des apports solaires et internes pour diminuer voire rendre nulle la demande de chauffage. Par exemple, le facteur de voilage dans la norme SIA 380/1 et la demande Minergie est égal à 0%. Or, la demande mesurée sur 2014-2017 est largement plus importante en cette période que prévue. Deux pistes d'explication sont envisageables. Premièrement, le bâtiment peut ne pas suffisamment valoriser les apports solaires durant cette période (occultation des fenêtres réduisant le gain). Deuxièmement, la régulation du bâtiment ne tient pas suffisamment en compte de ces gains solaires, continuant de chauffer le bâtiment, ce qui entraîne une température intérieure trop élevée. La première piste est cohérente avec l'analyse du diagramme H-M présentée au chapitre 2.3.3.2.

3.3 Analyse globale de sensibilité

Une distribution statistique de demande de chaleur a été calculé par le modèle probabiliste. Cette étape est la première partie du calcul probabiliste appelé analyse d'incertitude. Toutefois, il est nécessaire de pouvoir étudier l'influence des paramètres du modèle sur la variabilité des performances énergétiques du bâtiment. De cette manière, il sera possible d'identifier quels sont les paramètres qu'il est nécessaire d'étudier plus en détails pour expliquer l'écart de performance.

Pour ce faire, une analyse globale de sensibilité a été réalisée (*Global Sensitivity Analysis, GSA*) et une décomposition de la variance totale des performances énergétiques en somme de variance induite par chaque paramètre a été réalisée (indice de Sobol). Cette approche, décrite en détail par Saltelli et al. (2004), est brièvement énoncée ci-dessous.

Soit $Y = F(P_1, P_2, \dots, P_N)$ un modèle. Sous l'hypothèse que les paramètres P_i sont statistiquement indépendants, la variance totale de la sortie (la demande de chauffage dans le projet UserGap, notée Y) peut être décomposée en somme de variances dues à chaque paramètre et à leurs combinaisons comme suit :

$$\text{Var}[Y] = \sum_{i=1}^n V_i(Y) + \sum_{i<j}^n V_{ij}(Y) + \sum_{i<j<k}^n V_{ijk}(Y) + \dots + V_{1,2,\dots,d}(Y), \text{Eq. 1}$$

Avec,

$$V_i(Y) = \text{Var}[E(Y|P_i)] ; V_{ij}(Y) = \text{Var}[E(Y|P_i, P_j)] - V_i(Y) - V_j(Y) \quad \text{Eq. 2}$$

E correspond à l'espérance. $V_i(Y)$ quantifie la variance de la sortie qui est due au paramètre P_i . C'est la variance d'ordre 1. La variance $V_{ij}(Y)$ représente la part de variance totale qui est due à l'interaction des variables P_i et P_j , c'est la variance d'ordre 2. Ainsi, pour un nombre d de paramètres, le nombre d'ordre est de $2^d - 1$.

Le calcul des parts de variance dues à chaque paramètre peut être approximé par plusieurs méthodes de calcul. Ici, c'est la méthode de Monte Carlo qui a été considérée. Les indices de sensibilité (appelés

également indices de Sobol, (Sobol, 2001) se calculent en divisant ces variances conditionnelles par la variance totale de la réponse Y :

$$S_i = \frac{\text{Var}[E(Y|P_i)]}{\text{Var}(Y)} = \frac{V_i(Y)}{\text{Var}(Y)} \quad S_{ij} = \frac{V_{ij}(Y)}{\text{Var}(Y)} \quad \text{Eq. 3}$$

Il est donc possible, de hiérarchiser l'ensemble des contributions des paramètres et de leurs combinaisons. La somme de l'ensemble des indices est de 1. Cependant, plus le nombre de paramètres augmente dans le modèle, plus l'analyse des indices est complexe. Aussi, pour simplifier l'étude des contributions des paramètres, il est possible de calculer les indices totaux liés à un paramètre et l'ensemble de ses combinaisons avec les autres paramètres :

$$S_{\text{total } i} = S_i + \sum_{j \neq i} S_{ij} + \sum_{j \neq i, k \neq j, j < k} S_{ijk} + \dots \quad \text{Eq. 4}$$

La somme des indices totaux est supérieure à 1 car l'indice S_{ij} sera sommé dans l'indice total $S_{\text{tot } i}$ et $S_{\text{tot } j}$. Ainsi, en calculant les indices d'ordre 1 et totaux pour chaque paramètre, il est possible d'étudier l'influence de chaque paramètre et d'identifier si une contribution conjointe (non spécifiée) est importante. En effet, pour un paramètre P_i , dans le cas où la différence entre S_i et $S_{\text{tot } i}$ est grande, cela signifie que celui-ci interagit avec un ou plusieurs autres paramètres. Cette hiérarchisation permet ainsi d'identifier les paramètres clefs.

Avec cette approche, il est donc possible de quantifier la part de la variance totale d'un modèle (ici la demande de chauffage) en fonction de la variance des paramètres qui composent le modèle. Ces parts de variance permettent de déterminer les paramètres les plus influents sur la demande de chaleur et qu'il est nécessaire d'étudier plus en détails pour comprendre l'écart de performance. Dans un premier temps, la décomposition de la variance a été réalisée pour le modèle complet, incluant les conditions climatiques des quatre années considérées dans le modèle comme une variable du modèle, Figure 31. La caractérisation des données d'entrée du modèle est la même que celle décrite dans le Tableau 17 :

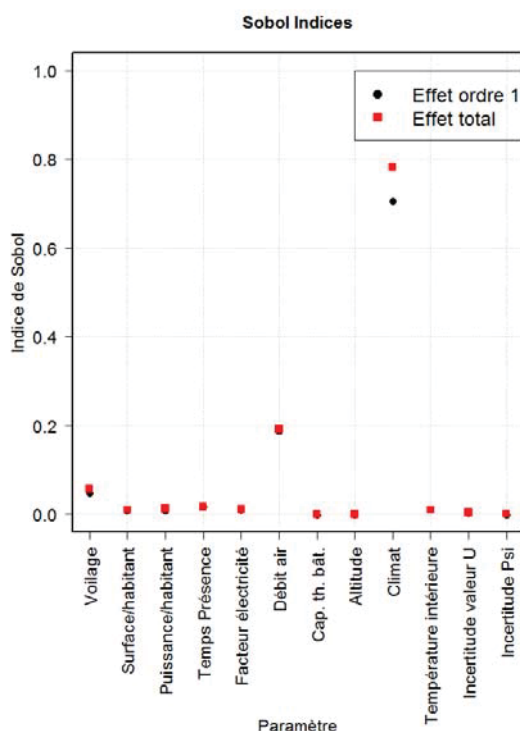


Figure 31: Décomposition de la variance incluant le climat des années 2014 à 2017 comme variable.

Trois paramètres expliquent le plus la variance de la demande de chaleur du bâtiment : le climat, le débit d'air thermiquement actif et le facteur de voilage (l'occultation des fenêtres par des stores à lamelles).

Les conditions climatiques expliquent environ 70% de la variance totale de la demande de chauffage. Cependant, ce paramètre ne peut pas être ajusté pour « réduire » la variance de la demande de chauffage puisqu'il est inhérent aux conditions météorologiques observées pour une année donnée. De fait, dans un second niveau d'analyse, il a été décidé de réaliser la décomposition de la variance pour une année fixe, i.e., 2016, Figure 32 :

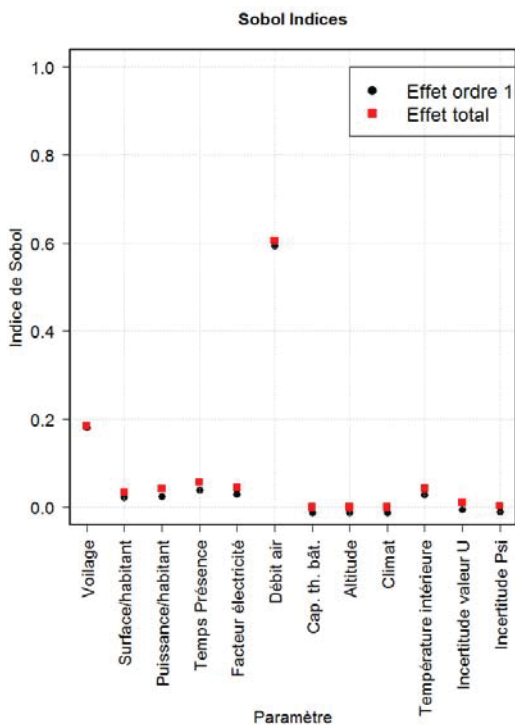


Figure 32: Décomposition de la variance pour l'année 2016.

En fixant le climat extérieur à l'année 2016, l'indice de Sobol du climat est nul (i.e., la part de la variance totale de la demande de chauffage expliquée par le paramètre « climat » est proche de zéro). Les trois paramètres expliquant le plus de variance sont le débit d'air thermiquement actif, le facteur de voilage des fenêtres et finalement la température intérieure (qui varie mois par mois pour l'année 2016). Les paramètres influençant les gains internes (i.e., surface, puissance et temps de présence des habitants) n'ont qu'une influence marginale sur la variance de la demande de chauffage. La prise en compte d'une incertitude de $\pm 10\%$ sur les valeurs U des éléments d'enveloppe et les valeurs Psi des ponts thermiques ne présente, également, pas d'influence significative sur la variance totale de la réponse énergétique du bâtiment.

Ainsi, la décomposition de la variance et le calcul des indices de Sobol tend à montrer que, une fois les paramètres de climat et consommations électriques fixés à l'aide des mesures, les performances énergétiques du bâtiment sont essentiellement influencées par le débit d'air thermiquement actif et le facteur de voilage des vitrages. Ces deux éléments doivent donc être étudiés plus en détails afin de mieux comprendre l'origine de l'écart de performance (cf. chapitre 4.2).

3.4 Synthèse sur l'analyse probabiliste

Un modèle probabiliste de la demande de chaleur selon la norme SIA 380/1 a été développé afin de tenir compte de l'incertitude liée à l'utilisation du bâtiment B1.2 d'Eikenott lors de sa phase d'exploitation. Ce modèle nécessite un temps de calcul très réduit pour lancer plusieurs milliers de simulations. Il aboutit à une distribution statistique de la demande de chaleur représentant un intervalle de valeurs au sein duquel la demande réelle du bâtiment se situe. Il est flexible d'utilisation, les bornes de variations des paramètres d'entrée du bilan thermique pouvant être modifiées par l'utilisateur.

La valeur médiane des simulations probabilistes permet de réduire l'EdP 2014-2017 à 17% en moyenne. C'est très largement inférieur à l'EdP constaté pour les harmonisations S1 à S3 où les paramètres non mesurés restaient à leur valeur standard selon la norme SIA 380/1. Par exemple, le facteur de voilage utilisé dans le bilan initial S0 et dans les harmonisations S1 à S3 est de 0% ce qui rend impossible l'obtention d'une demande de chaleur proche de celle qui a été mesurée. Le modèle probabiliste a lui considéré une variation de 0% à 100% pour les 10'000 simulations de la demande de chaleur. Le calcul probabiliste semble donc être très utile en évaluation Ex-Post pour identifier les paramètres influençant l'écart de performance et pouvoir cibler une campagne de mesures complémentaires.

A partir du cas d'étude du bâtiment étudié dans le projet et de l'analyse de sensibilité globale, deux paramètres de calcul, non mesurés par les boîtiers de suivi énergétiques, restent donc à approfondir :

- Le débit d'air thermiquement actif.
- Le facteur de voilage.

4 Analyse détaillée de paramètres avec visites/mesures in-situ complémentaires

L'approche développée dans les chapitres précédents a permis d'identifier quels sont les paramètres qui expliquent a priori l'écart de performance.

Cette identification des paramètres a amené, ensuite, à la mise en place de campagnes de mesures complémentaires sur deux paramètres :

- Facteur de voilage (occultation des fenêtres).
- Débit d'air de la ventilation.

Par ailleurs, bien que non identifié comme clef, il a été également décidé de mesurer le coefficient de transfert thermique d'un élément d'enveloppe afin de vérifier que celui-ci était proche de celui fixé lors de la conception du bâtiment.

4.1 Facteur de voilage

4.1.1 Analyse qualitative

Pour le bâtiment d'Eikenott, l'analyse probabiliste montre que le facteur de voilage des stores est particulièrement influent sur les calculs. Plusieurs visites sur site ont été réalisées. Les stores à lamelles étaient souvent soit complètement baissés avec lamelles fermées soit baissés avec lamelles horizontales limitant également les apports solaires directs, Figure 33 :



Figure 33 : Photographies des façades du bâtiment.

Bien que ponctuelles, ces observations confirment que les stores sont maintenus baissés ou partiellement ouverts pendant la journée (stores à lamelles dont l'orientation peut être aussi modifiée). Il est donc nécessaire de tenir compte de cette occultation des fenêtres dans le calcul du bilan thermique.

4.1.2 Analyse quantitative (approximée)

Le bâtiment B1.2, ne dispose pas d'information spécifique²⁰ sur la position ni l'orientation des stores dans les logements. Cependant, d'autres bâtiments du quartier sont équipés de systèmes de domotique permettant d'une part la gestion des stores par les habitants et d'autre part, le monitoring de leurs positions et orientations. Ces données ont été rendues accessibles dans le cadre du projet UserGap par la société eSmart.

Les données transmises correspondent aux positions et orientations des stores pour six logements sur une période maximale du 3 février 2016 au 30 octobre 2017. Il est à noter que les données ne sont pas toutes disponibles pour l'ensemble de cette période. Au total, les données transmises correspondent, en principe, à 29 fenêtres pour lesquelles l'orientation des lamelles et la position des stores sont données pour une moyenne horaire (0% fermé, 100% ouvert).

Pour chaque fenêtre, la position et l'orientation des stores ont été agrégées par heure pour une journée type de chaque mois de l'année.

La Figure 34 et la Figure 35 représentent les données d'orientation et de position des stores sous forme de graphique pour chaque appartement.

A la lecture de ces graphiques, il est apparu que pour deux logements, les données transmises ne semblaient pas consolidées. Ces logements correspondaient à six fenêtres de l'échantillon et ont été enlevés des analyses.

Pour les quatre autres logements, différents modes d'opérations peuvent être identifiés :

- Mode « jour/nuit » intégral : Dans ce mode d'opération, les fenêtres sont ouvertes le jour et fermées la nuit. Il correspond au mode « intuitif » d'utilisation des fenêtres. Il ne semble pas y avoir de gestion de l'orientation des lamelles, celles-ci étant soit complètement abaissées lors que le store est fermé, soit complètement ouvertes lorsque celui-ci est relevé.
- Mode « occultation partielle en journée » : Dans ce mode d'opération, les stores sont fermés la nuit et, en journée, leurs positions et orientations sont ajustées. De ce fait, les apports solaires ne sont que partiellement valorisés.
- Mode « occultation forte » : Dans ce mode d'opération, les stores sont maintenus essentiellement fermés et les lamelles sont orientées en journée de manière à laisser entrer la lumière naturelle. Dans ce cas, les apports solaires sont à priori peu valorisés.

D'une manière générale, les stores ne sont pas systématiquement remontés en journée pour maximiser les apports solaires. Même si les lamelles sont orientées horizontalement en saison de chauffage pour favoriser l'éclairage naturel (rayonnement diffus) dans les logements, cette position limite néanmoins l'irradiation directe sur les vitrages et de ce fait les gains solaires.

²⁰ Par exemple par le biais d'un système de domotique

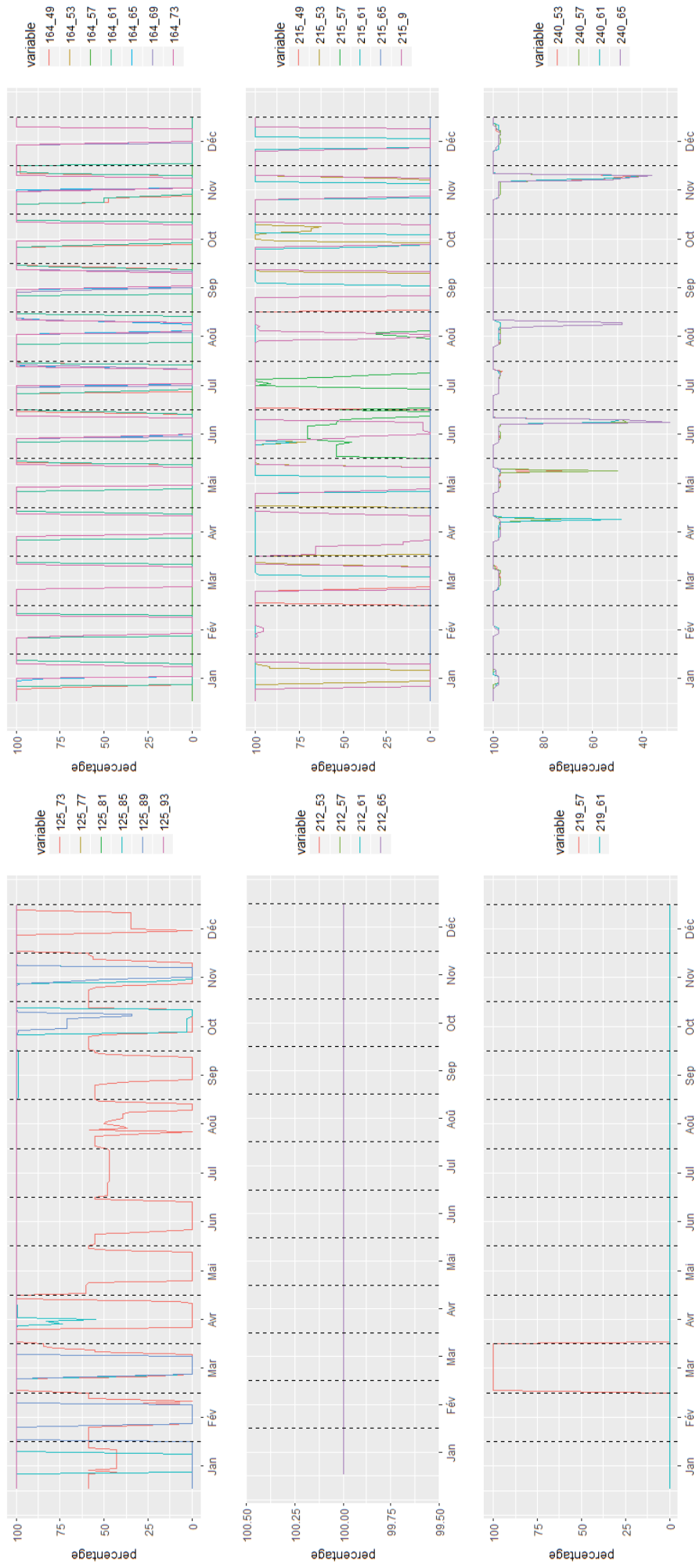


Figure 34: Position des stores pour des jours types chaque mois par fenêtre, un graphique par appartement (100% : store ouvert, 0% store baissé).

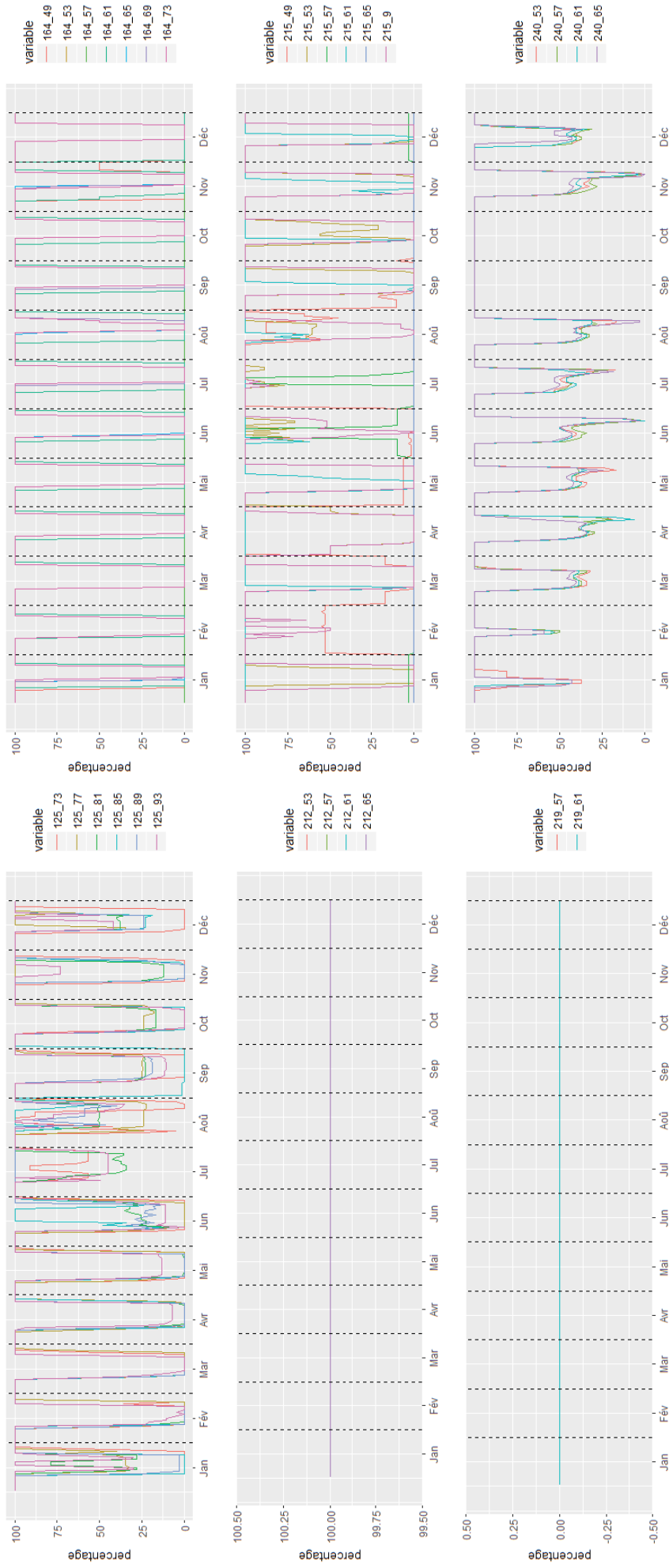


Figure 35: Orientation des stores pour des jours types chaque mois par fenêtre, un graphique par appartement (100% : store ouvert, 0% store baissé).

4.2 Analyse du monobloc de ventilation

Les données des débits d'air et des températures sur l'air entrant/sortant du monobloc de ventilation du bâtiment ont été historiquement mesurées par le biais d'un système d'acquisition connecté à l'automate de gestion. Malheureusement, comme présenté dans le chapitre 2.3.2, Figure 13, un problème d'acquisition est apparu et les données n'ont plus été remontées à partir de 2016. Ce paramètre ayant été identifié comme clefs dans l'analyse globale de sensibilité, il a été décidé, dans le cadre du projet UserGap, de mettre en place un système de suivi. Ce système de suivi, développé par la HEIG-VD communique avec l'automate de gestion de la ventilation via le protocole de communication modbus. Les données mesurées pour le mois de janvier 2019 sont présentées dans la Figure 36 pour le débit d'air pulsé et repris sur l'air vicié. Chaque ligne de couleur représente une journée complète de mesure avec un pas de temps de 1 minute pour l'acquisition.

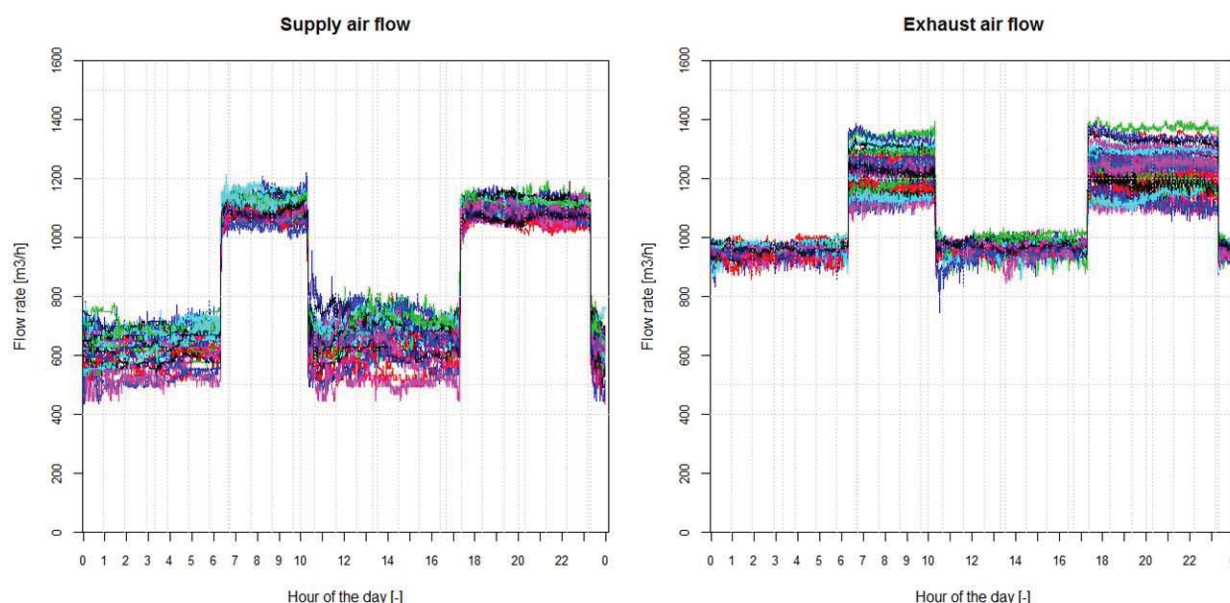


Figure 36: Débits d'air pulsé ("supply") et repris sur l'air vicié ("exhaust") mesurés à l'aide de l'acquisiteur initial installé.

Les graphiques mettent en évidence deux points importants :

- Il existe deux régimes de fonctionnement : un mode réduit la nuit et en journée et un mode nominal le matin et en soirée.
- Les débits d'air mesurés sont largement inférieurs à ceux définis lors de la mise en service de l'installation (et ayant servi au calcul du débit d'air thermiquement actif, voir, Tableau 2). Il y a en effet un facteur 2 à 2.5 d'écart (le débit prévu pour le bâtiment est de 2440 m³/h).

Dans un second temps, un capteur de pression différentielle a été placé sur le monobloc de ventilation sur l'air fourni. Connaissant les caractéristiques du monobloc (variable K_v ci-dessous), il est ainsi possible de calculer le débit d'air à partir de la pression différentielle selon la relation suivante :

$$\text{Débit} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] = \frac{1}{K_v} \cdot \sqrt{\text{Pression}_{\text{Différentielle}}}$$

Les données ont ainsi été collectées pendant une semaine sur l'air pulsé. Les résultats sont présentés dans la Figure 37. Chaque ligne de couleur représente une journée complète de mesure avec un pas de temps d'une minute pour l'acquisition.

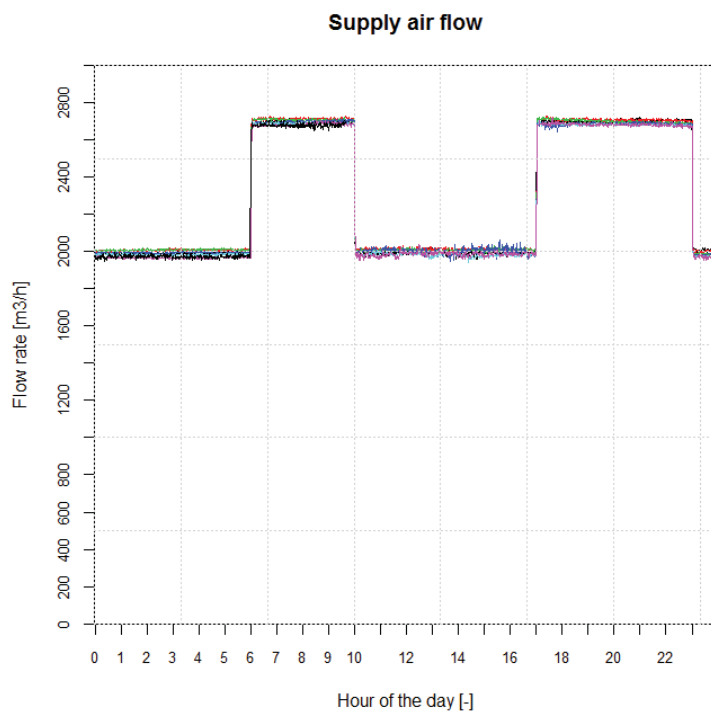


Figure 37: Débits d'air mesurés à l'aide à l'aide du capteur de pression différentielle (air pulsé, fourni au bâtiment).

Le débit d'air ainsi mesuré est plus important que celui donné par le boîtier de suivi connecté en ModBus à l'automate de régulation, Figure 38:

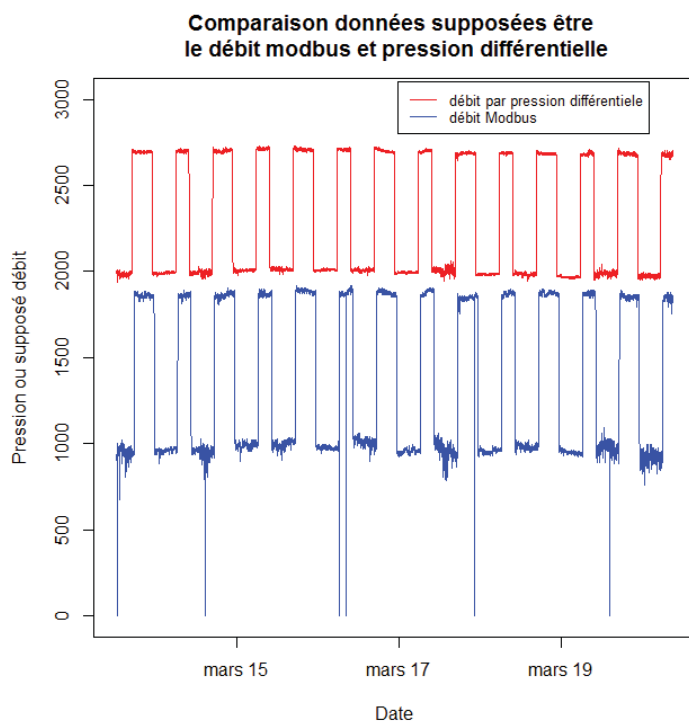


Figure 38: Comparaison des débits mesurés selon le capteur de pression différentielle et ceux collectés via le système de suivi connecté en Modbus à l'automate de régulation (côté air pulsé, fournit au bâtiment).

L'écart moyen entre les deux sources de mesure est de 42.7% (écart type = 13.6%). Les données collectées ne sont donc pas cohérentes entre elles. Une analyse détaillée des valeurs a permis d'identifier que la donnée remontée par le biais de l'automate de régulation n'est pas le débit d'air, mais bien la pression différentielle. En effet, en supposant que l'information codée comme « débit » sur l'automate de régulation soit en fait la pression différentielle et en comparant avec la donnée mesurée par le capteur de pression différentielle posé séparément, les valeurs sont similaires, Figure 39 :

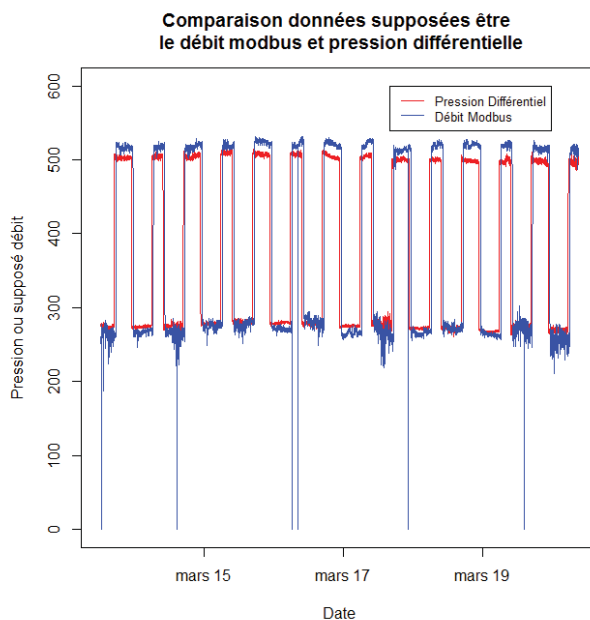


Figure 39: Comparaison des données du capteur de pression différentielle avec le débit (en fait pression différentielle) collecté sur l'automate de régulation.

Les données qui ont été collectées par la centrale de suivi (voir Figure 13), jusqu'alors considérées comme étant un débit d'air, sont donc une pression différentielle. Pour obtenir le débit, il est nécessaire d'appliquer l'équation reliant le débit à la pression différentielle. Les résultats de débit sont présentés pour la période 2014-2017 dans la Figure 40 :

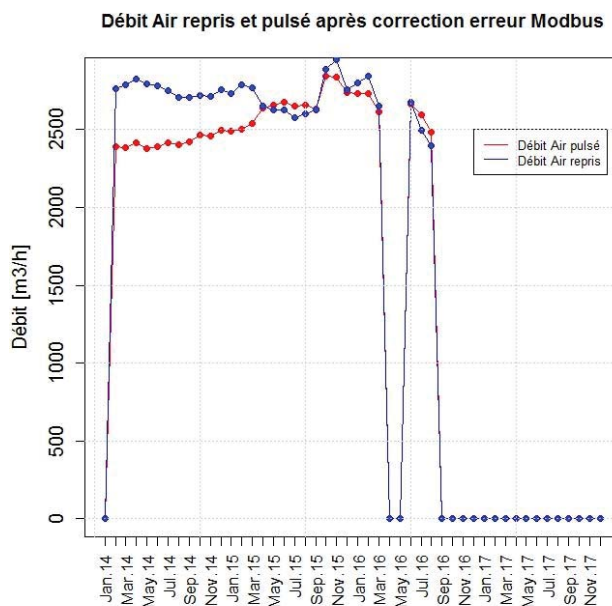


Figure 40: Débits d'air d'après les données Losinger Marazzi une fois le calcul du débit effectué à partir de la valeur de la pression différentielle.

Le débit d'air ainsi calculé est bien plus cohérent avec la valeur employée dans le bilan thermique. En 2014, le débit d'air repris (air vicié) était plus élevé que le débit d'air pulsé. Cette situation implique des infiltrations plus importantes puisque le bâtiment est en dépression. Au cours de l'année 2015, le débit d'air pulsé semble avoir été adapté pour être équivalent au débit d'air repris. Finalement dès la fin du printemps 2016, les données ne sont plus remontées à la suite d'un problème de communication entre le système d'acquisition modbus et l'automate de régulation du monobloc de ventilation. Sur la période pendant laquelle l'information était collectée, le débit d'air repris moyen était de 2717 m³/m²·h et de 2538 m³/m²·h pour le débit d'air pulsé. Ces débits sont au-dessus de la valeur utilisée pour les bilans thermiques provoquant une modification du débit d'air thermiquement actif. Selon les observations, ce dernier peut donc être redéfini selon l'équation suivante :

$$\text{Débit d'air thermiquement actif} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{m}^2_{\text{SRE}}} \right] = \frac{V_m}{\text{SRE}}(1 - \eta) + V_x + \frac{V_{\Delta\text{débit}}}{\text{SRE}}$$

Variable	Description	Unité
V _m	Débit moyen d'air neuf	m ³ /h
SRE	Surface de référence énergétique	m ²
η	Rendement de récupération de chaleur	%
V _x	Débit d'air neuf par infiltration naturelle	m ³ /h·m ² _{SRE}
V _{Δdébit}	Débit provoqué par un déséquilibre du monobloc	m ³ /h

V_{Δdébit} correspond au débit d'air induit par la différence de débit entre l'air extrait et l'air pulsé dans le bâtiment. En effet, si le débit d'air extrait est plus élevé que celui de l'air pulsé, alors la différence de débit implique une infiltration supplémentaire qui provient de l'extérieur et qui augmente donc le débit d'air thermiquement actif.

Pour calculer le débit thermiquement actif, il est nécessaire de calculer le rendement de la récupération de chaleur réel mois par mois. Celui-ci peut être calculé à partir des données de température collectée, à partir de l'équation suivante :

$$\eta [\%] = \frac{T_{\text{Air pulsé}} - T_{\text{Air extérieur}}}{T_{\text{Air vicié}} - T_{\text{Air extérieur}}}$$

A partir des données collectées sur le monobloc de ventilation (lorsque la communication fonctionnait), il est donc possible de déterminer ce rendement de récupération, Figure 41 :

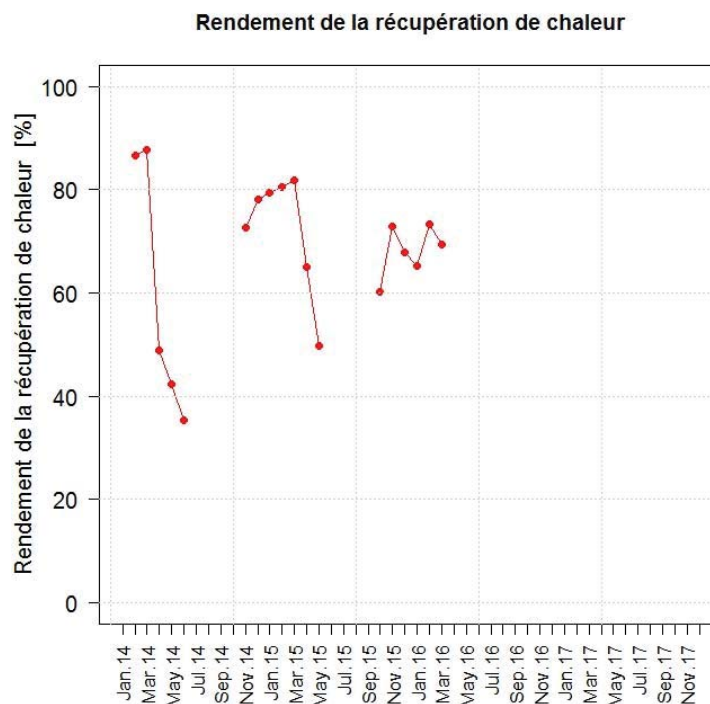


Figure 41: Rendement de la récupération de chaleur.

Le rendement de récupération varie donc grandement d'un mois à l'autre. En janvier et février 2014, il est proche de la valeur donnée par le fabricant du monobloc, i.e., 80%. Le rendement chute fortement les trois mois suivants avant que la mesure ne soit plus remontée pendant plusieurs mois. Ensuite, à partir de mi-2015, le rendement décroît et oscille autour de 68%. L'explication de cette chute provient d'une adaptation du débit d'air pulsé. Jusqu'à la fin de la saison de chauffe 2014/2015 (mars 2015), le débit d'air pulsé était en moyenne 10% inférieur au débit d'air repris, Figure 40. De fait, le rendement de récupération de chaleur était meilleur. A compter d'avril 2015, les débits d'air semblent avoir été ajusté et l'écart n'est plus que de 1.4%. Cet ajustement des débits semble donc être à l'origine de la chute du rendement de la récupération de chaleur.

Cependant, cet ajustement a également un effet bénéfique. En effet, lorsque le débit d'air pulsé était plus faible que le débit d'air extrait (jusqu'en mars 2015), la différence de débit est compensée par une augmentation des infiltrations impliquant ainsi un débit d'air thermiquement actif plus important. L'ajustement des débits permet donc de rendre le terme $V_{\Delta\text{débit}}$ nul ou proche de 0.

A partir des données de débits, de température et de rendement de la récupération de chaleur, il est donc possible de calculer le débit d'air thermiquement actif du bâtiment mois par mois, Figure 42 :

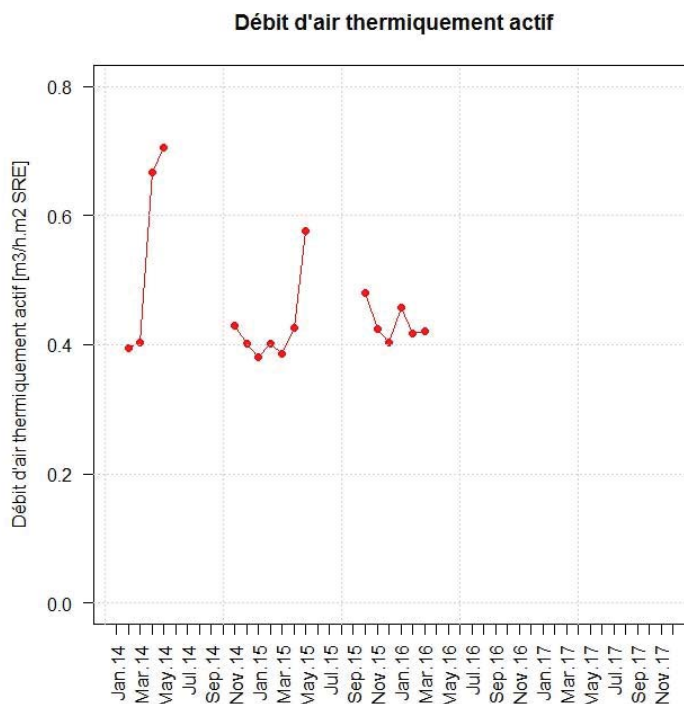


Figure 42: Débit d'air thermiquement actif calculé à partir des données du système de suivi.

Le débit d'air thermiquement actif ainsi calculé est donc plus important que la valeur ayant servi au calcul du bilan thermique pour le *Justificatif* Minergie (0.33 m³/m²_{SRE}·h). Sa valeur moyenne sur l'ensemble des mesures est en effet de 0.43 m³/m²_{SRE}·h soit 30% de plus que la valeur employée en phase de planification. Quelques points singuliers sont à relever. La modification du débit sur l'air pulsé (à partir d'avril 2015) a impliqué une augmentation ponctuelle du débit d'air thermiquement actif. Cependant, d'une manière générale, hormis les périodes de fin de chauffe (avril à juin), le débit d'air thermiquement actif reste proche en moyenne de 0.43 m³/m²_{SRE}·h.

Ce débit d'air, plus élevé que celui du bilan thermique de la demande Minergie contribue à augmenter la demande de chaleur du bâtiment, expliquant ainsi une partie de l'écart de performance observé. Ce dernier point a été mis en évidence par l'analyse globale de sensibilité ce qui a permis d'orienter la campagne de mesures complémentaires. Ce travail a permis de détecter l'erreur dans la collecte de données, puis, après correction, d'analyser correctement l'augmentation du débit entre mesures et planification. Il semble donc que cette approche soit prometteuse dans le cas de l'analyse de l'origine des écarts de performances entre planification et réalité.

4.3 Bilan thermique ajusté par les mesures

En reprenant les débits d'air thermiquement actifs pour l'année 2015 (seule année où l'ensemble des données sont disponibles), le bilan thermique probabiliste du bâtiment B1.2 est recalculé, Figure 43 :

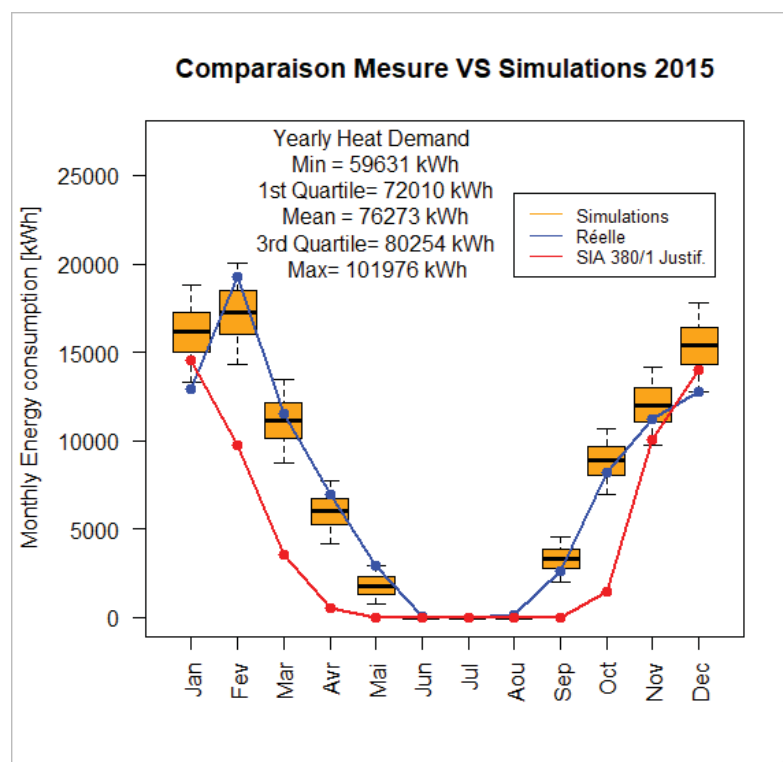


Figure 43: Résultat du bilan thermique probabiliste avec ajustement du débit d'air thermiquement actif calculé pour l'année 2015.

La demande de chauffage mensuelle obtenue par le calcul est globalement cohérente avec celle observée dans le bâtiment pour l'année 2015. Toutefois, deux tendances sont observées :

- Durant la première partie de l'année (Janvier à Mai), la demande de chauffage calculée sous-estime la valeur mesurée.
- Durant la deuxième partie de l'année (Septembre à Mai), la demande de chauffage calculée encadre bien la demande réelle.

Il est également possible d'étudier les intervalles de variation mensuelle du facteur de voilage qui permettent d'obtenir, par simulation, une demande de chauffage au plus près de la demande réelle observée. Pour ce faire, à partir des résultats présentés dans la Figure 43, une tolérance de $\pm 5\%$ a été fixée par rapport à la demande mesurée (courbe bleue). Parmi les 20'000 simulations thermiques probabilistes, seuls les scénarios de simulation, permettant d'obtenir une demande de chaleur dans l'intervalle $\pm 5\%$, ont été conservés. De ces scénarios, les distributions des facteurs de voilage pour chaque mois ont été extraites, Figure 44 :

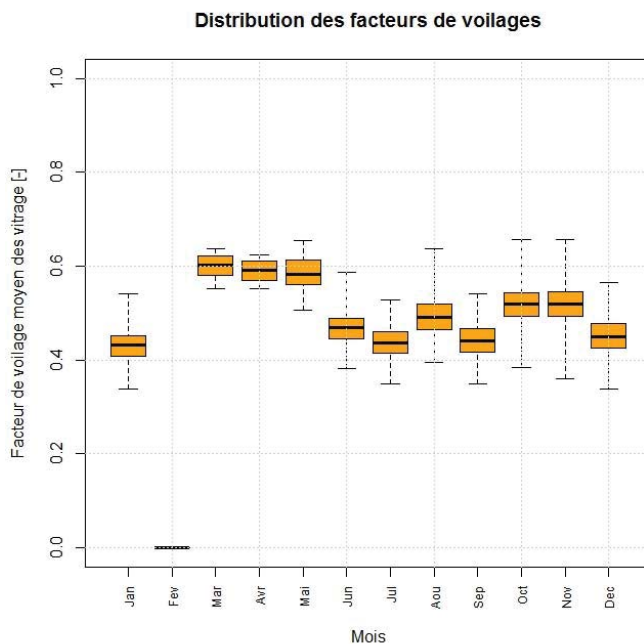


Figure 44: Facteur de voilage moyen mensuel permettant d’obtenir la meilleure approximation de la demande de chauffage mesurée du bâtiment.

Note : La simulation ajustée (résultats en Figure 43) ne fournit pas des valeurs qui encadrent la demande mesurée de chauffage du mois de février. De fait, il n’est pas possible d’identifier une valeur pour le facteur de voilage de ce mois-ci

Les résultats montrent que le facteur de voilage varie entre 36% et 65% environ. Il est plus important au printemps que pour le reste de l’année (60% en valeur médiane au printemps contre 50% pour le reste de l’année). Sur ce bâtiment, le facteur de voilage est donc systématiquement plus élevé que la valeur standard de la norme SIA 380/1 (0%), correspondant à une valorisation maximale des apports solaires. Les résultats de cette analyse sont cohérents avec l’analyse du diagramme H-M qui a montré que la surface effective de captage solaire était faible.

Comme précisé précédemment, l’analyse des valeurs du paramètre de voilage ne permet pas d’identifier sa valeur exacte. Elle permet néanmoins de donner des plages suffisamment précises pour réduire l’EdP pour l’année 2015.

4.4 Thermographie

4.4.1 Contexte

La thermographie est un outil de mesure in-situ très utile pour vérifier de possibles défauts d'isolation thermique, fuites d'air et autres déperditions par comparaison de température de surface. L'objectif est de vérifier, sur le bâtiment B1.2 d'Eikenott, d'une part l'absence de problème de mise en œuvre sur l'enveloppe thermique et d'autre part, la position des fenêtres des logements (ouvertes ou fermées). Ce travail complète les analyses précédentes sur la signature énergétique du bâtiment (cf. partie 2.3.3.1) et sur l'analyse du débit d'air thermiquement actif (cf. chapitre 4.2).

Cette thermographie a été uniquement faite d'un point de vue qualitatif. Les valeurs de température de façades ne sont pas très précises, car l'émissivité de la caméra n'a pas été réglée en fonction du matériau. Néanmoins, les mesures permettent clairement de déterminer sur la figure suivante :

- Les fenêtres ouvertes, même avec les stores fermés (cf. Figure 45).
- Le réchauffement de la façade ventilée (à droite de la Figure 45), bien au-delà du périmètre de la fenêtre. Toutefois, cette chaleur est très difficilement quantifiable individuellement par fenêtre²¹.

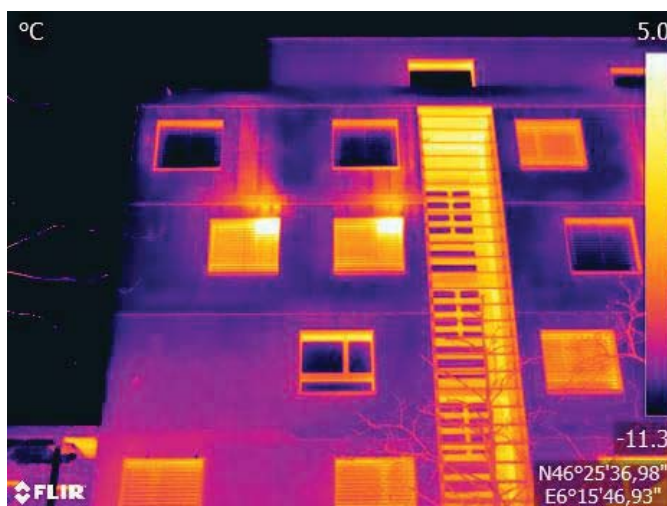


Figure 45: Fenêtres ouvertes en imposte sur la façade nord-est à 5h30 le 27.02.2019.

4.4.2 Mesures

Les mesures ont été effectuées à l'aide d'une caméra thermographique FLIR E95. La thermographie a été effectuée le mercredi 27 février 2019 (en semaine) entre 5h30 et 7h00 du matin avant le lever de soleil. Cet horaire matinal avait pour but :

- D'éviter dans un premier temps l'influence du soleil sur les façades.
- D'éviter l'influence des gains solaires emmagasinés sous forme de chaleur pendant la journée (déphasage thermique) dans les façades.
- De déterminer le nombre de fenêtres ouvertes pendant la nuit. L'hypothèse prise est que les fenêtres ouvertes, visible à la thermographie à la fin de la nuit, sont restées ouvertes toute la nuit.



Les quatre façades ont été photographiées deux fois. Une première fois entre 5h30 et 6h00 (i.e., en fin de nuit) et une seconde fois entre 6h30 et 7h00 (i.e., heures de lever des habitants). Ces deux mesures

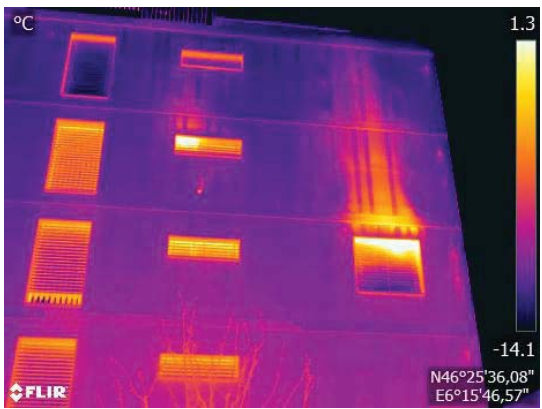
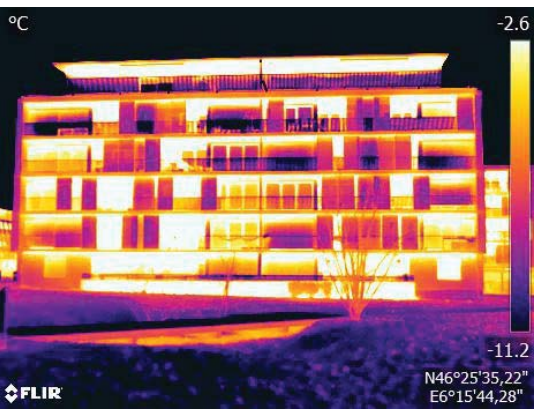
²¹ En effet, les phénomènes physiques liés au transfert de chaleur sont complexes à modéliser. Le nombre de paramètres de calculs sont nombreux (pression(s), température(s), vitesse du vent, coefficient de convection, etc.) et leurs variations temporelles sont significatives.

permettent de déterminer si la position des fenêtres évolue en début de matinée en fonction du réveil des habitants et de l'aération des chambres à coucher. Pour ne pas surcharger le rapport, les images, reportées dans la suite, montrent les éléments les plus marquants.


4.4.3 Analyses

Les analyses sont présentées côte-à-côte avec les thermographies de chaque façade pour faciliter la lecture. Les thermographies suivantes correspondent à la première série de 5h30 à 6h00 avant le réveil de la plupart des occupants.

 <p style="text-align: center;">Figure 46: Façade nord-est</p>	<p>Façade nord-est (Figure 46):</p> <p>Trois fenêtres sont clairement ouvertes en imposte.</p> <p>Bien que la thermographie montre une température de surface plus élevée à proximité des portes, il ne faut pas en tenir compte. Ceci pour deux raisons : la première est une différence d'émissivité entre les deux surfaces de façade différente ; la seconde est d'ordre constructif, car cette partie du bâtiment est une façade à isolation crépie contrairement au reste de la façade qui est ventilée. La température de surface est donc plus basse sur une façade ventilée, car de l'air extérieur passe entre l'isolation et le revêtement de façade. Il est très probable que ce détail constructif favorise les images thermographiques en ajoutant, naturellement, un contraste plus marqué ainsi qu'une canalisation du flux d'air chaud dans la façade.</p>
 <p style="text-align: center;">Figure 47: Façade nord-ouest</p>	<p>Façade nord-ouest (Figure 47) :</p> <p>La fenêtre en haut à gauche est ouverte. La tâche est plus marquée que sur les autres photos, car la fenêtre est à proximité de ces « ceintures » métalliques entre étages dans le but d'effectuer, probablement, une séparation coupe-feu.</p> <p>Deux fenêtres ressortent plus fortement au premier et troisième étages. Deux hypothèses peuvent être faites : soit il y a une erreur de mesure et une réflexion d'un élément plus chaud, soit il y a une défektivité (fuite du gaz entre les deux vitrages).</p>

 <p>Figure 48: Façade sud-est</p>	<p>Façade sud-est (Figure 48) :</p> <p>L'influence des fenêtres ouvertes est à nouveau bien visible sur la fenêtre de droite où la lame d'air de la paroi ventilée de la façade réchauffe cette dernière jusqu'à deux étages plus haut.</p>
 <p>Figure 49: Façade sud-ouest</p>	<p>Façade sud-ouest (Figure 49) :</p> <p>L'analyse de cette façade est impossible à effectuer pour plusieurs raisons. Plusieurs matériaux de différentes émissivités composent la façade rendant difficile un réglage de la caméra thermique. Ceci provoque, visuellement, des contrastes de couleur même si les surfaces sont à la même température. Etant donné que cette façade est principalement composée de vitres, il est également difficile d'effectuer une mesure, car il est probable que certaines reflètent simplement les rayons infrarouges, et émettent une information de température erronée.</p>

Une deuxième série de thermographie a ensuite été réalisée de 6h30 à 7h00 pour évaluer l'influence des usagers. La figure suivante présente justement un cas d'ouverture des fenêtres pour aérer l'appartement et les duvets.

 <p>Figure 50 : Influence visible d'une fenêtre ouverte²²</p>	<p>Influence des occupants au réveil (Figure 50) :</p> <p>La superposition de l'image thermographique avec l'image réel permet de visualiser l'impact de l'aération des duvets sur les déperditions thermiques. Cela permet de confirmer l'hypothèse que l'utilisateur a un impact direct sur le débit d'air thermiquement actif du bâtiment. La quantité d'énergie perdue ne permet par contre pas, par thermographie, d'être quantifiée.</p>
--	---

²² Cette photo n'appartient pas au bâtiment étudié, mais celui d'à côté. Elle permet, toutefois, de bien comprendre et de visualiser la fenêtre ouverte pour aération d'un lit le matin en superposant l'image thermographique avec l'image « standard ».

4.4.4 Synthèse de la thermographie

La thermographie confirme l'influence de l'utilisateur sur le débit d'air thermiquement actif du bâtiment. Il reste toutefois impossible de quantifier les déperditions thermiques par aération sans passer par une analyse du bilan thermique ou de la signature énergétique du bâtiment.

4.5 Analyse des valeurs U des éléments d'enveloppe

4.5.1 Contexte

Dans le cadre du modèle de simulation probabiliste, les valeurs U des éléments d'enveloppe ont été considérées à leurs valeurs théoriques (i.e., celles du bilan thermique standard) avec une plage de variation de $\pm 10\%$. La faible influence de ce paramètre a été démontrée au chapitre précédent (cf. Figure 32).

Dans cette partie, des relevés ponctuels sur un élément d'enveloppe a été effectué à l'aide de fluxmètres. Ils permettent de compléter la campagne de mesures en caractérisant l'écart entre valeur U réelle et valeur U théorique. L'objectif de cette campagne de mesure est de confirmer l'observation issue de l'approche probabiliste qui a identifié l'incertitude sur la valeur U des éléments d'enveloppe comme peu influente sur l'explication de l'écart de performance.

4.5.2 Mesures

Le matériel utilisé pour les mesures comporte les éléments suivants : un acquiseur de données Agilent, des fluxmètres Hukseflux, ainsi que quelques sondes PT100 (Figure 51). Il s'agit d'un système très fiable et simple d'utilisation. Il a, par contre, le désavantage d'avoir un coût élevé et d'émettre du bruit à chaque mesure pouvant gêner les occupants du bâtiment.

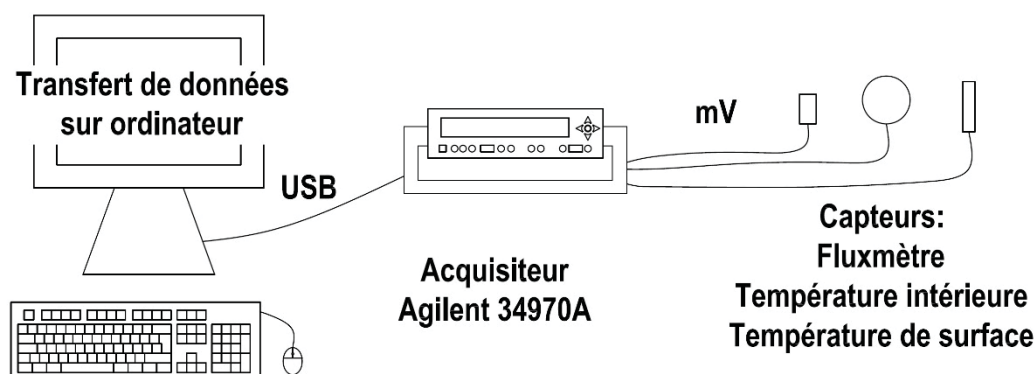


Figure 51: Système de mesure des valeurs U.

La seconde partie du travail était de déterminer l'emplacement des capteurs de mesures. Une pose dans le corridor a été écartée, pour éviter d'éventuelles déprédations. Des recherches ont été effectuées dans le but d'installer le système d'acquisition dans un appartement durant les vacances de février (afin d'éviter le désagrément du bruit), mais ces dernières n'ont pas abouti. Une solution de mesure de la dalle du rez-de-chaussée a finalement été trouvée. La position correspondait à la dalle entre le séjour de d'un appartement du rez et le dépôt de l'abri PC. La période de mesures s'est étendue du 27 février au 20 mars 2019, mais les mesures sont exploitables seulement du 27 février au 1^{er} mars du fait d'un problème matériel. Toutefois, le temps de stabilité est clairement visible sur les mesures ce qui permet d'effectuer les analyses sur des valeurs stables et sûrs (Figure 52). Les capteurs ont été installés au plafond du dépôt de l'abri PC (Figure 53). Le fluxmètre a été collé au plafond au centre de la pièce afin

d'éviter d'éventuels effets de bord (ponts thermiques des jonctions murs/dalle provoquant des déviations du flux thermique). Deux capteurs de températures ont été placés à 1m du sol pour mesurer la température du local. Une moyenne de ces capteurs a été faite pour déterminer la température intérieure (Figure 54). La température de l'appartement n'a pas été mesurée, puisque qu'elle est déjà mesurée par le boîtier eSmart. Grâce à ces différentes valeurs mesurées, la valeur U de l'élément a pu être calculé selon la relation suivante :

$$U \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] = \frac{\dot{q} \left[\frac{W}{m^2} \right]}{\Delta\theta \text{ [K]}}$$

Variable	Description	Unité
U	Valeur U, capacité isolante d'un élément de l'enveloppe	W/m ² ·K
q̇	Flux thermique	W/m ²
Δθ	Différence de température entre la partie chauffée et l'extérieur (ici la cave)	[K]

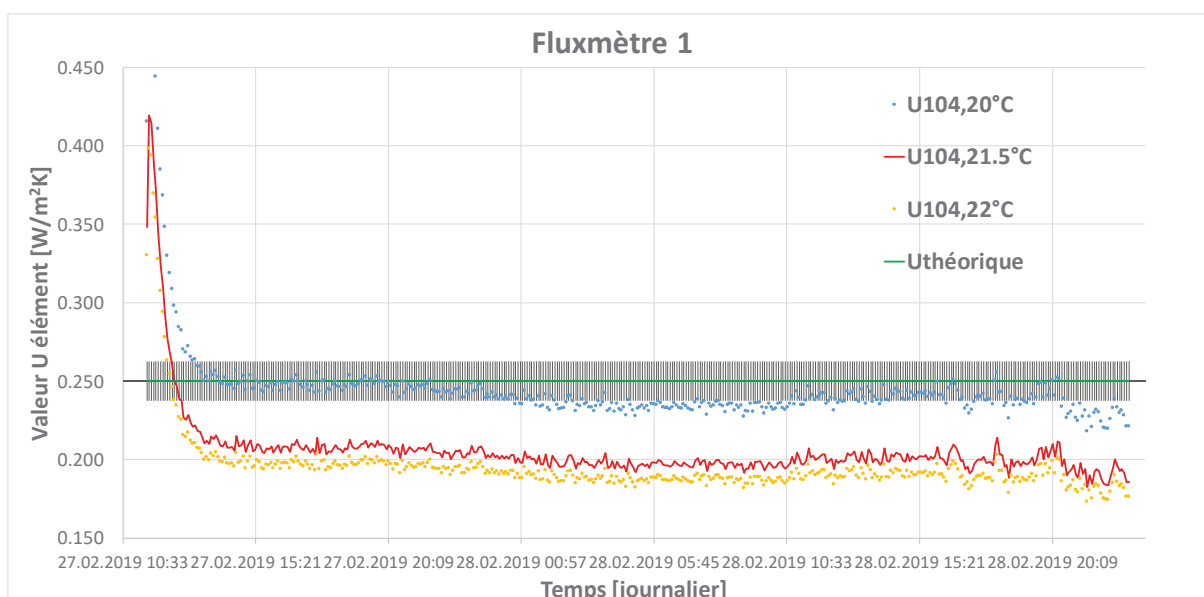


Figure 52: Mesure de la valeur U à l'aide d'un fluxmètre.

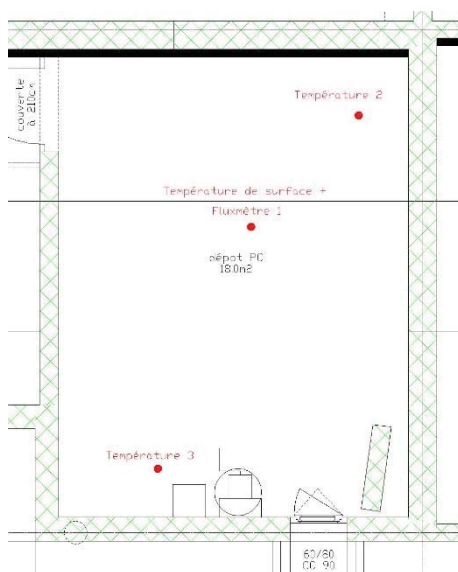


Figure 53: Installation des capteurs dans l'abri PC.

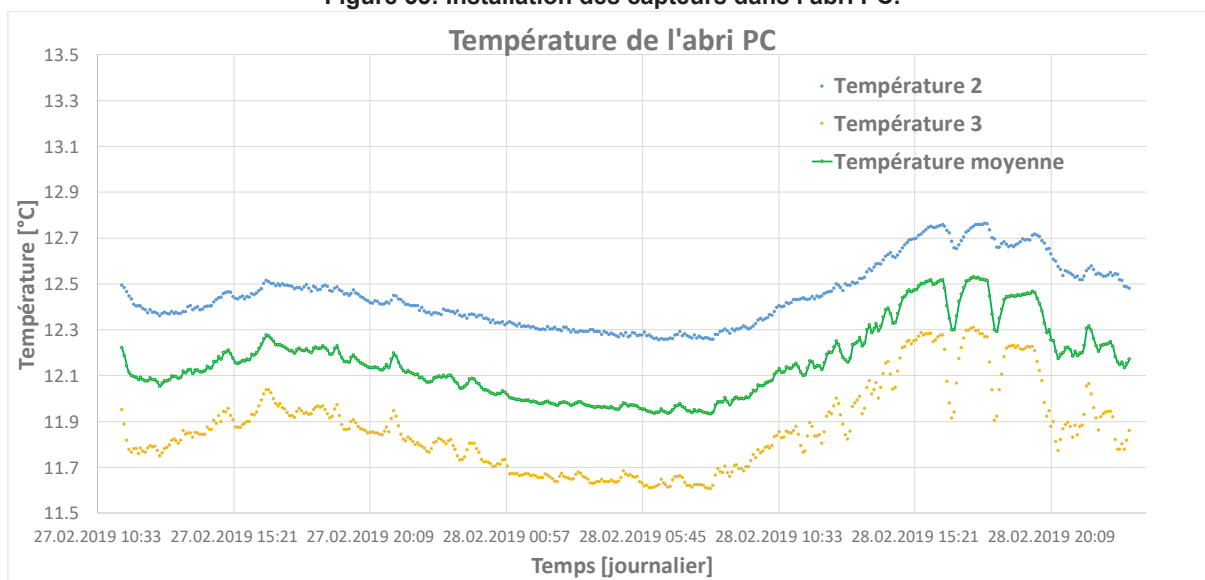


Figure 54: Température du dépôt de l'abri PC

4.5.3 Analyses

Initialement considérée comme disponible, la température intérieure du logement n'a pas pu être extraite du système de suivi eSmart, car ces mesures n'ont pas été enregistrées dans ce dernier suite à un défaut de sonde. En diagnostiquant ce problème, il apparaît que les appareils eSmart ont quelques lacunes de fonctionnement qui pourraient être corrigées. Néanmoins, une estimation de la valeur U a pu être calculée de la manière suivante :

- Pour la température du dépôt de l'abri PC, une température moyenne, pour chaque point de mesure, des deux capteurs a été calculées (trait vert sur la Figure 54). Ensuite, une valeur moyenne générale a été calculé. Elle s'élève à 12.1 °C avec un écart-type de 0.32 ce qui démontre une très bonne stabilité durant les mesures.
- Pour la température du séjour, la mesure sur l'air extrait de la ventilation permet une bonne indication du climat intérieur. Bien que cette température soit le résultat d'un mélange d'air de tous les logements, cette valeur peut être prise comme première approximation. Cette grandeur

a été prise fixe sur l'entier des mesures à 21.5°C (ligne rouge sur la Figure 52). Selon cette approche, la valeur U moyenne est de 0.20 W/m²·K.

- Comme la donnée de température intérieure n'était pas disponible, une analyse de sensibilité sur ce paramètre a été réalisée. Pour déterminer l'influence de la température du séjour, deux températures (20 et 22°C) ont permis de calculer deux valeurs U « limite » (respectivement points bleu et orange). Selon cette approche, la valeur U moyenne varie respectivement entre 0.24 et 0.19 W/m²·K.

Par ces deux approches, une valeur U comprise entre 0.19 et 0.24 W/m² K est plausible. Bien que cette plage de valeur U se base sur une approximation liée au manque d'information pour la température de l'appartement, il en ressort que la valeur U théorique (0.25 W/m²·K ±5%) et son incertitude semble cohérente (trait vert avec incertitude sur Figure 52). En effet, il semble peu probable que le séjour soit chauffé en dessous de 20°C, seule condition pour que la valeur U soit plus élevée que la valeur théorique (0.25 W/m²·K ±5%).

La qualité de ces mesures et analyses sont expliquées par le fait que tous les paramètres sont stables (pas de facteurs perturbateurs comme les gains solaires, coefficient de convection constant et température de la cave également, etc.). La stabilité des paramètres permet donc d'estimer la valeur U de l'élément mesuré et ce malgré le manque d'information sur la température intérieure. Cette approche n'aurait pas été valide dans le cas d'une façade contre l'extérieur, puisque :

- L'inertie des façades stockant les gains solaires et les restituant plus tard.
- Pour des faibles valeurs U, comme rencontré ici, les flux sont très faibles ne permettant pas aux capteurs de fonctionner dans une plage optimale.

4.5.4 Synthèse des mesures de valeurs U

Ces mesures n'ont pas permis de déterminer une valeur déterministe de valeur U mais un intervalle puisqu'une donnée était manquante. Cette plage se situe entre 0.19 et 0.24 W/m² K. Cette valeur est entre 4 et 24% en dessous de la valeur théorique de 0.25 W/m² K.

La méthodologie de mesures des valeurs U est très cohérente pour autant que les éléments perturbateurs soient inexistantes et/ou que les flux thermiques soient élevés pour permettre aux capteurs de fonctionner dans leur zone optimale.

L'hypothèse faite que les éléments d'enveloppe n'ont que très peu d'influence sur l'écart de performance semble être, également, validé par cette mesure sur un élément particulier. Ceci pour autant que le reste de l'enveloppe soit conforme aux valeurs théoriques.

5 Synthèse des principaux résultats

Dans le cadre du projet UserGap, l'analyse des différences entre le besoin de chaleur utile pour le chauffage calculé selon la demande Minergie et la demande mesurée pour le chauffage a permis de mettre en évidence un certain nombre de points clefs pour mieux comprendre les sources de l'écart.

Dans un premier temps, une analyse comparative des bilans ex-ante / ex-post a été réalisée. Les principales observations sont reportées ci-dessous :

- La demande de chaleur pour l'ECS est légèrement inférieure au besoin calculé par la norme, mais reste cohérente avec celle-ci.
- La consommation électrique mesurée est plus faible que la valeur standard retenue par la norme SIA 380/1 pour le calcul des gains internes.
- Concernant la demande de chauffage, l'écart de performance est important.
- La température intérieure est beaucoup plus importante que la norme ne le prévoit alors que les apports internes sont plus faibles. Par ailleurs ce paramètre varie significativement d'un mois à l'autre. Il semble donc nécessaire de tenir compte de ces fluctuations mensuelles pour le calcul des bilans thermiques.
- La signature énergétique permet d'identifier que le bâtiment possède une enveloppe thermique conforme à ce qui avait été prévu. Toutefois, la faible dispersion des points tend à montrer une faible dépendance aux apports solaires.
- Le diagramme H-M a confirmé la faible dépendance du bâtiment aux apports solaires. La surface effective de captage apparaît comme significativement plus faible que la valeur attendue en théorie.

Suite à l'analyse ex-ante / ex-post, les données mesurées par le système de suivi ont permis de recalculer le bilan thermique de la demande Minergie avec les mesures des années 2014-2017 (scénarios d'harmonisations S1 à S3 correspondant à un bilan thermique SIA 380/1 en mode *Comparaison*). Toutefois, l'écart de performance n'en a pas été réduit pour autant. En effet, le changement des conditions climatiques extérieures réduit la demande de chaleur, alors que la température intérieure et les apports internes augmentent la demande, ce qui s'équilibre. Néanmoins, cette harmonisation permet de réduire la dispersion de la demande de chauffage entre les années. Il semble donc que, dans le cas d'un bâtiment à haute performance énergétique, l'écart de performance soit lié aux fluctuations d'un nombre plus important de paramètres que pour les bâtiments anciens non rénovés qui sont en général thermosensibles et pour lesquels la prise en compte de la température intérieure et du climat réel permettent en général d'expliquer l'écart de performance.

Dans un deuxième temps, un modèle de calcul probabiliste de la demande de chaleur a été développé.

- La prise en compte de l'incertitude des paramètres influençant la demande de chauffage par le biais d'un modèle probabiliste de demande de chaleur a montré que la demande du bâtiment était plausible. Par ailleurs, cette approche permet une meilleure approximation de la demande réelle du bâtiment.
- L'analyse de sensibilité globale et la décomposition de la variance a permis d'identifier les deux principaux paramètres qui expliquent majoritairement l'écart de performance, à savoir le débit d'air thermiquement actif et le facteur de voilage.

Grâce aux résultats de l'analyse de sensibilité globale, des campagnes de mesures ciblées ont été mises en place.

- Une des campagnes de mesure portait sur l'occultation des fenêtres. Elle confirme que ce paramètre est effectivement important. Couplé au diagramme H-M, il semble donc clair que ce paramètre est un levier d'action important pour réduire la demande de chauffage.
- La campagne de mesure sur le monobloc de ventilation a montré que le débit d'air thermiquement actif était plus important que prévu. Par ailleurs, cette campagne a montré une erreur dans la collecte de données (confusion entre le débit d'air du monobloc et la pression

différentielle dans le boîtier électronique). Les thermographies ont aussi confirmé que les fenêtres étaient maintenues ouvertes la nuit augmentant ainsi les déperditions thermiques.

En tenant compte des observations des campagnes de mesures, il apparaît qu'en ajustant le débit d'air thermiquement actif et en tenant compte d'un facteur de voilage des fenêtres réalistes, la demande de chauffage réelle du bâtiment s'explique et semble être cohérente. L'approche globale mise en place, pour l'analyse de l'écart de performance, a montré sa cohérence puisque les analyses des données mesurées (première étape), les résultats du modèle probabiliste et la décomposition de la variance (deuxième étape) ont été confirmés par les mesures effectuées in-situ (troisième étape).

D'une manière générale donc, le calcul probabiliste de la demande de chaleur est un moyen de diagnostic intéressant pour l'étude de l'écart de performance. Il ne se substitue pas à des analyses et mesures de terrain mais vient en complémentarité pour cibler les campagnes de mesures prioritaires.

6 Discussions et recommandations

L'écart de performance entre simulation et réalité est lié d'une part au fonctionnement réel du bâtiment (c'est le cœur de l'analyse présenté dans ce rapport), mais également et d'autre part, à la référence par rapport à laquelle est calculé cet écart, c'est-à-dire, dans le cas présent, les résultats du bilan thermique SIA 380/1 en mode *Justificatif* également appelé bilan ex-ante dans ce rapport.

Dans la suite, les résultats de cette étude son discutées selon le cas d'application du projet Usergap (ex-ante / ex-post) puis mis en perspective dans d'autres cas d'application (aide à la conception et dans le cadre de contrats de performance énergétique, ou garantie de performance, etc.). Finalement, les perspectives quant à l'approche probabiliste sont également précisées.

6.1 Besoin de chaleur (SIA 380/1 *Justificatif*) vs. demande mesurée

Le bilan thermique SIA 380/1 *Justificatif* permet une comparaison entre les performances requises du bâtiment par rapport aux exigences légales. La norme vise à comparer les bâtiments sur une base commune et ainsi d'aider l'Etat dans les règlements énergétiques. Néanmoins, elle est souvent interprétée, en pratique, comme devant fournir une demande de chaleur « proche » de la réalité et l'écart entre son résultat et la réalité est considéré en pratique comme l'écart de performance du bâtiment.

Dans un premier temps, l'approche standard d'analyse de l'écart de performance a été réalisée. Dans cette approche, les paramètres du bilan thermique « *Justificatif* » ont été substitués par les valeurs réelles issues des données mesurées par le système de suivi eSmart. Les résultats intermédiaires montrent que la correction climatique ne permet pas d'expliquer l'écart de performance. De même, la prise en compte des valeurs mesurées dans le bâtiment par les boîtiers de mesures eSMART (notamment la température intérieure) n'ont pas non plus permis de diminuer l'écart de performance. Pourtant, ce bâtiment fait certainement partie des bâtiments résidentiels les plus instrumentés du parc de bâtiment suisse.

Par la suite, le développement et l'application d'un bilan thermique SIA 380/1 probabiliste tenant compte de l'incertitude des paramètres non mesurés par les boîtiers eSMART a montré que le facteur de voilage et le débit d'air, qui ne sont en général peu voire pas instrumentés par les systèmes de suivis, influençaient fortement les performances thermiques du bâtiment et donc l'écart de performance à la réalité. Après ajustement de ces deux paramètres, l'EdP a pu être abaissé à 17%. Ce modèle a également permis d'orienter la campagne de mesures. L'analyse probabiliste et la décomposition de la variance a donc permis de réduire l'écart de performance. Par ailleurs, les sources de cet écart ont été mises en évidence et une campagne de mesures ciblées a été lancée.

Le facteur de voilage a ainsi été identifié comme un paramètre explicatif de l'EdP, en particulier parce que le bâtiment étudié est à haute performance énergétique. Il valorise donc en principe fortement les apports solaires. Le facteur de voilage de la norme est supposé de 0% alors qu'en pratique, celui-ci semble bien plus important (entre 30 et 70%). Il serait peut-être pertinent de mieux tenir compte de ce point dans la norme. Le projet SolarGap (Lemon Consult, 2018) de l'OFEN concluait à un facteur de voilage allant de 10 à 40% en moyenne. Bien que supérieur aux résultats de cette étude, les estimations du projet UserGap confirment qu'il est nécessaire de tenir compte de ce point pour caractériser avec une meilleure précisions les performances thermiques des bâtiments à hautes performances énergétiques.

De même, le débit d'air thermiquement actif est apparu comme un paramètre influent. La campagne de mesures a ensuite montré que le débit mesuré est plus élevé que celui de la demande Minergie. Il serait alors utile de vérifier les paramètres de fonctionnement du monobloc par une entreprise spécialisée et

d'identifier si de possibles améliorations peuvent être apportées. Il serait également nécessaire de vérifier auprès des habitants s'ils ont des commentaires ou informations à transmettre au niveau de la qualité de l'air intérieur des logements. La partie sociologique et économétrique du projet UserGap devrait pouvoir transmettre des informations sur ce point.

Il semble donc exister un dilemme quant à l'usage de la norme SIA 380/1 et des paramètres à employer dans le calcul. Cette norme ne devrait, en principe, être employée qu'en comparaison d'une variante de conception par rapport à une autre ou alors pour se conformer à des seuils de demande de chaleur légaux. Cependant, cette norme est souvent considérée comme devant représenter la demande du bâtiment lorsque celui-ci sera en opération. Il serait donc nécessaire, de proposer des ajustements à la SIA 380/1 mode justification afin de la rendre plus représentative de la demande réelle du bâtiment.

A l'issue de ce volet du projet UserGap, il semblerait donc nécessaire d'essayer de faire converger autant que possible les résultats des bilans thermiques en mode « *Justificatif* » avec la réalité du terrain. Pour ce faire, les paramètres de références devraient être réévalués et mis à jour par rapport aux observations régulières du terrain. Ainsi, par exemple, la température intérieure apparaît comme clairement sous-évaluée dans les bâtiments neufs (la valeur de référence est de 20°C) et il semble donc nécessaire de la réévaluer à la hausse. Par ailleurs, le travail réalisé a montré que les valeurs des paramètres semblaient fluctuer dans le temps, il serait donc peut-être nécessaire de considérer ces fluctuations, selon un pas de temps mensuel, afin de réduire l'écart entre résultats de simulations issues des obligations légales et réalité du terrain.

Ces points sont d'importance dans la mesure où les planifications énergétiques nationales se basent sur les valeurs normatives pour définir leurs stratégies à moyens et longs termes. Le risque est significatif de sous-estimer la consommation réelle des bâtiments et donc, dans le cas d'une stratégie énergétique nationale, la consommation du parc entier de bâtiment. De fait, si celle-ci sont trop optimistes, les objectifs de réductions de la demande p.ex. d'ici 2050 ne pourront pas être atteints ou devront être revus.

6.2 Cas de l'aide à la conception et de marché avec contrats de performance énergétique (CPE, GPE)

Au-delà de cette étude orientée analyse ex-post, des synergies existent avec les études en conception notamment en ce qui concerne le modèle de calcul stochastique de la SIA 380/1.

En phase de conception, déterminer avec précision la demande énergétique pour le chauffage d'un bâtiment reste un objectif ambitieux. Ceci est particulièrement vrai pour les bâtiments neufs, à haute performance énergétique, pour lesquels de nombreux paramètres peuvent influencer la demande en exploitation du bâtiment. Il semble dès lors plus réaliste de proposer une approche qui caractérise une plage de demande énergétique probable du bâtiment. En ce sens, l'approche probabiliste, appliquée dans le projet Usergap à l'analyse ex-post, répond à cet objectif. A la différence de cette étude, tous les paramètres sont inconnus en phase de conception et devront avoir une distribution statistique pour le calcul de la demande de chaleur.

Le fonctionnement des bâtiments récents est bien plus complexe que les bâtiments anciens non rénovés. Les résultats du bâtiment B1.2 ont montré l'influence du débit d'air du monobloc de ventilation (influençant le débit d'air thermiquement actif) ou la gestion des stores (lié au facteur de voilage).

L'approche probabiliste semble donc à privilégier par rapport aux résultats des bilans déterministes lorsque le maître d'ouvrage souhaite, en phase de pré-projet, obtenir une estimation plus représentative de la demande de chauffage de son bâtiment, à ce titre, cette approche a été présentée dans le cadre

du 20^{ème} Status Seminar en 2018 (Padey et al., 2018). **L'approche de simulation probabiliste semble donc complémentaire avec le bilan thermique en mode *Justificatif*. Elle permet de tenir compte de l'incertitude d'usage, qui, dans les bâtiments à haute performance énergétique est un élément clef de la demande de chaleur.**

Finalement, l'approche développée pourrait également être employée pour les nouveaux modèles d'affaires émergents comme la garantie de performance (GPE) ou les contrats de performances énergétiques (CPE). En effet, à partir de la distribution statistique de la demande de chaleur, il est possible de définir un intervalle et une distribution de demande de chaleur plausible et ainsi, par le biais d'un facteur de risque, d'assurer effectivement que la demande sera bien conforme à un seuil fixé par le cahier des charges du bâtiment et des contrats. Ainsi, par exemple, dans le cadre du bâtiment étudié, 95% des valeurs de la simulation probabiliste sont inférieure à $131.7 \text{ MJ/m}^2_{\text{SRE}}$, en acceptant un seuil de risque de 5%, cette valeur pourrait donc être utilisée pour de la garantie de performance énergétique.

6.3 Perspective du calcul probabiliste pour le bilan énergétique des bâtiments

L'approche probabiliste développée dans le cadre de ce volet du projet UserGap permet d'appréhender la question de l'écart de performance énergétique des bâtiments selon une approche multifactorielle.

Elle permet d'identifier statistiquement, par le biais d'une décomposition de la variance du modèle, quels paramètres ont le plus d'influences sur l'écart de performance pour ainsi mettre en place des campagnes de mesures ciblées sur ces points précis.

L'approche développée pourrait donc être utilisée en complément des analyses traditionnelles déterministes telles que proposées par Khoury (2015) afin de mieux appréhender la question de la variabilité des performances énergétiques des bâtiments à hautes performances énergétiques.

Pour étoffer l'approche développée dans le cadre de ce travail de recherche, il serait néanmoins nécessaire d'appliquer cette approche a d'autres bâtiments. En effet, la pertinence de l'approche probabiliste dépend de la caractérisation des paramètres du modèle. La caractérisation des paramètres employés dans le modèle probabiliste d'analyse du bâtiment d'Eikenott a été relativement large en considérant des intervalles de variation important. L'application de l'approche probabiliste sur un échantillon de bâtiment plus grand permettrait d'affiner les hypothèses de modélisation du modèle et ainsi permettrait de confirmer l'intérêt d'un tel outil dans l'analyse de l'écart de performance des bâtiments ou encore comme aide au déploiement de nouveaux modèles d'affaires (CPE et garantie de performance par exemple).

Par ailleurs, le calcul SIA 380/1 pourrait être complété pour tenir compte non seulement du besoin de chauffage pour le chauffage mais également des calculs du besoin d'ECS ou d'électricité en utilisant les méthodes de calcul dédiées (et pas uniquement les valeurs standards de la SIA 380/1).

Néanmoins, l'approche développée dans ce projet apparait comme fonctionnelle. Elle permet une meilleure compréhension de l'écart de performance et reste simple d'implémentation donc facilement répliquable.

7 Recommandations pour l'autre volet du projet UserGap

L'analyse détaillée des paramètres influençant de la demande de chaleur du bâtiment B1.2 du quartier Eikenott contribue à cibler des actions d'efficacité énergétique à mener par les occupants. Quelques actions de sensibilisation sont recommandées. Elles portent sur les points suivants :

- La température intérieure des locaux :
 - o Il est nécessaire d'inciter les occupants à réduire les températures dans leurs logements. Au besoin, une régulation adaptée du système de chauffage pourrait aider à la réalisation de cet objectif.

- L'usage des stores et volets :
 - o Il apparaît primordial d'inciter les occupants à gérer différemment leurs stores et volets. Remonter tout ou parties de leurs volets lorsque le logement n'est pas occupé (en journée lorsque les habitants sont au travail) permettrait de maximiser les gains solaires. Par exemple, une solution de domotique serait envisageable avec un pilotage des stores uniquement en cas d'absences des occupants en journée. En cas de souhaits d'occultation pour une plus grande intimité, des stores ou rideaux intérieurs seraient plus efficaces que les stores extérieurs. Cela permettrait quand même aux gains internes de rentrer sans porter préjudice aux locataires.

- La gestion de l'aération par l'ouverture des fenêtres
 - o Il s'agit de limiter les ouvertures de fenêtres par les occupants. Cela permettrait de limiter les déperditions thermiques par ventilation. Cet aspect doit être traité conjointement avec un audit détaillé des performances du monobloc de ventilation, pour mettre à jour des solutions techniques d'optimisation de son fonctionnement. De même, il s'agit de bien comprendre les motivations des occupants sur l'ouverture des fenêtres : s'agit-il d'actions systématiques, ou seulement lorsque la ventilation n'est pas suffisante ?

Il est à noter que ces paramètres ont également été identifiés comme influençant l'écart de performance pour la demande de chauffage dans le cadre de l'étude de Lehmann et Khoury (2017) à Genève. Ces trois points permettraient, *à priori*, de limiter d'une part les besoins thermiques du bâtiment et, d'autre part, de réduire l'écart de performance entre le bilan thermique standard (SIA 380/1) et les campagnes de mesures ex-post dans le secteur résidentiel. Ces pistes d'améliorations permettent d'orienter le prochain volet du prochain UserGap dédié à l'enquête socio-démo et à la mise en place d'un *Energy Living Lab*.

8 Conclusions

Le projet UserGap vise à mieux comprendre l'écart de performance qui existe entre la consommation planifiée lors de la conception d'un bâtiment et sa consommation réelle afin, par la suite, de proposer des solutions de réduction de l'écart de performance par le biais de *Living Lab*. Le présent rapport avait pour objectif d'une part de caractériser l'écart de performance sur la demande de chaleur pour le chauffage du bâtiment et, d'autre part, d'identifier les sources expliquant l'écart de performance.

Pour répondre à cet objectif, une analyse des données mesurées par le système de suivi énergétique, géré par eSmart, a été réalisée dans un premier temps. Cette analyse a montré 1- que la demande de chauffage était nettement plus importante que prévue, 2- que les paramètres d'usages (température intérieure en particulier) étaient plus importants qu'attendus, 3- que ces paramètres sont également variables d'un mois à l'autre nécessitant de prendre en compte ces fluctuations dans les bilans thermiques et, 4- que le système semblait avoir des difficultés depuis 2016 à remonter l'ensemble des informations sur la plateforme centralisée, en particulier celles en lien avec le monobloc de ventilation.

Dans un deuxième temps, une série de normalisations des bilans thermiques initiaux a été réalisée en tenant compte du climat réel sur site, de la température des locaux ou encore des apports internes liés à la consommation d'électricité réelle du bâtiment. Ces harmonisations n'ont pas permis d'expliquer l'écart de performance mais ont néanmoins réduit la dispersion de la demande de chaleurs entre les différentes années du suivi (de 2014 à 2017). Il apparaît donc que, dans le cas d'un bâtiment à haute performance énergétique, l'écart de performance soit lié aux fluctuations d'un nombre plus important de paramètres que pour les bâtiments anciens non rénovés qui sont en général thermosensibles. Pour les bâtiments performants, il est donc nécessaire de tenir compte de l'aspect multifactoriel de l'écart de performance.

Dans un troisième temps, une approche stochastique de simulation énergétique, basée sur la méthode de calcul proposée par la norme SIA 380/1 a été mise en place. Cette approche caractérise une distribution de probabilité pour la demande de chauffage en considérant des intervalles de variations pour les paramètres permettant le calcul des besoins de chaleur. Par ailleurs, certaines données (température intérieure, consommation électrique, etc.) ont été disponibles et utilisées dans le cadre des bilans thermiques probabilistes. Leurs fluctuations temporelles ont été considérées pour augmenter la représentativité des bilans. Avec cette approche, il a été possible de positionner la demande réelle de chauffage des bâtiments par rapport au champ des possibles calculés par simulation. L'application de cette méthodologie sur le bâtiment B1.2 du quartier Eikenott de Gland a montré qu'il était possible de réduire significativement l'écart de performance entre simulation et réalité.

Dans un quatrième temps, une analyse globale de sensibilité a été réalisée avec une décomposition de la variance du modèle pour identifier les paramètres clefs influençant le plus la demande de chaleur du bâtiment. Le débit d'air thermiquement actif et le facteur de voilage des fenêtres ont ainsi été identifiés comme clefs, confirmant les résultats de l'analyse des consommations réelles (diagramme H-M et signature énergétique).

A l'aide des informations obtenues, des analyses ciblées sur les paramètres clefs ont été réalisées. Le facteur de voilage semblait plus important que les 0% du bilan thermique initial et le débit d'air thermiquement actif était également plus important que planifié. Ces observations ont montré par ailleurs le recours à des ouvertures manuelles importantes des fenêtres en période de chauffe impliquant ainsi une surconsommation énergétique.

Finalement, à l'aide de ces observations, des recommandations ont été transmises aux autres partenaires du projet afin de mettre en place des campagnes de sensibilisation à destination des occupants pour améliorer la gestion des stores et réduire les ouvertures manuelles trop longues des fenêtres. Si ces campagnes sont efficaces, il est attendu que la demande de chauffage du bâtiment baisse. Cependant, le suivi de la consommation suite à ces campagnes de sensibilisation n'a pas été effectué dans le cadre du projet UserGap.

Pour terminer, le travail réalisé dans cette partie du projet a mis en évidence une inadéquation entre les valeurs des paramètres employés dans la norme SIA 380/1 pour les justificatifs thermiques et la réalité du terrain. Bien que logique, puisque les justificatifs n'ont pas pour vocation à estimer avec précision la demande réelle de chauffage du bâtiment, il apparaît néanmoins pertinent de considérer une révision de certaines des valeurs pour réduire l'écart entre le besoin de chaleur calculé et la demande mesurée.

Références

Demoscope AG (2016) Reimann, W., Bühlmann, E., *Erfolgskontrolle Gebäudeenergiestandards*.

De Wilde, P. (2014). *The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation*. Automation in Construction, 41, 40-4

eSmart, 2019 : <http://www.myesmart.com/produits/une-technologie-exclusive/>

Khoury, J. (2015). *Rénovation énergétique des bâtiments résidentiels collectifs: état des lieux, retours d'expérience et potentiels du parc genevois*. Doctoral dissertation, University of Geneva

Lehmann U., Khoury J, (2017) *Performance énergétique des bâtiments de logement pour étudiants: Etudes de cas dans le canton de Genève*. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:93923>

Lemon Consult, (2018), *SolarGap – Auswirkung von Sonnenschutzsystemen auf den Heizwärmebedarf von Gebäuden*. Projet OFEN, accessible via: <https://www.aramis.admin.ch/Default.aspx?DocumentID=46277&Load=true>

Menezes, A. C., Cripps, A., Bouchlaghem, D., & Buswell, R. (2012). *Predicted vs. actual energy performance of non-domestic buildings: Using post-occupancy evaluation data to reduce the performance gap*. Applied Energy, 97, 355-364.

Office Fédéral de la météorologie et de climatologie MétéoSuisse, « Relevé de température pour les stations météo Suisses » accédé via : <https://gate.meteoswiss.ch/idaweb/more.do>

P. Padey, B.Périsset, S.Lasvaux, S.Genoud, J. Mastelic (2018): *Modèle probabiliste de la consommation énergétique d'un bâtiment pour l'étude de l'écart de performances*, 20. Status-Seminar «Forschen für den Bau im Kontext von Energie und Umwelt»

Claude-Alain Roulet (1987) *Energétique du bâtiment II*, Presses Polytechniques Romandes.

Meldem, R. et al. (1991) *Mesure et analyse d'un système de rafraîchissement passif à Sion (Valais)*. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:79687>

R Core Team (2014). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria <http://www.R-project.org/>

Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., ... Tarantola, S. (2008). *Global Sensitivity Analysis*. <https://doi.org/10.1002/9780470725184.ch6>

Sobol', I. . (2001). *Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates*. Mathematics and Computers in Simulation, 55(1-3), 271-280. [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(00\)00270-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00270-6)

SIA 380/1 (2009), *Besoins de chaleur pour le chauffage*, Société des Ingénieurs et Architectes

Transvalor, « Solar Radiation Data », accessed via : <http://www.soda-pro.com/>

Annexe I : Tableau des valeurs limites U


 Direction générale de l'environnement (DGE-DIREN) Rue du Valentin 10 1014 Lausanne www.vd.ch/energie info.energie@vd.ch Tel. 021 316 95 50 / Fax 021 316 95 51		Tableau des valeurs-limites U [W/m^2K] à respecter pour la norme SIA 380/1, édition 2009																			
Bâtiments neufs chauffés à 20°C (habitat collectif, habitat individuel, administration, écoles, commerce, restauration, lieux de rassemblement)		Bâtiments existants																			
		Chauffés aux énergies renouvelables (Pompes à chaleur, bois, CAD>50% renouvelable, solaire)					Chauffés aux énergies non renouvelables pour extensions: si SRE > 50 m ² et 20% de SRE existante ou si SRE > 1000 m ²														
Élément de construction		Avec justification des ponts thermiques		Sans justification des ponts thermiques		Avec justification des ponts thermiques		Sans justification des ponts thermiques		Avec justification des ponts thermiques		Sans justification des ponts thermiques									
		l'extérieur ou enterré à moins de 2 m plus de 2 m	locaux non chauffés ou enterrés à moins de 2 m plus de 2 m	l'extérieur ou enterré à moins de 2 m plus de 2 m	locaux non chauffés ou enterrés à moins de 2 m plus de 2 m	l'extérieur ou enterré à moins de 2 m plus de 2 m	locaux non chauffés ou enterrés à moins de 2 m plus de 2 m	l'extérieur ou enterré à moins de 2 m plus de 2 m	locaux non chauffés ou enterrés à moins de 2 m plus de 2 m	l'extérieur ou enterré à moins de 2 m plus de 2 m	locaux non chauffés ou enterrés à moins de 2 m plus de 2 m	l'extérieur ou enterré à moins de 2 m plus de 2 m	locaux non chauffés ou enterrés à moins de 2 m plus de 2 m								
Éléments opaques (toit, plafond)		0,20	0,25	0,17	0,25	0,16	0,20	0,14	0,20	0,12	0,15	0,10	0,15	0,25	0,28						
Éléments opaques (murs, sols)		0,20	0,28	0,17	0,25	0,16	0,22	0,14	0,20	0,12	0,17	0,10	0,15	0,25	0,30						
Éléments opaques avec système de chauffage intégré		0,20	0,25	0,17	0,25	0,16	0,20	0,14	0,20	0,12	0,15	0,10	0,15	0,25	0,28						
Fenêtres et portes-fenêtres		1,3	1,6	1,3	1,6	1,0	1,3	1,0	1,3	0,8	1,0	0,8	1,0	1,3	1,6						
Fenêtres avec corps de chauffe en applique		1,0	1,3	1,0	1,3	0,8	1,0	0,8	1,0	0,6	0,8	0,6	0,8	1,0	1,3						
Portes		1,3	1,6	1,3	1,6	1,0	1,3	1,0	1,3	0,8	1,0	0,8	1,0	1,3	1,6						
Portes supérieures à 6 m2		1,7	2,0	1,7	2,0	1,4	1,6	1,4	1,6	1,0	1,2	1,0	1,2	1,7	2,0						
Caissons de stores		0,50	0,50	0,50	0,50	0,40	0,40	0,40	0,40	0,30	0,30	0,30	0,30	0,50	0,50						
Preuve par les performances globales		$Q_h < 100 \% Q_{h,II}$					$Q_h < 80 \% Q_{h,II}$					$Q_h < 60 \% Q_{h,II}$					$Q_h < 125 \% Q_{h,II}$				


Tableau des valeurs-limites U [W/m ² K] à respecter pour la norme SIA 380/1, édition 2009										
Bâtiments neufs chauffés à 22°C (hôpitaux)										
Bâtiments existants										
(isolation de volumes déjà chauffés)										
Chauffés aux énergies renouvelables										
Chauffés aux énergies non renouvelables										
pour extensions: si SRE > 50 m ² et 20% de SRE existante ou si SRE > 1000 m ²										
Chauffés aux énergies renouvelables (Pompes à chaleur, bois, CAD>50% renouvelable, solaire)										
Chaudière à gaz										
Chaudière à mazout										
Ponts thermiques à traiter sauf si c'est disproportionné										
 <p>Direction générale de l'environnement Direction de l'énergie (DGE-DIREN) 1014 Lausanne www.vd.ch/energie info.energie@vd.ch Tel. 021 316 95 50 / Fax 021 316 95 51</p>	Avec justification des ponts thermiques		Avec justification des ponts thermiques		Avec justification des ponts thermiques		Avec justification des ponts thermiques		Avec justification des ponts thermiques	
	l'extérieur ou enterré à moins de 2 m		l'extérieur ou enterré à moins de 2 m		l'extérieur ou enterré à moins de 2 m		l'extérieur ou enterré à moins de 2 m		l'extérieur ou enterré à moins de 2 m	
	locaux non chauffés ou enterrés à plus de 2 m		locaux non chauffés ou enterrés à plus de 2 m		locaux non chauffés ou enterrés à plus de 2 m		locaux non chauffés ou enterrés à plus de 2 m		locaux non chauffés ou enterrés à plus de 2 m	
	0,18		0,15		0,23		0,18		0,14	
	0,18		0,15		0,23		0,18		0,14	
	0,18		0,15		0,23		0,18		0,14	
	1,2		1,2		1,4		1,2		0,9	
	0,9		0,9		1,2		0,9		0,5	
	1,2		1,2		1,4		1,2		0,9	
	1,5		1,5		1,8		1,4		1,1	
0,5		0,5		0,5		0,4		0,3		
Q _h < 100 % Q _{h,II}		Q _h < 80 % Q _{h,II}		Q _h < 60 % Q _{h,II}		Q _h < 125 % Q _{h,II}		Q _h < 125 % Q _{h,II}		
Preuve par les performances globales										

Tableau des valeurs-limites U [W/m²K] à respecter pour la norme SIA 380/1, édition 2009


 Direction générale de l'environnement Direction de l'énergie (DGE-DIREN) Rue du Valentin 10 1014 Lausanne www.vd.ch/energie info.energie@vd.ch Tel. 021 316 95 50 / Fax 021 316 95 51		Bâtiments neufs chauffés à 18°C (industrie, dépôts, installations sportives)												Bâtiments existants	
		Chauffés aux énergies renouvelables						Chauffés aux énergies non renouvelables						(isolation de volumes déjà chauffés)	
Élément d'enveloppe contre		Avec justification des ponts thermiques		Sans justification des ponts thermiques		Avec justification des ponts thermiques		Sans justification des ponts thermiques		Avec justification des ponts thermiques		Sans justification des ponts thermiques		Ponts thermiques à traiter sauf si c'est disproportionné	
		l'extérieur ou enterré à moins de 2 m plus de 2 m	locaux non chauffés ou enterrés à moins de 2 m plus de 2 m	l'extérieur ou enterré à moins de 2 m plus de 2 m	locaux non chauffés ou enterrés à moins de 2 m plus de 2 m	l'extérieur ou enterré à moins de 2 m plus de 2 m	locaux non chauffés ou enterrés à moins de 2 m plus de 2 m	l'extérieur ou enterré à moins de 2 m plus de 2 m	locaux non chauffés ou enterrés à moins de 2 m plus de 2 m	l'extérieur ou enterré à moins de 2 m plus de 2 m	locaux non chauffés ou enterrés à moins de 2 m plus de 2 m	l'extérieur ou enterré à moins de 2 m plus de 2 m	locaux non chauffés ou enterrés à moins de 2 m plus de 2 m	l'extérieur ou enterré à moins de 2 m plus de 2 m	locaux non chauffés ou enterrés à moins de 2 m plus de 2 m
Élément de construction		pour extensions: si SRE > 50 m² et 20% de SRE existante ou si SRE > 1000 m²													
Éléments opaques (toit, plafond)		0,22	0,28	0,19	0,28	0,18	0,22	0,15	0,22	0,13	0,17	0,11	0,17	0,28	0,31
Éléments opaques (murs, sols)		0,22	0,31	0,19	0,28	0,18	0,25	0,15	0,22	0,13	0,17	0,11	0,17	0,28	0,33
Éléments opaques avec système de chauffage intégré		0,22	0,28	0,19	0,28	0,18	0,22	0,15	0,22	0,13	0,17	0,11	0,17	0,28	0,31
Fenêtres et portes-fenêtres		1,4	1,8	1,4	1,8	1,1	1,4	1,1	1,4	0,9	1,1	0,9	1,1	1,4	1,8
Fenêtres avec corps de chauffe en applique		1,1	1,4	1,1	1,4	0,9	1,1	0,9	1,1	0,7	0,9	0,7	0,9	1,1	1,4
Portes		1,4	1,8	1,4	1,8	1,1	1,4	1,1	1,4	0,9	1,1	0,9	1,1	1,4	1,8
Portes supérieures à 6 m2		1,9	2,2	1,9	2,2	1,5	1,8	1,5	1,8	1,1	1,3	1,1	1,3	1,9	2,2
Caissons de stores		0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,6
Preuve par les performances globales		$Q_h < 100 \% Q_{h,il}$		$Q_h < 80 \% Q_{h,il}$		$Q_h < 60 \% Q_{h,il}$		$Q_h < 60 \% Q_{h,il}$		$Q_h < 60 \% Q_{h,il}$		$Q_h < 125 \% Q_{h,il}$		$Q_h < 125 \% Q_{h,il}$	

Tableau des valeurs-limites U [W/m²K] à respecter pour la norme SIA 380/1, édition 2009



Direction générale de l'environnement
 Direction de l'énergie (DGE-DIREN)
 Rue du Valentin 10
 1014 Lausanne
 www.vd.ch/energie
 info.energie@vd.ch
 Tel. 021 316 95 50 / Fax 021 316 95 51

Bâtiments neufs chauffés à 28°C (piscines couvertes)

Élément d'enveloppe contre construction	Chauffés aux énergies renouvelables (y compris extensions et nouveaux volumes chauffés)						Chauffés aux énergies non renouvelables pour extensions: si SRE > 50 m ² et 20% de SRE existante ou si SRE > 1000 m ²			Ponts thermiques à traiter sauf si c'est disproportionné				
	Chauffés aux énergies renouvelables			Chauffés aux énergies non renouvelables			Chaudière à mazout							
	(Pompes à chaleur, bois, CAD>50% renouvelable, solaire)			Chaudière à gaz			Chaudière à mazout							
	Avec justification des ponts thermiques	Sans justification des ponts thermiques	Avec justification des ponts thermiques	Sans justification des ponts thermiques	Avec justification des ponts thermiques	Sans justification des ponts thermiques	Avec justification des ponts thermiques	Sans justification des ponts thermiques	Avec justification des ponts thermiques	Sans justification des ponts thermiques	l'extérieur ou enterré à moins de 2 m	l'extérieur ou enterré à moins de 2 m	l'extérieur ou enterré à moins de 2 m	
Élément opaques (toit, plafond)	0,12	0,15	0,10	0,15	0,10	0,12	0,08	0,12	0,07	0,09	0,06	0,09	0,15	0,20
Éléments opaques (murs, sols)	0,12	0,17	0,10	0,15	0,10	0,12	0,08	0,12	0,07	0,10	0,06	0,09	0,15	0,20
Éléments opaques avec système de chauffage intégré	0,12	0,15	0,10	0,15	0,10	0,12	0,08	0,12	0,07	0,09	0,06	0,09	0,15	0,20
Fenêtres et portes-fenêtres	0,8	1,0	0,8	1,0	0,6	0,8	0,6	0,8	0,5	0,6	0,5	0,6	0,9	1,1
Fenêtres avec corps de chauffe en applique	0,6	0,8	0,6	0,8	0,5	0,6	0,5	0,6	0,4	0,5	0,4	0,5	0,8	1,0
Portes	0,8	1,0	0,8	1,0	0,6	0,8	0,6	0,8	0,5	0,6	0,5	0,6	1,1	1,3
Portes supérieures à 6 m2	1,0	1,2	1,0	1,2	0,8	1,0	0,8	1,0	0,6	0,7	0,6	0,7	1,2	1,4
Caissons de stores	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
Preuve par les performances globales	Q_h < 100 % Q_{h,II}			Q_h < 80 % Q_{h,II}			Q_h < 60 % Q_{h,II}			Q_h < 125 % Q_{h,II}				