



Rapport final du 2 février 2022

Projet UserGap

Influence des utilisateurs sur l'écart
de performance dans les bâtiments
à haute performance énergétique



Le quartier Eikenott de Gland en 2017. Source de l'image : © Joelle Mastelic, 2017



Date : 2 février 2022

Lieu : Sierre

Prestataire de subventions :

Office fédéral de l'énergie OFEN
Section Recherche énergétique et cleantech
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Cofinancements :

Conférence des directeurs cantonaux de l'Energie EnDK, Haus der Kantone, Speichergasse 6, CH-3000 Bern - <https://www.endk.ch/fr/>

Losinger Marazzi SA, Wankdorfalle 5, CH-3014 Bern
<https://www.losinger-marazzi.ch/fr/>

Bureau EHE SA, Rue des Pêcheurs, CH-1400 Yverdon-Les-Bains
<https://bureau-ehe.ch/>

Bénéficiaires de la subvention :

HES-SO Valais/Wallis Technopôle 3, CH 3960 Sierre
HEIG-VD, Rte de Cheseaux 1, CH-1401 Yverdon-les-Bains
Université de Neuchâtel, A.L.Breguet 2, CH-2000 Neuchâtel
TEP Energy GmbH, Rotbuchstr. 68, CH-8037 Zürich

Auteur(s) :

Joëlle Mastelic, HES-SO Valais-Wallis, IEE, joelle.mastelic@hevs.ch
Florian Bürki, HES-SO Valais-Wallis, IEE, florian.burki@hevs.ch
Stéphane Genoud, HES-SO Valais-Wallis, IEE, stephane.genoud@hevs.ch
Frédéric Revaz, HES-SO Valais-Wallis, IEE, frederic.revaz@hevs.ch
Francesco Cimmino, HES-SO Valais-Wallis, IEE, francesco.cimmino@hevs.ch
Sébastien Lasvaux, HES-SO | HEIG-VD | LESBAT, sebastien.lasvaux@heig-vd.ch
Pierryves Padey, HES-SO | HEIG-VD | LESBAT, pierryves.padey@heig-vd.ch
Guy Wagner, HES-SO | HEIG-VD | LESBAT, guy.wagner@heig-vd.ch
Blaise Périsset, HES-SO | HEIG-VD | LESBAT, blaise.perisset@heig-vd.ch
Mehdi Farsi, Université de Neuchâtel, mehdi.farsi@unine.ch
Sylvain Weber, Université de Neuchâtel, sylvain.weber@unine.ch

Suivi du projet à l'OFEN :

Andreas Eckmanns, OFEN, andreas.eckmanns@admin.ofen.ch
Rolf Moser, moser@enerconom.ch

Numéro du contrat de l'OFEN : Si/501520-01

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions du présent rapport.



Zusammenfassung

UserGap ist ein angewandtes Forschungsprojekt das sich mit den Einflussfaktoren des Performance Gaps in Gebäuden befasst. Die interdisziplinäre Forschung kombiniert eine Analyse auf Quartierebene (MACRO) durch Ökonometriker, eine technische Analyse der Gebäudeenergie (MESO) und eine Analyse der menschlichen Faktoren durch Socialmarketing Spezialisten (MICRO). Das Forschungsteam versucht anschliessend, durch den integrativen Prozess der Living Labs, gemeinsam mit den involvierten Interessensgruppen einen Interventionsplan zu entwickeln. Zusammenfassend zeigte dieser explorative Ansatz die nutzerbezogenen Faktoren, die den Performance Gap und insbesondere die inoptimale Nutzung von Storen beeinflussen. Die Analyse des sozialen Leistungsgefälles erwies sich als sehr interessant, um die technischen und wirtschaftlichen Analysen zu ergänzen. Es zeigte sich aber auch die Schwierigkeit eines solchen Ansatzes in Bezug auf die Datenerhebung, auf das sequenzielle Vorgehen und auf die Komplexität der Analyse verschiedener Quellen. Darüber hinaus könnten weitere Untersuchungen dazu beitragen, die Messung der Auswirkungen von gemeinsam entwickelten Interventionsplänen in einem grösseren Massstab zu vertiefen.

Résumé

UserGap est une recherche appliquée qui se concentre sur les facteurs d'influence de l'écart de performance énergétique dans les bâtiments. La recherche interdisciplinaire combine une analyse au niveau du quartier (MACRO) effectuée par des économètres, une analyse technique sur l'énergétique d'un bâtiment (MESO) et une analyse des facteurs humains réalisée par des spécialistes en marketing social (MICRO). Puis la recherche appliquée tente de co-développer un plan d'action énergétique avec les parties prenantes grâce au processus Living Lab intégré. En conclusion, cette approche exploratoire a démontré les facteurs liés aux utilisateurs qui influencent l'écart de performance énergétique et notamment l'utilisation peu optimale des stores. L'approche d'analyse de l'écart de performance sociale s'avèrent très intéressante pour compléter les analyses techniques et économiques. Elle révèle également la difficulté d'une telle démarche en termes de collecte de données, d'approche séquentielle et de complexité d'analyses de sources diverses. L'équipe de recherche propose de nouvelles méthodes de simulation dynamique de manière à pouvoir améliorer la méthodologie de calcul de l'écart de performance énergétique. De plus, de nouvelles recherches pourraient permettre d'approfondir la mesure d'impact des plans co-développés à plus large échelle.

Summary

UserGap is an applied research work that focuses on the influencing factors of the energy performance gap. The interdisciplinary research combines a neighbourhood level analysis (MACRO) by econometricians, a technical analysis of building energy (MESO) and a human factors analysis by social marketing specialists (MICRO). The research project then attempts to co-develop an energy action plan with stakeholders through the *Living Lab Integrative Process*. In conclusion, this exploratory approach demonstrated the user-related factors that influence the energy performance gap and in particular the sub-optimal use of blinds. The analysis of the social performance gap proved to be very interesting for complementing the technical and economic analyses. It also reveals the difficulty of such an approach in terms of data collection, sequential approach and complexity of analysis of various sources. In addition, further research could help to deepen the measurement of the impact of co-developed plans on a larger scale.



Résumé

L'écart de performance énergétique des bâtiments a été étudié depuis longtemps par les académiques comme par exemple Jaffe et Stavins (1994), Burmann et al (2014), de Wilde (2014). Malgré de nombreux articles dans le domaine, cet écart de performance ne tient pas toujours compte des trois aspects du développement durable à savoir **l'économique**, **l'écologique** et le **social**. En effet, on peut décrire la performance énergétique ou efficacité énergétique grâce à de nombreux indicateurs économiques, techniques, environnementaux. Une revue des différents indicateurs économiques et environnementaux est proposée par Patterson. Voici la définition qu'il en donne:

*“Energy efficiency is a generic term, and there is **no one unequivocal quantitative measure** of 'energy efficiency.' Instead, one must rely on a series of indicators to quantify changes in energy efficiency. In general, energy efficiency refers to using less energy to produce the same amount of **services** or useful output.” (Patterson, 1996, p. 1).*

Ce que la littérature ne dit pas, c'est comment mesurer la performance sociale d'un bâtiment basse consommation, troisième axe important de mesure pour le développement durable, c'est-à-dire l'« useful output » de Patterson. Comment la performance énergétique d'un bâtiment est-elle perçue par ses utilisateurs ? Existe-il un « **écart de performance sociale** » et si oui comment le mesurer ?

Le projet de recherche UserGap, financé par le programme Bâtiments de l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN) et par la Conférence Romande des Directeurs de l'Energie (ENDK), a utilisé une approche interdisciplinaire pour, d'une part, mieux comprendre l'écart de performance énergétique grâce à une analyse technique et de la consommation d'énergie d'un bâtiment basse consommation (cf annexe 1). Une analyse économique a également été conduite à l'aide d'équations économétriques pour mieux comprendre les variables socio-économiques qui influencent l'écart de performance énergétique sur le même quartier (cf annexe 2). La nouveauté de ce projet est l'apport du marketing social et des Living Labs pour, d'une part, comprendre la perception des habitants par rapport à la performance sociale des bâtiments et des services énergétiques. D'autre part, le projet a consisté à intégrer toutes les parties prenantes dans le co-développement d'interventions pour réduire l'écart de performance énergétique.

Pour être à même de mesurer **l'écart de performance sociale** des services énergétiques proposés dans les bâtiments basse consommation, plusieurs enquêtes longitudinales ont eu lieu dans le quartier étudié. Puis des entretiens qualitatifs semi-directifs en face à face ont permis de donner du sens aux résultats de l'enquête.

La méthode proposée pour étudier l'écart de performance sociale des services énergétiques a été développée selon l'article de Martilla et James (1977) la matrice importance/performance complétée par la méthode SERVQUAL de Parasuraman et al. (1988). On mesure tout d'abord

- l'importance perçue des services énergétiques fournis dans le quartier ;
- la satisfaction des habitants vis-à-vis de chaque service énergétique pris individuellement.

Ces deux valeurs sont ensuite placées sur une matrice qui permet de définir :



- quels sont les services énergétiques sur lesquels investir car ils sont jugés importants et à améliorer ;
- quels sont les services qui donnent déjà satisfaction et qui sont importants ;
- quels sont les services qui sont de moindre importance et sur lesquels il s'agit de désinvestir ;
- quels sont les services qui sont jugés peu importants et peu performants.

On peut ainsi mesurer quantitativement l'importance et la performance de l'« useful output » de Patterson. Cette méthode a été testée dans quartier durable d'Eikenott, à Gland (Suisse) composé de 300 logements. Elle tente de donner du sens aux **17% d'écart de performance thermique** mesurés. Les résultats de cette analyse démontrent que :

- La ventilation mécanique ne donne pas satisfaction mais qu'elle est compensée par la possibilité d'ouvrir les fenêtres, option jugée très importante par les habitants.
- Le rôle des stores, pourtant jugé très important dans l'analyse technique pour réduire les consommations thermiques, n'est pas jugé important par les habitants.
- Les appareils électroménagers donnent satisfaction et sont jugés importants par les habitants.
- L'analyse technique révèle qu'il n'y a pas de surconsommation en électricité et que les appareils basse consommation donnent satisfaction.
- Il y a, par contre, une importante surconsommation thermique mise en évidence par les analyses techniques et de smart meter.

Ce qui est intéressant, c'est de combiner les différentes analyses sur les perceptions de ces habitants par rapport aux services énergétiques, leur consommation d'énergie (thermique, électrique et eau chaude sanitaire) et l'analyse technique du bâti pour pouvoir donner un feedback pour réduire l'écart de performance du quartier étudié mais surtout donner un « feedforward » au constructeur pour éviter les problèmes dans les futurs quartiers et augmenter l'« useful output » pour la même consommation d'énergie.

Pour conclure, le marketing social est la science qui étudie les perceptions des consommateurs, notamment dans le domaine des services énergétiques. L'apport de la science des services peut être important pour mieux comprendre les perceptions des utilisateurs vis-à-vis des services énergétiques et pour réduire l'écart de performance énergétique des bâtiments basse consommation. Cette étude est exploratoire et ne se base que sur un quartier durable de 300 logements. La méthode pourrait être utilisée dans d'autres quartiers durables en vue de généraliser les résultats, notamment la pertinence d'utiliser la matrice importance/performance pour la mesure de la performance sociale. Les résultats de l'analyse des services énergétiques pourraient être comparés entre différents quartiers (l'introduction de RGPD durant le projet a refroidi beaucoup d'acteurs à partager les données de consommation et a bloqué la collecte et la comparaison d'un deuxième quartier, comme prévu initialement). La prise en compte de la dimension sociale de l'énergie est cruciale pour atteindre les objectifs de la Stratégie 2050. De nouvelles méthodes interdisciplinaires sont nécessaires pour apporter une aide concrète aux entreprises et aux autorités publiques. L'intégration des habitants, non pas uniquement comme destructeurs de valeur quand ils consomment de l'énergie mais comme co-créateurs de valeur est centrale. Ce projet a permis de tester la méthode du marketing social et des Living Labs pour les transformer en acteurs de la transition énergétique.



Kernbotschaften

- Die Analyse der verschiedenen Makro-Meso-Mikro-Ebenen ermöglicht die Anwendung interdisziplinärer Methoden in einem einzigen Projekt. Experten sollten nicht in "thematischen Silos" gruppiert werden, sondern in gemeinsamen "Arbeitspaketen" zusammenarbeiten.
- Das Co-Design von Massnahmenplänen kann nur genutzt werden, wenn das Umfeld und insbesondere die Einflussfaktoren gut bekannt und dokumentiert sind.
- Der Performance Gap ist beim Heizen wichtiger als beim Stromverbrauch. Die Standardlösung (Nudge) sollte besser durchdacht sein, ebenso die Regulierung.

Messages à retenir

- Analyser les différents niveaux macro-meso-micro permet d'utiliser des méthodes interdisciplinaires dans un même projet. Les spécialistes ne devraient pas être regroupés en « silos thématiques » mais devraient collaborer au sein de « work packages » communs.
- Le co-design de plans d'action ne peut être utilisé que si l'environnement et notamment les facteurs d'influence de l'écart de performance sont bien connus et documentés en amont.
- L'écart de performance énergétique s'avère plus important dans le domaine du chauffage que de l'électricité. La solution par défaut (nudge) devrait être mieux réfléchie ainsi que la régulation.

Take-home messages

- Analysing the different macro-meso-micro levels allows interdisciplinary methods to be used in a single project. Specialists should not be grouped in "thematic silos" but should collaborate in common "work packages".
- Co-design of energy action plans can only be used if the environment and especially the influencing factors are well known and documented.
- The energy performance gap is more important in the field of heating than electricity. The default solution (nudge) should be better thought out as well as its regulation.



Avant-propos et remerciements

L'équipe du projet UserGap souhaite remercier l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN) et son responsable du programme Bâtiments M. Rolf Moser ainsi que la Conférence des Directeurs Cantonaux de l'Energie (EnDK) pour la confiance envers le consortium et le financement du projet. Il n'est en effet pas courant d'explorer de nouvelles manières de combiner ingénierie et technique du bâtiment, économétrie et marketing social. Cette chance nous a été offerte d'apprendre à combiner ces différentes disciplines pour en comparer les approches et s'enrichir mutuellement. On peut donc dire que c'est un projet interdisciplinaire, chacun évoluant au contact des autres disciplines. Le premier projet exploratoire de ce consortium permet d'offrir plusieurs angles de vision sur le thème de l'écart de performance énergétique, qu'il soit technique, économique ou social et ouvre de nouvelles collaborations inter-équipes pour de futurs projets en vue de la transition énergétique.

Merci également à l'entreprise Losinger-Marazzi pour la mise à disposition du terrain d'étude. Pour pouvoir réduire l'écart de performance, il s'agit tout d'abord de l'analyser en détails. Il nous a été possible de le faire, avec à nouveau un angle de technique du bâtiment et un angle socio-économique grâce à la bonne collaboration avec le constructeur du quartier durable. C'est un des premiers de ce genre à cette échelle en Suisse, il est important de comprendre les potentiels dysfonctionnements sous un angle de recherche appliquée afin d'offrir un feedback pour le quartier mais également un « feedforward » pour la construction des futurs quartiers. Cela demande une grande ouverture d'esprit de la part de l'entreprise et nous la remercions pour cela, notamment Mme Eva Ulhorn qui nous a accompagnés. Merci également à l'entreprise e-smart et à son responsable M. Fabrizio Loconte pour la bonne collaboration durant le projet.

Le bureau EHE a également collaboré au projet pour nous permettre de mieux comprendre le label Minergie en Suisse. Ils nous ont également soutenus pour la communication durant le projet et suite au projet, pour transmettre les principales recommandations aux acteurs du terrain, sans quoi le projet de recherche appliquée perdrait de son intérêt. Merci pour cette contribution essentielle à la dissémination.

L'entreprise TEP énergie a travaillé sur le volet germanophone du projet qui n'a malheureusement pas pu aboutir et qui nous a permis de mettre en lumière les problèmes liés à l'acquisition des données pour la recherche dans le domaine de l'énergie. Si nous voulons parvenir à mieux comprendre les pratiques en matière de consommation d'énergie, il est essentiel de disposer de données pour la recherche. Or ces données sont souvent très difficiles à acquérir même si à priori elles semblent acquises. On parle beaucoup aujourd'hui de protection des données, n'oublions pas que dans la nouvelle loi européenne sur la protection des données, elles devraient pouvoir être accessibles si un intérêt supérieur de l'Etat l'exige : que dire du changement climatique et de son intérêt supérieur ?

Finalement, nous aimerions remercier tous les chercheurs participant au projet pour leur collaboration positive et bienveillante, pour l'apport de leurs connaissances et techniques de recherche. Même si parfois, des étapes ont dû être réalisées en parallèle, les conclusions de chacun des volets montre une grande complémentarité et également vont dans la même direction, comme des faisceaux d'indices concordants. Cela apporte une richesse supplémentaire aux recommandations.



Table des matières

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	3
Summary	3
Take-home messages	6
Avant-propos et remerciements.....	8
Table des matières	8
Liste des abréviations.....	9
Liste des figures	9
1 Introduction.....	10
2 Description des installations.....	15
3 Procédure et méthode.....	16
4 Résultats et commentaire.....	21
5 Conclusions et résumé	26
6 Aperçu et mise en œuvre prochaine	29
7 Coopération nationale et internationale.....	29
8 Communication	31
9 Publications	33
10 Bibliographie.....	38
11 Annexes.....	39



Liste des abréviations

EnDK	Conférence des Directeurs Cantonaux de l'Energie
EdP	Ecart de Performance
ENoLL	European Network of Living Labs
OFEN	Office Fédéral de l'Energie
RGPD	Règlement européen sur la protection des données

Liste des figures

Figure 1 - Approche interdisciplinaire du projet UserGap	10
Figure 2 - Analyse de la littérature et des cadres théoriques.....	11
Figure 3 - Trois dimensions analytiques interdépendantes, adaptées de Geels (2004).....	13
Figure 4 - Ecart de performance énergétique, adapté de Burmann et al (2014).....	13
Figure 5 - Boucle entre la phase de design du quartier et la phase d'exploitation.....	14
Figure 6 - Le quartier durable Eikenott de Gland en 2017, source de l'auteur	15
Figure 7 - Les différents niveaux d'analyse d'un quartier	19
Figure 8 - Processus Living Lab Intégré.....	20
Figure 9 - Matrice importance/performance des services énergétiques à Eikenott.....	21
Figure 10 - Nouveau modèle conceptuel d'écart de performance énergétique.....	23
Figure 11 - Exemple de persona d'un habitant du quartier	24
Figure 12 - Exemple de cartes du jeu sérieux	25
Figure 13 - Boucle de feedback pour les quartiers existants et de feedforward pour les nouveaux quartiers	26
Figure 14 : Etudes de cas considérés dans le projet UserGap pour les différentes échelles	39



1 Introduction

1.1 Contexte et arrière-plan : la performance énergétique dans les bâtiments basse consommation

Cette introduction est tirée de la thèse de doctorat de Joelle Mastelic (2019), cheffe du projet UserGap financé par l'OFEN et EnDK. Ce projet propose une approche novatrice combinant ingénierie, économétrie et innovation ouverte pour analyser les écarts de performances (EdP) des bâtiments collectifs à haute performance énergétique. Après avoir décomposé l'EdP et isolé le rôle des habitants, un laboratoire vivant testera 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 les normes et labels et étudier la construction de futurs quartiers durables.

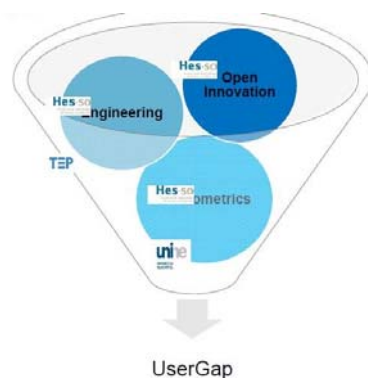


Figure 1 - Approche interdisciplinaire du projet UserGap

La crise climatique et le réchauffement ne sont plus à démontrer et incitent les pays à adapter leurs politiques en matière de consommation et de production d'énergie. L'Europe est confrontée à une transition énergétique fondée sur deux piliers principaux : (1) l'efficacité énergétique, (2) le développement des énergies renouvelables. Environ 40% de la consommation d'énergie est liée au secteur du bâtiment en Europe (EC, 2013). Des efforts sont faits pour atteindre des objectifs ambitieux : "d'ici au 31 décembre 2020, tous les nouveaux bâtiments seront des bâtiments à consommation d'énergie quasi nulle" (Commission européenne, 2013). La Suisse n'est pas intégrée politiquement à l'Europe, mais se trouve géographiquement au centre du continent. Le contexte énergétique est différent, mais les objectifs sont similaires.

Le Conseil fédéral a élaboré une stratégie appelée Stratégie énergétique 2050. Après l'accident de Fukushima, la Suisse a décidé d'abandonner l'énergie nucléaire et de promouvoir les énergies renouvelables. L'un des objectifs de cette stratégie est également de réduire la consommation totale d'énergie d'ici 2050. Trois domaines sont au centre de cette stratégie : (1) augmentation de la capacité de l'énergie hydraulique (2) utilisation d'autres sources d'énergie renouvelables, (3) plus haut degré d'efficacité énergétique dans les bâtiments, les appareils et le secteur des transports (OFEN, 2016). Ce projet se concentre sur le troisième élément : **l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment**. Une



projet se concentre sur le troisième élément : **l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment**. Une distinction peut être faite entre bâtiments à forte consommation et bâtiments à faible consommation. Un effort est proposé pour rénover les bâtiments à forte consommation et appliquer des techniques d'efficacité énergétique.

Ceci constitue aujourd'hui un grand défi dans le vieux continent, nécessitant une forte intensité d'investissements, mais il sortira du cadre de ce projet, qui se concentre sur la deuxième partie : comprendre l'écart de performance (EdP) des bâtiments basse consommation et y répondre par une intervention.

Les questions de recherche

Ce projet de recherche s'est focalisé sur les questions suivantes : Quelle est l'influence des pratiques des habitants sur les services énergétiques et donc sur la consommation d'un bâtiment à haute performance énergétique ? Est-ce qu'il y a un écart de performance énergétique (EdP) dans les bâtiments basse consommation ? Si oui, d'où vient-il ? Quel est le rôle de l'utilisateur sur la performance énergétique ?

D'un point de vue théorique, il existe déjà un grand nombre d'articles sur la conservation de l'énergie. Plus de 800'000 articles ont été écrits sur ce sujet. Il existe aussi beaucoup d'articles en marketing social c'est à dire les outils marketing qui sont utilisés dans un but prosocial ou pour environnemental. Beaucoup moins d'articles ont été écrits avec le terme co-design et on se rencontre à l'intersection de ces différents champs de littérature, il n'y a qu'une vingtaine d'articles qui citent ces trois mots clés. On se situe dans un champ qui est encore peu exploré : l'utilisation des méthodes de marketing social et de co-design pour réduire la consommation d'énergie. La contribution théorique viendra enrichir ce gap de littérature.

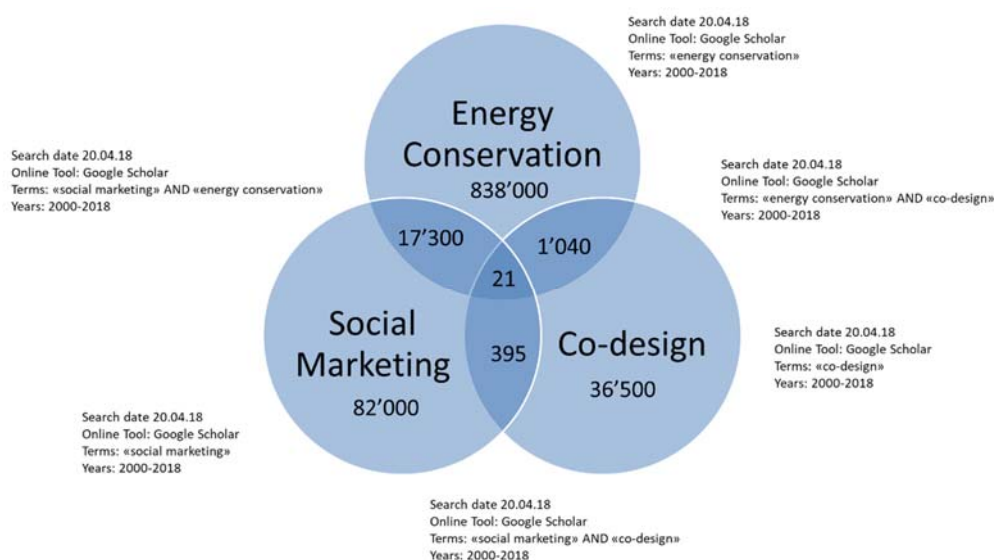


Figure 2 - Analyse de la littérature et des cadres théoriques



1.2 Justification du projet

Recherche axée sur les services énergétiques

Pour soutenir les activités de recherche liées à cette transition énergétique, huit Centres de compétences suisses pour la recherche énergétique (SCCER) ont été lancés par la Confédération en 2013. L'un des SCCER a concentré ses efforts sur des thèmes non techniques comme le droit, l'économie et l'innovation. Il s'agit du Centre de compétences pour la recherche sur l'énergie, la société et la transition (CREST). Ce projet est ancré dans le work package 2 de ce centre de compétences : "Changement de comportement." Ce groupe de recherche composé de psychologues, sociologues, économistes et spécialistes du marketing se sont concentrés sur l'individu et les facteurs qui influencent la consommation d'énergie individuelle. Le CREST l'affirme:

*« Comme les particuliers et les ménages ne demandent pas (dans la plupart des cas) d'énergie directement, mais demandent des services énergétiques, l'analyse des changements potentiels dans les habitudes de consommation comprend l'analyse des changements potentiels dans la demande et des alternatives potentielles dans la **prestation des services** » (CREST, 2016).*

La conception et l'exploitation des services énergétiques dans les bâtiments basse consommation seront au cœur de ce projet interdisciplinaire. Une définition des "services énergétiques" est proposée par Fell : « *Les services énergétiques sont les **fonctions** exécutées à l'aide d'énergie qui sont des moyens d'obtenir ou de faciliter les services ou **états finaux souhaités**.* » (2017).

Dans ce projet, différents services énergétiques fournis dans les bâtiments à basse consommation seront étudiés tels que le chauffage, l'éclairage, le lavage (corps, linge, vaisselle). Les auteurs du présent rapport soutiennent qu'il faut accorder plus d'attention aux services énergétiques et au **processus de création de valeur du service**. Nous mobilisons le paradigme de la « Service Dominant Logic » (Vargo et Lusch, 2004). Le produit est considéré comme un véhicule qui apporte cette valeur aux consommateurs. Ce rapport se situe à l'interface de la production et de la consommation dans les bâtiments basse consommation.



Le bâtiment en tant que système socio-technique complexe

Dans ce projet, le bâtiment est perçu comme un système complexe composé (1) d'acteurs humains, d'organisations, de groupes sociaux, (2) de règles, d'institutions et (3) de systèmes socio-techniques en interaction (Geels, 2004), comme le montre la **Figure 3**.

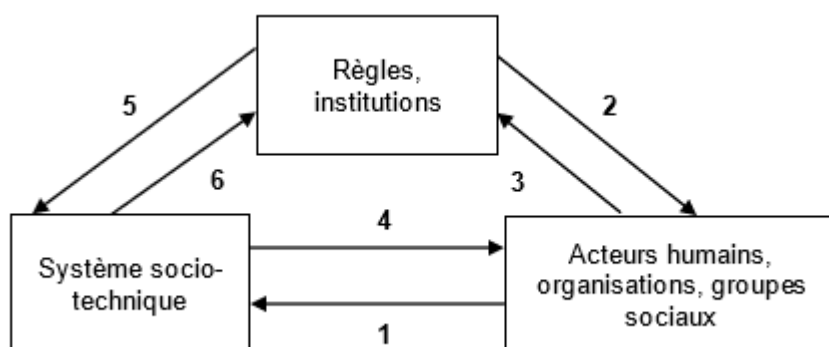


Figure 3 - Trois dimensions analytiques interdépendantes, adaptées de Geels (2004)

1.3 Objectifs du projet

L'écart de performance énergétique est un sujet complexe. L'écart vient de nombreuses variables et notamment d'un groupe de variables liées au comportement des occupants dans les bâtiments. Ce sont ces variables que l'on se propose d'étudier plus finement en mettant de côté les aspects d'énergétiques du bâtiment. Ils ne sont pas oubliés mais ils sont étudiés séparément (cf annexe 1) pour que l'on puisse finalement se focaliser sur le comportement des occupants (cf annexe 2).

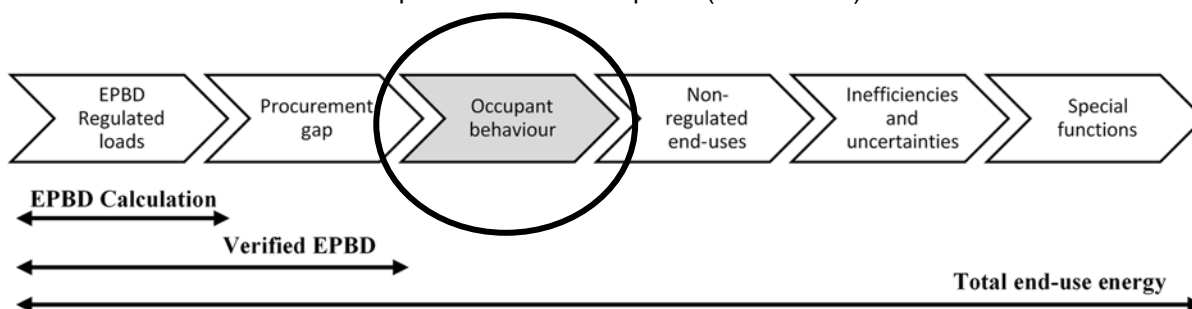
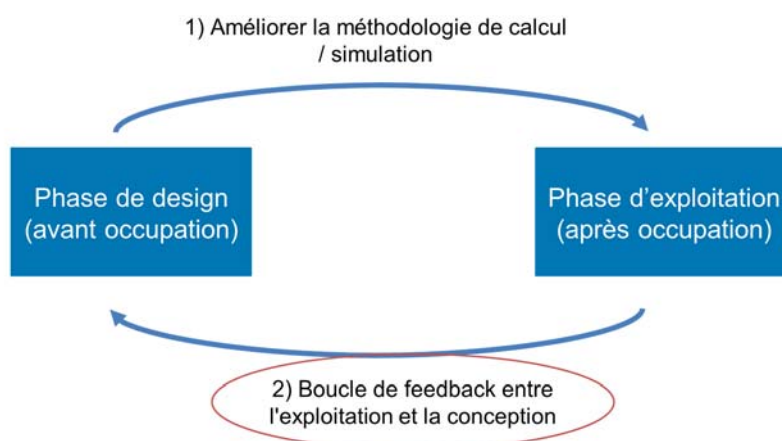


Figure 4 - Ecart de performance énergétique, adapté de Burmann et al (2014)

Le projet UserGap propose d'étudier l'écart de performance énergétique mais également d'essayer de le réduire. D'une part, l'équipe de recherche propose de nouvelles méthodes de simulation dynamique de manière à pouvoir améliorer la méthodologie de calcul (annexe 1). Nous avons également étudié la partie feedback de la phase exploitation vers la phase de conception en intégrant les habitants et les autres parties prenantes au retour d'expérience sur ces bâtiments pour pouvoir ensuite améliorer ces quartiers mais aussi les futurs quartiers à construire et s'approcher finalement de la consommation théorique (annexe 2).



L'objectif du projet UserGap est d'intégrer le feedback des parties prenantes pour co-développer des interventions d'efficacité énergétique pour réduire l'écart de performance. On cherche à répondre à la question centrale : *Comment impliquer ces différents acteurs dans le quartier ?* On parle des acteurs, ce ne sont pas seulement les habitants mais c'est aussi la commune, la déléguée à l'énergie, le distributeur d'énergie, le constructeur du quartier, les associations de quartier pour pouvoir avoir une bonne compréhension des pratiques sociales qui ont une influence sur la consommation d'énergie de ces bâtiments.



(Burman et al, 2012)

Figure 5 - Boucle entre la phase de design du quartier et la phase d'exploitation



2 Description des installations

Le projet UserGap étudie l'écart de performance des bâtiments basse consommation. Nous avons pris comme cas d'étude le quartier Eikenott à Gland, un des premiers écoquartiers de Suisse, composés de bâtiments labellisés Minergie. Il est composé d'environ 300 logements d'habitation une partie des bâtiments est en copropriété et l'autre partie est louée à des particuliers.

« L'ensemble du quartier est alimenté par un réseau de chauffage à distance. La production de chaleur centralisée se fait à l'aide de chaudières utilisant des copeaux de bois qui fournissent 80 % des besoins du quartier. L'utilisation du bois apporte une valeur ajoutée qui profite à la région. [...] En parallèle, environ 1'000 m² de panneaux photovoltaïques sont installés sur la toiture du parking aérien. »¹



Figure 6 - Le quartier durable Eikenott de Gland en 2017, source de l'auteur

L'annexe 1 détaille les analyses techniques effectuées sur un bâtiment pilote pour comprendre l'écart de performance thermique. Cela représente le niveau « meso » de l'analyse. Il serait en effet trop coûteux d'analyser en détails chaque bâtiment du quartier. Le bâtiment B1.2 a été étudié en détails pour comprendre l'écart à la norme SIA380/1, référence pour l'obtention du label Minergie. « *La norme SIA 380/1 a pour but l'utilisation rationnelle et économique de l'énergie pour le chauffage et la production d'eau chaude dans le bâtiment. Elle contribue ainsi à une conception de la construction respectueuse de l'environnement.* »²

Du point de vue de la consommation électrique, les analyses ont été effectuées à l'échelle MACRO, sur tout le quartier. La norme SIA308/4 a été utilisée comme référence pour comprendre et mesurer les écarts de performance électriques : « *La norme SIA 380/4 « L'énergie électrique dans le bâtiment » a pour objet l'utilisation rationnelle de l'électricité dans le bâtiment. Elle vise à faciliter la tâche des concepteurs en leur proposant un outil d'optimisation s'appliquant à la demande en électricité dans les bâtiments neufs ou rénovés. Elle définit les indices de référence et le modèle standard nécessaires à la description de la demande en électricité dans le bâtiment.* »³ Les analyses économétriques ont également été effectuées sur l'ensemble des consommations du quartier, remontées grâce aux smart meters e-smart installés au démarrage du quartier dans les logements.

¹ <https://www.eikenott.net/vivre-aux-eikenott/>

² http://shop.sia.ch/collection%20des%20normes/architecte/380-1_2007_f/F/Product

³ http://shop.sia.ch/collection%20des%20normes/architecte/380-4_2006_f/F/Product



3 Procédure et méthode

Cette section décrit les procédures et méthodes utilisées dans le projet UserGap. La première partie se concentre sur le paradigme épistémologique pour poser le cadre de l'étude interdisciplinaire. Puis l'approche interdisciplinaire est décrite. Les différents niveaux d'analyse sont ensuite détaillés. Les procédures détaillées figurent dans les deux annexes également.

3.1 Epistémologie et méthodologie : constructivisme, multiméthodes

Paradigme épistémologique : science de l'artificiel et constructivisme

Une étape importante de ce projet de recherche appliquée a consisté à définir dans quel paradigme scientifique il s'inscrit. Un paradigme scientifique est : "*Un système de croyances sur ce qu'est une science, ce qu'elle étudie et comment.*" (Gavard-Perret, M. L. et coll. 2008, p. 13). Il existe différents paradigmes, souvent liés à différentes disciplines. Cette recherche étant interdisciplinaire, il est particulièrement important de comprendre les différents paradigmes des chercheurs impliqués dans le projet. La science de l'artificiel tel que défini par Simon (1996, cité par Gavard-Perret, M. L. et al., 2008, p. 18) distingue l'artificiel du naturel par quatre indices :

(1) Les choses artificielles sont synthétisées (...) par des êtres humains. (2) Les choses artificielles peuvent imiter les apparences des choses naturelles tout en manquant, à un ou plusieurs égards, de la réalité de ces dernières. (3) Les choses artificielles peuvent être caractérisées en termes de fonctions, d'objectifs, d'adaptation. (4) Les choses artificielles sont souvent discutées, en particulier lorsqu'elles sont conçues, en termes d'impératifs aussi bien que de descriptifs.

Les bâtiments à faible consommation étudiés et les services énergétiques fournis aux occupants peuvent être considérés comme des artefacts synthétisés par des architectes et des ingénieurs. Ils poursuivent l'objectif de satisfaire les besoins des occupants en consommant efficacement les ressources, en assurant des fonctions : éclairage, chauffage, information.... La phase de conception est d'un intérêt particulier dans cette recherche car l'entreprise de construction aimerait mieux comprendre l'impact de la co-conception avec les parties prenantes pour les futurs bâtiments à faible consommation. Dans le plan d'économie d'énergie co-conçu, les actions peuvent être orientées vers le changement des trois éléments du système : acteurs, règles, artefacts techniques. Différents types de règles telles que les normes de construction SIA 380/1 et SIA 380/4 fournissent un cadre impératif. A cet égard, ce projet est ancré dans le **paradigme des sciences de l'artificiel**.

Il est également important de définir dans quel **paradigme épistémologique** se situe le projet. L'épistémologie est définie par Piaget comme "*l'étude de la constitution de connaissances valides*" (1967, dans Gavard-Perret, M. L. et al., 2008). Par connaissances valides, deux points de vue peuvent être définis : (1) **valeur épistémique** : cette recherche a-t-elle une valeur pour le développement des connaissances générales ? (2) **valeur pragmatique** : cette recherche a-t-elle une valeur pour la pratique managériale ? (Gavard-Perret et al., p. 7). Comme c'est souvent le cas en recherche



appliquée, cette recherche vise à développer les deux types de valeur : (1) valeur épistémique : mieux comprendre et mesurer l'impact du processus de co-conception dans un LL et l'impact sur la performance énergétique, (2) valeur pragmatique : proposer un processus d'innovation débouchant sur des recommandations qui contribuent à une meilleure efficacité énergétique dans les bâtiments à basse consommation étudiés.

Deux grands paradigmes épistémologiques dominent aujourd'hui : le **positivisme** et le **constructivisme**. Dans le paradigme épistémologique positiviste, le chercheur adopte une posture neutre et observe pour ne pas influencer le phénomène étudié. Par exemple, les chercheurs en économétrie participant au projet UserGap qui adoptent ce paradigme épistémologique pourraient dire : *"Je ne veux pas augmenter l'efficacité énergétique ; je veux mesurer, avec les compteurs intelligents installés dans le quartier et les données de l'enquête, l'effet de ce processus de co-design sur la consommation énergétique des occupants"*. Ils élaboreraient l'hypothèse et la testeraient empiriquement à l'aide de modèles économétriques. Dans le cadre de la recherche pour l'OFEN, l'objectif est de trouver un procédé permettant d'augmenter l'efficacité énergétique dans les bâtiments à faible consommation. Il y a une forte implication managériale, ce qui ne peut pas être considéré comme une position neutre.

Les chercheurs en marketing dans le projet UserGap ont un paradigme épistémologique constructiviste : de leur point de vue, l'observateur ne peut être séparé du phénomène observé ; le chercheur construit sa compréhension d'une réalité et du phénomène, avec sa propre subjectivité. De nombreux intervenants participent au projet de recherche et **le chercheur adopte le rôle de facilitateur dans l'écosystème de l'innovation** (Sanders et Stappers, 2008). Il ne s'agit pas d'une position neutre, mais d'un rôle changeant pour le chercheur. Le système de construction est interprété à partir des différentes perspectives subjectives des parties prenantes. En tant que chercheurs, nous avons l'intention de recueillir les perceptions subjectives de ces acteurs.

Comment les deux paradigmes, le positivisme et le constructivisme, sont-ils conciliés dans la même recherche ? Nous proposons de séparer clairement les différents rôles : les ingénieurs, statisticiens et spécialistes en économétrie avec un paradigme positiviste feront une revue de littérature ; ils proposeront des hypothèses sur les déterminants de la consommation énergétique et testeront l'hypothèse avant les interventions dans les bâtiments. Ils auront accès aux données historiques sur la consommation d'énergie (eau, électricité et température) et aux données des enquêtes. À partir de leurs premières hypothèses et d'un paradigme constructiviste, les chercheurs en marketing social piloteront différentes interventions d'économie d'énergie, conçues en collaboration avec les différents intervenants. L'équipe de recherche tentera de recueillir des connaissances à partir d'enquêtes, d'entrevues qualitatives, d'ateliers et de techniques de crowdsourcing. Ensuite, les ingénieurs, statisticiens et spécialistes en économétrie mesureront à nouveau l'impact de l'intervention sur la performance énergétique. La richesse de cette équipe interdisciplinaire permet de combiner des méthodes quantitatives et qualitatives pour mesurer l'impact de l'intervention.



Approche interdisciplinaire

Pour répondre aux questions de recherche, plusieurs disciplines sont nécessaires. En ingénierie, l'analyse au niveau du bâtiment est la plus courante, on compare la consommation effective d'un bâtiment à la consommation planifiée, en lien avec les normes suisses SIA citées ci-dessus. On recherche les déviations par rapport à la consommation planifiée et les variables influençant ces déviations.

On peut également se pencher sur la consommation d'un quartier et des ménages qui le composent. L'économétrie est principalement utilisée à ce niveau et se base sur des données de sondages et des collectes de données de consommation. Les méthodes d'analyse doivent être adaptées pour tenir compte d'un grand jeu de données et de nombreux facteurs d'influence.

Si on désire zoomer sur un ménage et sur ses pratiques qui ont un impact sur la consommation d'énergie, on cherche à comprendre les consommations individuelles, les leviers d'action et les barrières des acteurs. Cela fait appel aux connaissances en marketing social. On peut réaliser ces analyses grâce aux entretiens qualitatifs, et aux observations sur site. Ces ménages sont ensuite invités à co-développer des interventions à l'aide d'outils provenant de l'innovation ouverte.

Unité d'analyse

Le projet UserGap combine de manière innovante plusieurs niveaux d'analyse.

MACRO : Les spécialistes en économétrie étudient le macro-environnement, le niveau du quartier. Les équations économétriques fonctionnent uniquement avec une grande quantité de données (historiques ou instantanées) qui sont exploitées de deux sources : les smart meters installés dans le quartier pour comprendre les consommations thermiques et électriques et deux enquêtes socio démographiques pour comprendre les comportements des habitants. Les résultats détaillés de cette analyse se trouvent dans l'annexe 2.

MESO : les ingénieurs spécialistes en thermique du bâtiment se focalisent sur un bâtiment et l'étudient en détail pour essayer de comprendre s'il y a des différences par rapport aux normes en vigueur qui ont été utilisées comme standards dans le quartier (SIA 380/1) pour l'obtention du label Minergie. Cette analyse fait l'objet de l'annexe 1.

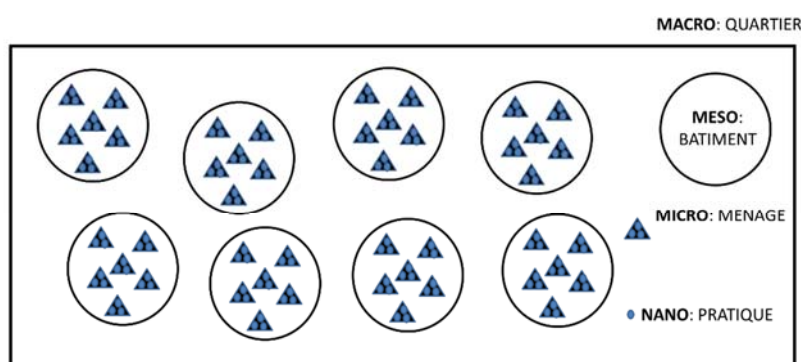
MICRO : on étudie les ménages grâce aux spécialistes en marketing, dans ce cas le marketing social, pour bien comprendre les attentes et les perceptions des ménages vis à vis de la consommation d'énergie (un répondant au sondage qui s'exprime au nom du ménage). Ce niveau ne permet pas de distinguer les attributs, comportements et impacts des différents membres du foyer. Les résultats détaillés de cette analyse se trouvent également dans l'annexe 2.

NANO : les pratiques de consommation d'énergie. Le ménage peut être composé de plusieurs personnes aux pratiques différentes. On étudie donc les différentes pratiques. Une pratique par exemple



ce serait se laver. Comment est-ce qu'on se lave ? Est-ce qu'on prend un bain ? Est-ce qu'on prend une douche ? Combien de temps on reste dans la douche ? Ce sont aussi les spécialistes en marketing qui vont étudier les pratiques d'un individu. Des entretiens ethnographiques ont été menés à ce niveau qui sont repris dans l'annexe 2.

Cette manière de procéder permet de contourner les limites de chaque méthode prise individuellement et de se compléter, dans une approche interdisciplinaire et de croisement de l'information. C'est ce que l'on nomme les **multi-méthodes séquentielles**. Elles ont également des limites qui seront discutées dans la conclusion du travail. La difficulté de ce projet est de ne pas seulement juxtaposer les niveaux d'analyse mais également de les faire communiquer pour s'enrichir mutuellement.



Source: auteurs

Figure 7 - Les différents niveaux d'analyse d'UN quartier

Processus de marketing social

Mckenzie-Mohr a proposé en 2000 une méthode de marketing social communautaire. Le marketing social basé sur la communauté fusionne les connaissances de la psychologie avec l'expertise du marketing social. Le marketing social souligne que la conception d'un programme efficace commence par la **compréhension des barrières** que les acteurs perçoivent à la participation à une activité. Le marketing social souligne également l'importance d'une mise en œuvre stratégique des programmes afin de **cibler les segments spécifiques du public** et de surmonter les obstacles à l'engagement de ces segments dans le comportement. Dans ce cadre, on étudie les **pratiques de consommation d'énergie**. (1) On sélectionne un comportement, (2) on découvre les barrières à l'utilisation efficace de l'énergie, (3) on conçoit une stratégie pour réduire l'écart de performance, (4) on la pilote dans le quartier et (5) on évalue les résultats.

Processus Living Lab Intégré

Dans le cadre du projet UserGap, on utilise le quartier comme un Living Lab. Qu'est-ce qu'un Living Lab ? Malgré ses dix ans d'existence, le terme ne disposait pas de définition stable, la définition a donc été développée pendant la durée du projet par la cheffe de projet, elle est reprise par le réseau européen ENoLL. Un Living Lab est un « *intermédiaire d'innovation qui orchestre un écosystème d'acteurs dans*



une région spécifique. Son objectif est de concevoir des produits et des services de manière itérative avec les principaux acteurs dans le cadre d'un partenariat public-privé et dans un contexte réel. L'un des résultats de ce processus de co-conception est la co-création d'une valeur sociale. Pour atteindre ses objectifs, le Living Lab mobilise des outils et méthodes d'innovation existants ou en développement de nouveaux. » (Mastelic, 2019).

Dans le cadre du projet UserGap, nous avons développé un nouveau processus qui intègre les deux précédents. On commence par sélectionner une pratique et non pas un comportement. La différence : on va tenir compte du contexte dans lequel le comportement arrive (« nudge »). Ensuite, on intègre les différentes parties prenantes. Ce ne sont pas que les habitants mais également le constructeur, les fournisseurs, le distributeur d'énergie, la commune... On découvre les barrières à une utilisation efficace de l'énergie. On co-développe le plan avec les acteurs et non pas pour les acteurs. On pilote l'intervention dans le quartier et on évalue la performance. Nous avons appelé cette approche le « **Processus Living Lab Intégré** ».

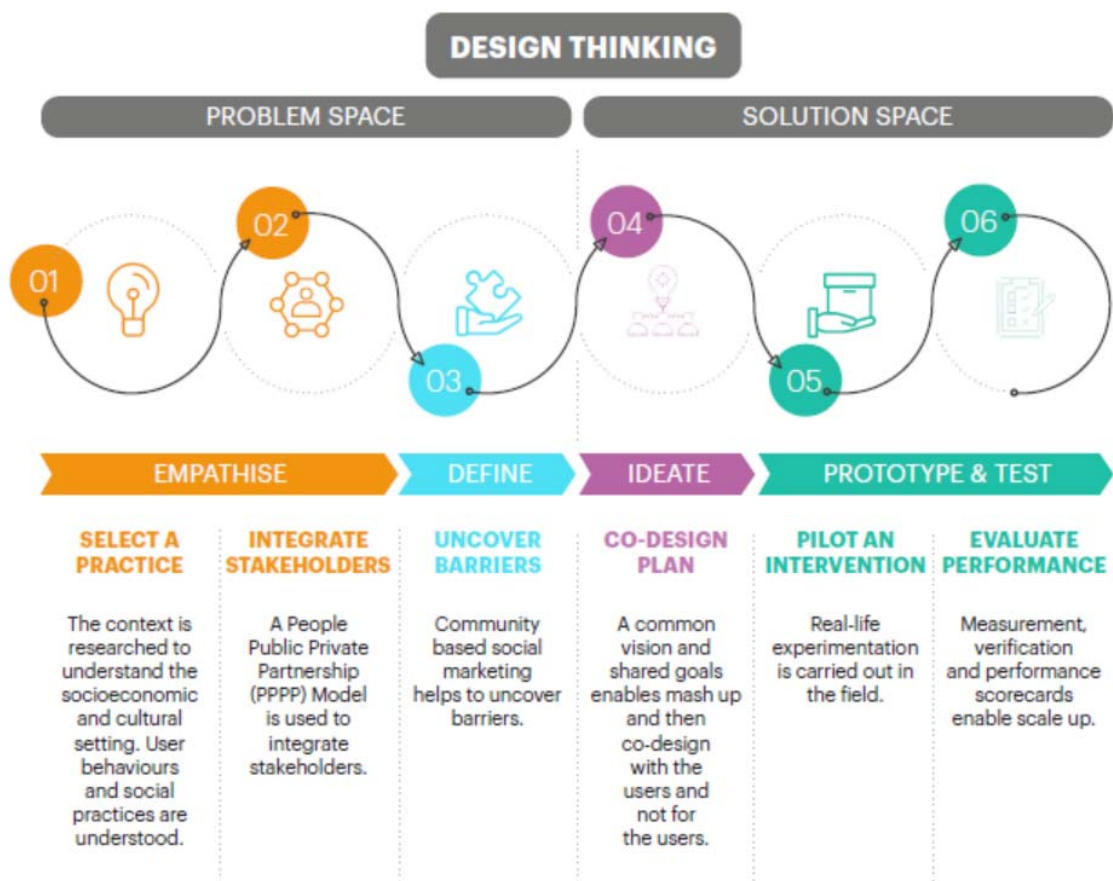


Figure 8 - Processus Living Lab Intégré



4 Résultats et commentaire

Dans cette synthèse des résultats du projet UserGap, nous allons nous concentrer sur la partie « User » : les habitants, leurs attentes et perceptions vis-à-vis des services énergétiques et **l'écart de performance sociale** des bâtiments basse consommation. Les résultats détaillés de l'analyse technique thermique figurent en annexe 1 et ceux de la partie économétrique en annexe 2. Martilla et James (1977) ont proposé une matrice pour mesurer l'importance et la performance des services. Nous l'avons utilisée dans ce quartier pour comprendre les perceptions des habitants vis-à-vis des services énergétiques. Les axes représentent d'une part la satisfaction vis-à-vis des services et d'autre part l'importance qu'ils accordent à ces différents services.

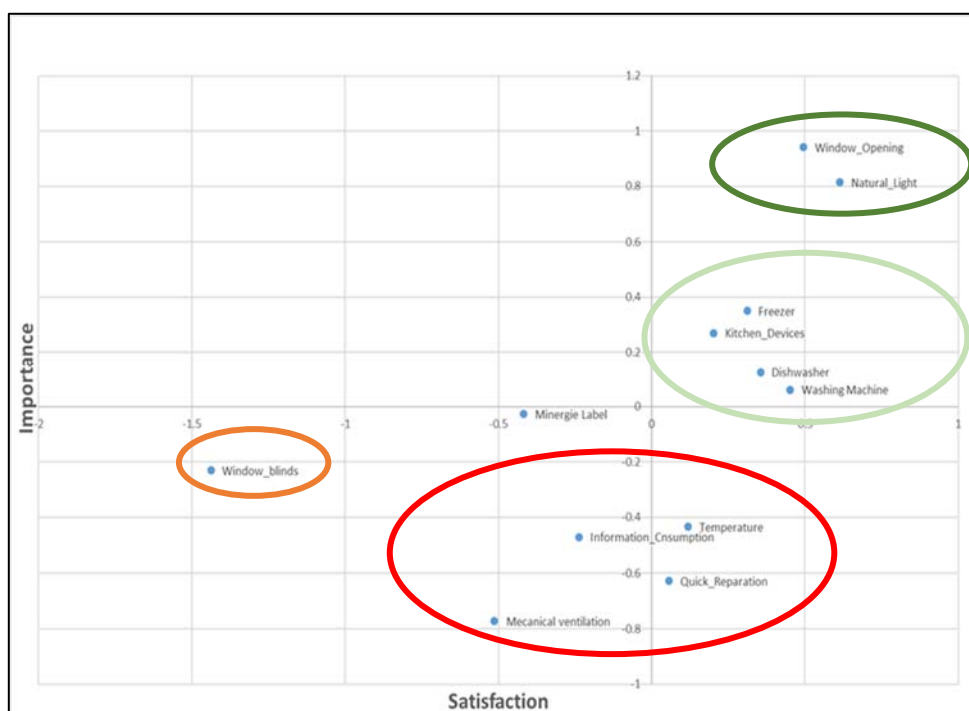


Figure 9 - Matrice importance/performance des services énergétiques à Eikenott

La Figure 9 issue du sondage auprès des habitants (N=96) démontre que l'ouverture des fenêtres est très satisfaisante et très importante pour les habitants. Il en est de même pour la lumière naturelle offerte par de grandes baies vitrées.

A l'opposé, la ventilation mécanique n'est pas satisfaisante et n'est pas non plus jugée comme importante. Dans les entretiens qualitatifs réalisés, nous nous sommes rendu compte que le débit d'air n'était vraiment pas suffisant et que finalement les habitants préféraient ouvrir les fenêtres et laisser les fenêtres ouvertes quelle que soit la saison et cela avait un impact important sur la **consommation thermique qui est de 17% trop élevée** par rapport à la norme.



On constate par contre dans l'annexe 2 une consommation électrique qui est dans la norme, donc qualifiée d'acceptable. On voit également dans la Figure 9 que les appareils électriques utilisés dans le logement donnent satisfaction et sont importants : le congélateur, la cuisine, le lave-vaisselle et le lave-linge. On peut en déduire que les choix qui ont été effectués par le constructeur sont les bons. Les habitants sont satisfaits, la performance sociale de ces appareils est acceptable.

On découvre également d'autres problématiques : ce sont les stores qui sont jugés peu importants mais pas satisfaisants et on se rend compte que la domotique n'a pas été installée dans tous les appartements, c'était au libre choix du futur propriétaire. Les habitants utilisent mal les stores. Ils les ferment en hiver, ils les laissent ouverts en été avec un impact sur la consommation thermique et on voit qu'ils ne sont pas satisfaits de ces stores. Il y a un message pour le constructeur à devoir revoir la manière dont on obscurcit, dont on se protège du soleil dans ces appartements.

On constate aussi que les réparations ne donnent pas satisfaction. On a beaucoup entendu pendant les entretiens qualitatifs que les habitants ne savent plus à qui s'adresser et ont de la peine à trouver un interlocuteur dans le quartier une fois que le constructeur a terminé et a remis en main le quartier aux habitants. Ils ont de la peine à trouver quelqu'un qui est une interface pour les réparations, malgré le bureau de services installé dans le quartier par le constructeur (facility management).

On constate également que **la température ne donne pas satisfaction**. Le quartier est censé être limité à 21 degrés (20 selon la norme). On a pu constater des températures beaucoup plus élevées on l'a vu pour deux raisons avec les entretiens qualitatifs. La première raison c'est qu'il y a des appartements protégés avec des personnes âgées dans ces logements qui bougent peu. La température de 21 degrés pour une personne âgée qui bouge peu est assez basse. Finalement, elle va s'équiper de radiateurs électriques pour compenser la température qu'elle juge trop basse. Il y a un problème aussi d'information liée à la température. Tous les habitants ne savaient pas que la température était bloquée et ils ont essayé d'augmenter la température pendant la durée des premiers hivers. On voit aussi qu'il y a un problème avec l'appareil pour régler la température puisqu'il indique 25 degrés alors que normalement, les appartements ne devraient pas être chauffés jusqu'à 25 degrés. On voit que du côté de la température, la communication est déficiente, l'appareil pour régler la température est mal choisi. En fonction du public cible, la température doit être adaptée, donc c'est un point critique par rapport à la norme.

Par rapport au **label Minergie**, on constate qu'il se situe proche du milieu. C'est encore un facteur de motivation pour certains, pas pour tous. Avec la crise du logement, beaucoup d'habitants de cet écoquartier ne sont pas forcément des adeptes du développement durable mais cherchent un logement proche des grands centres pour pouvoir habiter de manière confortable. Ils ne sont pas forcément sensibles au label.



Résultats : nouveau modèle conceptuel

Nous avons trouvé très intéressant dans le cadre de ce projet UserGap d'être justement interdisciplinaire pour pouvoir apporter les connaissances en thermique du bâtiment, en électricité, pouvoir comprendre l'influence des variables sociodémographiques et des comportements grâce aux analyses économétriques et également d'apporter cette couche de compréhension des perceptions des acteurs. C'est ce qu'on a appelé cette performance sociale et l'écart de performance sociale. Sans avoir la compréhension des perceptions des acteurs, c'est très difficile de pouvoir réduire l'écart de performance énergétique. Ce que nous proposons dans ce modèle, c'est d'intégrer l'écart de performance sociale pour pouvoir mesurer la performance énergétique d'un bâtiment. Nous avons proposé un modèle quantitatif, certes perfectible, et qu'on peut encore travailler pour pouvoir mesurer quantitativement la performance du bâtiment et pas seulement qualitativement, grâce à des mots, grâce à des perceptions. Il est important de pouvoir proposer des indicateurs également quantitatifs pour pouvoir mieux comprendre ou est-ce qu'il y a des zones d'amélioration à apporter au bâtiment.

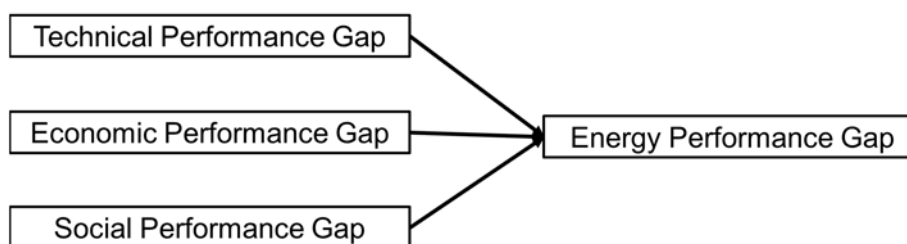


Figure 10 - Nouveau modèle conceptuel d'écart de performance énergétique



Résultats : persona

Dans l'introduction, nous avons parlé de vouloir agir sur l'écart de performance. Maintenant, on sait qu'il y a un écart de performance de 17% thermique. Il n'y a pas d'écarts de performance électrique. On doit se concentrer sur la partie thermique. Nous avons représenté les différents types de parties prenantes à l'aide de personas. Sur la base des entretiens qualitatifs, nous avons développé ces personas, nous avons évalué les différents obstacles et motivations en fonction des entretiens que nous avons menés et nous avons mesuré la satisfaction grâce au sondage qui a été réalisé dans le quartier.



Figure 11 - Exemple de persona d'un habitant du quartier



Résultats : jeu sérieux

A partir de ces personas, nous avons développé un jeu sérieux basé sur des cartes de personas, des cartes d'action et des cartes de pratique. En combinant les trois types de cartes, dans le cadre d'un atelier de co-conception, les parties prenantes ont été encouragées à regarder sous un autre angle et à proposer des mesures d'efficacité énergétique. Elles ont été intégrées dans un plan d'efficacité énergétique. Ce qui est intéressant c'est que c'est un prototype qui peut être utilisé dans d'autres quartiers pour aider à dialoguer avec les parties prenantes sur les mesures à mettre en place pour réduire les consommations d'énergie.



Figure 12 - Exemple de cartes du jeu sérieux



5 Conclusions et résumé

Les enseignements tirés de ce projet sont structurés ci-dessous en trois domaines : l'apport managérial (implications pratiques), théorique (construction de nouvelles connaissances), méthodologique (implications pour de futures recherches appliquées).

Implications managériales

Pour conclure, l'intégration des parties prenantes dans la co-conception de mesures d'efficacité énergétique permet une boucle de feedback entre la phase de conception et la phase d'exploitation et une boucle de feed-forward pour la conception des futurs quartiers durables. L'approche interdisciplinaire combine les compétences pour améliorer la phase d'exploitation avec la co-conception d'un plan d'efficacité énergétique et pour mesurer les résultats avec des modèles économétriques. L'implication du constructeur dans le projet de recherche l'incite à modifier ses pratiques futures. Il est également intéressant de pouvoir modifier les hypothèses sur lesquelles se basent les normes de construction en y intégrant les praticiens et les chercheurs en sciences sociales pour mieux comprendre les pratiques sociales influençant la consommation d'énergie, ce qui n'est pas le cas actuellement.

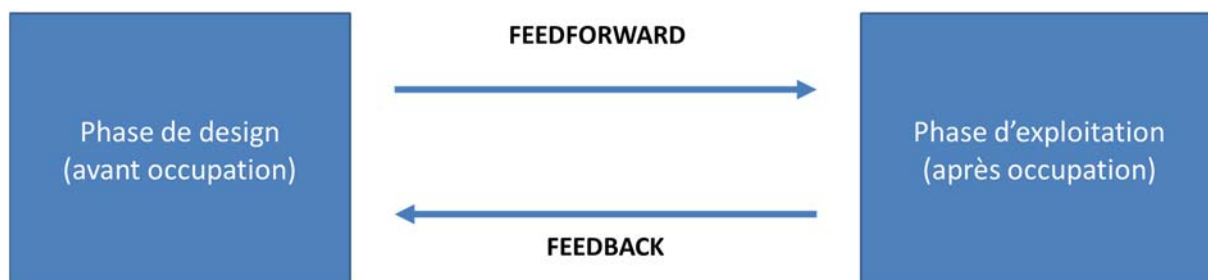


Figure 13 - Boucle de feedback pour les quartiers existants et de feedforward pour les nouveaux quartiers

Implications théoriques

D'un point de vue théorique, de construction de nouvelles connaissances, il semble important que les modèles d'analyse du gap de performance énergétique incluent la performance sociale, à côté de la performance technique et économique. L'intégration de l'écart de performance sociale dans le modèle permet de mieux comprendre l'écart final. Proposer des mesures quantitatives de l'écart de performance sociale permet d'évaluer les trois dimensions dans un seul modèle, social, économique et technique.



Implications méthodologiques

Les recommandations suivantes s'appliquent aux approches à adopter pour l'analyse et les interventions techniques et sociologiques en étudiant différents niveaux d'analyse : le quartier (MACRO), le bâtiment (Meso), le ménage (Micro), les pratiques (Nano) et en utilisant différentes disciplines : énergétique du bâtiment, marketing, économétrie, statistique.

Un des challenges d'un projet interdisciplinaire est lié à **l'épistémologie de la recherche** : les chercheurs, en fonction de leur discipline, ont un paradigme épistémologique différents (plus de détails sur ce point dans la thèse de doctorat de Joelle Mastelic, 2019). Concilier un paradigme épistémologique positiviste des statisticiens, économètres et ingénieurs avec un paradigme épistémologique constructiviste en marketing social demande du temps, de l'ouverture aux autres disciplines et de la confiance entre les chercheurs. Un article scientifique a également été proposé sur la manière de construire la confiance dans un écosystème d'acteurs (Dupont et al, 2019).

Un mot sur les données : le projet UserGap a nécessité la collecte de nombreuses données quantitatives et qualitatives pour comprendre l'écart de performance énergétique. Tout d'abord les données des smart meters e-smart installés dans les appartements du quartier. Au début du projet, 3 ans de données historiques étaient mises à disposition. En regardant plus en détails, il a été très compliqué et long d'obtenir ces données. En effet, elles n'étaient pas stockées et structurées de manière à pouvoir aisément les transférer. Les distributeurs d'énergie utilisent principalement les données en vue de la facturation et n'avaient pas suffisamment de compétences internes dans le management et la structuration de données. C'est un champ qui a beaucoup évolué ces dernières années. De plus, il n'a pas été possible d'utiliser des algorithmes de décomposition automatique de la charge, pourtant à disposition de l'équipe de recherche. La granularité des données à disposition du distributeur ne correspondant pas à l'utilisation de ces algorithmes. Pour affiner la granularité, cela aurait nécessité la collecte individuelle depuis chacun des smart meter et bien entendu l'autorisation écrite de chaque ménage. Ce n'était pas réaliste avec les ressources (financières, temporelles) à disposition.

L'arrivée du nouveau **règlement européen sur la protection des données** (RGPD) en mai 2018 soit au milieu du projet de recherche appliquée a compliqué l'obtention des données et il ne nous a pas été possible, malgré des efforts longs et importants, d'obtenir le même type de données pour un autre quartier afin de comparer les résultats de notre étude. Les données pour la recherche devraient être plus aisément accessible, comme le prévoit d'ailleurs RGPD. Le vrai problème est la méconnaissance de ces nouvelles règles qui rend les acteurs (et y compris les chercheurs) frileux à transférer, analyser, stocker ce type de données. Le développement de l'Open Access peut d'un côté aider les chercheurs à développer les outils de gestion de données (data management). D'un autre côté, les distributeurs et les consommateurs ne se satisfont pas toujours d'une pseudonymisation de leurs données, rendant encore plus compliqué l'accès aux données.

La **collecte des données socio-démographiques** utiles à la compréhension des profils et des comportements de consommation a aussi été très longue et compliquée. L'enquête a dû être renouvelée à deux reprises car le constructeur ne souhaitait pas voir figurer le numéro d'appartement dans le sondage, jugé trop intrusif. Nous avons donc dû revoir à la baisse la taille de l'échantillon. Les approches statistiques comme l'économétrie ne peuvent être utilisées avec de petits échantillon, d'où l'importance et la nécessité de renouveler le sondage jusqu'à arriver à un nombre satisfaisant de répondants (dans ce cas 95 appartements sur 300 logements).

La **collecte de données qualitatives** durant les entretiens ethnographiques s'est par contre déroulée sans encombre. Ce type de collecte est très utile pour donner du sens aux données quantitatives. Elle



permet également de constater in situ les installations et les contextes d'usage, ce qui permet ensuite de creuser certains aspects quantitatifs. En prenant un exemple, la consommation thermique excessive a pu être documentée avec des photos de fenêtres constamment ouvertes en hiver, de tuyaux montés à l'envers, d'interface utilisateur qui indique 25 degrés alors que le quartier est limité à 21 degrés.

En ce qui concerne les différents types d'études à mettre en place en fonction de l'échelle d'analyse (Macro, Meso, Micro, Nano), elle nécessite des compétences très variées et une équipe interdisciplinaire avec une excellente communication interne. Les ingénieurs en thermique du bâtiment ont tout de suite identifié un bâtiment représentatif et ont conduit leurs recherches pour comprendre les écarts de performance thermiques. Les spécialistes en marketing ont conduit en parallèle les entretiens qualitatifs avec les parties prenantes. Les statisticiens et économètres ont dû patienter avant d'obtenir un jeu de données au niveau du quartier (données de consommation et données socio-démographiques). Les résultats sur les écarts de performance au niveau du quartier ont donc été fortement retardés. En théorie, l'approche par les multi-méthodes séquentielles est alléchante car elle permet d'obtenir une compréhension aux différentes échelles : celle du quartier (économétrie), celle du bâtiment (ingénierie), celle des ménages et des pratiques (marketing). C'est sans compter l'**approche séquentielle** qui oblige à attendre les conclusions d'une phase pour démarrer une autre phase. Pour ne pas prendre trop de retard, des hypothèses ont dû être posées sur les écarts de performance et sur les déterminants de la sur-consommation supposée, basées sur des recherches antérieures et de la littérature. On peut prendre l'exemple le plus parlant des stores : les ingénieurs en thermique du bâtiment ont conclu leur rapport en indiquant qu'il serait souhaitable de développer une intervention sur les stores afin d'optimiser leur usage. Or, les interventions de marketing social ont dû avancer sans faire cette hypothèse sur les stores mais en travaillant par exemple sur la réduction de consommation électrique grâce à un interrupteur central qui a été testé dans les ménages. Il s'est avéré qu'il n'y avait pas d'écart de performance électrique au niveau du quartier. Par contre, un écart de performance thermique et des interventions sur les stores étaient nécessaires. L'approche séquentielle pose donc un problème de phasage des activités qui, avec la difficulté d'accès aux données, a forcé l'équipe de projet à faire des hypothèses et des choix sans maîtriser toutes les informations.

Nous recommandons donc :

- De s'assurer que les données de consommation sont à disposition, avec un data management plan, qu'elles sont déjà stockées et structurées avant le démarrage de l'étude.
- De former les chercheurs mais également les parties prenantes clés et pourvoyeurs de données à la nouvelle législation en matière de protection des données pour chaque nouveau projet de recherche. Ils doivent se sentir en confiance pour travailler sur ces données.
- D'éviter de créer des silos disciplinaires au sein de « work packages » séparés mais de mélanger les chercheurs de différentes disciplines dans les mêmes équipes de projet (au sein des mêmes work packages).
- De mettre en place, dans la mesure du possible, des méthodes non séquentielles (agiles), quitte à revoir les objectifs du projet à la baisse.
- D'utiliser les multi-méthodes combinant analyses quantitatives qui ont l'avantage de permettre la généralisation des résultats et des analyses qualitatives qui permettent l'exploration et l'explication des phénomènes.



6 Aperçu et mise en œuvre prochaine

6.1 Soirées TupperWatt

Les **soirées TupperWatt** ont connu un grand succès auprès des participants. Elles permettent de donner accès à cette thématique de l'énergie à tout un chacun et également à passer à l'action. Du matériel d'efficacité énergétique peut être vendu durant ces soirées, ce qui permet d'en diminuer le coût. Elles ont également une vertu éducative, les enfants ayant également pu prendre part à la soirée et donner des idées.

En partant d'une discussion sur l'efficacité énergétique dans le logement, on peut également parler de produire sa propre énergie. Il est intéressant de faire le lien avec les communautés d'autoconsommation, ces groupes de quartiers dans lesquels se déroulent les soirées TupperWatt peuvent se transformer en communautés formelles autour d'un objectif de production d'énergie propre. C'est ce que l'on souhaite tester dans un prochain projet.

Nous recommandons à Suisse Energie de soutenir ce type d'initiative pour changer d'échelle et passer du prototype dans un projet de recherche (poker design ou soirée TupperWatt) à un réel produit mis à disposition des conseillers en énergie, avec une offre conçue selon le marketing social, sorte de promotion pour favoriser l'efficacité énergétique et le développement du renouvelable chez les ménages.

7 Coopération nationale et internationale

Au niveau national, ce projet a permis tout d'abord de renforcer les collaborations au sein du consortium : HES-SO Valais, HEIG-VD, Université de Neuchâtel, Bureau EHE, TEP, Losinger. Tous les partenaires disposent de compétences complémentaires et interdisciplinaires qu'il s'agit de combiner pour arriver au meilleur résultat, tant d'un point de vue théorique que managérial et social.

De plus, l'Université de Neuchâtel a fait partie du SCCER CREST et a travaillé dans le Work Package sur les changements de comportement, notamment au travers de l'enquête nationale annuelle. Elle fait le lien avec ce consortium d'envergure nationale.

La journée de conférence et workshops "**Zéro Carbone**" organisée le 16 novembre 2017 par le cluster Energie et Bâtiments a permis de réunir 100 acteurs du domaine. Elle a bénéficié d'une traduction simultanée, ce qui a permis de regrouper une communauté francophone et germanophone. Le thème de l'année : "la contribution positive des projets immobiliers à l'environnement." Le lien a pu être renforcé avec le **Smart Living Lab** (Anne-Claude Cosandey, EPFL Fribourg) qui a également mené un projet portant sur le gap de performance" et les résultats de ce projet seront partagés.



La HES-SO Valais-Wallis et l'équipe du professeur Pierre Roduit ont également travaillé sur un projet centré sur l'écart de performance énergétique. Des échanges ont eu lieu pour enrichir les conclusions du projet.

La conférence scientifique ICE/IEEE International Conference in Engineering, Technology and Innovation (www.ice-conference.org) qui s'est tenue fin juin 2017 à Madeire a réuni, lors de workshops, des spécialistes du domaine du bâtiment. Joelle Mastelic a eu l'occasion de présenter la méthode de co-création avec les parties prenantes pour diminuer la consommation d'énergie dans le bâtiment. Les échanges ont été nombreux et ont donné lieu à un partenariat avec l'école d'ingénieur de l'Université de Nancy. Un nouveau partenariat avec le **Lorraine Fab Living Lab** a été développé (<http://www.lf2l.fr>). Ils ont notamment des projets dans le domaine de la co-création de services à partir du compteur Linky d'ERDF. Des fablabs ont eu l'occasion de s'impliquer pour co-créer ces services avec le Lorraine Fab Living Lab.

Un partenariat a été renforcé entre l'Energy Living Lab et le **Living Lab de la province de Trento** (Antonio Zonta, resp. du département Bâtiments pour la province de Trento). Ils travaillent à large échelle pour co-développer des plans d'efficacité énergétiques pour les bâtiments publics, notamment des écoles.

Joelle Mastelic est membre du conseil du réseau ENOLL et responsable de l'Action Taskforce Energie & Environnement. En septembre 2019, un workshop a réuni à Thessalonique lors des Open Living Lab Days 2019 des spécialistes énergie responsables de projets européens, les responsables du réseau ERA Net Energy Systems, des Living labs labellisés par le réseau européen. Cela a débouché sur le lancement d'un appel à projet international auquel l'équipe a participé, avec la Heig-VD.

https://www.eranet-smartenergysystems.eu/Partners/Living_Labs



8 Communication

Le jeu de « Poker Design » développé au sein de l'Energy Living Lab durant le projet pour le quartier Eikenott a été modélisé et décontextualisé du quartier. L'ensemble des persona créés sont des représentations des personnages clés du quartier, comme la mère de famille travaillant à mi-temps, ou le responsable énergie dans une entreprise. Suite au développement de ce jeu, une participation de l'Institut Entrepreneuriat et Management de Sierre à l'événement Moving Mountains le 6 septembre 2019 a permis de retravailler le jeu et de tester son utilisation dans un tout autre contexte.

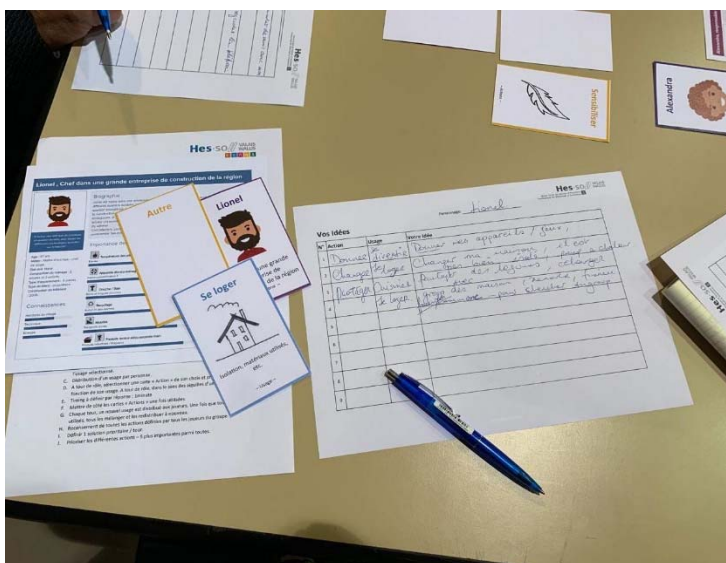


Figure 103 : Poker Design

Lors de la conférence Moving Mountains, Forum Ecovillages⁴, un workshop a été réalisé basé sur le jeu. Une totale décontextualisation du jeu a permis de travailler sur différentes thématiques, plus globales. Le développement durable de manière générale a été ajouté aux caractéristiques des personnages, mais également aux cartes d'action et d'usage. Des thématiques comme la mobilité, ou le traitement des déchets ont été ajoutées au jeu, de telle façon que non seulement l'efficacité énergétique dans les bâtiments, mais le développement durable soit intégré dans ce jeu.

Ce jeu intéresse notamment le WWF pour le développement des quartiers durables avec le label «One Planet Living» (OPL). A cet effet, il est testé par la start-up Enoki pour co-développer les futurs quartiers OPL. Des retours d'expériences permettront de poursuivre la décontextualisation et de l'utiliser dans les communes également. Les conseillers en énergies pourraient par exemple l'utiliser. Nous souhaitons passer de la phase de prototype à la phase de produit et le mettre à disposition en licence « Creative Commons ».

⁴ <https://movingmountainsforum.com/en/home-2/>



Deux articles de vulgarisation ont été publiés par la revue des électriciens suisses Le Bulletin sur le quartier durable :

- 1) Mastelic, J., Genoud, S. (2018), Développer les services énergétiques, AES - Le Bulletin

Cet article de vulgarisation dans la revue Le Bulletin de l'association des électriciens suisses résume les résultats de la thèse de doctorat de Joelle Mastelic. Il s'adresse aux professionnels de la branche et propose également une checklist pour lancer des activités Living Lab dans le domaine de l'énergie.

<https://www.bulletin.ch/fr/news-detail/developper-les-services-energetiques.html>

- 2) Previdoli, D., Mastelic, J., Genoud, S., Cimmino, F. M., Fragnière, E, (2016), *Comment les ménages perçoivent-ils la valeur des services énergétiques ?* Une étude de cas dans un quartier durable suisse, Le Bulletin, AES, 5/2016.

Cet article explique la manière dont la valeur des services énergétiques est perçue par les ménages dans le quartier de Eikenott et donne des pistes d'action.

Le projet UserGap a également été cité par M. Rolf Moser, dans le numéro 6 de la revue Energieia. L'article explique ce qu'est l'écart de performance (Novembre 2017).

Le jeu « poker design » a été utilisé lors de l'émission de la RTS : « Une Seule Planète ». L'objectif de cette émission est de faire vivre la transition écologique à plusieurs familles qui sont suivies durant leur parcours et coachées. La partie énergétique a été menée par le Prof. Stéphane Genoud. L'émission a été retransmise sur la RTS. Le jeu développé dans le cadre du projet UserGap et le concept de soirées TupperWatt ont été filmés. Les voisins des familles participant à l'émission ont participé à cette soirée TupperWatt et ont beaucoup apprécié la simplicité d'utilisation du jeu, qui a un réel potentiel de vulgarisation de la thématique. Il peut notamment être produit pour les délégués à l'énergie dans les villes et les régions, en combinaison avec les soirées TupperWatt ou séparément.

<https://www.rts.ch/play/tv/une-seule-planete/video/des-changements-durables-?urn=urn:rts:video:10141545>



9 Publications

Voici ci-dessous la liste des articles scientifiques rédigés durant le rapport, avec résumé scientifique.

Mastelic, J., Emery, L., Previdoli, D., Papilloud, L., Cimmino, F., & Genoud, S. (2017). Energy management in a public building: A case study co-designing the building energy management system. In *2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, pp. 1517-1523, IEEE, DOI [10.1109/ICE.2017.8280062](https://doi.org/10.1109/ICE.2017.8280062)

Résumé

« Les bâtiments représentent une part importante de la consommation d'énergie, soit environ un tiers de l'énergie consommée dans les villes, où les grands bâtiments publics sont les principaux consommateurs d'énergie. Par conséquent, le système de gestion de l'énergie du bâtiment (BEMS) peut être défini comme un système combinant à la fois la technologie du bâtiment intelligent et celle du bâtiment écologique. La littérature antérieure a déjà présenté un ensemble de caractéristiques techniques d'un BEMS. C'est pourquoi, dans le présent document, nous nous concentrerons sur les parties prenantes et nous nous efforcerons de comprendre comment les impliquer et les responsabiliser afin de concevoir un système qui réponde aux besoins des différents sous-groupes des bâtiments publics. Nous avons testé la méthode Living Lab pour co-concevoir le BEMS, avec une étude de cas dans un grand bâtiment public basse consommation. Les principales conclusions peuvent être résumées comme suit : l'implication de toutes les parties prenantes depuis le début est cruciale pour réduire les risques de défaillance. La mise sur pieds d'un comité directeur habilite les principales parties prenantes à améliorer le BEMS. Les informations fournies par les compteurs intelligents installés pour surveiller la consommation d'énergie doivent être transformées en indicateurs exploitables pour être utiles à l'entretien des bâtiments. Des conseils automatiques basés sur des algorithmes devraient être proposés, même s'ils sont plus coûteux. La méthode proposée apporte une contribution pertinente à l'ensemble des connaissances existantes, car elle permet aux concepteurs du BEMS d'intégrer les parties prenantes concernées dans la co-conception du système et décrit comment procéder. À l'avenir, nous avons l'intention d'appliquer notre approche à d'autres édifices publics afin d'améliorer et de valider davantage la méthode.

Cimmino, F., Mastelic, J., & Genoud, S. (2016). Multi-method approach to compare the socio-demographic typology of residents and clusters of electricity load curves in a Swiss sustainable neighbourhood. In *Proceedings of the ENTRENOVA-ENTerprise REsearch InNOVation Conference* (Vol. 2, No. 1, pp. 77-81).

Résumé

Un quartier durable a été construit en Suisse par l'un des leaders dans ce domaine. La moitié des 400 appartements ont été équipés de compteurs intelligents fournissant des données importantes sur la consommation d'énergie (électricité, eau, chauffage...). L'entreprise aimerait savoir s'il est possible d'établir un lien entre la typologie sociodémographique des résidents et les habitudes de consommation d'énergie. Pour répondre à cette question, nous présentons dans cet article une



approche multi-méthodes combinant l'analyse qualitative, fréquemment utilisée en marketing (analyses de correspondances multiples), et l'analyse quantitative des statistiques appliquées. Nous avons d'abord mené une enquête auprès des résidents du quartier durable pour recueillir des données sociodémographiques, puis nous avons proposé une typologie marketing des résidents. Parallèlement, nous avons analysé des courbes de charge à l'aide de modèles statistiques (facteurs de regroupement, modèles hermano bêta, facteurs de coïncidence, som, pratiques expertes) pour voir s'il existe des modèles de consommation d'énergie et pour déterminer des groupes de courbes de charge similaires. Nous avons ensuite comparé les différences dans la composition des groupes entre les deux méthodes. Cette étude s'appuie sur une étude de cas générant une nouvelle hypothèse de recherche : la typologie des résidents basée sur des données sociodémographiques peut être liée aux habitudes de consommation énergétique d'un ménage. »

Padey, P., Périsset, B., Lasvaux, S., Genoud, S., Mastelic, J., (2018), *Modèle probabiliste de la consommation énergétique d'un bâtiment pour l'étude de l'écart de performances*, Séminaire Brenet, 20e Séminaire sur l'Etat de la Recherche, Septembre 2018, Zürich.

Dans le cadre du projet UserGap, la HEIG-VD a rédigé un article et présenté ses travaux lors du Status-Seminar 2018 qui s'est tenu les 6 et 7 septembre 2018 à Zürich.

Résumé

« Le projet UserGap propose une approche innovante pour analyser l'écart de performance entre le bilan réalisé en planification et les consommations mesurées lors de l'exploitation des bâtiments à faible consommation d'énergie. Les consommations énergétiques sont désormais de plus en plus sensibles aux hypothèses sur le comportement des usagers et sur le fonctionnement des installations techniques. Les objectifs de ce projet sont 1) de comparer le bilan énergétique planifié avec les valeurs mesurées en exploitation ; 2) de caractériser l'écart de performances et le rôle des utilisateurs sur celui-ci ; et 3) de tester des mesures de réduction de consommation au moyen de « Living Lab ».

Pour ce faire, un modèle stochastique de simulation énergétique a été utilisé. Il caractérise une distribution de probabilité pour la consommation énergétique considérant l'incertitude des paramètres de la norme SIA 380/1. En évaluation ex-post, il est calibré en remplaçant certains paramètres variables par les valeurs mesurées in-situ pour approximer la consommation réelle. Cette approche permet de hiérarchiser l'influence des paramètres (technique et utilisateur) sur l'écart de performance, et, peut être utilisé : (1) en conception : pour identifier l'influence de l'usage sur la demande en simulant mensuellement, selon des distributions de probabilité, les paramètres « utilisateurs » ; (2) en exploitation : pour vérifier les consommations par ajustement du modèle de calcul et proposer des actions correctives sur la consommation via un Living Lab. »

Mastelic, J., (2018), *A Conceptual Model Analysing Building-in-Use to Act on Energy Performance Gap*, European Social Marketing Conference, Antwerp, September 2018.



Résumé

« La performance énergétique des bâtiments résidentiels dépend d'un système socio-technique complexe. Il existe souvent un écart entre la performance énergétique prévue (avant l'occupation) et la performance énergétique réelle (après l'occupation), qui n'est pas entièrement expliqué dans la documentation. Quel est le rôle des "occupants" sur l'écart de performance énergétique ? Comment analyser la "performance sociale" du système ? L'objectif de cette recherche est de faire le lien entre les théories de l'ingénierie, de l'économie et du marketing pour analyser cet écart dans les "bâtiments en usage" résidentiels basse consommation et d'apporter une implication managériale pour agir sur celui-ci. L'intégration de cette compréhension de la "performance sociale" dans un modèle conceptuel intégré est importante pour atteindre les objectifs ambitieux des bâtiments à faible consommation. Cet article théorique s'appuie sur la littérature et l'analyse conceptuelle existantes. Le nouveau modèle conceptuel tient compte de la co-création de la valeur lorsque le bâtiment est en service. Nous illustrons empiriquement l'utilisation de la théorie par un processus innovant combinant les méthodes de marketing social communautaire et de laboratoire vivant. Nous testerons ensuite l'impact sur la performance lors du co-design d'un plan d'efficacité énergétique. Nous distinguons trois types d'écarts de rendement énergétique : (1) écart de performance technique (2) écart de performance économique (3) écart de performance sociale. En tant qu'implications pratiques, de nouveaux indicateurs doivent être développés pour mesurer l'"écart de performance sociale" des bâtiments et l'impact sur la co-création de valeur. Le constructeur doit intégrer toutes les parties prenantes dans la co-conception de nouveaux quartiers durables (feedforward) et dans l'optimisation de l'exploitation (feedback). En tant qu'implications sociales, les habitants doivent être considérés comme des co-créateurs de valeur pour réduire l'écart. L'article correspond à l'élaboration d'une nouvelle théorie étayée par des recherches empiriques. Le modèle conceptuel proposé a l'avantage de prendre en compte et d'intégrer le point de vue de plusieurs parties prenantes et de combiner les théories techniques, économiques et marketing en un seul modèle. »

Cimmino, F., Bonazzi, R., (2018), Une application de jeu de société pour sensibiliser les préadolescents aux moyens de réduire leur consommation d'énergie, conférence proceedings, Entrenova.

Résumé

« Cette étude explore une nouvelle façon de sensibiliser davantage les préadolescents aux moyens de réduire leur consommation d'énergie. Des études antérieures ont déjà montré que les jeux peuvent soutenir les comportements, mais peu d'entre eux sont axés sur le changement d'attitude dans la vie quotidienne. Dans l'enquête sur les jeux de société, l'accent est mis sur un niveau macro. Néanmoins, les solutions existantes sont connues pour avoir des défauts, en plus des coûts importants nécessaires à la mise en place des jeux. Pour augmenter l'impact sur la vie réelle, nous avons développé un jeu basé sur le jeu de l'Oie, où chaque case représente une pièce différente dans l'appartement. Celles-ci ont été introduites plusieurs fois, afin de générer de nouvelles solutions. Pour tester notre prototype, nous avons effectué une analyse textuelle des 30 idées obtenues de 12 participants. Les résultats préliminaires montrent que les idées des participants au jeu sont centrées sur leurs problèmes quotidiens. Ces idées seront élaborées avec les méthodologies Delphi mise en œuvre dans le cadre d'un projet de recherche plus large sur un éco-quartier. L'objectif du projet est de mesurer l'efficacité des méthodologies "laboratoire vivant" pour atteindre les objectifs de transition énergétique. »



Mastelic, J. (2019), Stakeholder's engagement in the co-design of energy conservation interventions: The case of the Energy Living Lab". Doctoral thesis, University of Lausanne

Résumé

« Comment atteindre l'efficacité énergétique dans les bâtiments à faible consommation ? Souvent, dans la littérature on constate une analyse séparée des interventions sur les comportements, sur les artefacts techniques ou sur les normes. Les trois composantes d'un système socio-technique sont en interaction et il s'agit de modifier le système complexe dans son ensemble. Cette thèse pluridisciplinaire analyse les dimensions techniques, économiques et sociales de la performance énergétique des bâtiments basse consommation afin d'agir sur le système avec une intervention regroupant marketing social et Living Lab (LL).

Comment les services énergétiques sont-ils perçus par les consommateurs dans les bâtiments basse consommation ? Sont-ils prêts à co-concevoir des interventions de conservation d'énergie ? Est-ce que ces idées créent de la valeur ? Comment intégrer différentes parties prenantes dans le co-design d'une intervention d'économie d'énergie ? Existe-t-il un « écart de performance sociale » des services énergétiques ? Comment le mesurer ?

Cette thèse est basée sur deux projets de recherche, le projet pilote Energy Living Lab et le projet UserGap utilisant les multiméthodes séquentielles. Une enquête empirique permet de recueillir des données sociodémographiques. Des entretiens qualitatifs en face à face font ressortir les obstacles aux pratiques de conservation d'énergie. Ensuite, une étude de cas analyse le processus de crowdsourcing et mesure la qualité des idées générées. Une deuxième étude de cas analyse l'intégration des différentes parties prenantes dans la co-conception d'un système de gestion de l'énergie du bâtiment. Puis, un nouveau modèle conceptuel sur l'écart de performance énergétique est induit à partir des données.

Nous avons constaté que les consommateurs ne perçoivent pas la qualité des services énergétiques tant que la qualité est bonne. Les services énergétiques ne sont pas fortement liés à la satisfaction de vivre dans des bâtiments à basse consommation. S'ils sont intégrés dans le co-design de solutions, les parties prenantes ont des idées qui créent une valeur sociétale et managériale. Les LLs agissent comme des catalyseurs, des intermédiaires d'innovation pour orchestrer le co-design dans un écosystème d'acteurs. La question clé de la « performance sociale » pourrait être mesurée par la qualité perçue des services énergétiques. Les multi-méthodes séquentielles utilisées dans cette thèse ne sont pas faciles à reproduire. Les résultats sont limités au secteur du bâtiment à basse consommation. Les études de cas n'ont pas pour but d'être généralisées mais sont exploratoires. Elles devraient être suivies d'une quasi-expérimentation pour généraliser les résultats dans d'autres régions et mesurer l'impact du processus de co-design.

La recommandation à la société de construction, au fournisseur d'énergie et de label énergétique est d'intégrer les parties prenantes dans la co-conception des bâtiments à basse consommation et des interventions de conservation de l'énergie. Une boucle de feedback pourrait réduire l'écart de performance des bâtiments existants et une boucle de feedforward pourrait aider à la conception



des futurs services énergétiques. Les implications sociétales pourraient être la diminution des émissions de CO₂, une meilleure intégration du consommateur comme co-créateur de valeur. L'intégration des parties prenantes pourrait également augmenter l'adoption sociale. Cette thèse explore le processus de co-design dans le secteur des services énergétiques dans les bâtiments à basse consommation. Elle propose un nouveau modèle conceptuel pour comprendre l'écart de performance énergétique. La méthode du marketing social dans un LL permet de développer un nouveau processus d'innovation dans le secteur des services énergétiques. »

Cimmino, F. M., (2019), *Forecasting electrical load curves based on consumption cluster and user profile. A test for a Virtual Power Plant*, in Essays on the creation of a virtual power plant for small and medium enterprises, PhD Thesis, University of Marseille.

Dupont, L., Mastelic, J., Nyffeler, N., Latrille, S. & Seulliet, E. (2019). Living lab as a support to trust for co-creation of value: application to the consumer energy market [1]. *Journal of Innovation Economics & Management*, 28, 53-78. <https://doi.org/10.3917/jie.028.0053>

Mastelic, J., Genoud, S., Cimmino, F.M., Previdoli, D., Fragnière, E., (2016), *Perceived value of energy efficiency technologies in a sustainable neighborhood: an empirical enquiry from the Energy Living Lab*, Conference Proceedings, Open Living Lab Days 2016, Montreal.

Mastelic, J., Genoud, S., (2019), The value of participatory approaches in developing energy services, proceedings of the Conference, Open Living Lab Days 2019, Thessaloniki, September 2019.



10 Bibliographie

Burman, E., Mumovic, D., & Kimpian, J. (2014). Towards measurement and verification of energy performance under the framework of the European directive for energy performance of buildings. *Energy*, 77, 153–163. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.102>

de Wilde, P. (2014). The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation, *Automation in Construction*, 41, 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.02.009>

Jaffe, A. B, Stavins, R.N. (1994). The energy-efficiency gap: What does it mean? *Energy Policy*, 22, 804-810. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(94\)90138-4](https://doi.org/10.1016/0301-4215(94)90138-4)

Martilla, J.A., & James, J.C. (1977). Importance-Performance Analysis. *Journal of Marketing*, 41(1), 77-79. <https://doi.org/10.2307/1250495>

Mastelic, J., (2018), *A Conceptual Model Analysing Building-in-Use to Act on Energy Performance Gap*, European Social Marketing Conference, Antwerp, September 2018

Mastelic, J. (2019), Stakeholders' engagement in the co-design of energy conservation interventions: The case of the Energy Living Lab, Doctoral Thesis, University of Lausanne.

Parasuraman, A., Zeithaml, V. A., & Berry, L. L. (1988). Servqual: A multiple-item scale for measuring consumer perceptions of service quality. *Journal of Retailing*, 64(1), 12-40. Retrieved from <https://search.proquest.com/docview/228609374?accountid=15920>

Patterson, M. G. (1996). What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues. *Energy Policy*, 24(5), 377–390. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(96\)00017-1](https://doi.org/10.1016/0301-4215(96)00017-1)



11 Annexes

La **Figure 14** présente la **structure des annexes**. Le premier volet s'est intéressé uniquement à un bâtiment (B1.2), mais avec une analyse détaillée de ses consommations associées à son besoin de chaleur. En parallèle, des analyses des pratiques des utilisateurs sur l'éco-quartier complet de Gland (VD) ont permis d'approfondir l'écart de performance lié aux habitants, l'analyse des consommations électriques, les analyses économétriques et le co-design de solutions énergétiques avec les habitants du quartier.

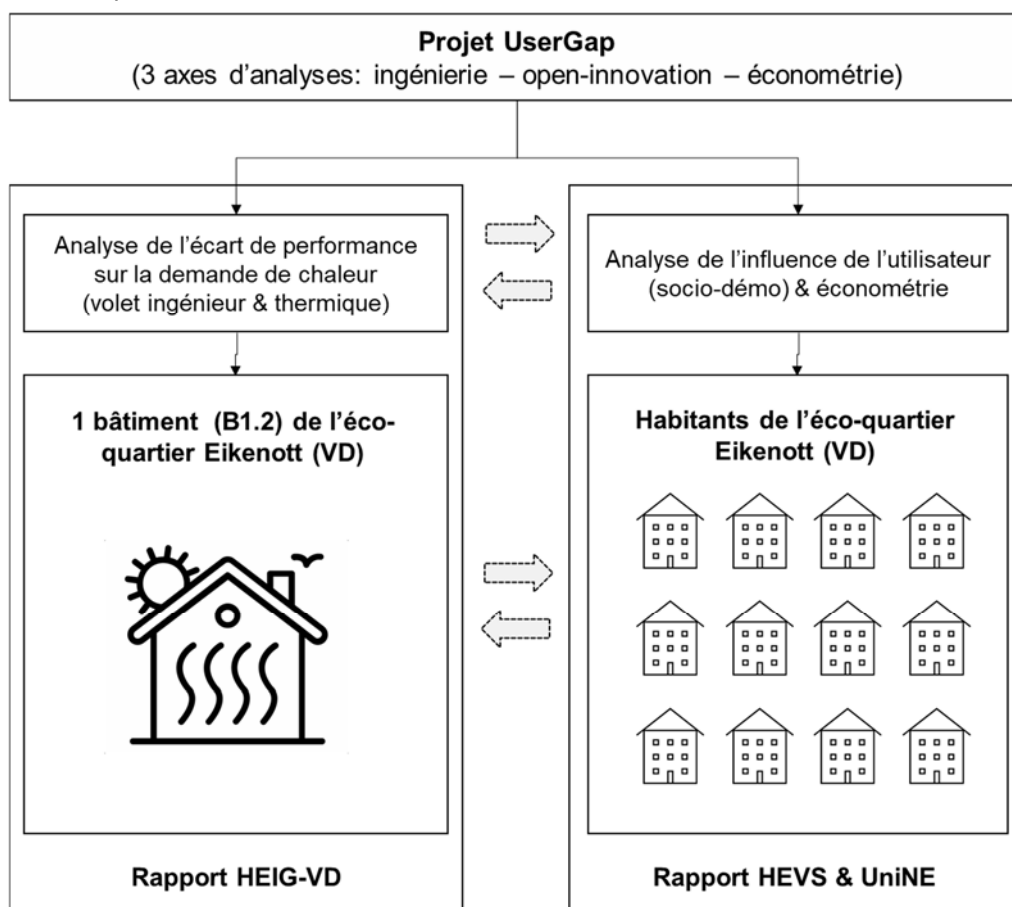


Figure 14 : Etudes de cas considérés dans le projet UserGap pour les différentes échelles

- Annexe 1** Echelle MESO (le bâtiment). Ce volet présente l'analyse détaillée d'un bâtiment du quartier Eikenott de Gland (VD). Un rapport dédié a été rédigé par la HEIG-VD.
- Annexe 2** Echelles MACRO et MICRO (le quartier, le ménage). La seconde annexe détaille l'influence des utilisateurs au niveau du quartier (analyses économétriques) et au niveau des ménages (sondage et entretiens qualitatifs) et la manière d'agir sur l'EdP à l'aide de l'innovation ouverte



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 :

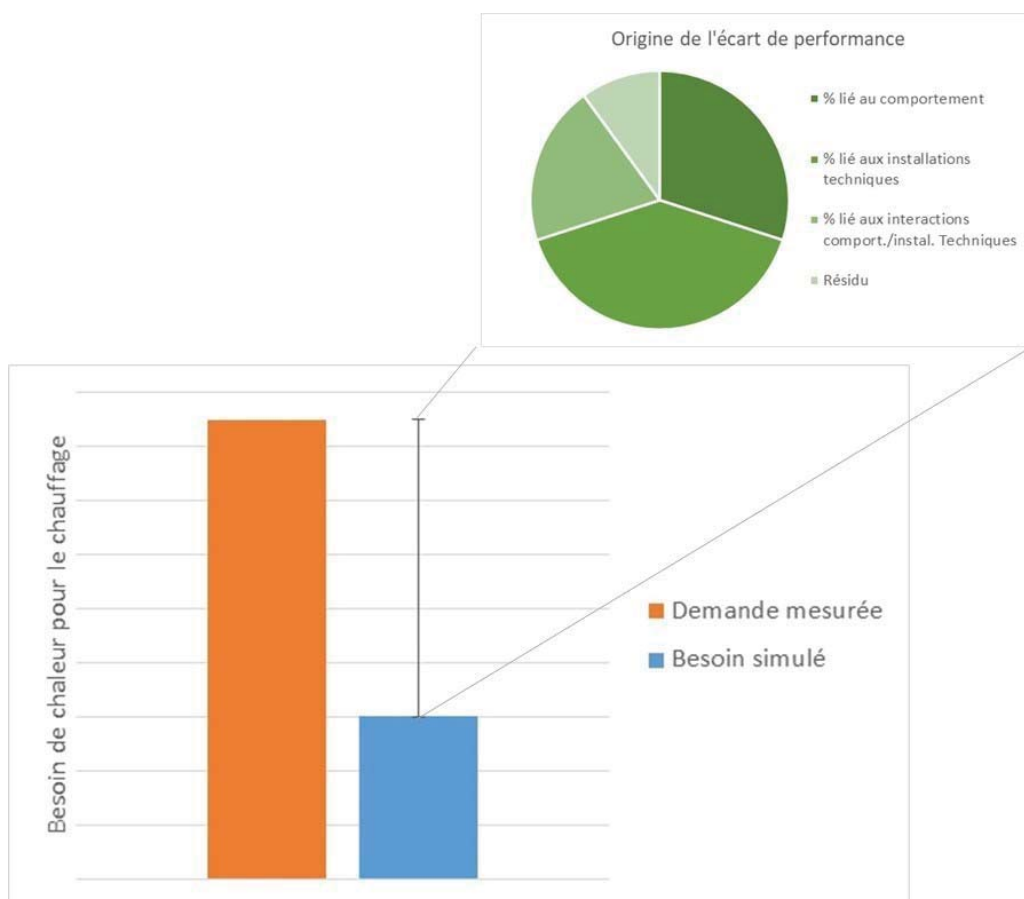


Figure 1: Représentation de l'écart de performance énergétique entre calcul théorique et consommation réelle pour un bâtiment (les parts sont données à titre d'illustration à la problématique).

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)

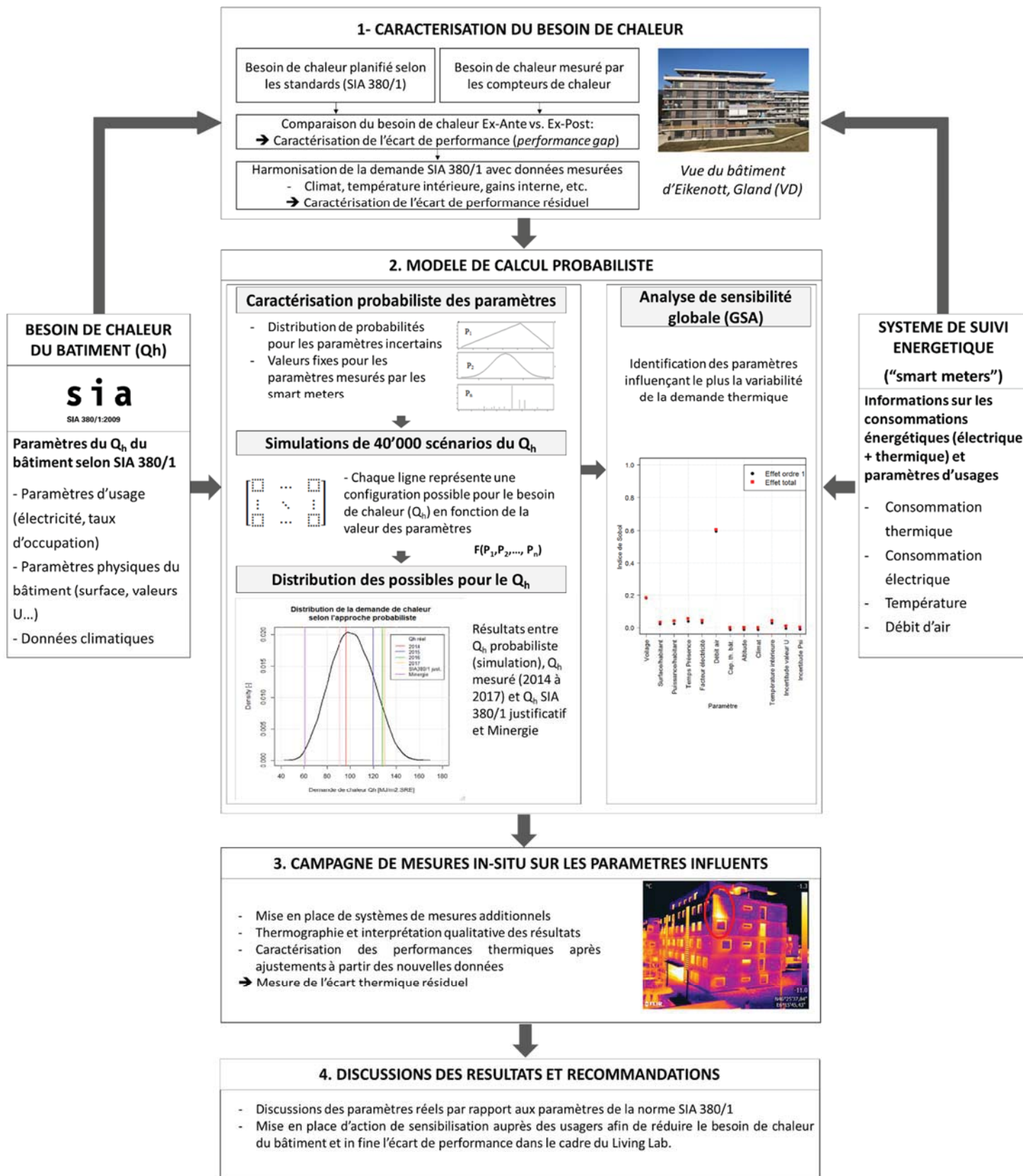


Figure 2: Structure du travail d'analyse des performances énergétiques du bâtiment.

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	m ²		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	m ² _{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/m ² _{SRE}		100
Facteur de réduction des besoins d'électricité	-		0.7
Débit d'air thermiquement actif	m ³ /(h·m ² _{SRE})	0.7	0.33
Débit d'air moyen	m ³ /h	-	2400
Rendement de récupération de chaleur	%	-	80
Présence d'un puits canadien	-	-	Non
Infiltration de base Minergie	m ³ /(h·m ² _{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/m ² _{SRE}	90.8	-
Besoin de chaleur efficace (Q _{h,eff})	MJ/m ² _{SRE}	-	60.7
Besoin de chaleur utile pour l'ECS	MJ/m ² _{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/m ² _{SRE}	-	15.8
Gaz à condensation	kWh/m ² _{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/m ² _{SRE}	-	19.6
Gaz à condensation	kWh/m ² _{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 :

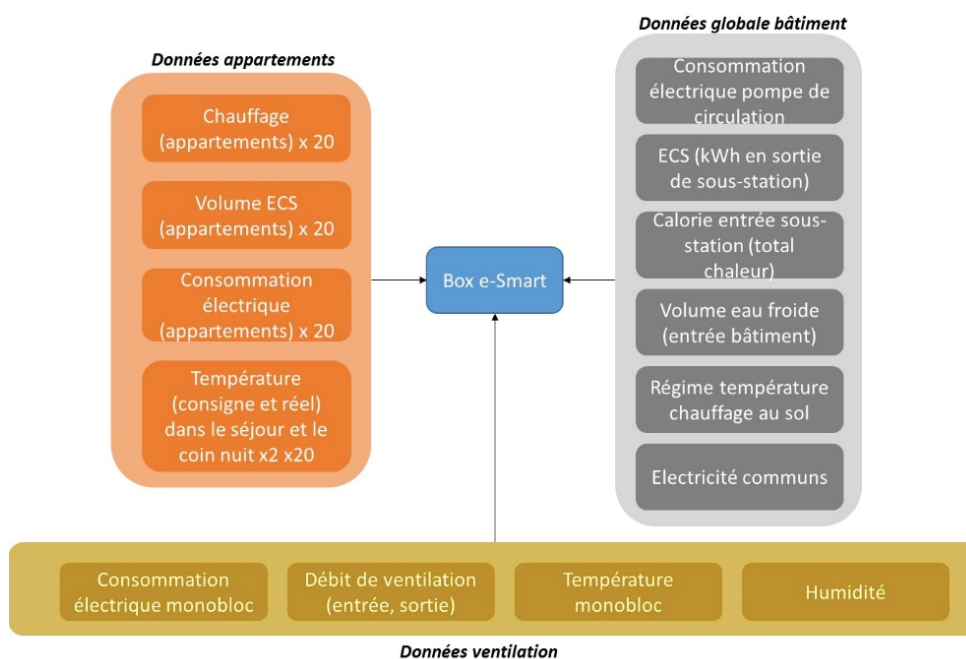


Figure 4: Schéma du système de suivi énergétique.

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

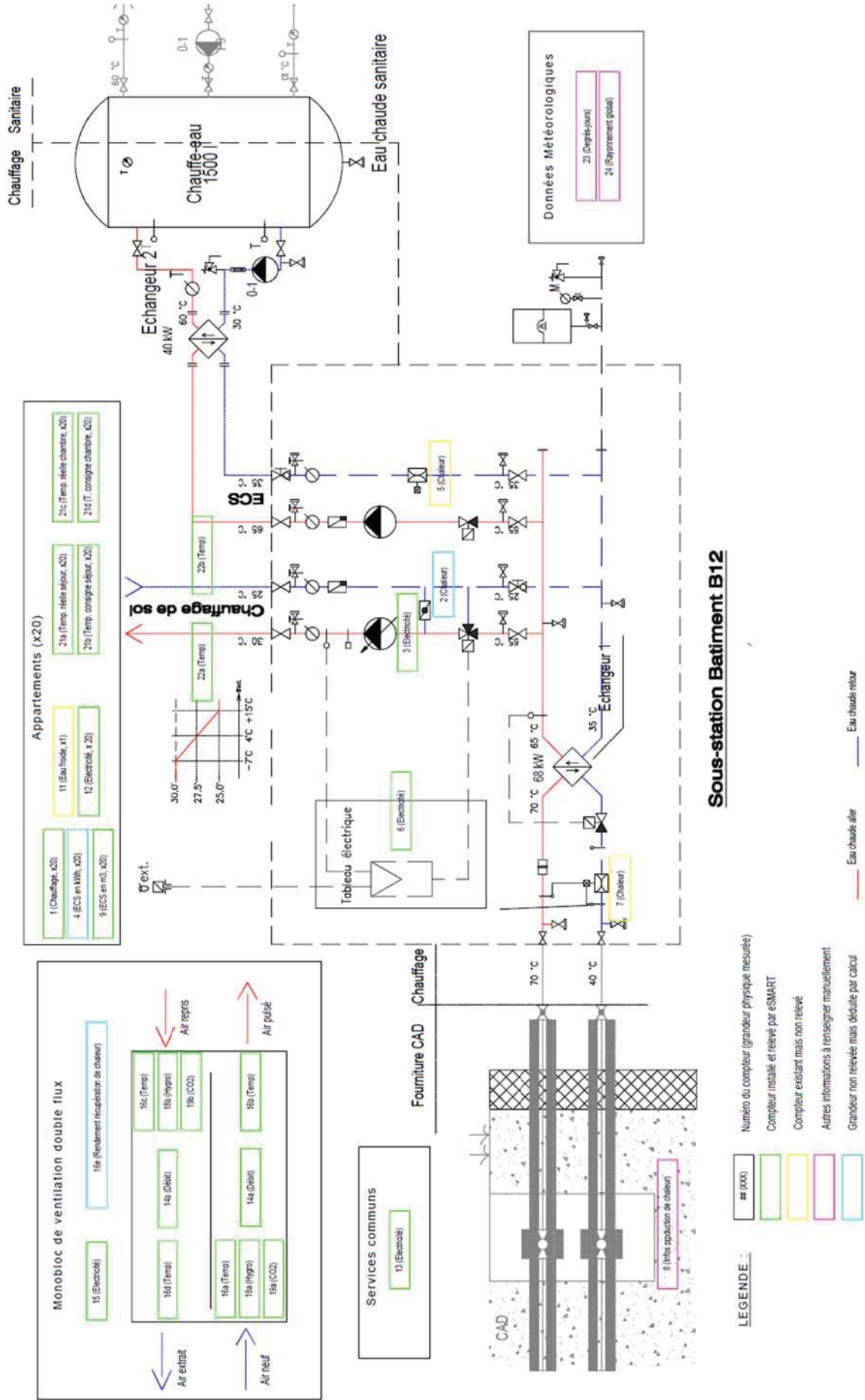


Figure 5: Schéma de principe du suivi énergétique.

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 :

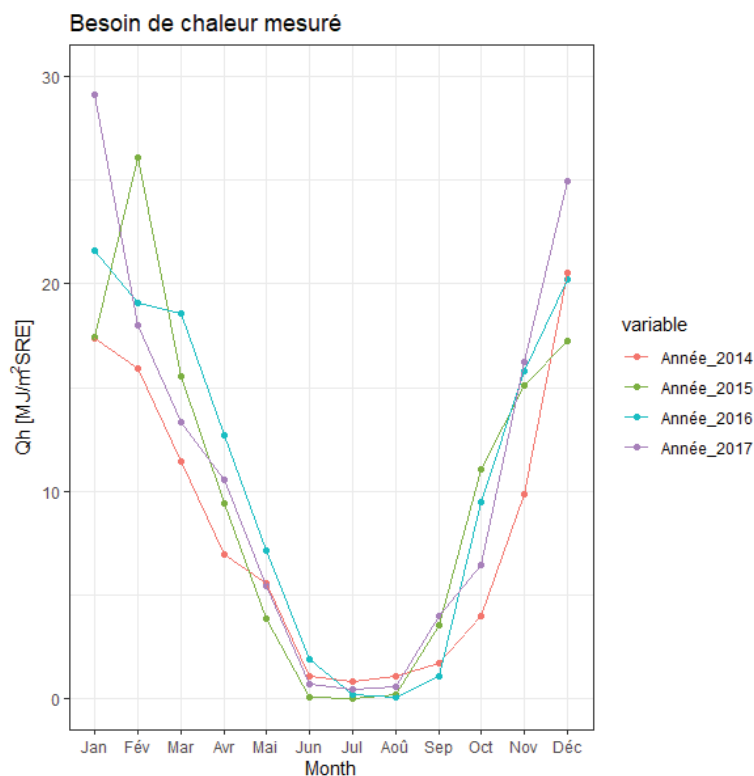


Figure 6: Demande de chauffage mensuelle mesurée par le système de suivi

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.

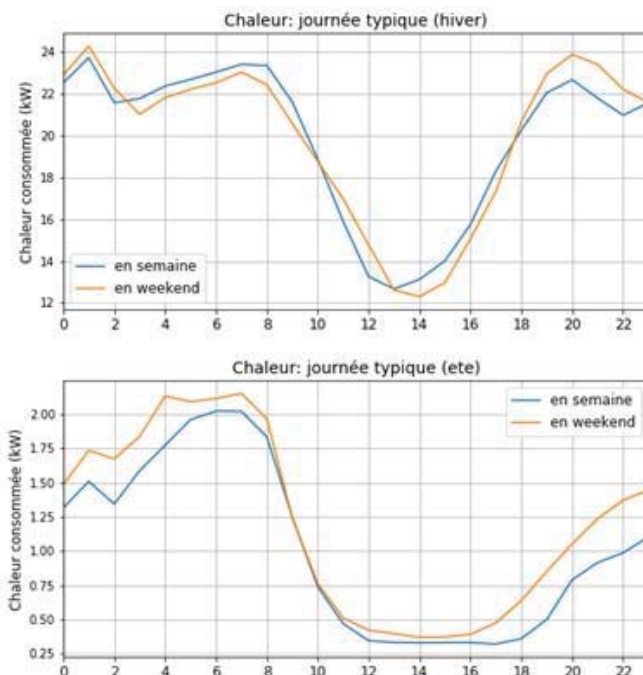


Figure 7 Profil journalier de demande de chaleur typique pour le chauffage.

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.

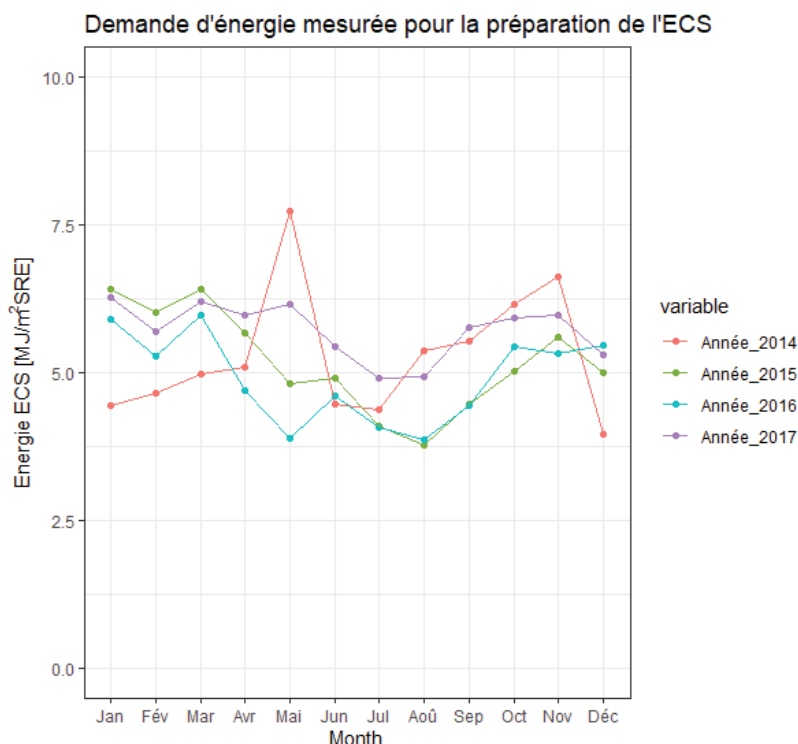


Figure 8: Demande de chaleur pour l'ECS mesurée par le système de suivi.

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.

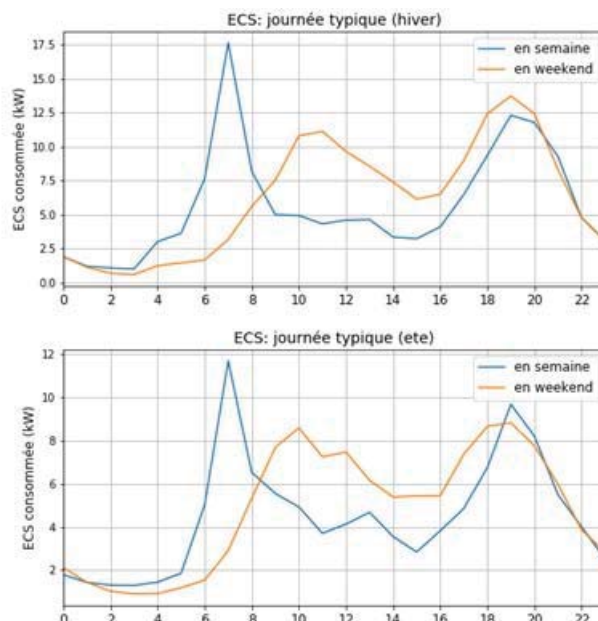


Figure 9: Profil journalier typique de la demande de chaleur pour la production d'ECS.

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 :

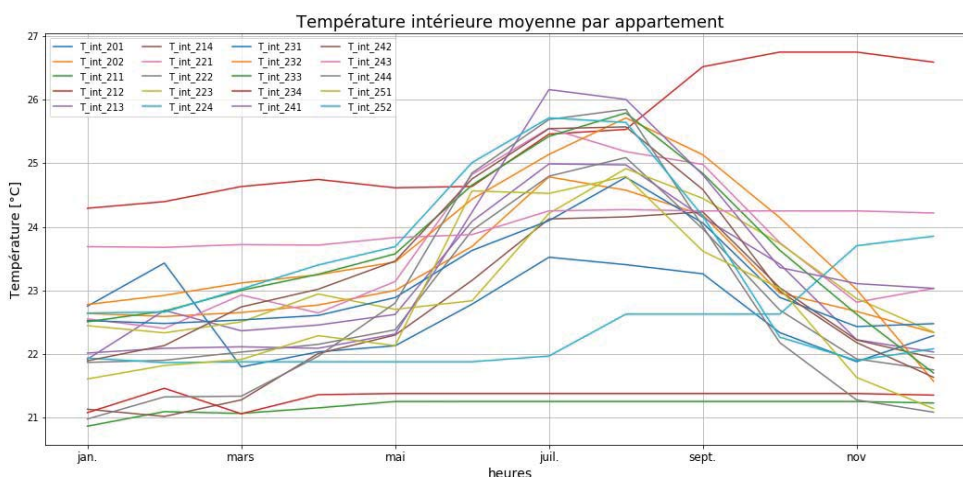


Figure 10: Température moyenne mensuelle par appartement.

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 :

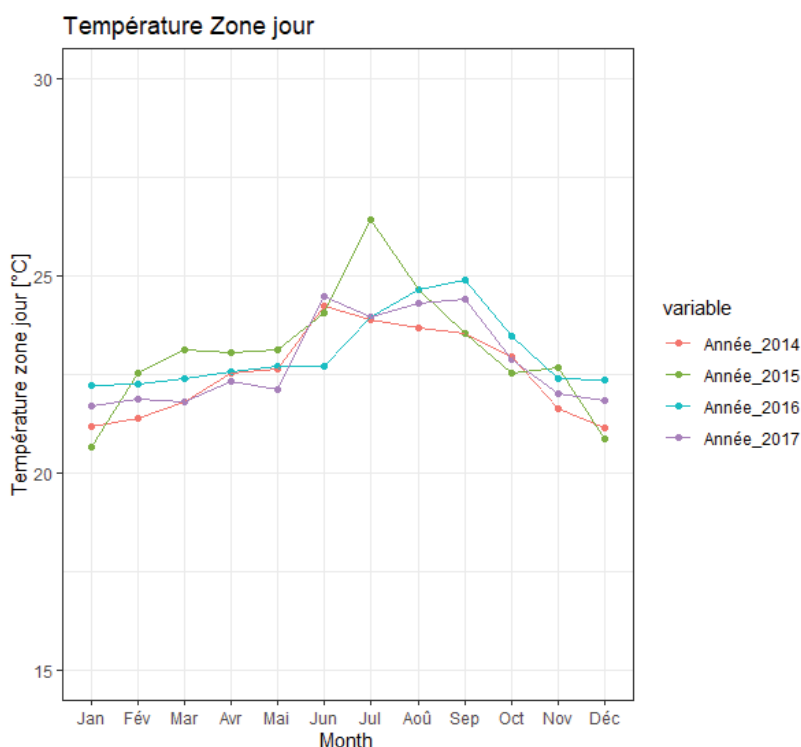


Figure 11: Température zone jour moyenne mesurée par le système de suivi.

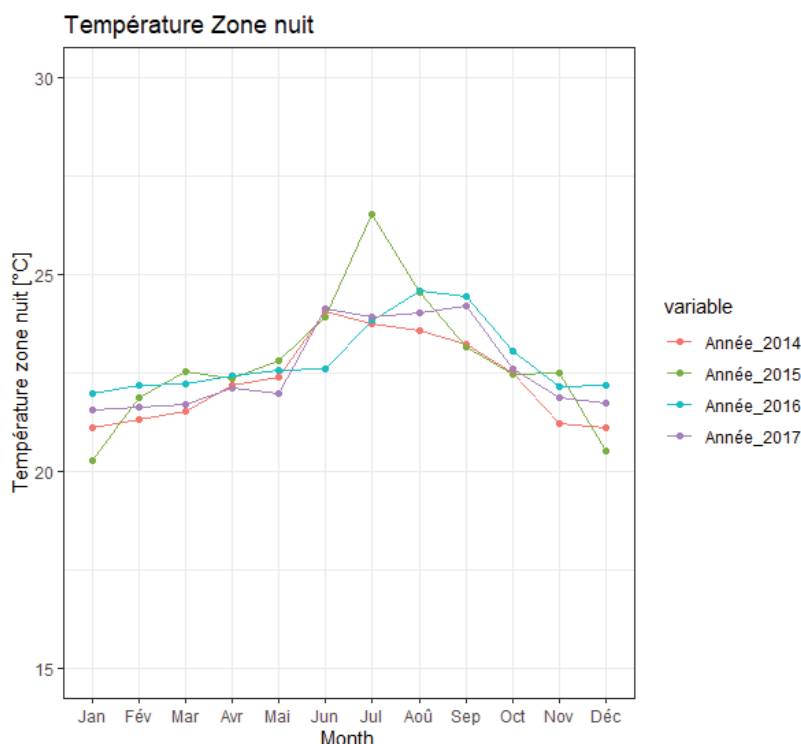


Figure 12: Température moyenne de la zone nuit mesurée par le système de suivi.

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.

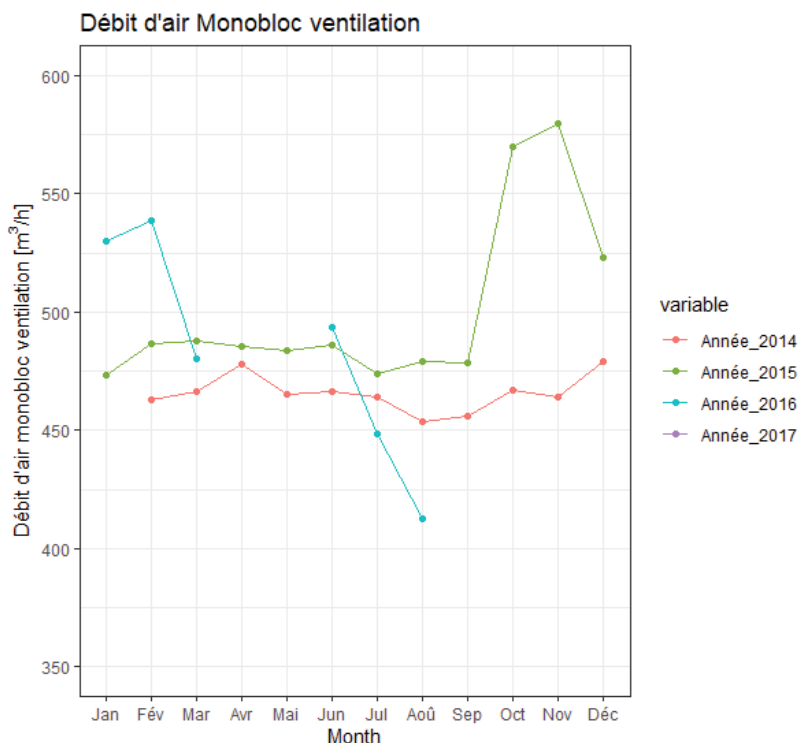


Figure 13: Débit d'air au monobloc de ventilation mesuré par le système de suivi.

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.

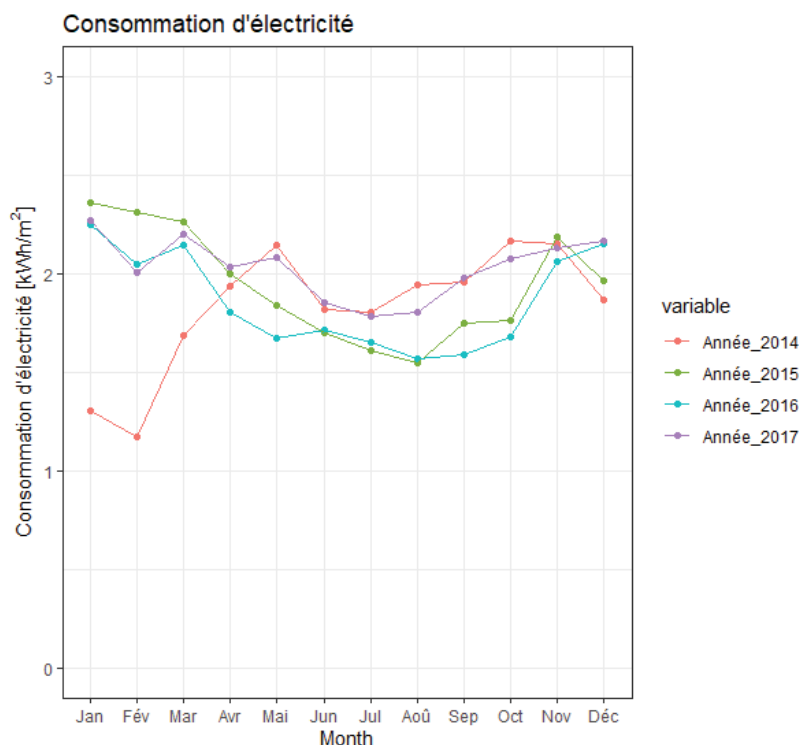


Figure 14: Consommation d'électricité spécifique du bâtiment (somme des 20 compteurs des logements).

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:

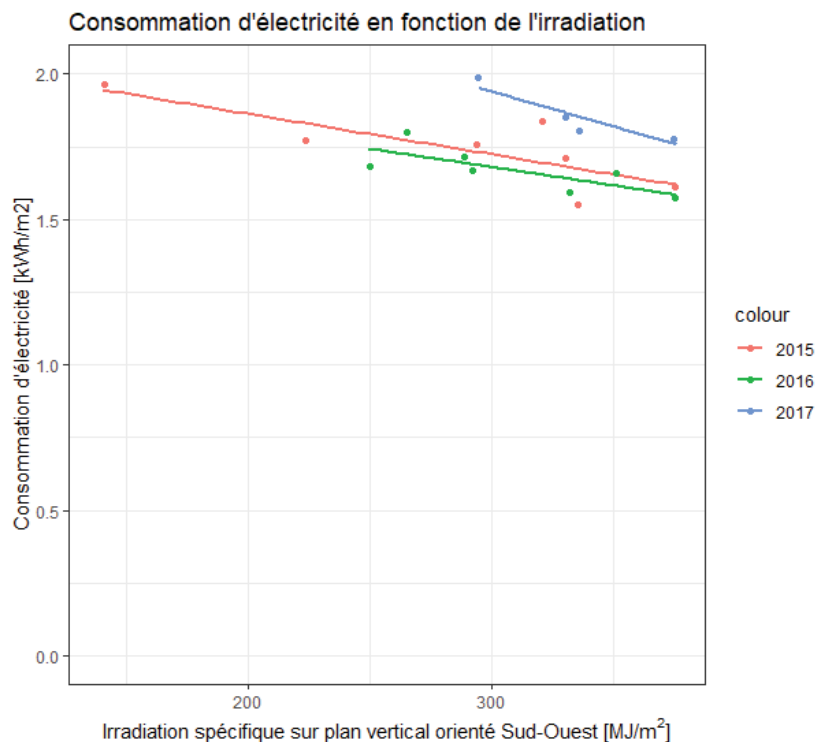


Figure 15: Consommation d'électricité spécifique du bâtiment en fonction de l'irradiation reçue sur la façade sud-ouest.

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 :

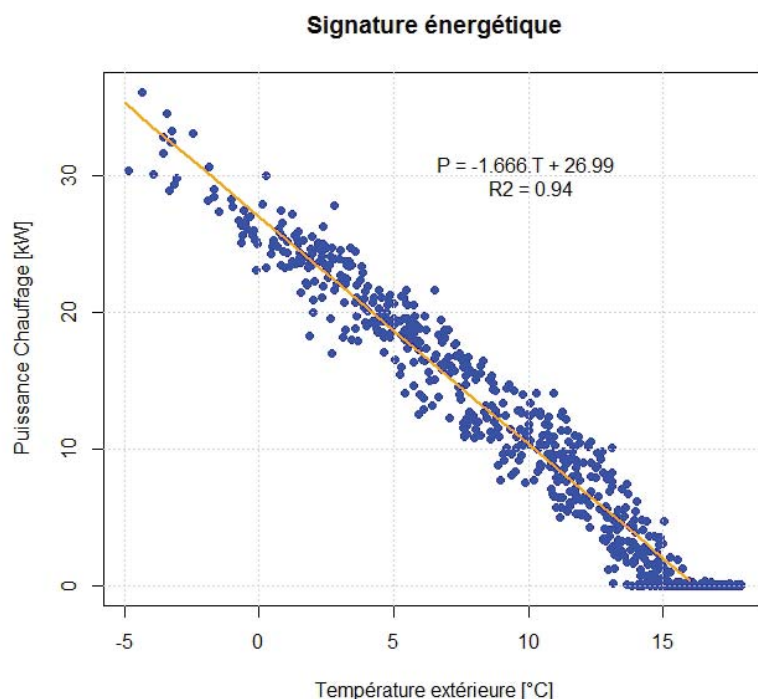


Figure 16: Signature énergétique du bâtiment B1.2 d'Eikenott.

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.

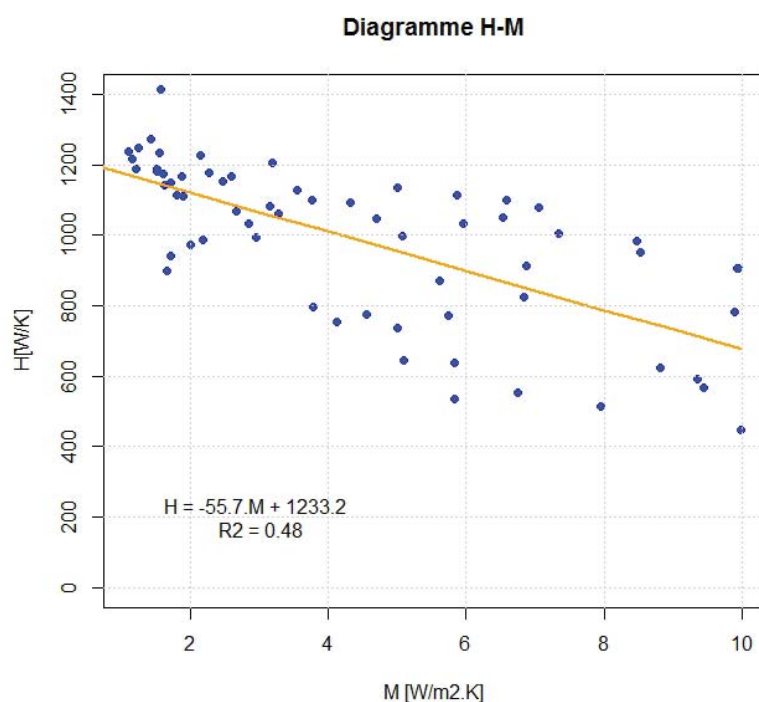


Figure 17: Diagramme H-M du bâtiment B1.2 d'Eikenott.

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 _{h,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 :

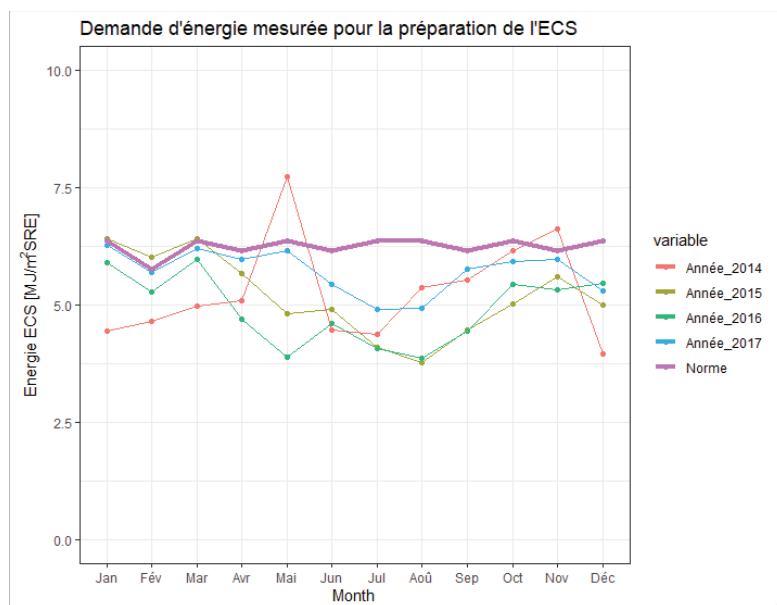


Figure 18: Besoin de chaleur mensuel pour la production d'ECS pour le calcul normatif (SIA 380/1) et les années de mesure 2014 à 2017.

	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 :

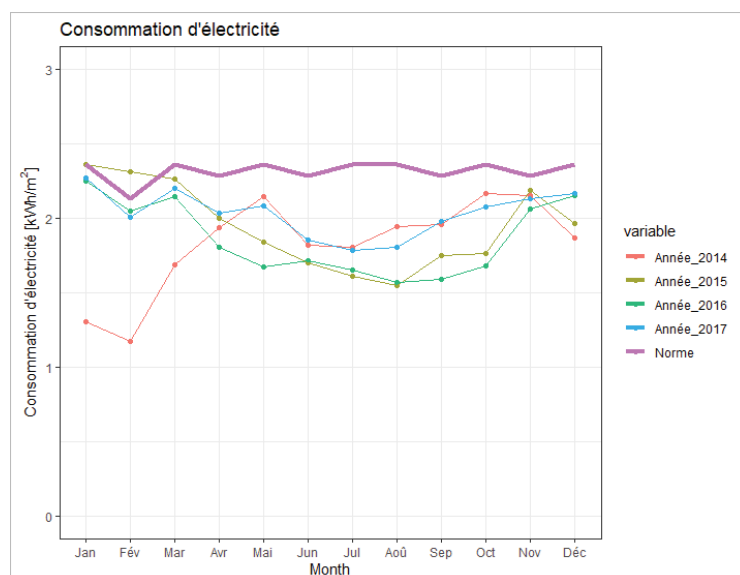


Figure 19: Consommation électrique mensuelle pour le calcul normatif (SIA 380/1) et pour les années de mesures 2014 à 2017.

	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)

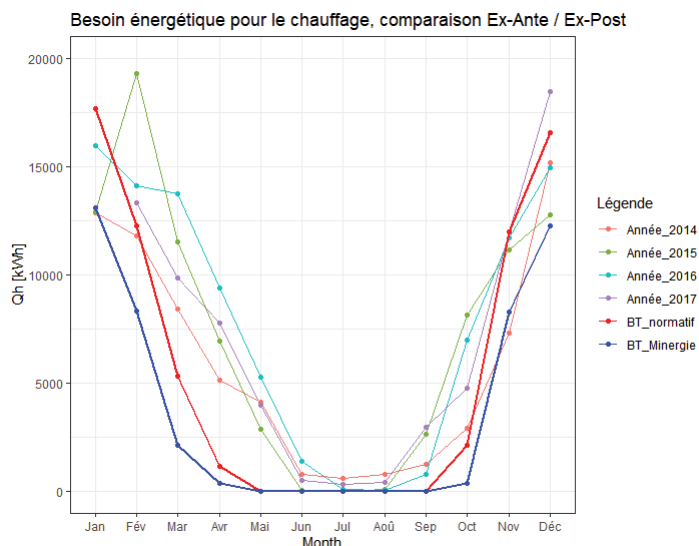


Figure 20: Besoin de chaleur mensuel pour le chauffage selon le bilan thermique (BT) normatif (SIA 380/1) et la demande Minergie et les années de mesure 2014 à 2017.

	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") :

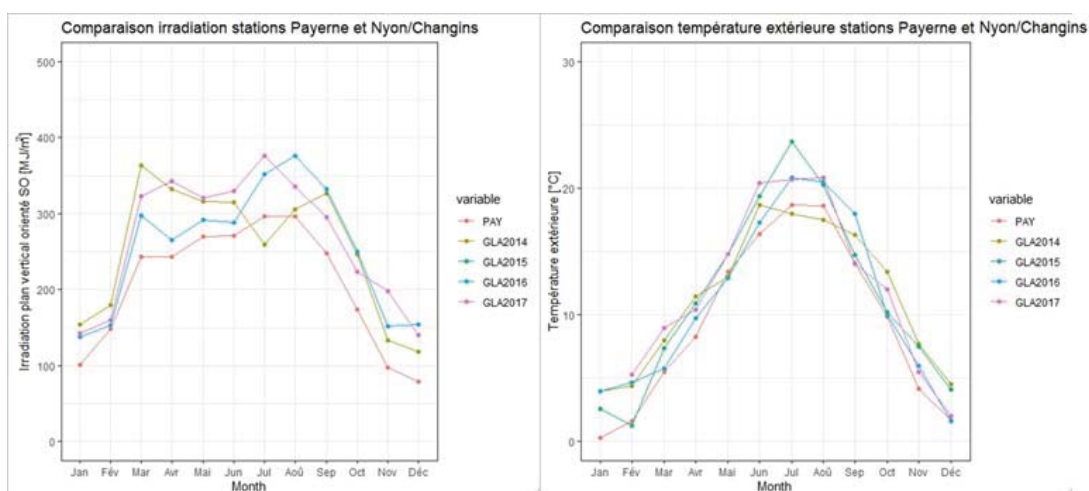


Figure 21: Comparaison de l'irradiation (gauche) et de la température extérieure (droite) pour la station de référence de la SIA 380/1 *Justificatif* (Payerne) et pour la station à proximité du bâtiment pour 2014 à 2017 (Nyons Changins).

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:

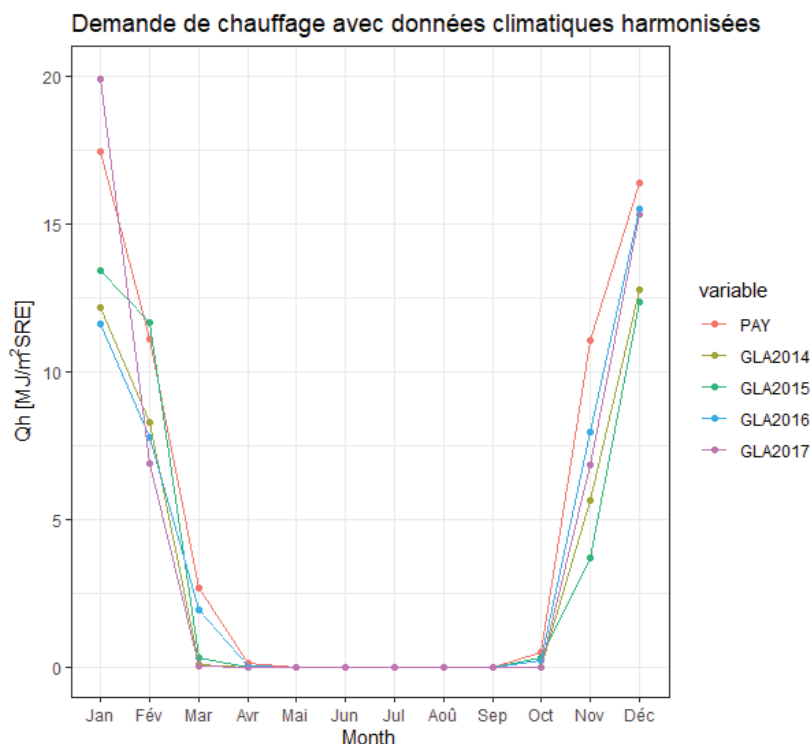


Figure 22: Besoin de chaleur mensuel pour le chauffage avec les données météorologiques de la station de Nyon/Changins (scénario S1).

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.

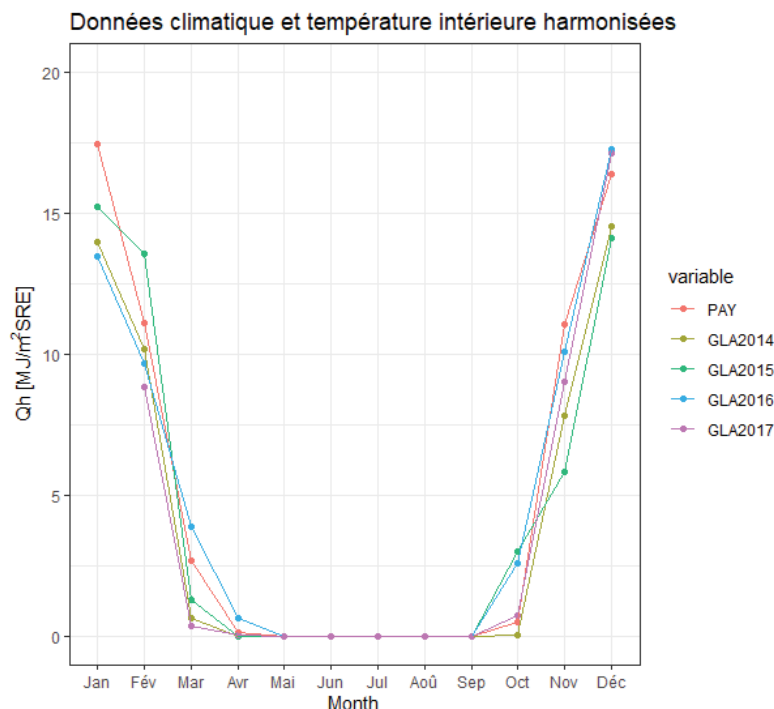


Figure 23: Besoin de chaleur mensuel pour le chauffage avec les données météorologiques de la station de Nyon/Changins et la température intérieure mesurée par les smart meters (scénario S2).

	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.

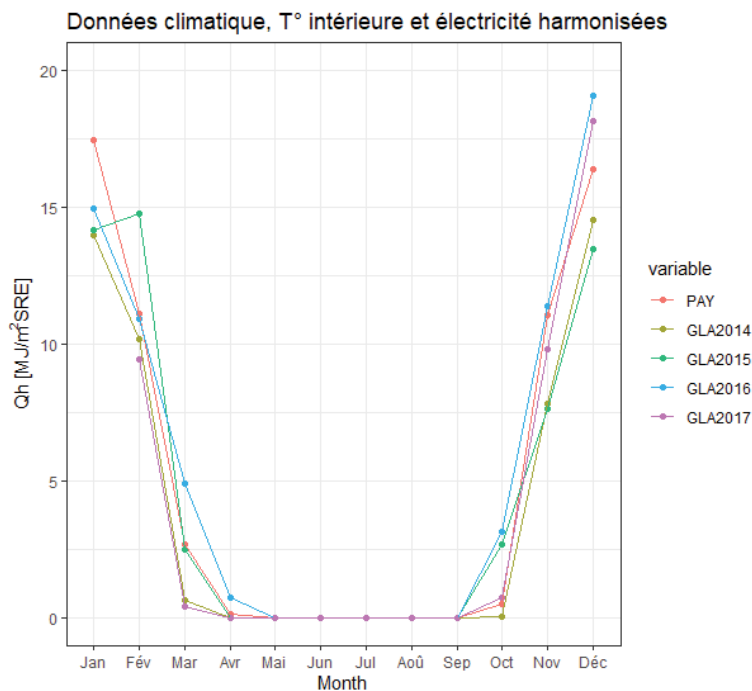


Figure 24: Besoin de chaleur mensuel pour le chauffage avec les données météo de Nyon/Changins, la température intérieure et la consommation électrique mesurées par les smart meters (scénario S3).

	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 :

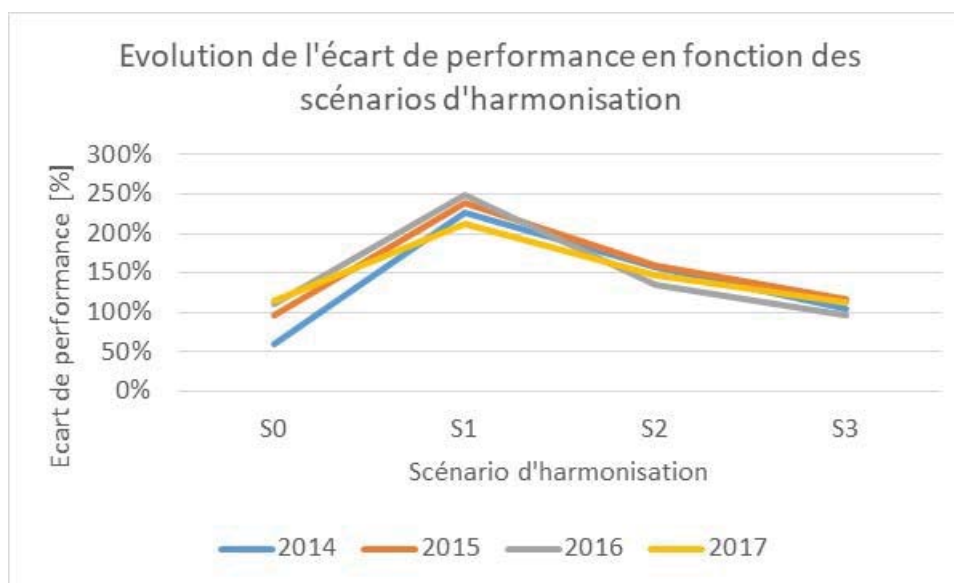


Figure 25: Evolution de l'écart de performance en fonction des différents scénarios (S0, S1, S2, S3).

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 :

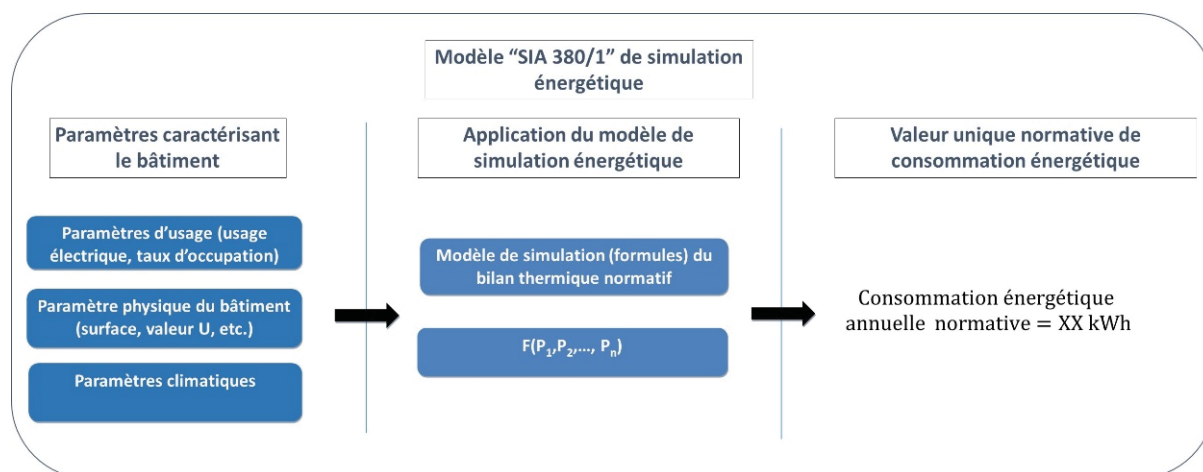


Figure 26 : Modèle déterministe de simulation énergétique selon la SIA 380/1.

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 :

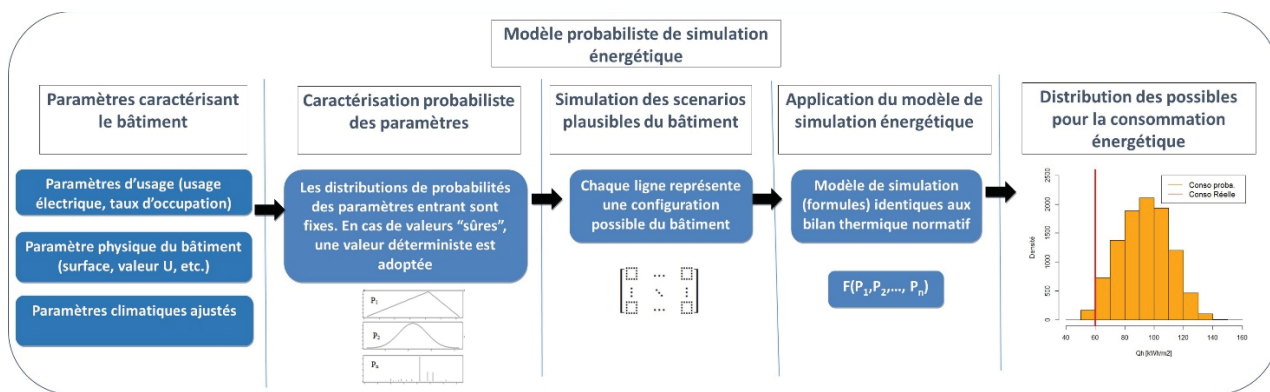


Figure 27 : Etapes de calcul d'un modèle probabiliste permettant de définir la distribution de probabilité de la consommation énergétique du bâtiment selon la SIA 380/1.

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 :

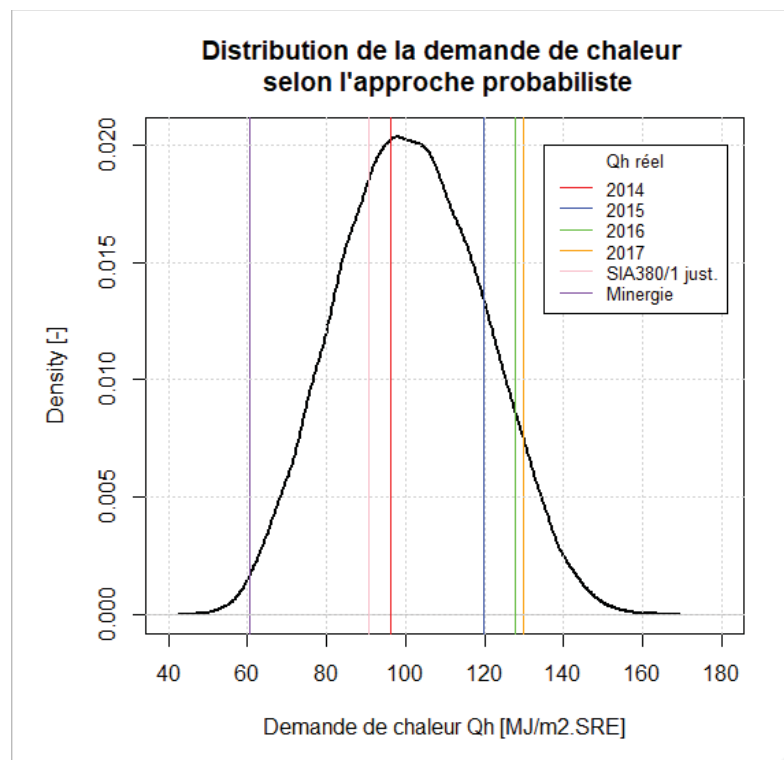


Figure 28 : Distribution de la demande de chaleur spécifique du cas d'étude obtenu par le modèle probabiliste développé.

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 :

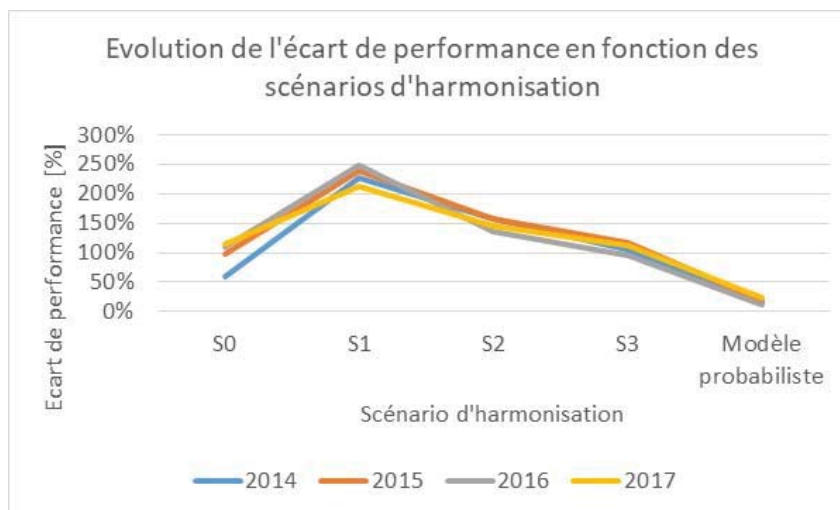


Figure 29 : Evolution de l'écart de performance en fonction des scénarios d'harmonisation et du modèle probabiliste.

	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 :

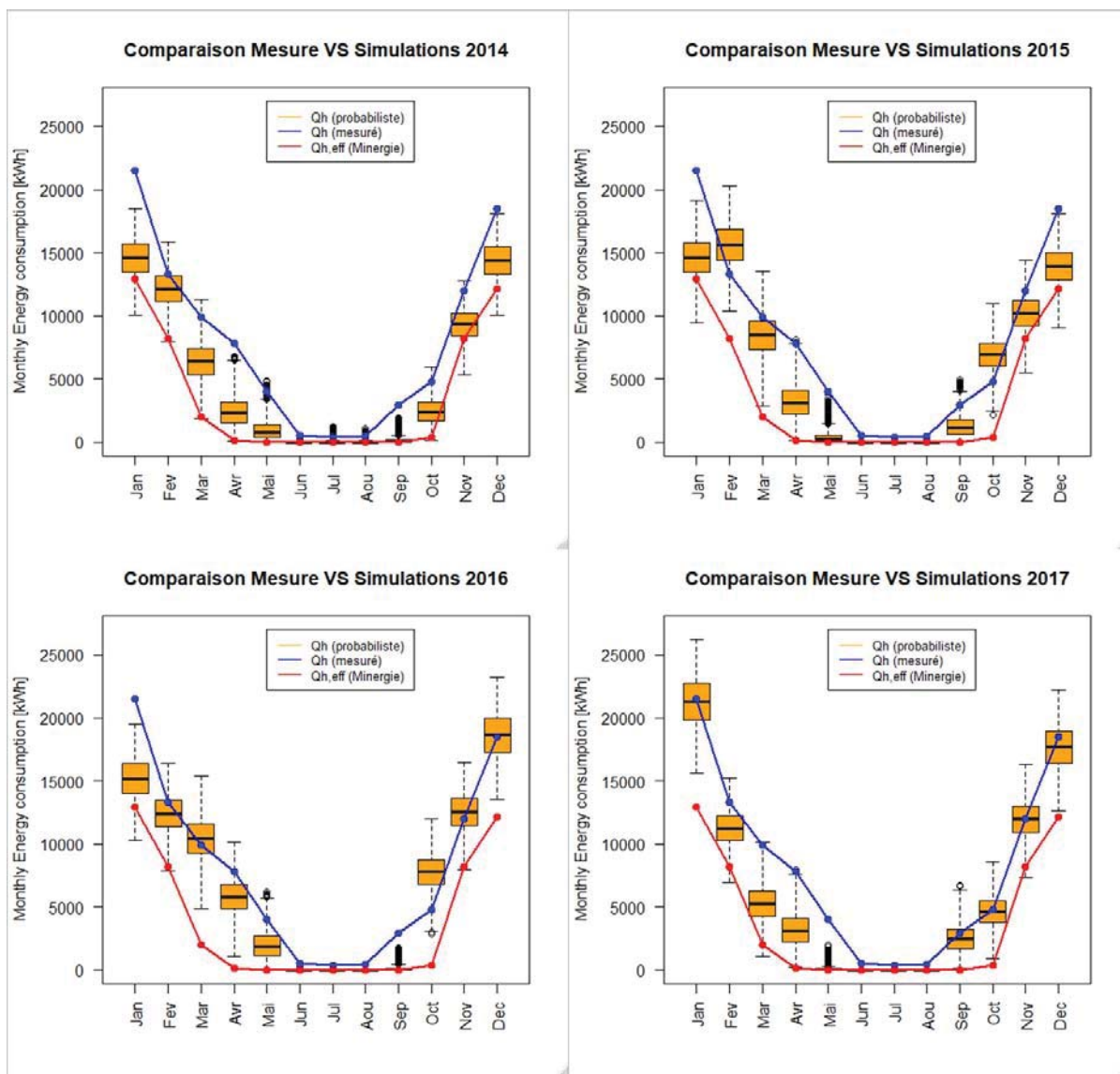


Figure 30 : Résultats de la demande de chaleur probabiliste, calculée selon la norme SIA 380/1 *Justificatif* ("Qh eff Minergie") et mesurée ("Qh mesuré") de 2014 à 2017.

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 définies 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 :

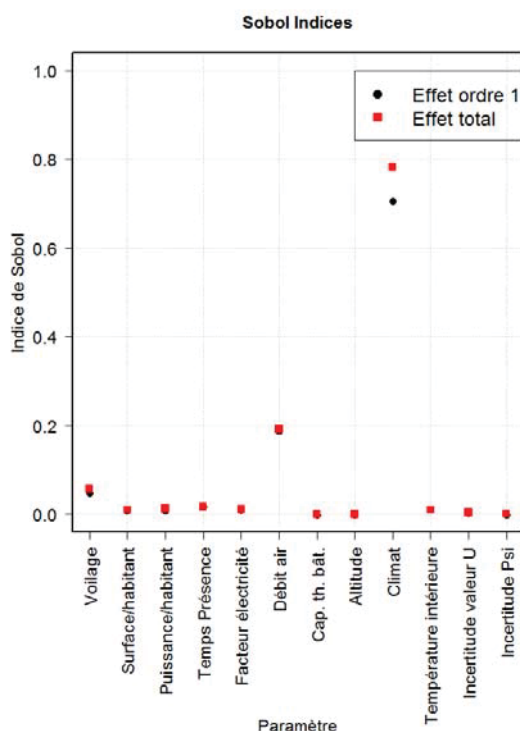


Figure 31: Décomposition de la variance incluant le climat des années 2014 à 2017 comme variable.

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 :

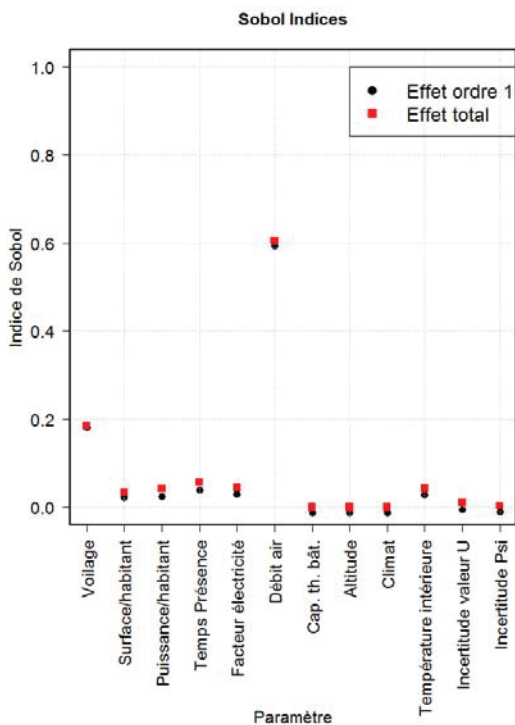


Figure 32: Décomposition de la variance pour l'année 2016.

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

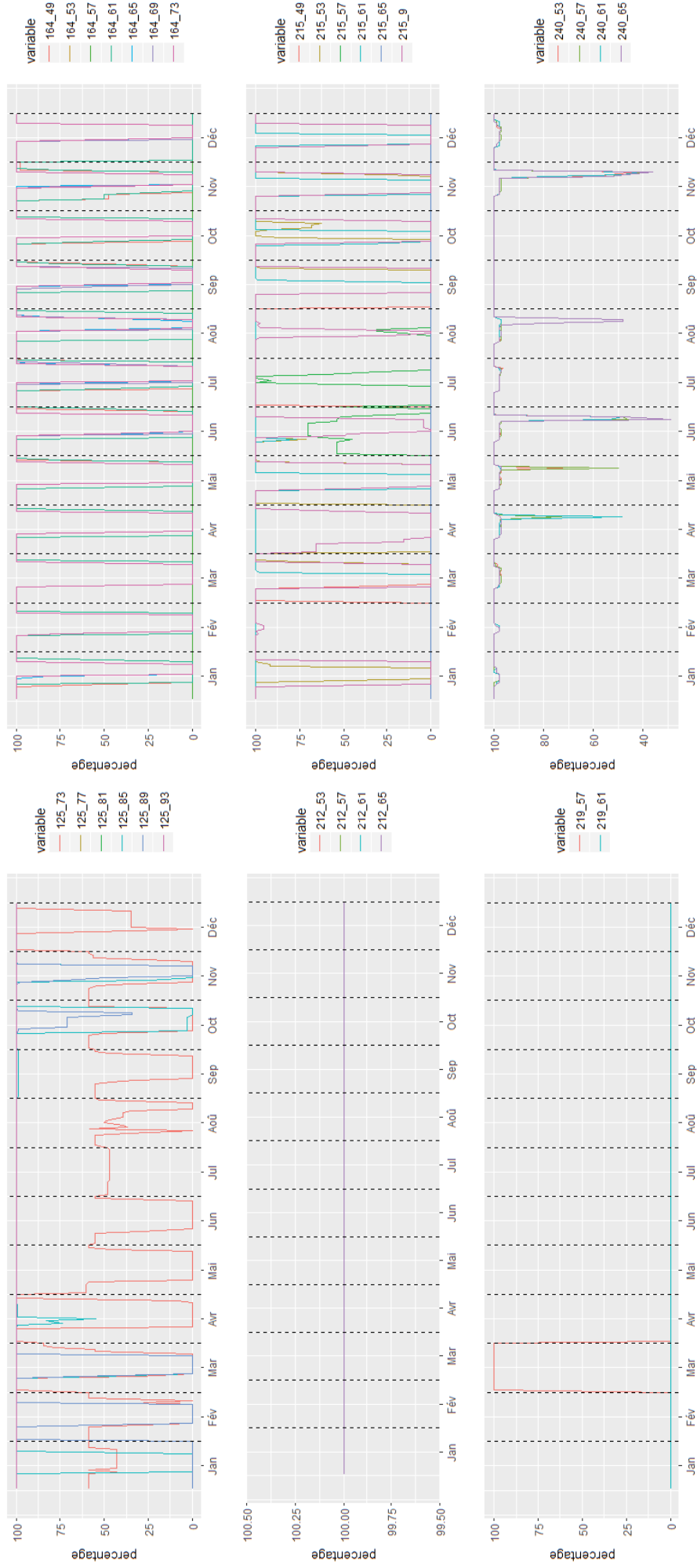


Figure 34: Position des stores pour des jours types chaque mois par fenêtre, un graphique par appartement (100% : store ouvert, 0% store baissé).

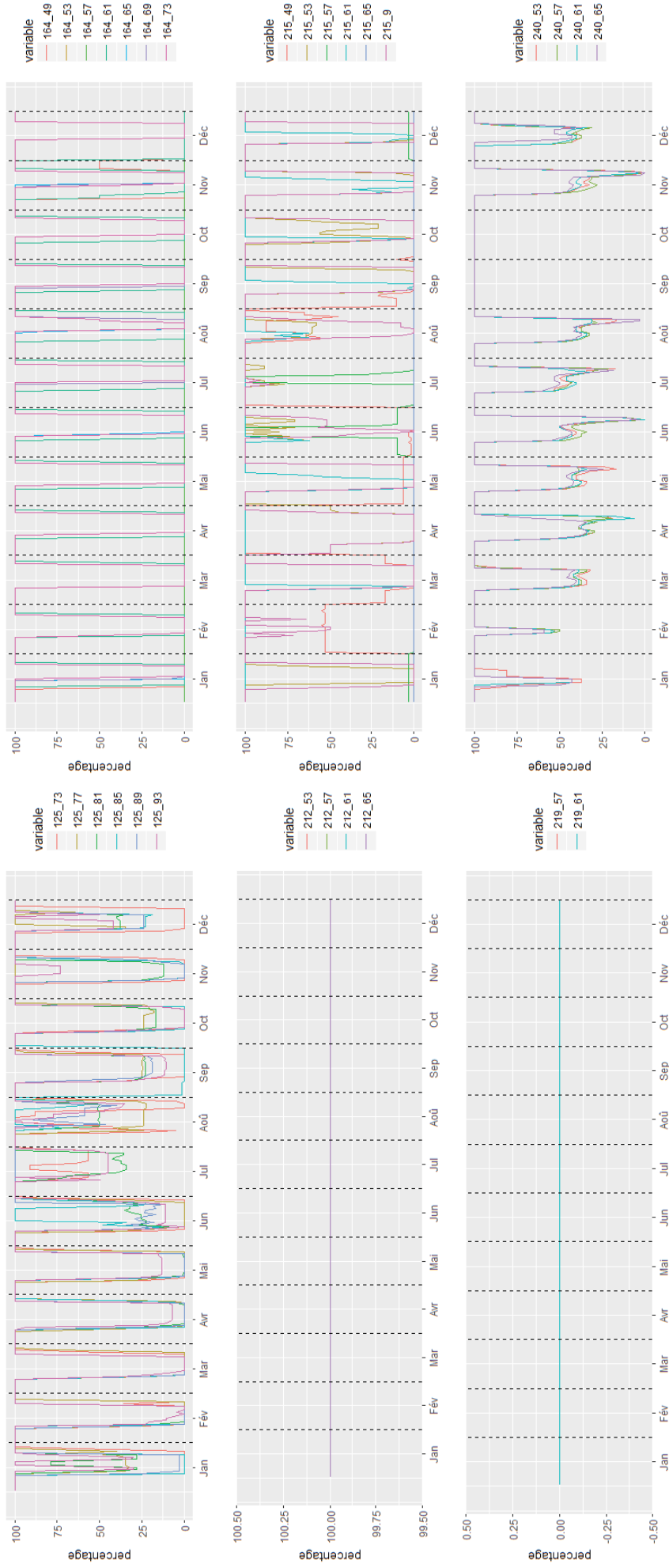


Figure 35: Orientation des stores pour des jours types chaque mois par fenêtre, un graphique par appartement (100% : store ouvert, 0% store baissé).

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.

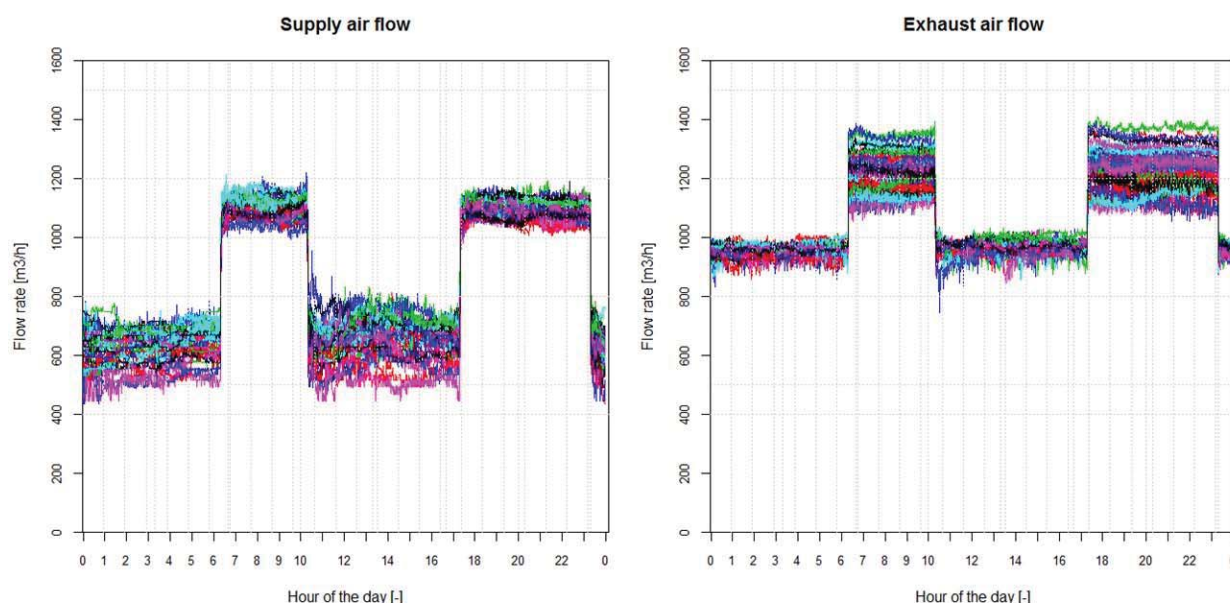


Figure 36: Débits d'air pulsé ("supply") et repris sur l'air vicié ("exhaust") mesurés à l'aide de l'acquisiteur initial installé.

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.

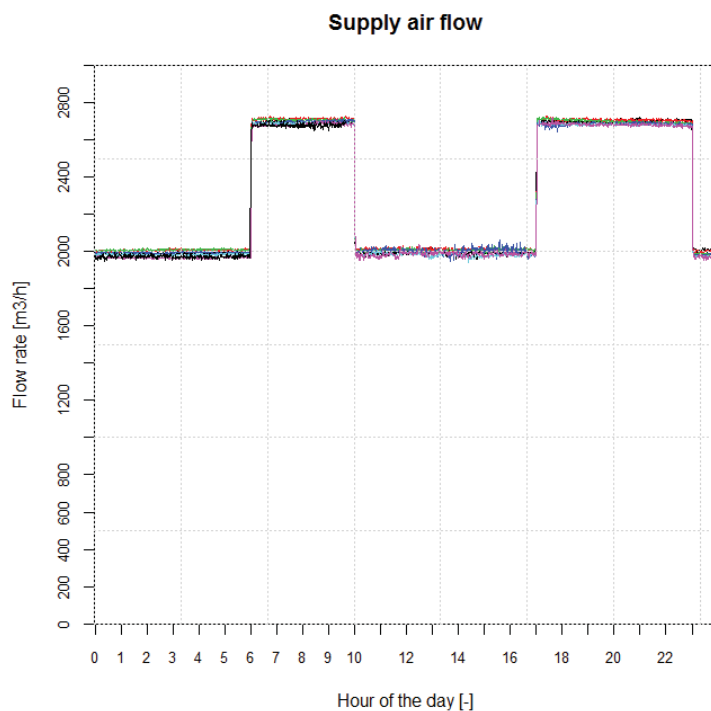


Figure 37: Débits d'air mesurés à l'aide à l'aide du capteur de pression différentielle (air pulsé, fourni au bâtiment).

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:

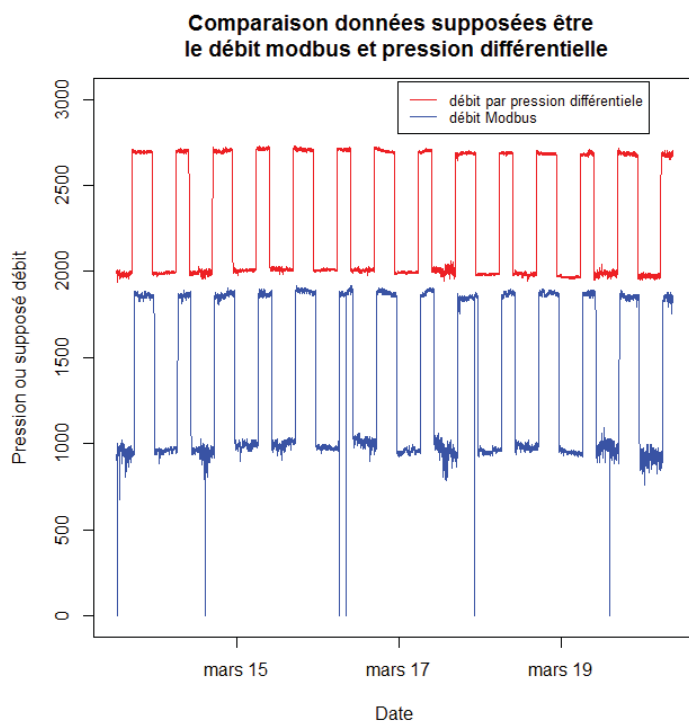


Figure 38: Comparaison des débits mesurés selon le capteur de pression différentielle et ceux collectés via le système de suivi connecté en Modbus à l'automate de régulation (côté air pulsé, fournit au bâtiment).

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 :

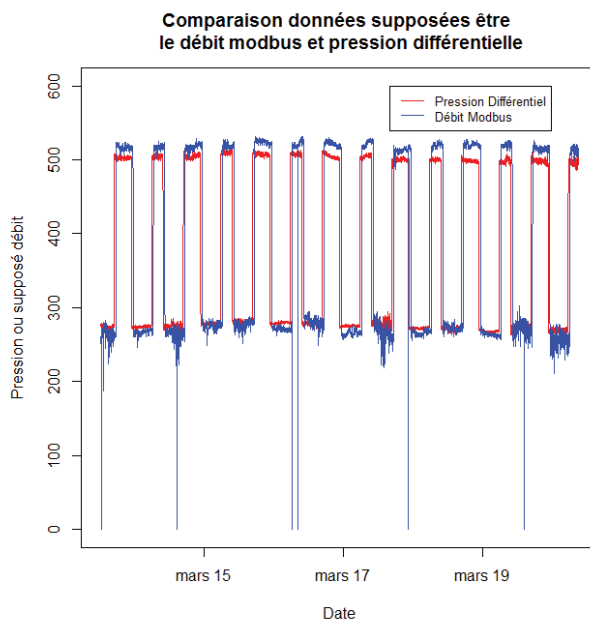


Figure 39: Comparaison des données du capteur de pression différentielle avec le débit (en fait pression différentielle) collecté sur l'automate de régulation.

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 :

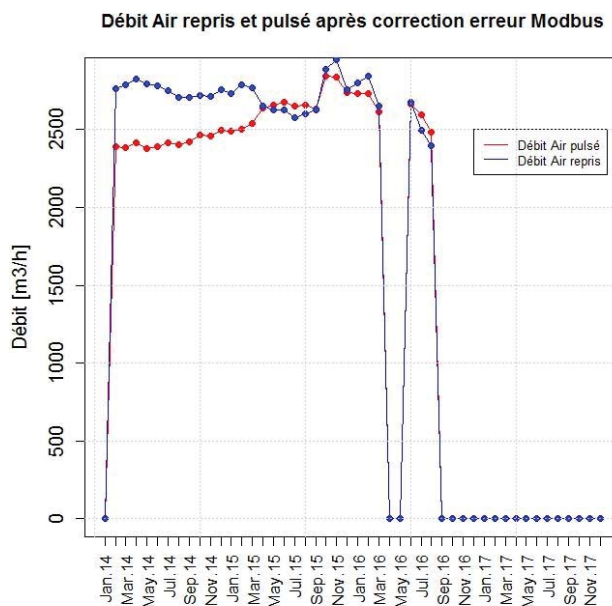


Figure 40: Débits d'air d'après les données Losinger Marazzi une fois le calcul du débit effectué à partir de la valeur de la pression différentielle.

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 :

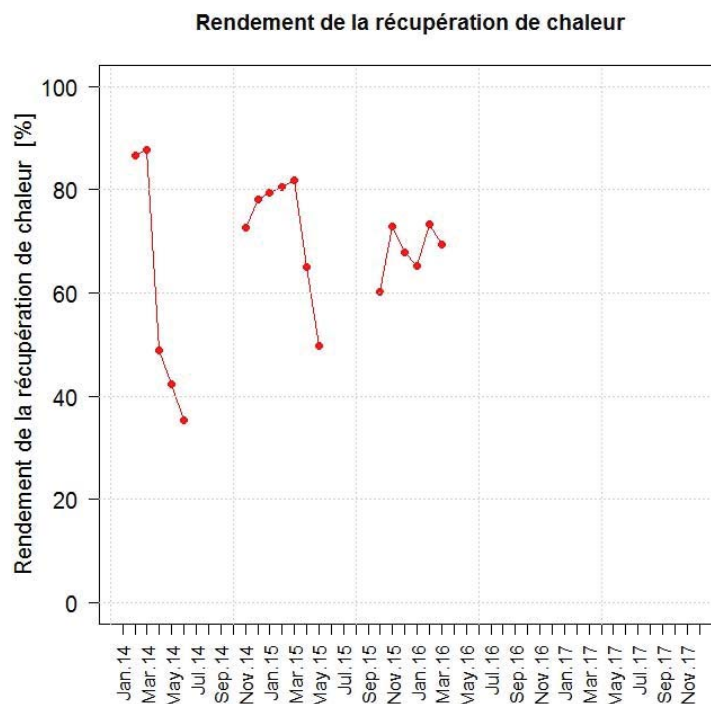


Figure 41: Rendement de la récupération de chaleur.

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 :

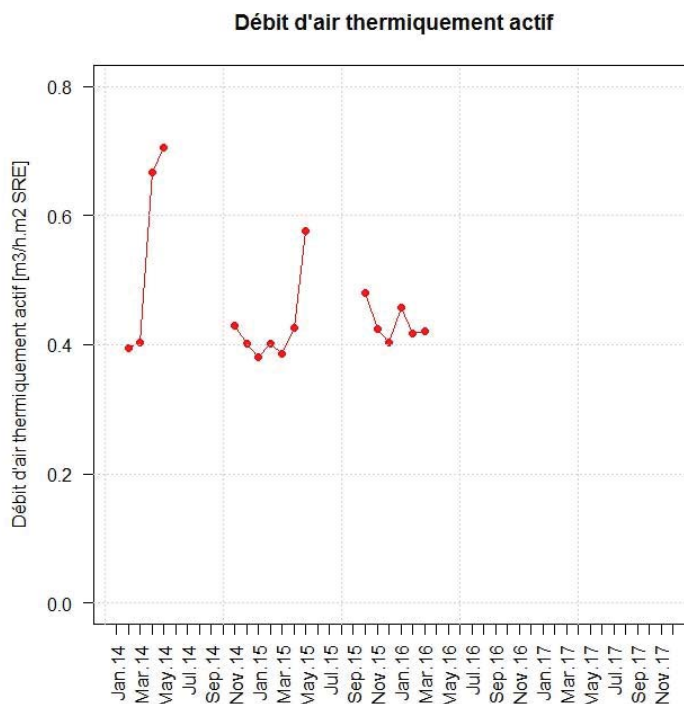


Figure 42: Débit d'air thermiquement actif calculé à partir des données du système de suivi.

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 :

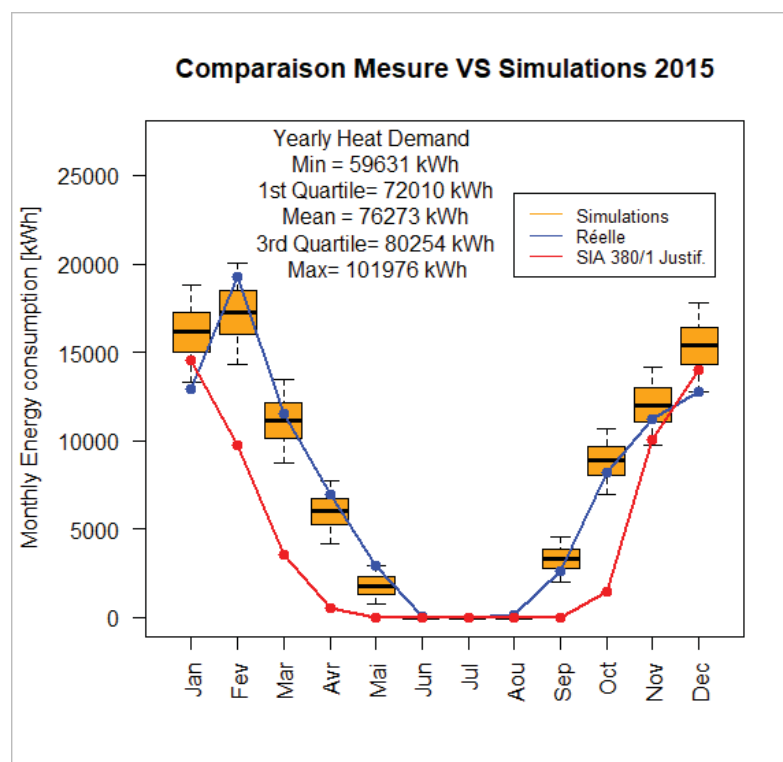


Figure 43: Résultat du bilan thermique probabiliste avec ajustement du débit d'air thermiquement actif calculé pour l'année 2015.

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 :

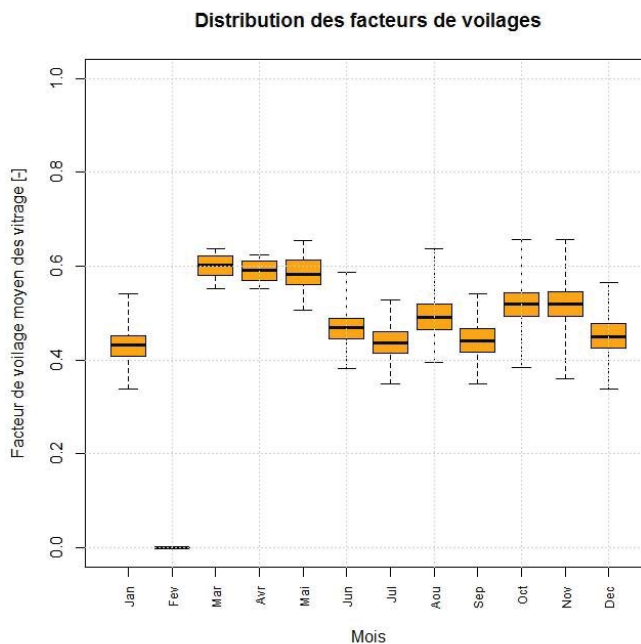


Figure 44: Facteur de voilage moyen mensuel permettant d'obtenir la meilleure approximation de la demande de chauffage mesurée du bâtiment.

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.

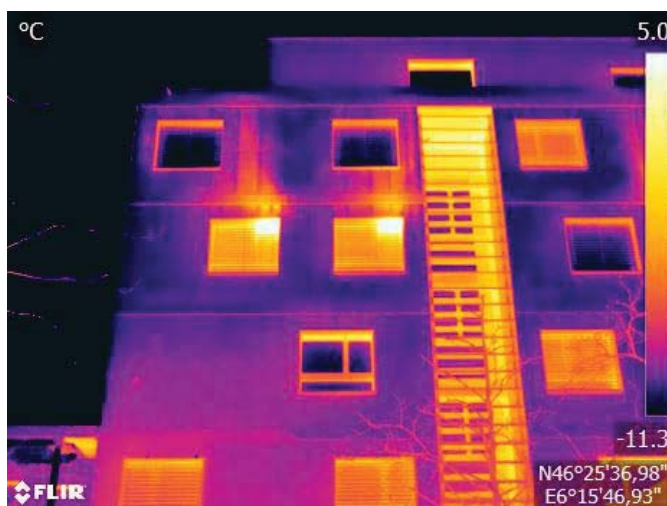


Figure 45: Fenêtres ouvertes en imposte sur la façade nord-est à 5h30 le 27.02.2019.

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

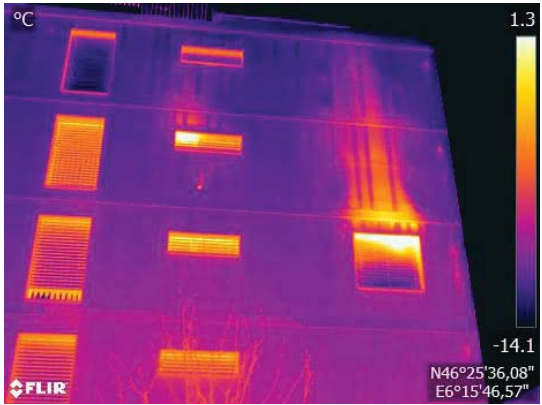

²¹ En effet, les phénomènes physiques liés au transfert de chaleur sont complexes à modéliser. Le nombre de paramètres de calculs sont nombreux (pression(s), température(s), vitesse du vent, coefficient de convection, etc.) et leurs variations temporelles sont significatives.

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.

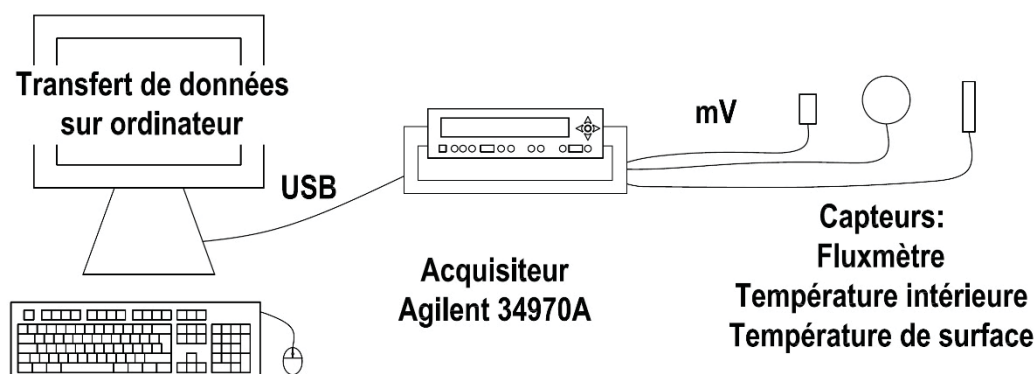


Figure 51: Système de mesure des valeurs U.

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]

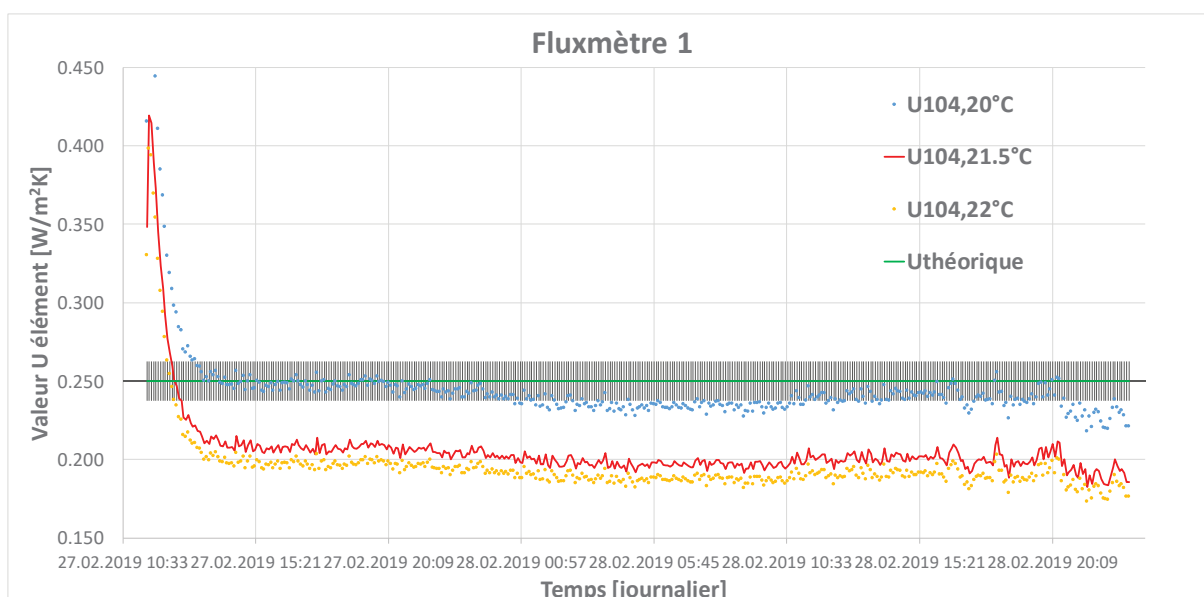


Figure 52: Mesure de la valeur U à l'aide d'un fluxmètre.

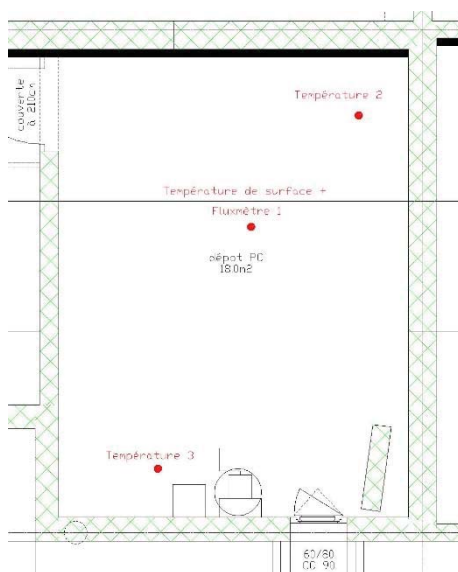


Figure 53: Installation des capteurs dans l'abri PC.

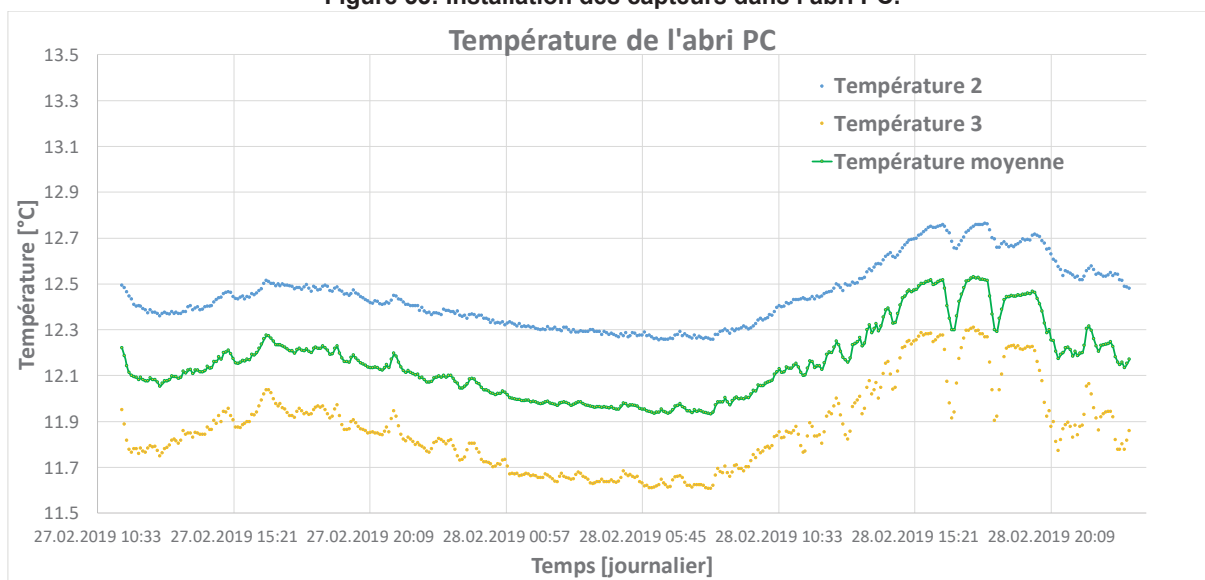


Figure 54: Température du dépôt de l'abri PC

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 à 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 chaleur 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												
Chaudière à gaz												
Chaudière à mazout												
Pompe à chaleur, bois, CAD>50% renouvelable, solaire												
Ponts thermiques à traiter sauf si c'est disproportionné												
 <p>Direction générale de l'environnement Rue du Valentin 10 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		
	Sans justification des ponts thermiques			Sans justification des ponts thermiques			Sans 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			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		
	0,18			0,15			0,23			0,14		
	0,18			0,15			0,23			0,14		
	0,18			0,15			0,23			0,14		
	1,2			1,2			1,4			0,9		
	0,9			0,9			1,2			0,5		
	1,2			1,2			1,4			0,9		
1,5			1,5			1,8			1,1			
0,5			0,5			0,5			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}			
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			Chauffés aux énergies non renouvelables							
	(Pompes à chaleur, bois, CAD>50% renouvelable, solaire)			(Pompes à chaleur, bois, CAD>50% renouvelable, solaire)			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}				



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des
transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral de l'énergie OFEN
Section Recherche énergétique et Cleantech

Projet UserGap : Annexe 2 - 23 décembre 2019

Le quartier et ses habitants

Analyses économétriques et Living Lab

Auteurs :

Joëlle Mastelic, HES-SO Valais-Wallis, IEE, joelle.mastelic@hevs.ch

Florian Bürki, HES-SO Valais-Wallis, IEE, florian.burki@hevs.ch

Stéphane Genoud, HES-SO Valais-Wallis, IEE, stephane.genoud@hevs.ch

Frédéric Revaz, HES-SO Valais-Wallis, IEE, frederic.revaz@hevs.ch

Francesco Cimmino, HES-SO Valais-Wallis, IEM, francesco.cimmino@hevs.ch M

ehdi Farsi, Université de Neuchâtel, mehdi.farsi@unine.ch

Sylvain Weber, Université de Neuchâtel, sylvain.weber@unine.ch



Résumé

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

L'Energy Living Lab a cherché à s'intéresser au niveau micro. L'analyse des pratiques sociales a permis de répondre à la question : « Quel est le rôle de l'utilisateur dans le gap de performance ? ». De plus, les différentes analyses économétriques du quartier ont apporté des réponses sur le rôle du quartier et de sa gestion dans le gap de performance, au niveau macro.

Différents entretiens qualitatifs ont été menés au sein du quartier en 2017, et ont permis de comprendre le rôle des services énergétiques pour les habitants, mais également d'évaluer leur niveau de satisfaction face à ces derniers.

Après avoir récolté des informations socio-démographiques, et de consommation de différents services énergétiques à l'aide d'un sondage en juin 2018, des analyses multivariées ont mis en lumière des liens entre la chaleur consommée par exemple, et les comportements des habitants face à l'utilisation des stores.

Finalement, différentes interventions dans le quartier ont permis le co-design de mesures avec les habitants afin de créer un « nudge », une solution par défaut, qui a été testée dans le quartier et permettant d'optimiser l'efficacité énergétique des ménages.



Liste des tableaux

Tableau 1 - Avantages de la co-conception, adapté de Steen et al (2011).....	17
Tableau 2 - Réponses aux questions de recherche, adaptées de Wackers (1998).....	25
Tableau 3 - Qualité des jeux de données	32
Tableau 4 - Groupement par année du meilleur compteur électrique	33
Tableau 5 - Relevés mensuels électriques	33
Tableau 6 - Rapport compteurs volume / compteurs énergie.....	34
Tableau 7 - Moyennes de consommation sur les 200 appartements	36
Tableau 8 - Valeurs des 199 appartements	36
Tableau 9 - Liste des bâtiments et caractéristiques.....	37
Tableau 10 - Comparaison des consommations.....	38
Tableau 11 - Estimations économétriques des déterminants de la consommation d'énergie.....	95
Tableau 12 - Estimations économétriques des déterminants de la consommation d'énergie	96
Tableau 13 - Estimations de la frontière efficiente	97
Tableau 14 - Déterminants de l'inefficience	99
Tableau 15 - Le paquet TSclust R.....	105
Tableau 16 - Résumé des relevés de consommation électrique par bâtiment.....	106



Liste des figures

Figure 1 - Deux phases distinctes du cycle de vie du bâtiment.....	12
Figure 2 Intervention intégrative avec l'approche Living La.....	12
Figure 3 - Écart de performance énergétique, adapté de Burmann et al (2014).	10
Figure 4 - Processus de conception d'une intervention, adapté de McKenzie-Mohr (2000).	13
Figure 5 - Mots clés utilisés pour faire des recherches dans la littérature existante.	14
Figure 6 - Processus de co-design, adapté de Sanders (2008).	16
Figure 7 - Différents types d'énergie, adaptés de Patterson (1996)	18
Figure 8 - Qu'est-ce que l'efficacité énergétique, Adapté de Patterson et al, (1996)	19
Figure 9 - Processus de co-création dans le secteur des services, adapté de Chesbrough (2011)	20
Figure 10 - Qu'est-ce qu'un service énergétique, d'après Fell (2017)	21
Figure 11 - Groupes sociaux dans le secteur du bâtiment, adapté de Geels (2004)	23
Figure 12 - Principaux éléments de la conception de la recherche	26
Figure 13 - Processus du Living Lab intégré.....	31
Figure 14 - Facteurs X des bâtiments et des ménages et consommation d'énergie dans le secteur résidentiel, adapté de Estiri, (2014).	28
Figure 15 – Exemple de modèle SEM	29
Figure 16 - Sexe et âge des répondants.....	39
Figure 17 - Propriétaire / locataire.....	40
Figure 18 - Possession d'un animal de compagnie	40
Figure 19 - Type de ménage	41
Figure 20 - Nombre de personnes par ménage / catégorie.....	41
Figure 21 - Profession des habitants	42
Figure 22 - Niveau d'éducation le plus élevé du ménage	42
Figure 23 - Revenu mensuel par ménage.....	43
Figure 24 - Importance des services énergétiques pour les habitants	44
Figure 25 - Satisfaction vis-à-vis des services énergétiques	45
Figure 26: Nuage des mots sur satisfaction	
Figure 27 - Insatisfaction vis-à-vis de la ventilation.....	46
Figure 28 - Importance d'autres services énergétiques pour les habitants	46
Figure 29 - Satisfaction d'autres services énergétiques pour les habitants.....	47
Figure 30 - Insatisfaction de la température du logement en été.....	48
Figure 31 - Analyse Tétraclasses - Matrice Llosa	49
Figure 32 - Pratique d'aération du logement en hiver	50



Figure 33 - Moment d'ouverture des fenêtres	51
Figure 34 - Durée d'ouverture des fenêtres la nuit en hiver.....	51
Figure 35 - Durée d'ouverture des fenêtres en journée en hiver.....	52
Figure 36 - Température de confort de l'appartement.....	53
Figure 37 - Installation d'un chauffage d'appoint et d'un climatiseur	54
Figure 38 - Installation d'un ventilateur d'appoint.....	54
Figure 39 - Utilisation des stores du logement par les habitants.....	55
Figure 40 - Gestion des stores durant la journée.....	55
Figure 41 - Gestion des stores durant la nuit.....	56
Figure 42 - Lave-linge et sèche-linge.....	57
Figure 43 - Nombre d'installations à laver installées.....	57
Figure 44 - Nombre de cycles de machine à laver par semaine.....	58
Figure 45 - Nombre de cycles de sèche linge par semaine.....	58
Figure 46 - Façon de faire la vaisselle	58
Figure 47 - Nombre de cycles de lave-vaisselle par semaine	58
Figure 48 - Taille du réfrigérateur.....	59
Figure 49 - Congélateur intégré ou non	59
Figure 50 - Taille du congélateur.....	59
Figure 51 - Existence d'un congélateur séparé.....	60
Figure 52 - Placement du congélateur.....	60
Figure 53 - Taille du congélateur.....	60
Figure 54 - Estimation du prix d'un kWh	61
Figure 55 - Réponses aux questions liées aux attitudes	62
Figure 56 - Réponses liées aux attitudes II.....	63
Figure 57 - Réponses liées aux attitudes III.....	63
Figure 58 - Réponses liées aux attitudes IV	64
Figure 59 - Description des échantillons de consommation de chaleur	65
Figure 60 - Corrélation du type de ménage avec la chaleur	66
Figure 61 - Corrélation de la formation sur la consommation du chauffage	66
Figure 62 - Corrélation du salaire sur la consommation du chauffage	67
Figure 63 - Corrélation de l'âge sur la consommation du chauffage.....	68
Figure 64 - Corrélation de la chaleur avec le fait d'être propriétaire	68
Figure 65 - Corrélation de la chaleur avec le fait d'avoir un animal de compagnie	69
Figure 66 - Corrélation de la chaleur avec le nombre de personnes dans le ménage	69
Figure 67 - Aération du logement et corrélation avec la consommation de chauffage.....	70



Figure 68 - Corrélation entre la chaleur et le moment d'ouverture des fenêtres en hiver.....	71
Figure 69 - Corrélation du temps d'ouverture des fenêtres la nuit en hiver avec la chaleur.....	71
Figure 70 - Temps d'ouverture des fenêtres le jour en hiver corrélé à la chaleur.....	72
Figure 71 - Croisement entre la température de confort souhaitée et la chaleur moyenne annuelle....	72
Figure 72 - Croisement entre la présence d'un chauffage d'appoint dans le logement et la chaleur moyenne annuelle	73
Figure 73 - Croisement de la température moyenne de chaque pièce en hiver et la consommation de chaleur annuelle moyenne	73
Figure 74 - Croisement entre l'abaissement des stores et la consommation de chaleur annuelle moyenne	74
Figure 75 - Croisement entre l'utilisation des stores et la consommation de chaleur annuelle moyenne	75
Figure 76 - Croisement entre la préoccupation concernant les conditions environnementales et la chaleur.....	76
Figure 77 - Croisement entre la conscience des habitants et la chaleur	76
Figure 78 - Croisement entre la conscience des personnes et la consommation de chauffage	77
Figure 79 - Croisement entre le scepticisme des habitants et leur consommation de chaleur.....	77
Figure 80 - Croisement entre la responsabilité face à la question énergétique et les consommations de chaleur.....	78
Figure 81 - Croisement entre le scepticisme face aux écologistes et la consommation de chaleur	78
Figure 82 - Croisement entre l'avis des habitants sur les politiciens et la consommation de chauffage	79
Figure 83 - Croisement entre l'espoir de l'humain sur le DD et la consommation de chaleur	79
Figure 84 - Description de l'échantillon concernant l'électricité	80
Figure 85 - Description de l'échantillon concernant l'eau.....	81
Figure 86 - Croisement entre l'eau et la consommation moyen	81
Figure 87 - Consommation d'eau croisée au type de ménage	82
Figure 88 - Croisement de la consommation d'eau avec le niveau d'éducation le plus élevé du ménage	82
Figure 89 - Croisement entre l'âge et la consommation d'eau.....	83
Figure 90 - Corrélation de la consommation d'eau avec la possession d'un animal de compagnie	83
Figure 91 - Corrélation de la consommation d'eau avec la satisfaction du label Minergie	84
Figure 92 - Croisement de la crainte des habitants avec leur consommation d'eau	84
Figure 93 - Croisement du scepticisme des habitants avec leur consommation d'eau	84
Figure 94 - Consommation de chauffage.....	88
Figure 95 - Consommation d'eau chaude	89
Figure 96 - Consommation d'électricité.....	89
Figure 97 - Représentation schématique d'une frontière stochastique.....	98



Figure 98 - Matrice pouvoir / intérêt	101
Figure 99 - Analyse des correspondances pour les variables socio-démographiques	104
Figure 100 - Matrice importance / satisfaction	108
Figure 101 - Exemple de vanne connectée et de douche connectée Hydrao	111
Figure 102 - Exemple de bouton connecté programmable	111
Figure 103 - Cartes Persona	113
Figure 104 - Cartes d'action	113
Figure 105 - Cartes d'Usages	113
Figure 106 - Représentation des mesures journalières d'eau sanitaire pour un ménage	115



Contents

1	Introduction.....	10
1.1	Contexte et arrière-plan.....	10
	La performance énergétique dans les bâtiments résidentiels.....	10
	Le marketing social communautaire et co-conception.....	12
	Définition des concepts clés : co-design, économie d'énergie, marketing social.....	14
	Méthode de revue de la littérature.....	14
	Comment définir le " co-design " ?.....	15
	La valeur ou l'avantage co-créé.....	16
	Comment définir " économie d'énergie " ?.....	18
	La notion complexe de « service ».....	19
	Le concept de « services énergétiques ».....	21
	Comment définir le " marketing social " ?.....	22
	Le carrefour des différents cadres conceptuels.....	23
1.2	Justification du projet.....	25
1.3	Objectifs du projet.....	25
2.	Procédure et méthode.....	27
	Mixed methods séquentielles.....	27
	Récupération des données des smart meters.....	27
	Sondage et modèles économétriques.....	28
	Le questionnaire.....	29
	Mise en place du processus Living Lab Intégré.....	31
3.	Résultats et commentaires.....	32
3.1	Evaluation des consommations électriques et comparaison aux données des smart meters (Tâche 1.2).....	32
	Qualité du jeu de données.....	32
	Comparaison des consommations électriques avec la norme SIA 380/4.....	35
	Impact des smart-meters sur la consommation électrique.....	37
3.2	Résultats des analyses des facteurs humains (tâche 2.2).....	39
	Description de l'échantillon du sondage.....	39
	Satisfaction et importance des services énergétiques.....	44
	Pratiques des habitants en matière de consommation d'énergie.....	49
	Autres services énergétiques.....	56
	Connaissances du prix de l'énergie.....	61
	Attitudes vis-à-vis de l'environnement.....	62



Résultats des analyses multivariées	65
Analyses multivariées du chauffage.....	65
Electricité	80
Analyses de la consommation d'eau chaude sanitaire	81
Analyses économétriques	86
3.3 Mise en place d'un processus Living Lab dans le quartier.....	100
Résultats de l'identification des parties prenantes (Tâche 3.1)	100
Résultats de la sélection de pratiques (Tâche 3.2).....	107
Résultat de la co-création de mesures énergétiques (Tâche 3.3)	110
Résultat de la mise en place d'interventions ciblées dans le quartier (Tâche 3.4)	113
Evaluation des consommations réelles après la mise en place du Living Lab (Tâche 3.5).....	114
4. Conclusions et résumé	116
5.1 Recommandations à destination des entreprises de construction	116
Recommandations pour le développement des normes SIA	119
5. Bibliographie	122



1 Introduction

L'annexe 2 se concentre sur le travail d'analyses économétrique et sur le processus Living Lab mis en place dans le projet UserGap. Elle vient approfondir la synthèse du projet. Elle traite du niveau du quartier dans son ensemble (MACRO) et des ménages (MICRO). L'annexe 1 traite quant à elle le niveau du bâtiment (MESO). Cette introduction est tirée de la thèse de doctorat de Joelle Mastelic (2019), cheffe du projet UserGap financé par l'Office Fédéral de l'Energie et la Conférence des Directeurs Romands de l'Energie.

1.1 Contexte et arrière-plan

La performance énergétique dans les bâtiments résidentiels

En Suisse, la consommation d'énergie des ménages représente 32,2% de la consommation totale d'énergie ; c'est la plus grande consommation avant l'industrie : 30,9 %, services : 27,1 %, transport : 8,1 % et l'agriculture : 1,7 % (OFEN, 2016). Comprendre comment augmenter l'efficacité énergétique dans les bâtiments d'habitation pourrait avoir un impact majeur sur la réalisation de l'objectif fixé par le Conseil fédéral dans la "Stratégie énergétique 2050". De plus, la consommation d'énergie diminue dans le secteur industriel et augmente dans le secteur résidentiel, ce qui met l'accent sur les besoins en programmes d'efficacité énergétique dans ce domaine.

Dans le secteur du bâtiment, de nombreux défis restent ouverts, tels que **l'écart de performance énergétique (EdP)**. Il existe souvent un écart entre la performance énergétique prévue (pré-occupation) et la performance énergétique réelle (post-occupation), même dans les bâtiments à faible consommation, une partie de cet écart est liée au "comportement des occupants" détaillé par Burmann et al (2014) dans la **Figure 1**, lors de l'analyse de la directive sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD). Cet écart n'est pas entièrement expliqué dans la littérature.

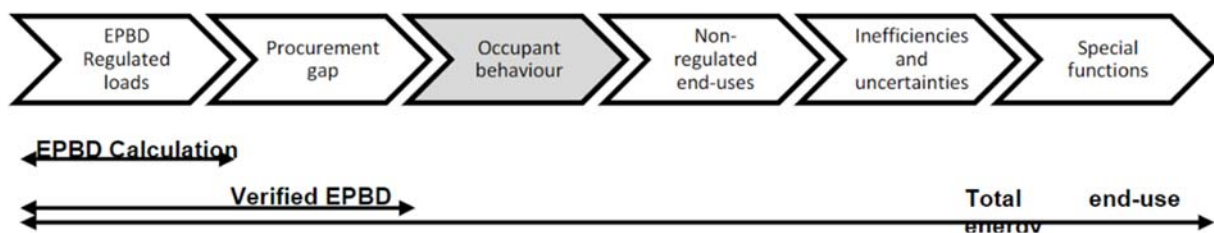


Figure 1 - Écart de performance énergétique, adapté de Burmann et al (2014).

Quelles sont les mesures visant à accroître l'efficacité énergétique et à réduire l'écart de performance dans les bâtiments résidentiels ? Cette question est déjà étudiée depuis des décennies. Par exemple, en 2006, une étude s'est concentrée sur la volonté de payer pour des mesures d'économie d'énergie dans les bâtiments résidentiels en Suisse (Banfi, Farsi, Filippini, et Jakob). L'équipe de recherche a mené une « Choice Experiment » avec deux échantillons pour les appartements loués et les propriétaires. Ils ont conclu qu'il existe une volonté importante de payer pour l'efficacité énergétique. Ils ont fondé leur étude sur les préférences déclarées parce que les données sur les préférences révélées "*ne sont que très peu disponibles puisque le marché des technologies d'EE est encore restreint*". À l'époque, les mesures recommandées étaient d'appuyer la communication et l'information des décideurs "*à savoir les consommateurs, les investisseurs et les institutions financières*". Les données sur l'efficacité énergétique,



grâce au déploiement des compteurs intelligents, deviennent aujourd'hui plus accessibles et il est possible d'observer les comportements des consommateurs dans le contexte et non par le biais de "variables substitutives" comme les attitudes vis-à-vis de la consommation d'énergie. C'est ce que propose l'équipe de recherche dans ce projet : **étudier les comportements avec des données sociodémographiques issues d'enquêtes et des données de consommation issues de compteurs intelligents et de factures d'électricité.**

Aujourd'hui, de nombreuses recherches ont montré qu'il existe un écart entre attitude et comportement dans le secteur environnemental et que **les recherches basées uniquement sur des données déclaratives des attitudes ne reflètent pas la réalité des comportements individuels** (Kollmuss & Agyeman, 2002). La collecte de données par le biais d'enquêtes est intéressante car elle permet d'obtenir des données sociodémographiques ou de comparer les attitudes (telles que les normes sociales) et les comportements mesurés, par exemple, par les données des compteurs intelligents. Par contre, les auteurs s'opposent à l'utilisation des attitudes comme approximation des comportements, car cela pourrait générer d'importantes divergences. D'autres méthodes et processus doivent être développés.

La richesse d'un tel projet de recherche appliquée interdisciplinaire est d'acquérir différentes perspectives spécialisées et "naïves" sur les trois parties du système sociotechnique. Les ingénieurs sont spécialisés dans les artefacts, le bâtiment lui-même, les appareils, les normes techniques et architecturales. Les marketers sont spécialisés dans les attitudes et les comportements humains, sur la compréhension des normes sociales tacites. Les économistes offrent une perspective différente de la prise de décision rationnelle basée sur la valeur monétaire, l'analyse des variables influençant le système avec une analyse économétrique.

Si nous nous concentrons sur les règles qui prévalent dans un système sociotechnique, Scott propose une typologie de ces règles : régulatrice, normative et cognitive (dans Geels, 2004, p. 904). Ces règles sont écrites ou tacites, selon le type de règles. Ils influencent la manière dont les acteurs utilisent l'énergie et dont les artefacts techniques sont conçus et fonctionnent. Dans cette recherche appliquée, il existe de nombreuses règles écrites et tacites. Des exemples de normes réglementaires écrites s'appliquent à la construction d'un bâtiment à faible consommation, comme en Suisse la norme SIA 380/1 sur les exigences thermiques pour le chauffage et la norme SIA 380/4 sur la consommation d'énergie électrique dans le bâtiment. Telles sont les principales normes qui seront étudiées dans le contexte des bâtiments suisses à faible consommation.

Les artefacts techniques sont également programmés avec des règles normatives. Par exemple, le système de gestion de l'énergie du bâtiment est programmé pour optimiser le fonctionnement des services énergétiques : ventilation, éclairage, chauffage. Les règles cognitives sont également ancrées dans les artefacts et dans les acteurs qui influencent le processus décisionnel. Les règles cognitives sont souvent tacites et difficiles à faire émerger à la surface. Des méthodes de recherche qualitative seront utilisées pour approfondir la compréhension de ces règles cognitives. C'est une contribution importante des sciences sociales de **faire émerger et rendre visible des normes sociales cognitives latentes.**

Si l'on se concentre sur les **acteurs**, les consommateurs d'énergie sont appelés "occupants" dans la littérature technique. Les ingénieurs et les architectes séparent deux phases principales dans la construction d'un bâtiment à faible consommation : "avant l'occupation", lorsque l'immeuble est vide ; et "après l'occupation", lorsque les occupants sont dans l'immeuble, comme l'illustre la **Figure 2**.

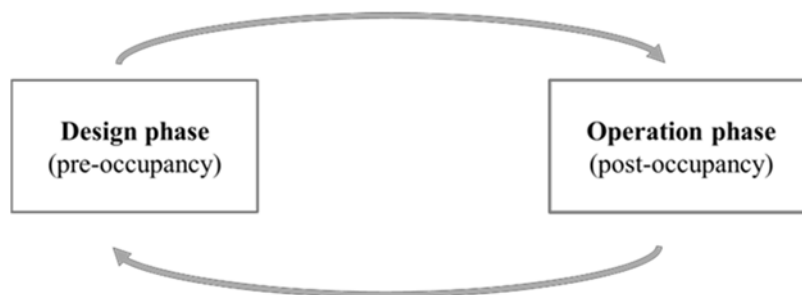


Figure 2 - Deux phases distinctes du cycle de vie du bâtiment

Dans ce projet, nous soutenons que comprendre les modèles utilisés par les "occupants" lorsqu'ils consomment de l'énergie en phase de fonctionnement et essayer de changer ces modèles (recherches sur le "changement de comportement") ne suffit pas pour comprendre le système complexe et agir sur lui. De notre point de vue, sans comprendre les interactions avec les artefacts techniques et les règles, nous n'avons pas la vision complète du système sociotechnique pour pouvoir développer une intervention et agir sur la performance énergétique (Geels, 2004). **Dans ce projet, l'accent n'est pas seulement mis sur le "changement de comportement", mais sur le "changement de système"**. L'intégration des parties prenantes dans la phase d'exploitation est intéressante à des fins d'optimisation. Ce qui est plus intéressant, c'est d'obtenir un retour d'information pour la conception future des services énergétiques.

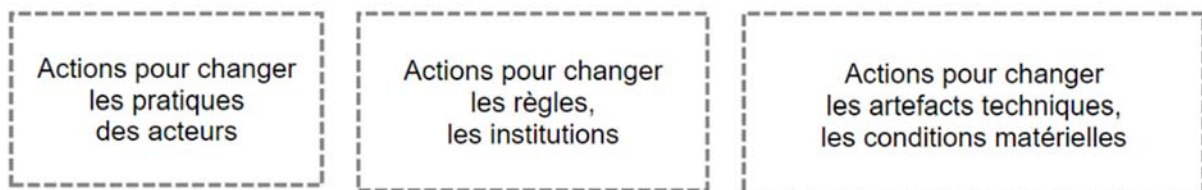


Figure 3 Intervention intégrative avec l'approche Living La

Comme le montre la **Figure 3**, l'intervention sur le système pourrait inclure : (1) actions de changement des pratiques des acteurs, (2) actions de changement des règles et des institutions et (3) actions de changement des artefacts techniques, des conditions matérielles. **Une combinaison de ces trois types d'actions semble, d'après nos premières intuitions de recherche, appropriée et doit être testée dans ce projet de recherche appliquée.**

Le marketing social communautaire et co-conception

En 2013, l'Agence européenne pour l'environnement a réalisé une méta-analyse de différents types de mesures visant à accroître l'efficacité énergétique. Un rapport intitulé "Atteindre l'efficacité énergétique par le changement de comportement : que faut-il faire ?" résume l'impact des différentes mesures et leurs recommandations concernant les futurs programmes d'efficacité énergétique. Dans leur conclusion, l'une des recommandations était **d'intégrer différents intervenants dans la conception et la mise à l'essai des mesures ou des programmes d'efficacité énergétique** (AEE, 2016, p. 43). Ils recommandent également de combiner différents types de mesures telles que des compteurs intelligents pour informer les résidents de leur consommation d'énergie, des programmes basés sur les pratiques sociales et l'engagement communautaire.



Comment les différentes parties prenantes peuvent-elles s'engager dans la co-conception d'interventions d'économie d'énergie ? C'est précisément ce que ce projet entend mieux comprendre, car la littérature ne répond pas à ces questions. Ce type de programmes d'efficacité énergétique impliquant différents intervenants est également proposé par des psychologues sociaux tels que McKenzie-Mohr. Il a mené une revue de littérature en 2000 qui démontre, à l'aide de nombreux exemples, qu'une " **approche attitude-comportement** " basée sur des campagnes d'information intensive a peu ou pas d'effet sur le comportement. Les campagnes basées uniquement sur une "approche d'intérêt économique personnel" n'affectent pas non plus le comportement à long terme. Un obstacle évident à l'efficacité énergétique est le coût de l'énergie, qui est actuellement faible par rapport au prix des technologies d'efficacité énergétique. Le délai de retour doit être le plus court possible et un délai de retour trop long interdit tout investissement dans des technologies à faible consommation. **Les interventions fondées uniquement sur des incitations par les prix semblent insuffisantes.**

McKenzie-Mohr propose une approche alternative appelée "Community based social marketing" :

*"Le **marketing social communautaire** (MSC) fusionne les connaissances de la psychologie et l'expertise du marketing social. Le marketing social met l'accent sur le fait que la conception de programmes efficaces commence par la compréhension des obstacles que les gens perçoivent lorsqu'ils s'engagent dans une activité." "Le marketing social souligne également l'importance d'une orientation stratégique des programmes afin qu'ils ciblent des segments spécifiques du public et qu'ils surmontent les obstacles qui empêchent ce segment de s'engager dans le comportement. » (2000)*

Sa méthode suit cinq étapes comme le montre la **Figure 4** : (1) Choisir un comportement, (2) Identifier les obstacles et les avantages, (3) Concevoir des stratégies, (4) Piloter une intervention, (5) Mettre en œuvre et évaluer à grande échelle.



Figure 4 - Processus de conception d'une intervention, adapté de McKenzie-Mohr (2000).

M. McKenzie-Mohr déclare que son objectif est de **donner accès à la littérature scientifique aux planificateurs énergétiques**. Il pourrait être considéré comme une " approche descendante " pilotée par des planificateurs professionnels qui conçoivent et mettent en œuvre un plan d'efficacité énergétique. Dans le projet UserGap, les équipes de recherche proposent une " **approche ascendante** " de **co-conception de l'intervention avec les parties prenantes à l'aide d'un Energy Living Lab**. L'hypothèse est qu'une " approche ascendante " permettrait de mieux aborder les obstacles actuels et d'élaborer un plan d'efficacité énergétique plus proche des besoins des intervenants. Cela pourrait aussi accroître l'acceptation sociale du plan. Nous aimerions tester le processus de marketing social en combinaison avec le processus de co-design dans un laboratoire vivant :

"Les laboratoires vivants (LL) sont définis comme des écosystèmes d'innovation ouverts et centrés sur l'utilisateur, basés sur une approche systématique de co-création par l'utilisateur, intégrant les processus de recherche et d'innovation dans des communautés et des environnements réels " (ENoLL, 2018).



Définition des concepts clés : co-design, économie d'énergie, marketing social

L'objectif de cette section est de définir les principaux concepts utilisés dans le projet. Différentes disciplines étudient comment concevoir une intervention d'économie d'énergie. En raison de la quantité de littérature, il ne serait pas réaliste d'être exhaustif ; l'objectif principal est de définir les termes et de formuler les questions de recherche. La structure du chapitre est la suivante : la méthode d'examen de la documentation sera détaillée, puis la définition des différents termes et les liens entre les termes aux intersections des axes de recherche suivront.

Méthode de revue de la littérature

Pour passer en revue la littérature existante, un brainstorming a été effectué sur les mots clés, après une première revue exploratoire de la littérature. Ensuite, les mots-clés ont été regroupés en sous- thèmes avec un arbre de pertinence. Les principaux mots clés ont donné lieu à une nouvelle recherche documentaire, comme le proposent Saunders et al (2016, p. 73). Les mots-clés suivants ont été utilisés : "co?design" (le signe " ?" est utilisé pour considérer différentes orthographes), "économie d'énergie" et "marketing social". L'outil de recherche en ligne utilisé est Google scholar, l'intervalle est de 2000 à 2018, et la date de recherche est le 20 avril 2018. Un résumé des résultats est illustré à la Figure 5.

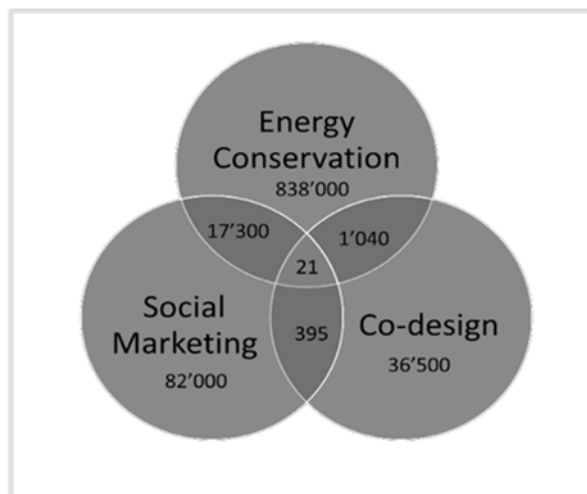


Figure 5 - Mots clés utilisés pour faire des recherches dans la littérature existante.

La difficulté et la richesse de cette recherche réside dans son positionnement à l'intersection de plusieurs disciplines aux paradigmes différents (du positivisme au constructivisme) et aux méthodes différentes (qualitatives et quantitatives), qui complique et enrichit l'analyse de la littérature.

Il existe une quantité énorme de documentation sur les trois mots clés pris séparément ; cependant, il y a peu de documents à l'intersection des différents thèmes. Afin de définir les termes de la recherche et d'encadrer les questions de recherche, un bref résumé est proposé. Le LL est un concept récent et il n'est pas bien établi en tant que courant de littérature. Pour cette raison, nous n'avons pas utilisé le terme "Living Lab" comme mot clé de la revue de la littérature, mais nous avons plutôt utilisé des mots clés reflétant les flux de littérature établis. Nous considérons le LL comme un phénomène : "un fait ou un événement d'intérêt scientifique susceptible d'être décrit et expliqué scientifiquement".



Dans les sections suivantes, les concepts seront définis à partir de la littérature et une combinaison des différents concepts sera proposée. Le phénomène étudié est l'Energy Living Lab et son impact potentiel sur l'écart de performance énergétique. Un processus de co-conception est appliqué pour élaborer un plan d'économie d'énergie avec les intervenants. Le plan est le résultat du processus de co-conception. À la fin du processus de co-conception, une intervention de marketing social sera effectuée pour tester l'impact du plan sur l'écart de performance énergétique.

Comment définir le " co-design " ?

Les termes co-design et co-création sont des mots avec polysémie, abondamment utilisés dans la littérature de l'innovation. Une clarification du sens des deux concepts et une différenciation sémantique semblent importantes dans ce projet qui les mobilise fortement.

Avant d'explorer la littérature scientifique qui les définit, un passage dans le dictionnaire semble être un premier pas important. Pour définir le "co-design", il faut d'abord définir le mot "design". Selon le dictionnaire Webster, le terme "design" signifie : "(1) créer, façonner, exécuter ou construire selon le plan", ou (2) "concevoir et planifier dans l'esprit, avoir comme but, concevoir pour une fonction ou une fin spécifique". Cette définition n'aide pas à clarifier la différence entre design et création, car elle définit le terme "design" en référence au terme "créer". Il est intéressant de noter que cette définition contient le terme "construire"... (par exemple un artefact), ne limitant pas la conception à la phase amont du processus d'innovation (idéation, prototypage). Avec cette définition, la co-production fait partie d'un processus de co-conception. Le lien avec le plan est également utile dans cette thèse axée sur la planification des économies d'énergie. On peut concevoir une intervention en fonction du plan d'EE ou on peut concevoir le plan d'EE lui-même, puis concevoir et exécuter une intervention dans les bâtiments à faible consommation. Les notions de "fonction" et de "fin" sont également intéressantes car ces mots clés sont mobilisés dans la définition des "services énergétiques".

Que signifie le préfixe "co-" ? Dans le même dictionnaire, "co-" est défini comme :

"(1) avec ; ensemble ; conjointement ; conjointement ; conjointement (p.i. coexistant, cohéritier), (2) dans ou au même degré, (3) a. celui qui est associé dans une action à un autre (p.i. co-auteur, collègue de travail), b. celui qui généralement une part moindre dans le devoir ou la responsabilité (p.i. copilote)".

Dans ce projet, fondé sur l'« empowerment » des parties prenantes, les auteurs voient le terme "co-" comme dans la définition (1) ensemble, conjointement (2) dans ou au même degré et (3) a. un terme qui est associé dans une action à une autre. Les différentes parties prenantes réaliseront l'action d'élaboration conjointe d'un plan d'économie d'énergie pour le quartier. Elle n'est pas alignée sur la définition (3) b. ayant généralement une part de responsabilité moindre : les parties prenantes sont considérées sur un pied d'égalité dans les écosystèmes d'acteurs.

Après cette première phase de définition du concept à partir du dictionnaire, il est temps d'analyser la littérature scientifique pour définir le terme clé "co-design". Sanders et Stappers, chercheurs dans la discipline du design, ont contribué au développement de la définition scientifique du co-design avec leur article phare " Co-creation and the new landscapes of design" (2008). Ils définissent le co-design en référence à la co-création :

"Les termes co-design et co-création sont aujourd'hui souvent confondus et/ou traités comme synonymes l'un de l'autre. Les opinions sur les personnes qui devraient être impliquées dans ces actes collectifs de créativité, quand et dans quel rôle varient considérablement. Les auteurs prennent la co-création pour désigner tout acte de créativité collective, c'est-à-dire de créativité partagée par deux ou plusieurs personnes. La co-création est un terme très large" [...] "Par co-design, on désigne la créativité collective telle qu'elle s'applique à l'ensemble d'un processus de conception [...]"



Nous utilisons le co- design au sens large pour désigner la **créativité des concepteurs et des personnes non formées en design qui travaillent ensemble dans le processus de développement du design.** (2008, p. 3)

Dans ce projet, les intervenants non formés en planification des économies d'énergie seront intégrés avec des planificateurs professionnels dans un processus de créativité pour co-concevoir une intervention. Les différentes phases de la co-conception seront présentées ci-dessous. Dans une approche d'apprentissage tout au long de la vie, les parties prenantes sont intégrées au début du processus d'élaboration de la conception, dans le "Fuzzy front end", comme l'appellent Sanders et Stappers (2008), comme l'illustre la **Figure 6.**

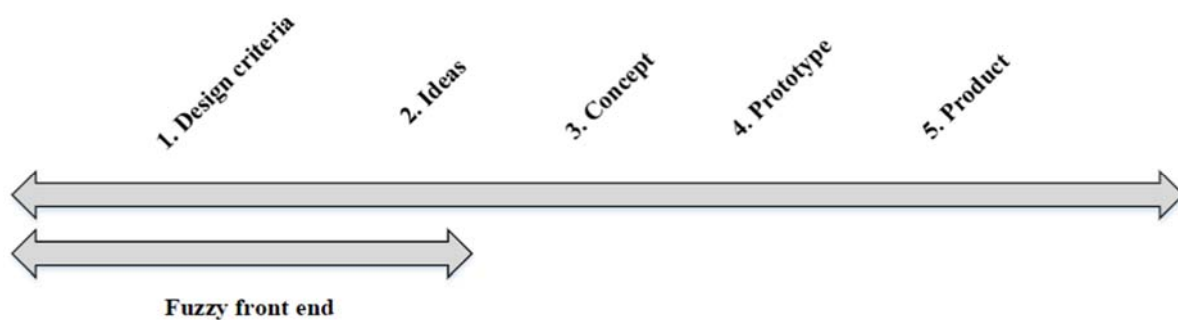


Figure 6 - Processus de co-design, adapté de Sanders (2008).

Steen et al (2011) s'appuient sur le papier séminal de Sanders et Stappers et analysent les avantages de la co-conception. Ils définissent le co-design comme une "coopération créative pendant les processus de conception" et l'opposent à la co-création "qui se réfère également à la coopération créative pendant la prestation et l'utilisation des services, par exemple, aux interactions entre les clients et le fournisseur de services aux points de contact des services". Cette définition distingue la co-conception et la co-création du point de vue du processus : la co-conception précède la prestation et l'utilisation des services. Ils séparent la phase de conception de la phase d'exploitation. Pour un nouveau service, cette définition permet de faire une distinction satisfaisante entre les deux concepts. Mais pour une refonte d'un service existant, comme dans notre cas du service énergétique, cette définition est plus problématique. Les utilisateurs ont déjà une interaction avec le service (post- occupation du bâtiment) et la séparation entre "côté demande" et "côté offre" formulée par Steen et al (2011) n'est pas claire. Avec une boucle de rétroaction de la phase d'exploitation à la phase de conception, il y aura une refonte du service avec les intervenants, c'est-à-dire une co-conception.

La valeur ou l'avantage co-créé

La notion de co-création de valeur est considérée dans ce projet comme le résultat du processus de co-design. La notion de valeur est également polysémique et dans ce projet, la valeur co-créée peut être comprise comme les bénéfices du processus de co-design. Steen et al (2011) proposent, comme dans le **Tableau 1**, de séparer les avantages de la co-conception en trois catégories : (1) - Avantages pour le projet de conception du service lui-même (2) Avantages pour les clients ou utilisateurs du service (3) Avantages pour l'organisation ou les organisations concernées. Ils ont passé en revue les différents avantages potentiels de la co-conception, à partir d'une vaste analyse documentaire.



	Avantages pour le projet de conception du service	Avantages pour les clients ou utilisateurs du service	Avantages pour l'organisation
<i>Améliorer la génération d'idées</i>	<ul style="list-style-type: none"> - De meilleures idées - Meilleure connaissance des besoins des clients ou des utilisateurs - Meilleure génération d'idées 		<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration de la créativité - Meilleure focalisation sur les clients ou les utilisateurs - Une meilleure coopération entre les différentes personnes ou organisations et entre les disciplines
<i>Améliorer le service</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Meilleure définition de la qualité de service - Des innovations plus réussies 	<ul style="list-style-type: none"> - Meilleure adéquation entre le service et les besoins des clients ou des utilisateurs, et meilleure expérience du service - Meilleure qualité de service - Un service plus différencié 	
<i>Améliorer la gestion des projets</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Meilleure prise de décision - Coûts de développement réduits - Réduction du temps de développement ou de mise sur le marché - Amélioration continue 		
<i>Améliorer les effets à long terme</i>		<ul style="list-style-type: none"> - Satisfaction accrue des clients ou des utilisateurs - Une plus grande fidélité des clients ou des utilisateurs - Éduquer les utilisateurs 	<ul style="list-style-type: none"> - Des innovations plus réussies, p. ex. rapide diffusion - Amélioration des pratiques et des processus d'innovation et capacités - Plus de soutien et d'enthousiasme pour l'innovation et le changement - De meilleures relations entre le fournisseur de services et les clients - De meilleures relations publiques

Tableau 1 - Avantages de la co-conception, adapté de Steen et al (2011)

Dans ce projet, "co-crédation de valeur" signifie co-crédation d'un bénéfice pour les différents acteurs impliqués dans le processus de co-design. La valeur n'est pas seulement du point de vue du client ou de l'entreprise, comme c'est souvent le cas en marketing. Elle est plus grande et peut profiter à la société dans son ensemble. Cette partie manque dans la liste des avantages de Steen et al (2011) et pourrait constituer une dimension supplémentaire. Comme le mentionne Vargo & Lusch, **la valeur est toujours co-crédée lorsque le service est consommé, car la valeur est la résultante du processus** (2004).

Le terme "co-design" a été choisi dans ce projet pour sa spécificité, associée à la conception d'un service avec les parties prenantes. In fine, l'objectif du processus de conception du service est de co-crédé de la valeur avec les parties prenantes. La co-crédation de valeur est considérée dans ce projet comme le résultat du processus de co-design. Elle est également mentionnée par Steel et al (2011) : **"L'ensemble du processus de développement et de fourniture de services est (ou devrait être) orientée vers l'obtention d'avantages pour les clients et les utilisateurs."**



Comment définir " économie d'énergie " ?

Pour définir l'économie d'énergie, il faut commencer par définir l'énergie. Qu'est-ce que l'énergie ? L'énergie est définie par le dictionnaire en ligne Webster comme :

"une entité fondamentale de la nature qui est transférée entre les parties d'un système dans la production d'un changement physique au sein du système et généralement considérée comme la capacité d'effectuer un travail", une deuxième définition est proposée : "l'énergie utilisable (comme la chaleur ou l'électricité) ; également : les ressources pour produire cette énergie1."2

On voit dans ces deux définitions que le terme "énergie" peut être compris différemment. Patterson propose une catégorie et une séparation entre "Primary energy", "Consumer energy" et "End use energy" comme dans la **Figure 7**, qui donne des exemples du processus de transformation de l'énergie d'une ressource naturelle à une utilisation finale (1996).

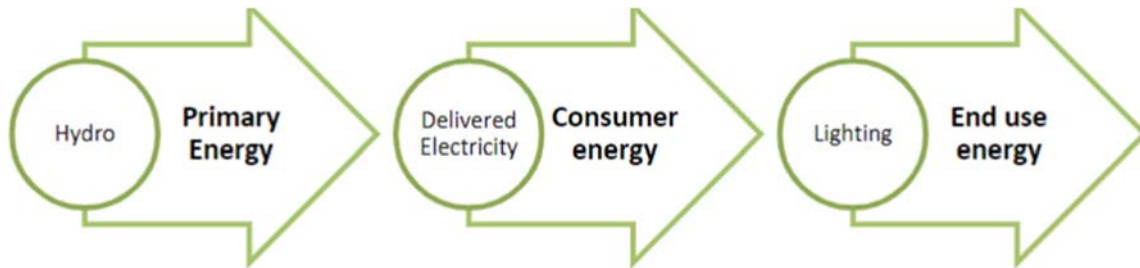


Figure 7 - Différents types d'énergie, adaptés de Patterson (1996)

Dans ce projet, le terme "énergie" est utilisé comme "énergie finale" pour fournir un service énergétique tel que l'éclairage. **L'accent est mis sur la prestation de services du point de vue du marketing et de la science des services.**

Qu'est-ce que l'efficacité énergétique ? Patterson a déclaré qu'on n'a pas accordé suffisamment d'attention à la définition des termes et des indicateurs pour le rendre opérationnel. En outre, il rend compte des questions méthodologiques qui se posent lorsqu'il s'agit de le rendre opérationnel.

*« L'efficacité énergétique est un terme générique et il n'existe pas de mesure quantitative sans équivoque de l'"efficacité énergétique". Il faut plutôt se fier à **une série d'indicateurs** pour quantifier les changements dans l'efficacité énergétique. En général, l'efficacité énergétique consiste à utiliser moins d'énergie pour produire la même quantité **de services ou useful output.** » (Patterson, 1996, p. 1).*

¹ <https://www.merriam-webster.com/dictionary/energy>



La définition est illustrée à la **Figure 8**. Pour Patterson, la façon de définir "Useful output" et "Energy input" du processus suscite des considérations méthodologiques sérieuses, souvent ignorées dans la littérature. Il classe le type d'indicateurs en quatre catégories : (1) Thermodynamique, (2) Physique-Thermodynamique, (3) Économique-Thermodynamique et (4) Économique. Dans la deuxième catégorie, on tente de mesurer la "**prestation de service du processus**", l'efficacité enthalpique ne mesure que "useful output", le reste est gaspillé. L'efficacité enthalpique est souvent appelée "first-law efficiency" en référence à la première loi de la thermodynamique : "dans tout processus de conversion, l'énergie ne peut être créée ou détruite" (Patterson, 1996, p. 2). Il mentionne également que cette méthode ne tient pas compte de la qualité de l'énergie, qu'il considère comme un grave problème méthodologique. Il propose sa propre méthode d'opérationnalisation.

$$\boxed{\text{Energy Efficiency}} = \boxed{\text{Useful output of a process}} / \boxed{\text{Energy input into a process}}$$

Figure 8 - Qu'est-ce que l'efficacité énergétique, Adapté de Patterson et al, (1996)

Dans notre compréhension, "energy input" (énergie primaire, énergie de consommation) peut être considéré comme le "côté production" et "useful output" peut être considéré comme le "côté consommation" ("énergie pour utilisation finale"). Elle suit un processus de transformation de la production à la consommation. **L'économie d'énergie est considérée dans ce projet comme l'action visant à réduire "l'energy input" pour la fourniture du "useful output"**. Ce projet se concentre sur le côté consommation, la "**prestation de services du processus**". L'idée est de mieux définir ce que l'on entend par "résultat utile" ou "prestation de services" du point de vue de la science des services et de proposer un moyen novateur de rendre opérationnel et mesurer "useful output". De nouvelles méthodes doivent être mises au point pour le quantifier non seulement en termes économiques mais aussi en termes sociaux. Les marketeurs et les sociologues sont des spécialistes dans ce domaine.

La notion complexe de « service »

Il y a eu un changement dans le marketing avec l'article fondateur de Vargo et Lusch : « *Evolving to a new dominant logic for marketing* » (2004). Ils définissent un service comme : « l'application de compétences spécialisées (connaissances et aptitudes) par des actes, des processus et des performances au profit d'une autre entité ou de l'entité elle-même. » (Vargo et Lusch, 2004, p. 3). Dans le cas du bâtiment, les ingénieurs et les architectes utilisent leurs compétences spécialisées pour développer des artefacts (bâtiments, systèmes de chauffage et de ventilation, appareils, matériaux...), qui sont les véhicules pour apporter le bénéfice (la valeur) aux "occupants". Cette valeur est créée lorsqu'elle est consommée. La valeur est toujours co-crée en interaction avec le système. "*En bref, le marketing est passé d'une vision dominée par les marchandises, dans laquelle la production tangible et les transactions discrètes étaient centrales, à une vision dominée par les services, dans laquelle l'intangibilité, les processus d'échange et les relations sont centraux* " (Vargo & Lusch, 2004). De ce paradigme de « Service Dominant Logic », le lien entre l'efficacité énergétique, la prestation de services et la co-créeation de valeur est plus clair.



Comme l'ont mentionné Gassman, Enkel et Chesbrough (2010), il est nécessaire de poursuivre la recherche sur l'innovation ouverte dans le secteur des services. Chesbrough se concentre sur l'innovation ouverte dans les services dans un article où il fait le lien entre l'innovation ouverte et la co-création : une étape du processus d'innovation ouverte est la "co-création de services" (2011). Il propose le modèle suivant à la **Figure 9**, avec une mention intéressante de l'intégration des "connaissances tacites". L'ouverture des frontières de l'entreprise permet une intégration des connaissances tacites de l'environnement, qui comprend "les clients, partenaires, compléments ou autres tiers".

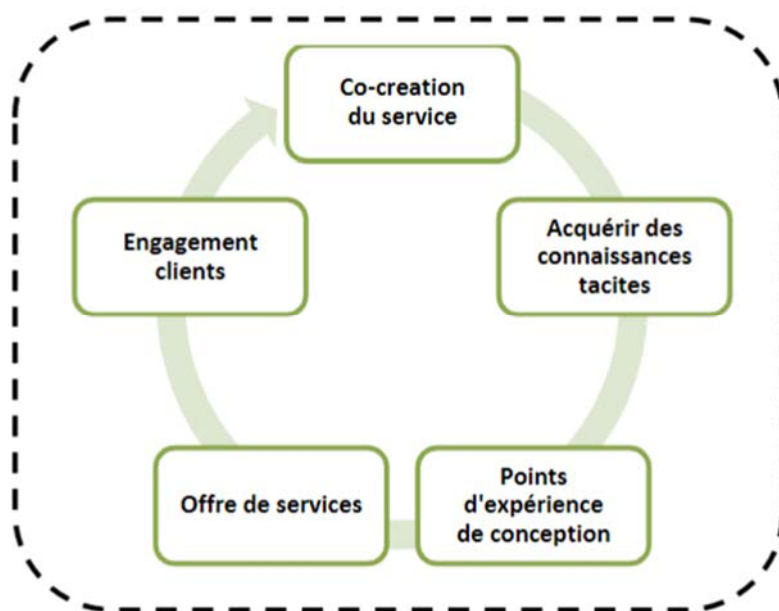


Figure 9 - Processus de co-création dans le secteur des services, adapté de Chesbrough (2011)

Il s'agit clairement d'une perspective centrée sur l'entreprise avec un "environnement extérieur" représenté en dehors des lignes pointillées. De ce point de vue, il semble que les entreprises du secteur du bâtiment et de l'énergie devraient engager les clients dans des activités visant à co-concevoir une intervention d'économie d'énergie. Cependant, il pourrait aussi être compris différemment, dans une perspective centrée sur le client. Heinonen propose de se rapprocher des clients : "Au lieu de se concentrer sur la façon dont les clients peuvent s'engager dans la co-création avec l'entreprise, **les fournisseurs de services devraient plutôt se concentrer sur leur implication dans la vie des clients.**" (Heinonen et al., 2010 cité par Grönroos & Voima, 2013). Au lieu d'intégrer les clients au sein du département R&D des services publics, les entreprises devraient aller au-delà des frontières de l'entreprise pour apprendre des pratiques sociales, avec des méthodes ethnographiques par exemple.

Dans cette perspective, **le rôle des différents acteurs du système évolue**. Les utilisateurs deviennent des co-concepteurs, avec des planificateurs professionnels. Gassman et ses collaborateurs (2010) proposent également un rôle évolutif pour les universités "*des tours d'ivoire aux médiateurs du savoir*" (p. 4), qui va dans le même sens que Sanders et Stappers : **le chercheur devient un facilitateur dans le processus d'innovation ouverte** (2008).



Le concept de « services énergétiques »

Une recherche récente de Michael James Fell a été menée sur la définition du concept (2017). Il souligne l'importance croissante de la gestion de la demande, d'où l'intérêt de mieux définir les "services énergétiques". Il a analysé 185 articles de deux revues différentes contenant le terme "**service énergétique***". Ce concept n'est mentionné que dans **0,5% des articles sur la thématique "Energie"** qu'il analyse. Sur ces 185 articles, seuls 10% proposent une définition des services énergétiques et 50% donnent des exemples de services énergétiques (173 exemples au total). Fell a élargi la revue de la littérature avec la "littérature grise" et a trouvé 12 définitions supplémentaires.

Il a constaté des incohérences dans les différentes définitions proposées et a élaboré sa propre définition à partir d'une analyse du contenu des documents sélectionnés :

« Les services énergétiques sont les fonctions exécutées à l'aide d'énergie qui sont des moyens d'obtenir ou de faciliter les services ou états finaux souhaités. »

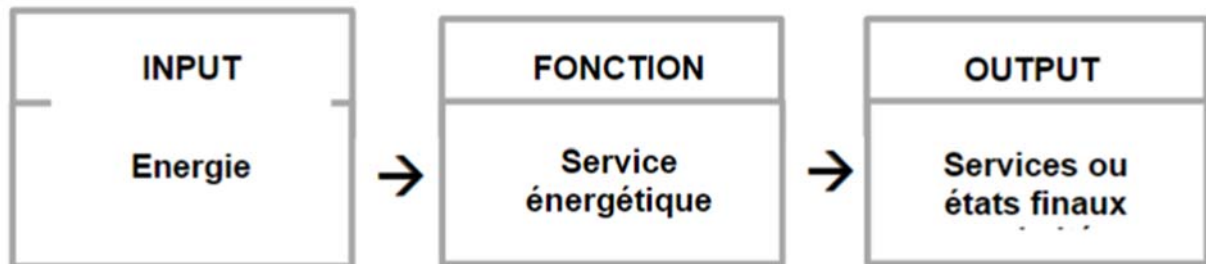


Figure 10 - Qu'est-ce qu'un service énergétique, d'après Fell (2017)

Il différencie la "fonction" et les "états finaux", ce qui n'est pas souvent le cas dans les différents documents qu'il a examinés : "il est nécessaire de déterminer où s'arrêtent les services énergétiques, et où commencent les services finaux." (...) Il propose des exemples : Le service énergétique "éclairage" a pour but de pouvoir voir la nuit (service final) ". (Fell, 2017, p. 8).

Pour encadrer ses recherches et analyser une quantité "gérable" de littérature, Fell a analysé des articles de deux revues différentes, à savoir : "Energy Policy" et la récente revue "**Energy Research and Social Science**". Ces revues ne se concentrent pas sur la partie "service" du concept "service énergétique" mais sur la partie "énergie". Dans ce projet, nous soutenons que **la discipline marketing peut contribuer à définir le "service énergétique" dans une perspective différente et complémentaire**. Plus précisément, la science des services pourrait aider à définir en général ce qu'est un service. Cette recherche est ancrée dans le paradigme Service Dominant Logic (SDL), proposé par Vargo et Lusch en 2004. SDL se situe à la croisée des disciplines Marketing et Service Science. SDL considère que toutes les économies sont des économies de services et que **le service est ce qui crée de la valeur pour les résidents**. Le watt, par exemple, ne crée pas de valeur pour les résidents ; ce n'est qu'un produit, un "véhicule" qui apporte la valeur du service aux résidents. La valeur (l'avantage) est toujours co-crée lorsque le service est consommé. Lorsque des watts sont perdus pendant le transport, ils ne créent aucune valeur.

Dans le secteur de l'énergie et du point de vue de l'ingénierie, les consommateurs sont souvent, pour l'instant, au bout de la chaîne de valeur en tant que consommateurs du service énergétique. Qu'arrive-t-il s'ils sont placés au début de la chaîne de valeur, en tant que co-créateurs de valeur, lorsqu'ils conçoivent des services énergétiques en collaboration avec des intervenants clés ? **Quel serait l'impact sur la performance énergétique des bâtiments basse consommation ?**



Dans la discipline de l'ingénierie, l'accent est souvent mis sur la partie production, sur l'apport de la prestation de services énergétiques, sur les artefacts, une technologie spécifique par exemple. Dans la discipline du marketing, l'accent est mis sur les résultats, du côté de la demande, sur la prestation de services dans un paradigme SDL. **Un système de chauffage, par exemple, n'est pas ce qui crée de la valeur pour les résidents, ce qui crée de la valeur, c'est le service énergétique fourni par le système de chauffage** : "chauffage", l'état final est de se sentir bien au chaud et à l'aise à la maison. Ce cadre théorique de co-création de valeur au sein de SLD est utilisé au niveau méta pour décentraliser l'attention du produit aux services dans un secteur où la technologie est prédominante.

Comment définir le " marketing social " ?

Tout d'abord, le terme "social" doit être défini : "Social : de ou en relation avec la société humaine, l'interaction de l'individu et du groupe, ou le bien-être des êtres humains en tant que membres de la société." Dans la littérature scientifique, Kotler et Zaltman ont inventé le terme marketing social en 1971 déjà :

« Le marketing social est la conception, la mise en œuvre et le contrôle de programmes visant à influencer l'acceptabilité des idées sociales et impliquant des considérations de planification des produits, de tarification, de communication, de distribution et de recherche marketing. »

A partir de cette première définition, une "idée sociale" est une idée liée au **bien-être des êtres humains**. Kotler et Zaltman décrivent le marketing social comme un processus qui peut être utilisé pour concevoir un programme, ce que nous avons appelé une intervention. Dans cet article, ils proposent une adaptation des 4P à dimension sociale. Après près de 50 ans, cet article contient encore des idées importantes, par exemple sur la thématique de la pollution qui n'a pas proposé un "produit" clair à acheter, un appel à l'action clair. Avec la multiplication d'acteurs non coordonnés, elle a provoqué un "surenchérissement d'intérêt" (déjà mentionné en 1971). **Dans le cas de l'EE, il est particulièrement intéressant de ne pas se concentrer uniquement sur les coûts " monétaires ", mais aussi sur les " coûts d'opportunité " et les " coûts psychiques ", peu souvent intégrés dans les programmes d'efficacité énergétique.** *"Les auteurs croient que des causes sociales spécifiques pourraient bénéficier d'une réflexion et d'une planification marketing"* (Kotler & Zaltman, 1971). Présenté de cette façon, le marketing devient un outil ; il n'est ni positif ni négatif. L'impact de l'outil sur la société est positif ou négatif. Aujourd'hui, le marketing est souvent utilisé de manière péjorative au sein de la population et a une connotation de manipulation. Les auteurs avaient déjà mis en garde les spécialistes du marketing social contre ce phénomène dans ce document en 1971. **Le marketing peut également être utilisé pour une implication sociale positive.**

En 2000, un psychologue, McKenzie-Mohr, frustré de voir que les planificateurs professionnels de l'environnement n'utilisaient pas les connaissances de la recherche sur le marketing social, a proposé un processus simple pour élaborer une intervention en marketing social. Il l'a appelé "**marketing social communautaire**". Le processus comprend quatre étapes à suivre pour élaborer une intervention :

(1) Découvrir les obstacles et choisir les comportements, (2) Concevoir des stratégies, (3) Piloter, et (4) Évaluer. Ce processus commun de marketing a été illustré par différents exemples de marketing social dans son article. **L'agent de changement est toujours un planificateur professionnel, mais ce planificateur est encouragé à faire des recherches préliminaires et à tester son plan in situ dans des projets pilotes.** Cela constitue l'intervention de marketing social. L'intérêt de ce processus est aussi de fusionner un plan de marketing et un plan d'économie d'énergie afin de mieux cibler l'intervention sur l'auditoire. C'est également le point de vue de l'équipe de recherche lorsqu'elle élabore une intervention visant à accroître l'efficacité énergétique dans les bâtiments à faible consommation.



Le carrefour des différents cadres conceptuels

Ce projet se situe au carrefour de la production et de la consommation de services énergétiques dans les bâtiments basse consommation, nécessitant une recherche interdisciplinaire : (1) mieux comprendre le système sociotechnique (Geels, 2004), et (2) agir sur lui par une intervention d'économie d'énergie. Dans cette partie, les liens entre les différentes disciplines et les cadres conceptuels seront proposés. Dans la pratique, **les ingénieurs et les architectes se concentrent souvent sur la production et les spécialistes du marketing, les sociologues et les psychologues sur la consommation**. Ces deux axes différents montrent une séparation claire entre la production et la consommation, avec des acteurs différents impliqués à chaque étape du processus, comme on peut le voir dans la **Figure 11** proposée par Geels (2004).

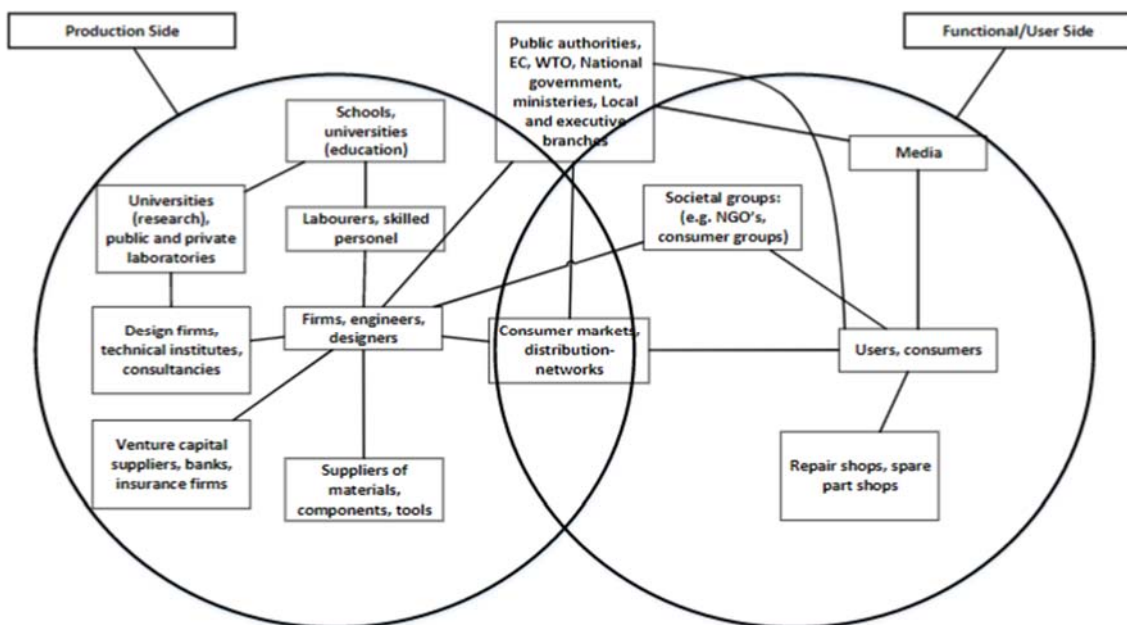


Figure 11 - Groupes sociaux dans le secteur du bâtiment, adapté de Geels (2004)

Le service, par définition, est produit et consommé simultanément (Vargo & Lusch, 2004), ce qui signifie que la frontière entre production et consommation n'est pas aussi claire qu'à la Figure 11 et qu'il n'est pas évident de séparer "côté production" et "côté fonctionnement/utilisateur" comme proposé par Geels dans son modèle, avec "marchés consommateurs, réseau de distribution" à l'intersection (2004). Par conséquent, il n'est pas évident de séparer les acteurs qui participent à la "production", comme les architectes et les ingénieurs, et ceux qui participent à la "fonction/utilisateur", comme les "occupants", les "utilisateurs" et les "consommateurs" (une terminologie différente est utilisée dans différentes disciplines). **Dans le cadre d'un processus de co-design, les parties prenantes traditionnellement considérées du "côté de la demande" co-développent des produits, des services et des interventions, avec les acteurs traditionnellement considérés du "côté de la production".**



La notion de "prosommateurs" complique la modélisation, car le consommateur d'énergie peut être le producteur de sa propre énergie : où placer le "prosommateur" dans ce modèle ? Le modèle est toujours une simplification d'une réalité complexe, mais dans ce cas, même les cercles séparant la production et la consommation devraient être revus dans une perspective de science du service. Comme le proposent Vargo et Lusch, les consommateurs sont toujours des co-créateurs de valeur lorsqu'ils consomment le service ; toutes les économies sont des économies de services (2004).

Qu'est-ce que cela signifie pour les services énergétiques et les économies d'énergie ? Si une intervention vise à modifier le système socio-technique et si le consommateur est toujours un co-créateur de valeur, la performance sociale du service dépend de la capacité du système socio-technique à fournir la valeur. La proposition du chercheur est d'intégrer le consommateur dans la chaîne de valeur en tant que co-concepteur. Si le consommateur n'est pas satisfait de la valeur créée dans le système, il a la possibilité de devenir un prosommateur et de produire sa propre énergie. Il devient un "lead user" comme l'a mentionné von Hippel, développant une solution pour répondre à ses propres besoins car la solution fournie par le marché ne le satisfait pas totalement (2005).

Les entreprises telles que les entreprises de services publics et les entreprises de construction ont le choix de les intégrer ou non. **Les consommateurs ont également la possibilité de modifier le système sociotechnique pour répondre à leurs propres besoins.** L'étude de leurs pratiques de consommation de la vie quotidienne et leur intégration dans la co-conception d'une intervention d'économie d'énergie irait dans le sens proposé par l'Open Innovation (OI). C'est la proposition que l'équipe de recherche testera dans ce projet. Comment intégrer les différents acteurs mentionnés par Geels (2004) ? Les Living Labs proposent une typologie des acteurs utilisant le modèle Quadruple Helix : (1) les universitaires, (2) les pouvoirs publics, (3) les entreprises privées et (4) les citoyens. L'innovation ascendante est l'approche centrale. Dans les LLs, les acteurs ne sont pas séparés par "côté production" et "côté fonctionnement/utilisateur" comme le propose Geels (2004) mais sont réunis dans un **écosystème d'acteurs contribuant par leur interaction à la co-conception de l'intervention.** Les LL sont considérés comme des intermédiaires d'innovation qui orchestrent le processus d'IO. Ils jouent également le rôle de catalyseurs. Steels et al ont également proposé une contribution importante aux avantages de la co-conception :

"Le processus de co-design a également apporté des avantages inattendus. Premièrement, les résultats de la recherche ont modifié les hypothèses implicites des chercheurs. Ainsi, en plus d'acquérir de nouvelles idées ou de nouveaux points de vue, le co-design peut aussi aider à changer des idées ou des points de vue existants." (2011, p.55).

Ces hypothèses sont ancrées dans les différentes parties du système sociotechnique : normes, acteurs, artefacts (Geels, 2004). Les normes architecturales nationales, par exemple, sont basées sur des hypothèses d'usage. Les artefacts tels que l'automate de régulation du système de ventilation sont basés sur des hypothèses. Les chercheurs ont également formulé des hypothèses sur le niveau de pouvoir et d'intérêt des différents acteurs qui peuvent différer de la réalité. Ces hypothèses, proposées pendant la phase de conception (phase préalable à l'occupation), peuvent ne pas être exactes, et une conception conjointe avec les intervenants pourrait modifier ces hypothèses au moyen d'une boucle de rétroaction entre la phase d'exploitation et celle de la conception. Ainsi, l'intérêt de l'intégration des méthodes agiles dans les LLs.



1.2 Justification du projet

Les recherches de co-design en Living Labs ont été menées principalement dans des secteurs tels que la santé, le tourisme, le développement régional... Peu d'articles décrivent l'utilisation de cette méthode participative pour la conception et l'exploitation des services énergétiques. Le but de cette recherche est de tester cette méthode dans le secteur de l'énergie et de comprendre comment intégrer différents types d'intervenants pour co-concevoir des interventions d'économie d'énergie pour réduire l'écart de performance énergétique lié aux pratiques sociales. Nous pouvons formuler les questions de recherche comme suit : **La méthode de co-conception utilisée dans les LL est-elle transférable au secteur de l'énergie ? Comment faire participer les principaux intervenants au processus de co-conception d'un plan d'économie d'énergie ? Quel serait l'impact sur l'écart de performance ? Existe-t-il un écart de performance sociale**

1.3 Objectifs du projet

Cette section propose de décomposer les questions de recherche pour aboutir aux objectifs. Pour plus de clarté, Wacker propose de répondre aux questions de base (1998), comme dans le Tableau 2 :

Questions	Réponse du projet
QUI	Les principales parties prenantes du partenariat public-privé personnes (PPPP)
QUOI	Co-conception de services énergétiques et d'interventions d'économie d'énergie
QUAND	Pendant la transition énergétique, grâce à une technologie de pointe.
OU	Dans les bâtiments à faible consommation, en Suisse, dans un cadre Living Lab
COMMENT	Avec des méthodes de co-conception et de marketing social communautaire
POURQUOI	Pour réduire l'écart de performance énergétique (variable dépendante)
DEVRAIT/ POURRAIT	Nous devrions intégrer les intervenants clés dans la co-conception d'une intervention d'économie d'énergie. Nous pourrions alors réduire l'écart de performance énergétique, ce qui aurait des répercussions positives sur l'environnement et la société.

Tableau 2 - Réponses aux questions de recherche, adaptées de Wackers (1998).



La Figure 12 représente schématiquement ce que les auteurs ont l'intention d'étudier dans ce projet :

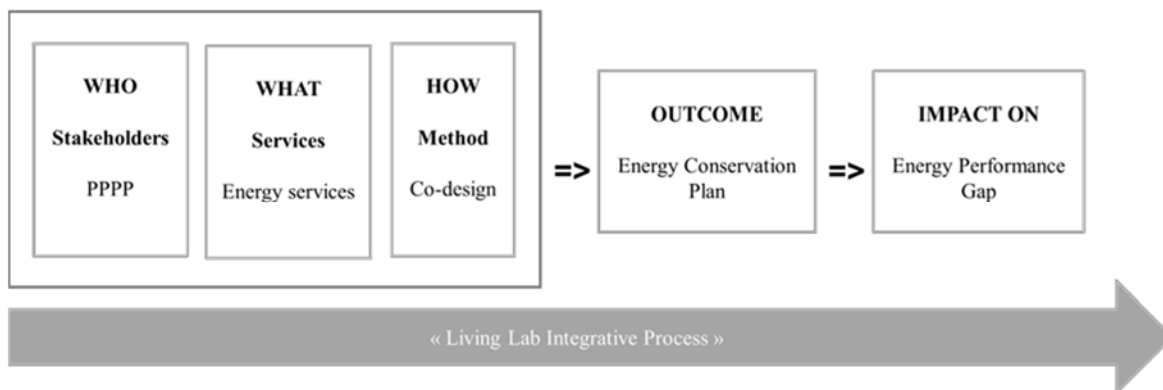


Figure 12 - Principaux éléments de la conception de la recherche



2. Procédure et méthode

Les bâtiments à faible consommation de l'éco-quartier étudié seront utilisés comme des laboratoires vivants où les interventions in situ seront menées en utilisant des mixed-méthods séquentielles. Différentes parties prenantes seront invitées à participer : (1) les chercheurs en sciences sociales auront un rôle de facilitateurs et conduiront et modéreront l'expérience, (2) les chercheurs en économétrie mesureront la performance énergétique avant et après les différentes interventions, (3) les ingénieurs surveilleront les bâtiments du quartier et sépareront l'influence des bâtiments et celle des occupants sur l'efficacité énergétique globale du bâtiment, (5) Les entreprises de construction donneront accès aux bâtiments et aux données de consommation et utiliseront les résultats pour la conception des futurs bâtiments à faible consommation, (6) Les occupants participeront aux différentes phases de la recherche appliquée : des entrevues qualitatives et des ateliers et (6) L'association Minergie utilisera les résultats de la recherche pour faire évoluer le processus de labellisation et communiquera les résultats de cette recherche.

Voici ci-dessous plus de détails sur les différentes méthodes économétriques et de marketing social.

Mixed methods séquentielles

Les **analyses économétriques** sont conduites au niveau des ménages du quartier (niveau MACRO), avec pour objectif d'expliquer les consommations d'énergie (chauffage, ECS, électricité) non seulement par les **éléments techniques du logement**, mais également par les **caractéristiques sociodémographiques** des ménages (nombre de personnes, âge, niveau d'éducation, ...). De tels modèles permettent ainsi d'indiquer quels facteurs sociodémographiques ont tendance à augmenter l'écart de performance ou au contraire à le réduire. Afin de pouvoir les effectuer, il est au préalable nécessaire de **relier les données de consommations du logement** (données du distributeur et du smart meter) **avec les données socio-démographiques du ménage** habitant dans ce logement.

Le lien entre ces deux bases de données s'est révélé plus compliqué que prévu. Les identifiants n'avaient effectivement pas été relevés de manière complète au moment de la collecte initiale des données car le constructeur trouvait ces données trop intrusives. Lors du premier sondage, le numéro d'appartement n'avait pas été demandé et avait été retiré de l'enquête, il s'agissait donc de « deviner » quel compteur été relié à quel répondant du sondage en croisant les informations sur le nom de rue, l'étage et l'exposition, exercice très laborieux et qui a fortement réduit l'échantillon de 150 à répondants au sondage de 2014 à 50 appartements avec consommation d'énergie...

Nous avons par conséquent dû relancer un sondage au mois de juin 2018 pour collecter de nouvelles données socio-démographiques auprès des ménages habitant le quartier d'Eikenott, ce qui a permis d'élargir le nombre de ménages pour réaliser les analyses économétriques. L'échantillon du deuxième sondage est constitué de **95 ménages sur les 300 appartements** que compte le quartier.

Récupération des données des smart meters

Grâce aux smart meters installés sur les bâtiments de l'éco-quartier de Gland, il a été possible de collecter certaines informations énergétiques relatives aux logements composant l'ensemble des bâtiments. Les smart meters ont mesuré un éventail large recouvrant l'énergie électrique et thermique (457 points de mesure), la consommation d'eau chaude sanitaire (252 points de mesure) et la température dans les zones séjour et nuit (619 points de mesure). Les données, à une fréquence variable de 10 minutes à



plusieurs heures selon le type, sont disponibles sur 5 années complètes, de 2014 à 2018. Il est à noter que les données 2018 et 2019 ont été fournies fin octobre 2019 (soit trois mois avant la fin du projet) et n'ont permis qu'une analyse sommaire. Trois années complètes de mesures ont été analysées. A partir des données historiques mensuelles sur trois années, il a été possible de comparer les paramètres réellement mesurés aux données utilisées dans le bilan thermique à partir du logiciel Lesosai. Sur la base de ces données, nous présentons les résultats pour les besoins de chauffage et les consommations électriques.

Sondage et modèles économétriques

Concernant l'échantillon étudié, le quartier d'Eikenott comporte environ 400 ménages². Avec 95 répondants correspondant chacun à un ménage, nous avons des marges d'erreur (avec alfa à 5%) de 9.51%. Même si nous considérons une population de base plus petite (seulement les adultes) il faudrait avoir une taille de la population de 125.9 personnes afin d'avoir une marge d'erreur de 5%. Pour repérer les observations non-pertinentes (échelle systématique, outlier et peu documenté), les variables textes, de système ont été exclues, ainsi que les variables qui diffèrent des deux enquêtes.

Les résultats socio-démographiques seront tout d'abord présentés afin de définir le nombre d'habitants par ménage, la configuration du ménage, la profession, le niveau d'éducation. Ensuite, différentes analyses multivariées seront proposées en nous concentrant sur trois énergies différentes : le chauffage, l'électricité et finalement l'eau chaude sanitaire. Ces données de consommation ont ensuite été croisées avec les données socio-démographiques.

La difficulté de ce projet est de combiner les apports des différentes disciplines (marketing social, économétrie, statistique, ingénierie) pour **développer un modèle unique et interdisciplinaire**. Notre projet est basé sur l'hypothèse que les comportements, les caractéristiques techniques et leur interactions ont des effets sur la consommation énergétique (**sociotechnical system theory**) comme mentionné dans la **Figure 14** :

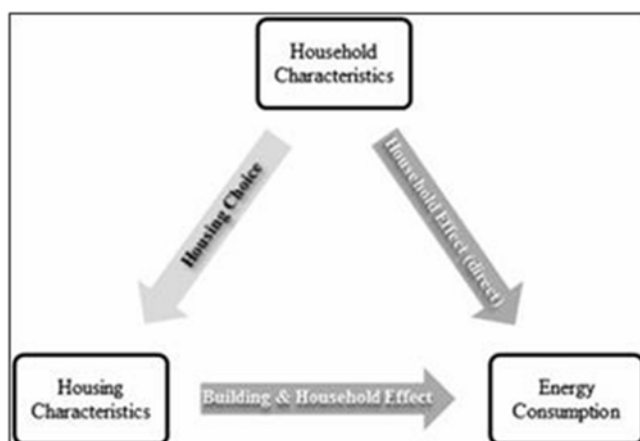


Figure 13 - Facteurs X des bâtiments et des ménages et consommation d'énergie dans le secteur résidentiel, adapté de Estiri, (2014)

² <https://www.24heures.ch/vaud-regions/la-cote/gland-nouveau-quartier-pour1100-habitants/story/11760490>



Dans notre cas spécifique, à la différence de la **Figure 14**, nous nous sommes intéressés à la séparation des différentes strates, afin de comprendre quel sera l'impact des mesures co-développées sur différents groupes cibles. Pour cette raison, au lieu de réaliser des modèles de type SEM (exemple de modèle dans la **Figure 15** toujours du même article), nous allons réaliser deux approches différentes :

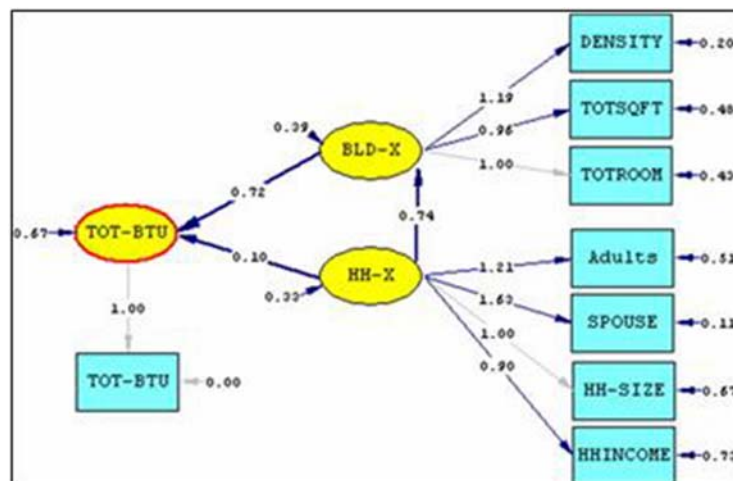


Figure 14 – Exemple de modèle SEM

- Un modèle appelé “stochastic frontier analysis” (SFA)
- Des indicateurs de performance basés sur des équations qui reflètent les comportements

Le questionnaire

Pour la rédaction d'un questionnaire, la méthodologie derrière le modèle SEM permet de définir les hypothèses et donc les questions que nous devons poser.

La procédure est la suivante :

1. Définir les « construits » que l'on veut intégrer dans le modèle (par revue de littérature). ->
2. Choix de variables qui peuvent mesurer les « construits ». ->
3. Définition des hypothèses qui relient toutes les variables entre elles. ->
4. Construction d'un modèle théorique : comment les variables sont reliées entre elles ? ->
5. Construction des tests pour vérifier le modèle empiriquement. ->
6. Construction du questionnaire (qui reprend la revue de littérature).



« Contruits »	Définition	Source
Critère socio-démographique	Un critère socio-démographique est un critère de segmentation ou de ciblage reposant sur une caractéristique sociale ou démographique des individus.	Common grounds (wikipedia)
Comportement en matière d'économie d'énergie	<p>La définition n'est pas unique.</p> <p>Dans l'article de référence, Cook identifie 7 niveaux qui impliquent des action différente (1981).</p> <p>Nous sommes dans la catégorie 7 « Les approches de la septième et dernière catégorie ont pour objectif commun d'informer et de guider les utilisateurs en ce qui concerne leurs efforts de conservation, quelle que soit la motivation de ces efforts.</p> <p>L'une de ces approches fait appel à diverses formes de feed-back fourni par un agent externe. L'autre concerne le self-monitoring, c'est-à-dire la remontée d'informations par les consommateurs eux- mêmes. »</p>	Cook, S. W., & Berrenberg, J. L. (1981). Approaches to encouraging conservation behavior: A review and conceptual framework. <i>Journal of Social Issues</i> , 37(2), 73-107.
Interface utilisateur	<p>L'interface utilisateur (IU), dans le domaine du design industriel de l'interaction homme-machine, est l'espace où se produisent les interactions entre les humains et les machines.</p> <p>L'objectif de cette interaction est de permettre un fonctionnement et un contrôle efficaces de la machine du côté humain, tandis que la machine fournit simultanément des informations qui facilitent le processus décisionnel des opérateurs.</p>	Common grounds (wikipedia)



Mise en place du processus Living Lab Intégré

Après avoir collecté et analysé les données sociodémographiques et les données des smart meter ainsi que la thermique du bâtiment, la phase de co-conception de mesures peut débuter. L'idée est d'intégrer différentes parties prenantes à l'élaboration d'un plan pour réduire l'écart de performance constaté (la partie liée aux pratiques sociales des occupants).

Nous travaillons avec la théorie du “**Community based social marketing**” (CBSM) qui part des comportements pour ensuite tenter de comprendre les barrières aux comportements pro-environnementaux (McKenzie-Mohr, 2000). Un plan d'efficacité énergétique est ensuite conçu pour contourner si possible ces barrières. Il sera piloté dans le quartier et les résultats du plan seront analysés grâce aux équations économétriques. Ce que nous proposons en plus du modèle, c'est de co-développer ce plan avec les parties prenantes, comme illustré dans la **Figure 13**.



Figure 15 - Processus du Living Lab intégré

Nous avons choisi de travailler sur les consommations (1) d'eau chaude sanitaire, (2) d'électricité et (3) de chauffage. Lors des entretiens qualitatifs en face-à-face réalisés en 2017, nous avons demandé aux habitants de décrire leurs consommations dans ces trois domaines. Nous allons ensuite comparer leurs réponses qualitatives avec les données quantitatives sur leurs consommations.

Comme illustré dans les recommandations du premier volet technique, le focus sur ces trois services énergétiques est important : le chauffage est le service énergétique le plus gourmand et où l'écart constaté est le plus élevé.



3. Résultats et commentaires

Cette partie reprend les principaux résultats des analyses, structuré dans l'ordre logique du processus. Le processus peut paraître linéaire, il est beaucoup plus complexe en réalité et nécessite des méthodes agiles et de nombreux ajustements qui figurent dans les recommandations. Pour rappel, l'annexe 1 se concentre sur l'analyse thermique basée sur la norme SIA 380/1 et étudie un bâtiment du quartier en profondeur (niveau MESO). L'annexe 2 comprend les analyses électriques et le rapport à la norme SIA 380/4 au niveau du quartier (MACRO). Elle étudie ensuite les facteurs explicatifs des écarts, à nouveau à un niveau MACRO puis propose des pistes d'interventions.

3.1 Evaluation des consommations électriques et comparaison aux données des smart meters (Tâche 1.2)

Tout d'abord, voici un bref rappel des questions de recherche pour cette partie :

- Existe-t-il un écart de consommation électrique par rapport à la norme SIA 380/4 ?
- Sur quelle(s) pratique(s) liées à la consommation électrique se concentrer dans le co-design ?
- Quelle est l'influence des smart meters sur la consommation notamment électrique ?
- Y a-t-il des différences entre les bâtiments du quartier ? Entre les propriétaires et les locataires ?

Qualité du jeu de données

La volumétrie des données recueillies est importante et la qualité de ces données est inégale, avec les données manquantes et des données aberrantes. Un gros travail de nettoyage de ces données a dû être fait pour pouvoir les utiliser, avec encore certainement des subissions de la qualité d'une partie de ces dernières :

	Energie	ECS	Température
	77'750'000	8'700'000	5'200'000
Nombre de points de mesure	457	252	619
Moyenne mesures / point de mesure (arrondi)		34'000	8'400
Max mesures / point de mesure	283'001	106'905	68'872
Min mesures / point de mesure	11'558	15	2

Tableau 3 - Qualité des jeux de données

On constate une **différence importante** dans la moyenne des mesures par point de mesure. L'énergie a une moyenne arrondie de mesures par point de 170'000, l'ECS de 34'000 et la température de 8'400. La différence de volumétrie dans l'enregistrement des données vient du fait que le système de smart meters ne stocke les données que lorsqu'il y a une variation significative afin d'économiser de la place dans la base de données.

Pour la température, les données stockées sont la valeur de température. Nous avons évalué que la différence qui déclenchait l'enregistrement devait être au minimum de 0.5°C. Etant donné que la



température des pièces à l'intérieur d'un logement ne varie pas rapidement, cela explique le peu de données présentes.

Pour les volumes, les données sont stockées sous forme d'index. Le système change de pas de mesure si aucune consommation n'est mesurée. Ainsi, nous avons des intervalles d'une heure et demie entre deux mesures lorsque l'index est identique, alors que cette fréquence passe à 10 minutes lorsque l'index change.

Cette façon de procéder, normale et légitime, ne nous permet pas de simplement compter le nombre de mesures pour évaluer leur qualité. Une approche différente doit être utilisée. Pour évaluer la fiabilité des données, nous avons sélectionné le compteur ayant le plus de données d'électricité (nommé meilleur compteur) et avons effectué un groupement par année :

Année	Quantité de données dans le meilleur compteur électrique	% de données présentes pour une fréquence de 10 minutes
2014	33'863	64.42
2015	34'323	65.30
2016	48'860	92.70
2017	52'302	99.50
2018	51'527	98.03

Tableau 4 - Groupement par année du meilleur compteur électrique

La qualité des mesures s'améliore au cours du temps pour ce compteur. La qualité était médiocre en 2014 et 2015 (environ 65% des données collectées) alors qu'elle est excellente en 2017 et 2018 (plus de 95% des données collectées). Cette observation est cohérente avec une meilleure fiabilité du système de relève des données, les mises à jour et une meilleure maîtrise du système augmentant la qualité. Un découpage des données mois par mois sur l'année 2018 pour ce compteur donne des résultats uniformes avec des mois comptant 100% de données.

Cette constatation ne peut pas être faite sur l'ensemble des mesures. Un pointage sur d'autres compteurs électriques ayant une volumétrie de données plus faible montre des relevés de données très fragmentaires. Par exemple, un compteur électrique avec 83'651 données relevées sur l'ensemble de la période expose les relevés mensuels suivants :

Année	Nombre de mois présents	Remarques
2014	12	Tous
2015	6	1, 2, 3, 4, 7, 9
2016	10	Janvier et décembre absents
2017	5	Avril à juillet présent
2018	1	Octobre

Tableau 5 - Relevés mensuels électriques



Cela peut être dû à différentes causes telles que :

- Déménagement d'un locataire, appartement vacant et interrupteur général sur OFF ;
- Résidence secondaire vide et interrupteur général sur OFF ;
- Panne de compteur ou du système de télérelève ;

Un croisement des données avec les compteurs du même bâtiment donne les mêmes résultats, les mois ayant des données étant strictement identiques. Il est donc très probable que le système de mesure ait été mis hors tension, ce qui fait penser à une des deux premières causes.

Pour évaluer les compteurs d'eau chaude sanitaire (ECS), nous avons également sélectionné le compteur ayant le plus de données d'ECS. Nous avons ensuite effectué un groupement par année, puis avons comparé la volumétrie avec celle du meilleur compteur d'énergie :

Année	Quantité de données dans le meilleur compteur ECS	Rapport compteurs volume / compteurs énergie
2014	13'329	39.36 %
2015	15'217	44.33 %
2016	15'380	31.47 %
2017	20'824	39.81 %
2018	21'328	41.39 %

Tableau 6 - Rapport compteurs volume / compteurs énergie

Le rapport entre la quantité de données présentes pour ce compteur de volume et le meilleur compteur d'énergie oscille entre 31 % et 44 %. Etant donné la méthode de stockage et la répartition plus ou moins uniforme des données, nous considérons que la qualité des données ECS est identique à celles des compteurs électriques.

En conclusion, nous pouvons dire que les données de 2014 et 2015 sont exploitables, mais à utiliser avec une certaine prudence car il existe des informations manquantes. Lors des analyses suivantes, la pertinence des informations devra être évaluée au cas par cas.

Le recoupement des données des smart meters avec les appartements et habitants a posé plusieurs problèmes qu'il est important de noter. En effet, **ces problèmes vont se retrouver dans d'autres études ou dans d'autres systèmes de smart meters :**

- Le recoupement entre identifiants de plusieurs fournisseurs de données (dans notre cas, les données des compteurs facturés mensuellement et les données des smart meters) est difficile car les identifiants ne sont pas uniques. Par ailleurs, on note une grande hétérogénéité dans les notations de bâtiments et d'appartements ;
- Le recoupement entre les habitants et les compteurs est également difficile, les informations étant également fragmentaires et non homogénéisées ;
- Surtout au démarrage des installations de mesure, on constate une grande quantité de valeurs aberrantes ;



- Il existe des valeurs manquantes sans explication rationnelle. Ces valeurs peuvent manquer pour des causes normales (absence) ou anormales (panne), mais il n'y a pas de possibilité de savoir laquelle de ces deux causes est valide ;
- L'accès à la base de données est difficile, tant du point de vue de la protection des données que du partage informatique, le système de smart meters n'étant pas prêt à la collaboration.

Comparaison des consommations électriques avec la norme SIA 380/4

En tenant compte des informations socio-démographiques recueillies auprès des utilisateurs ainsi que des données techniques des appartements, nous avons comparé les consommations réelles obtenues avec les smart meters avec la norme SIA 380/4.

Dans un premier temps, les **213 appartements des 12 bâtiments équipés de smart meters** ont été référencés avec leur superficie. Les smart meters ont été reliés à chacun de ces bâtiments et leur consommation mensuelle évaluée.

Pour chaque appartement, les consommations mensuelles totales en kWh des années 2014, 2015, 2016 et 2017 ont été évaluées pour révision. **Les données étaient par pas de 10 minutes, mais nous sommes limités à la moyenne mensuelle, moyenne qui est suffisante pour en tirer des conclusions, compatibles avec le mandat reçu.** Ces consommations ont été ignorées si elles présentaient des valeurs négatives ou fortement aberrantes. Puis, une consommation annuelle pour 2014, 2015, 2016 et 2017 a été construite en fonction des valeurs obtenues. Nous avons finalement considéré comme valeur de référence la moyenne des consommations annuelles de ces quatre années. Une dernière analyse de la différence entre ces quatre années a permis de détecter les appartements ayant une trop grande variation et de les éliminer de l'analyse. Ainsi, après apurement, **il reste 200 appartements considérés comme valables.** Cette volumétrie est suffisante pour un résultat statistiquement correct.

Pour chaque bâtiment, une valeur de consommation annuelle de référence en kWh/a a été construite en fonction de la norme SIA 380/1 en utilisant les valeurs suivantes :

- **Demande totale en électricité pour l'habitation** : la valeur la plus proche de la superficie de l'appartement a été utilisée et pondérée par la superficie de l'appartement;
- **Demande spécifique en électricité pour l'éclairage des locaux** : le nombre de pièces a été extrapolé en fonction du tableau concernant la demande totale en électricité pour l'habitation. Les valeurs « moyenne » et « le plus souvent tous » ont été utilisées dans la pondération ;
- **Valeur cible pour la demande annuelle en électricité de la ventilation** : extraite des valeurs limites de référence.



La différence entre la consommation moyenne des quatre années mesurées par les smart meters et la valeur de consommation annuelle de référence a finalement été exprimée en pourcentage.

La moyenne a été effectuée sur les 200 résultats et donne les valeurs suivantes :

Différence moyenne [%]	Minimum trouvé sur les 200 échantillons [%]	Maximum trouvé sur les 200 échantillons [%]	Ecart-type
-14.26	-80.59	133.67	31.8

Tableau 7 - Moyennes de consommation sur les 200 appartements

Une analyse en profondeur, en examinant les courbes de charge des trois appartements ayant la consommation minimale et maximale a été effectuée, et a permis de supprimer l'appartement ayant une différence de consommation de -80.59%. Cet appartement montrait une consommation électrique quasiment permanente de 80W, sauf durant quelques semaines par année. Une analyse de la consommation d'eau montrait également une consommation nulle. Il s'agit donc d'un **appartement vide la plupart du temps**. A noter que la consommation de chauffage était identique aux autres appartements, ce qui montre que **le chauffage est resté enclenché durant l'absence de l'occupant**.

Après suppression de l'appartement cité ci-dessus, les 199 appartements restants présentent les valeurs suivantes :

Différence moyenne [%]	Minimum trouvé sur les 200 échantillons [%]	Maximum trouvé sur les 200 échantillons [%]	Ecart-type
-13.93	-63.67	133.67	31.53

Tableau 8 - Valeurs des 199 appartements

Ces résultats montrent une consommation réelle inférieure d'environ 15% par rapport à la norme SIA 380/1.



Impact des smart-meters sur la consommation électrique

Les analyses de l'impact des smart-meters sur la consommation électrique des utilisateurs ont été effectuées à partir des données de consommation des compteurs électriques officiels. Nous avons compilé les informations relatives des bâtiments pour les années 2016 et 2017. Dans chacun de ces bâtiments, nous avons évalué la surface de plancher occupée par les types d'habitants suivants :

- Avec smart meters / sans smart meters ;
- Propriétaires / locataires ;
- Buanderie privée / buanderie commune ;

L'échantillon des bâtiments se présente selon le **Tableau 9** :

Bâtiment	Surface [m ²]	Avec smart meter	Propriétaire ou locataire	Buanderie
A1.1	4'094	Oui	Locataire	Commune
A2.1	2'222	Non	Locataire	Commune
A2.1	2'222	Non	Locataire	Commune
B1.1	2'100	Oui	Locataire	Privée
B1.2	2'663	Oui	Locataire	Privée
B1.3	2'100	Oui	Locataire	Privée
B1.4	2'663	Oui	Locataire	Privée
B1.5	1'050	Oui	Locataire	Privée
B2.1	2'711	Non	Locataire	Commune
B2.2	1'661	Non	Locataire	Commune
B2.3	2'595	Oui	Propriétaire	N/A
B2.4	3'375	Non	Locataire	Commune
B2.4	3'375	Non	Locataire	Commune
B3.1	2'658	Oui	Locataire	Commune
B3.2	2'894	Non	Locataire	Commune
B3.3	3'046	Non	Locataire	Privée
B3.4	2'658	Non	Locataire	Privée
B4.1	2'022	Non	Locataire	Commune
B4.2	2'035	Non	Locataire	Commune
B4.3	2'022	Non	Locataire	Commune
C1.1	2'487	Oui	Propriétaire	Privée
C1.2	2'487	Oui	Propriétaire	Privée
C2.1	2'033	Oui	Propriétaire	Privée
C2.2	2'033	Oui	Propriétaire	Privée

Tableau 9 - Liste des bâtiments et caractéristiques



Nous avons ensuite comparé les consommations par mètre carré pour les utilisateurs ayant un smart meter avec ceux n'en ayant pas. Les résultats sont les suivants :

Locataires et propriétaires	Consommation moyenne par m ²	Total des m ² référencés
Avec smart meter	2.9	28'963
Sans smart meter	1.68	30'243
Différence %	172 %	
Locataires	Consommation moyenne par m ²	Total des m ² référencés
Avec smart meter	2.62	17'328
Sans smart meter	1.68	30'243
Différence %	156 %	
Locataires avec buanderie commune	Consommation moyenne par m ²	Total des m ² référencés
Avec smart meter	1.48	6'752
Sans smart meter	1.75	24'539
Différence %	85 %	
Locataires avec buanderie privée	Consommation moyenne par m ²	Total des m ² référencés
Avec smart meter	3.35	10'576
Sans smart meter	1.40	5'704
Différence %	240 %	

Tableau 10 - Comparaison des consommations

Seule la catégorie « locataires avec buanderie commune » montre une diminution de 15 % de consommation moyenne par mètre carré. Cependant, les tailles d'échantillons (surfaces) sont extrêmement différentes entre les deux catégories. Pour les autres catégories, **on note chaque fois une consommation jusqu'à 2.4 fois supérieure pour les ménages avec smart meter.**

On peut donc conclure de cette analyse des consommations électriques que :

- Les données sont difficilement accessibles pour analyse, pour une variété de raisons énoncées.
- On ne constate pas d'écart de performance électrique par rapport à la norme SIA 380/4 sur la moyenne des 200 bâtiments étudiés. La consommation moyenne est 15% plus basse que la norme SIA 380/4.
- Les smart meters installés dans l'éco-quartier ne permettent pas une réduction de consommation électrique dans la majorité des cas de figure.



3.2 Résultats des analyses des facteurs humains (tâche 2.2)

Cette partie se concentre sur les facteurs humains qui peuvent expliquer les écarts de performance thermiques (17%) et électriques (-15%). Les données proviennent du sondage effectué en été 2018 dans le quartier pilote.

Description de l'échantillon du sondage

Il est tout d'abord nécessaire de bien comprendre qui habite dans l'éco-quartier d'Eikenott pour mieux analyser les consommations d'énergie et les déterminants de la consommation et pour explorer les pratiques qui ont un impact sur l'EdP. Un sondage a donc été réalisé en juin 2018 dans le quartier. Il a réuni 95 répondants après nettoyage des données, ce qui représente environ un quart des ménages du quartier. La partie suivante présente l'échantillon des répondants, la composition des ménages et leurs caractéristiques socio-démographiques.

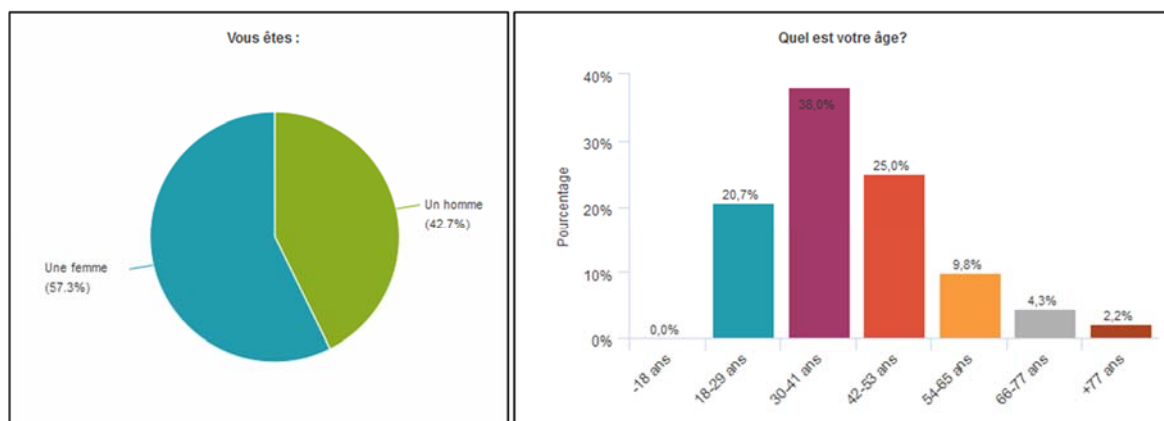


Figure 16 - Sexe et âge des répondants

La **Figure 16** démontre une bonne répartition entre les hommes (43%) et les femmes (57%) dans l'échantillon des répondants. Quant à l'âge des répondants, plus de la moitié se situe entre 30 et 53 ans. Les jeunes de moins de 29 ans ainsi que les personnes âgées de plus de 53 ans sont réparties de façon plutôt égale, représentant chacune environ 20% de la population. Il est à noter que nous n'interrogeons pas les personnes de moins de 18 ans. Les répondants ont été répartis dans des tranches d'âge de 11 ans pour pouvoir les comparer entre elles, en proposant des bornes qui font du sens (exemple : 30 ans : âge moyen du premier enfant en Suisse, 65 ans âge de la retraite).

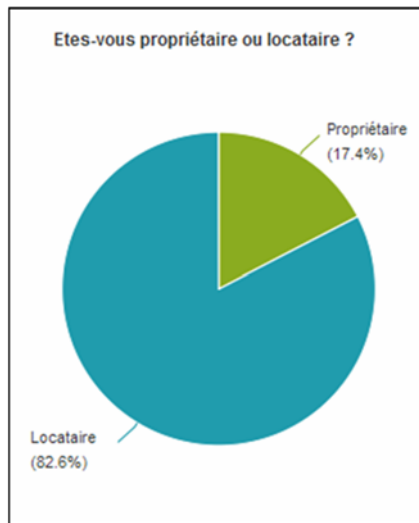


Figure 17 - Propriétaire / locataire

La majorité des habitants questionnés sont des locataires du quartier, à plus de 80%. Cette information est importante car elle sera déterminante lors de l'analyse de l'attitude des habitants face aux services énergétiques. En effet, les visions peuvent être différentes entre propriétaires et locataires.

Une autre caractéristique pouvant avoir des conséquences sur la consommation est la possession d'un animal de compagnie ou non. Ici, un cinquième de notre échantillon possède un animal de compagnie. Selon deux études antérieures (Santin, O. G. (2011) & Kavousian, A., Rajagopal, R., & Fischer, M. (2013).), la possession ou non d'un animal de compagnie a une influence sur la consommation d'énergie du ménage. Cette influence sera vérifiée par la suite dans les tris croisés.

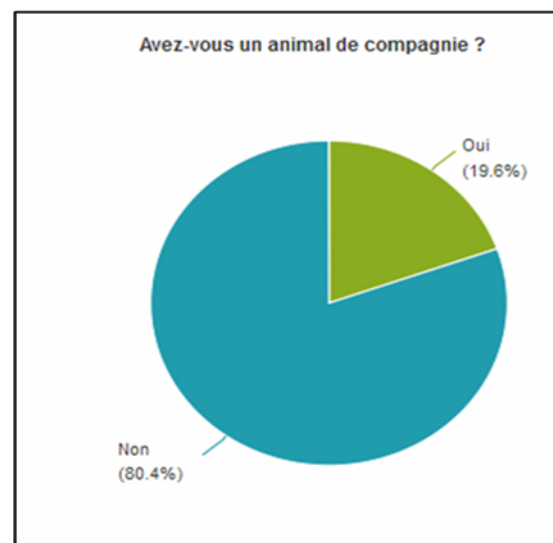


Figure 18 - Possession d'un animal de compagnie



La description du type de ménage est la suivante : un couple avec enfants est le type de ménage le plus représenté (40%), suivi des couples sans enfant (29%), et des familles monoparentales (11%). Une minorité des ménages est en collocation (3%). La catégorie « seul » représente environ 16% des ménages.

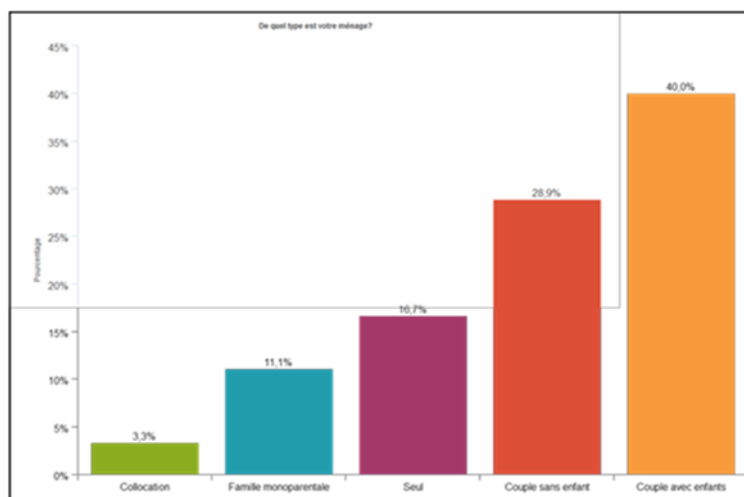


Figure 19 - Type de ménage

On peut ensuite aller plus dans le détail de la composition du ménage en analysant l'activité de ses membres. La catégorie réunissant plus d'un membre par ménage est celle des écoliers ainsi que des retraités. En effet, on y voit une proportion plus élevée d'avoir plusieurs enfants dans un même ménage, ou d'être deux retraités dans un appartement.

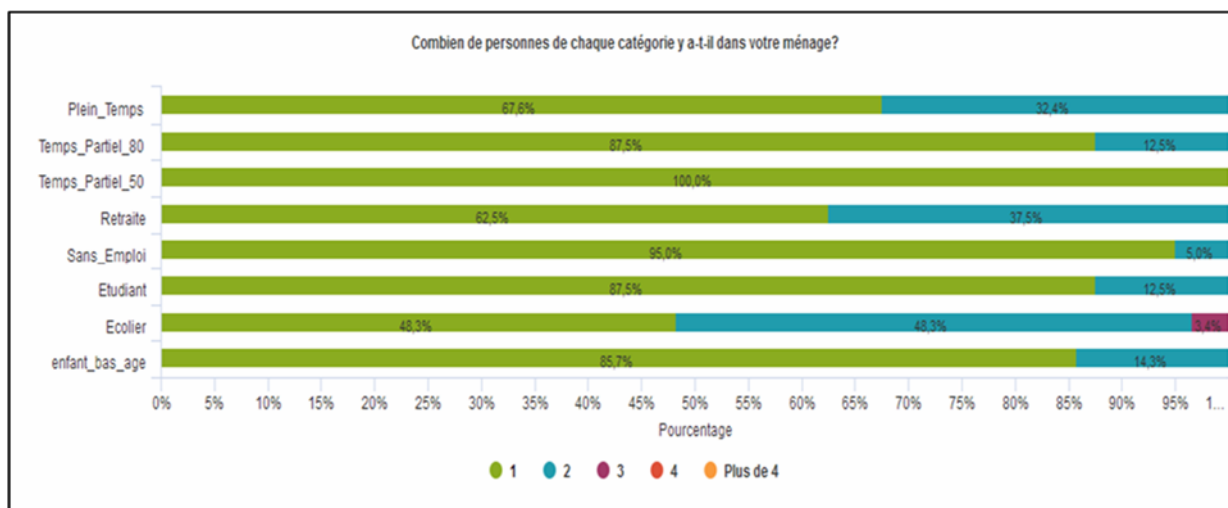


Figure 20 - Nombre de personnes par ménage / catégorie



La profession de l'échantillon est détaillée dans la **Figure 21**. La profession la plus représentée de l'échantillon est celle des employés ou fonctionnaires (53%). Puis environ 11% des personnes ont une profession en tant que cadre dirigeant et 10% comme indépendant. Le taux bas d'hommes ou de femmes au foyer (7,6%) pourra également avoir des conséquences sur les pratiques énergétiques. Près de 6% des répondants sont sans emploi. Un très faible pourcentage d'étudiants (1%) est représenté. En résumé, la grande majorité des personnes interrogées sont employées.

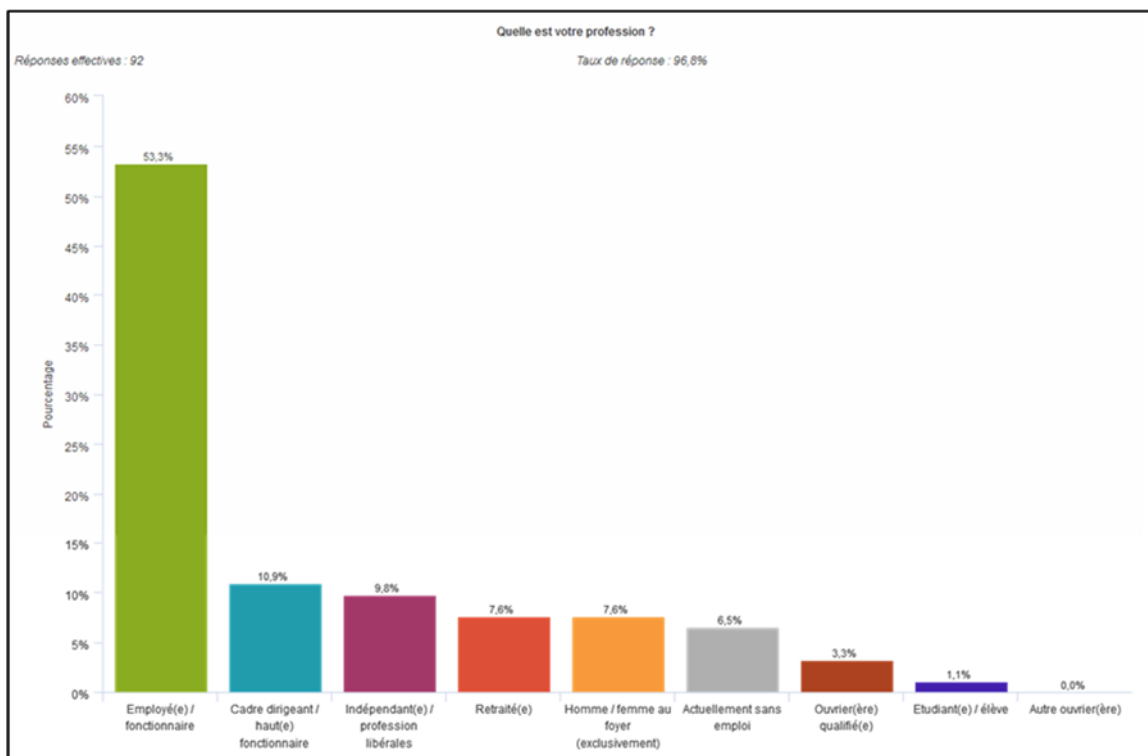


Figure 21 - Profession des habitants

Le niveau d'éducation peut également influencer la consommation d'énergie.

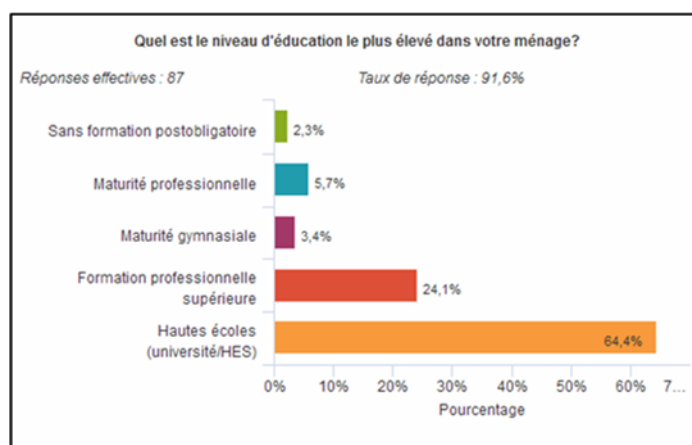


Figure 22 - Niveau d'éducation le plus élevé du ménage



La majeure partie des ménages est composée d'au moins un membre ayant un **diplôme de formation tertiaire**. Connaître le niveau d'éducation peut également avoir des conséquences sur le comportement énergétique des personnes mais également sur la sensibilité et la connaissance des personnes vis-à-vis de l'énergies, comme le démontreront les analyses bivariées dans les chapitres suivants.

Le revenu peut également influencer la consommation d'énergie :

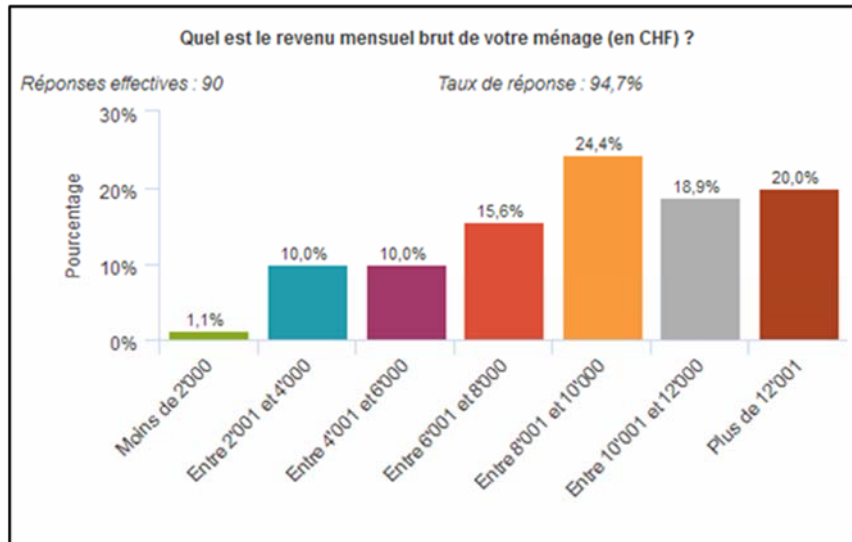


Figure 23 - Revenu mensuel par ménage

Le revenu mensuel du ménage dépasse pour les deux tiers des personnes CHF8'000. Un cinquième de l'échantillon détient moins de CHF6'000 de revenu global mensuel. Il est également intéressant de mentionner le nombre de répondants à cette question. En effet, 90 des 95 répondants au sondage ont déclaré leur fourchette salariale. Cela dénote une **confiance vis-à-vis des personnes qui réalisent l'étude**. Ces données permettront d'affiner les analyses économétriques qui suivront.

En conclusion, grâce à ces premiers graphiques décrivant les aspects socio-démographiques de l'échantillon interrogé via ce sondage, nous avons pu déterminer une série de caractéristiques décrivant l'échantillon des répondants. Il sera ensuite intéressant de faire des tris croisés puis des analyses multivariées pour mieux comprendre l'influence de ces caractéristiques sur la consommation d'énergie et sur l'EdP.



Satisfaction et importance des services énergétiques

La suite des analyses a permis de connaître l'importance des services énergétiques pour la population du quartier, mais également de connaître leur satisfaction vis-à-vis de ces services. Il est en effet intéressant de voir dans quelles dimensions les bâtiments basse consommation donnent satisfaction et si ces éléments sont importants ou non. Quand il s'agit de mettre en place des mesures correctrices, il n'est pas possible d'envisager des investissements pour chaque catégorie, on privilégiera les catégories où la satisfaction est basse et l'importance élevée aux yeux des habitants. Cette analyse se base sur la matrice importance/performance proposée par Martilla & James (1977) et revisitée avec le modèle SERVQUAL qui évalue la qualité du service (Parasuraman et al., 1988). Nous allons tout d'abord présenter les résultats sous forme de tris à plat puis les représenter sous forme de matrice importance/performance. L'importance des services est d'abord présentée :

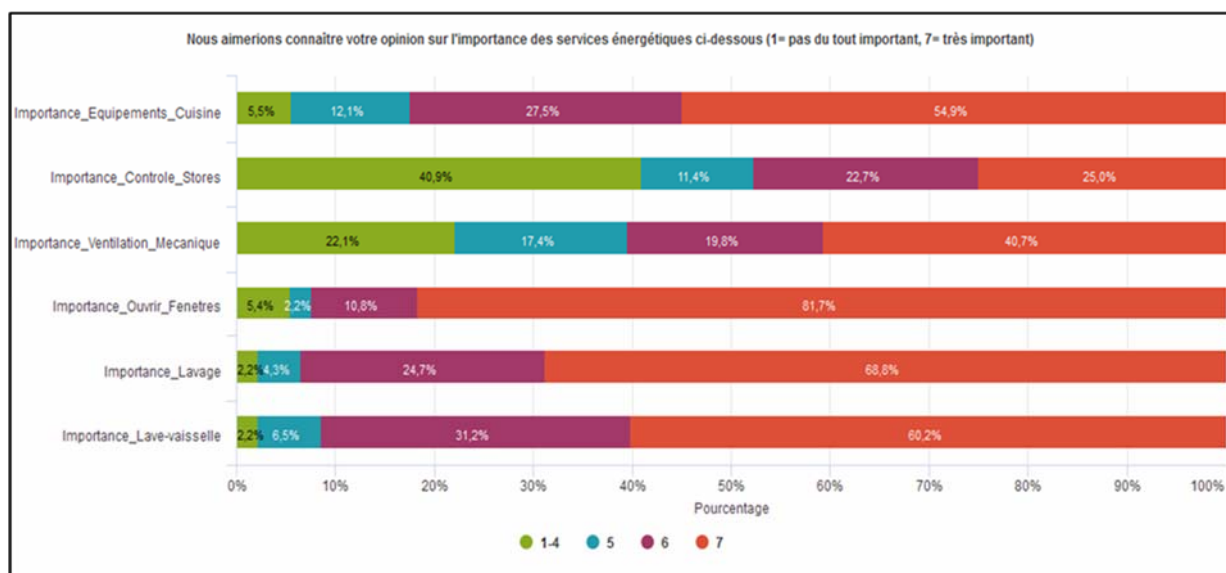


Figure 24 - Importance des services énergétiques pour les habitants

Sur les 95 répondants, la majorité accorde une grande importance (entre 6 et 7) à la possibilité d'ouvrir les fenêtres (92%), mais également à la qualité du lave-vaisselle (91%) et aux appareils pour laver et sécher le linge (93%). En revanche, le contrôle électrique des stores ne représente pas une priorité pour les habitants car « seulement » 48% des répondants ont jugé le contrôle des stores très importants (entre 6 et 7). La ventilation non plus n'est pas l'élément déterminant pour tout le monde : 60% des ménages y accorde une grande importance. Ce qui est intéressant dans ce type d'analyse est de voir que les ménages trouvent tous les services énergétiques importants. Il est donc utile de pouvoir non seulement analyser le niveau d'importance mais également de comparer les items entre eux et de les classer par ordre d'importance en les priorisant.



Après avoir pu déterminer à quels services énergétiques les habitants accordent de l'importance, il est intéressant, pour ces mêmes services, d'observer comment ils évaluent **la satisfaction vis-à-vis de ces services**.

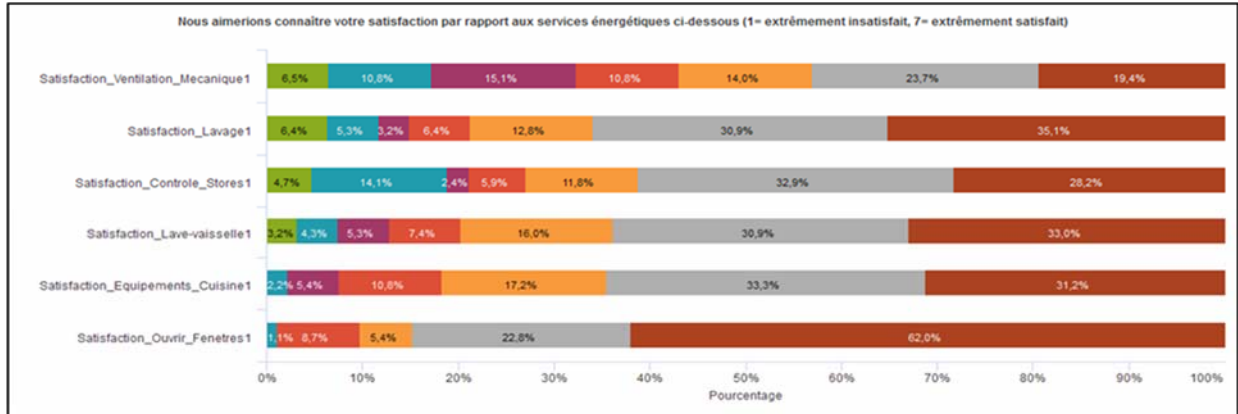


Figure 25 - Satisfaction vis-à-vis des services énergétiques

La possibilité d'ouvrir les fenêtres (6.3/7), les machines à laver ainsi que le lave-vaisselle (5.5/7) semblent être satisfaisants de manière générale. En revanche, l'usage énergétique le moins satisfaisant est la ventilation mécanique du bâtiment (4.6/7). Cela semble corroborer les analyses techniques du bâtiment qui indiquent une trop faible aération mécanique, du moins dans le bâtiment B1.2. Les entretiens qualitatifs exploratoires réalisés en 2017 avaient également mis en lumière ce point. Pour le reste de ces services énergétiques, la satisfaction semble correcte.

Le nuage de points ci-dessous indique les résultats des **mots-clés les plus cités spontanément par rapport à la satisfaction liées aux services énergétiques**. Un problème d'odeur et la qualité de l'air semblent poser problèmes. Cela avait été également soulevé lors des entretiens qualitatifs préliminaires avec les parties prenantes en 2017.



Figure 26 - Nuage des mots sur la satisfaction vis-à-vis des services énergétiques



Sur la problématique de la ventilation, une question a cherché à comprendre les raisons de l'insatisfaction.

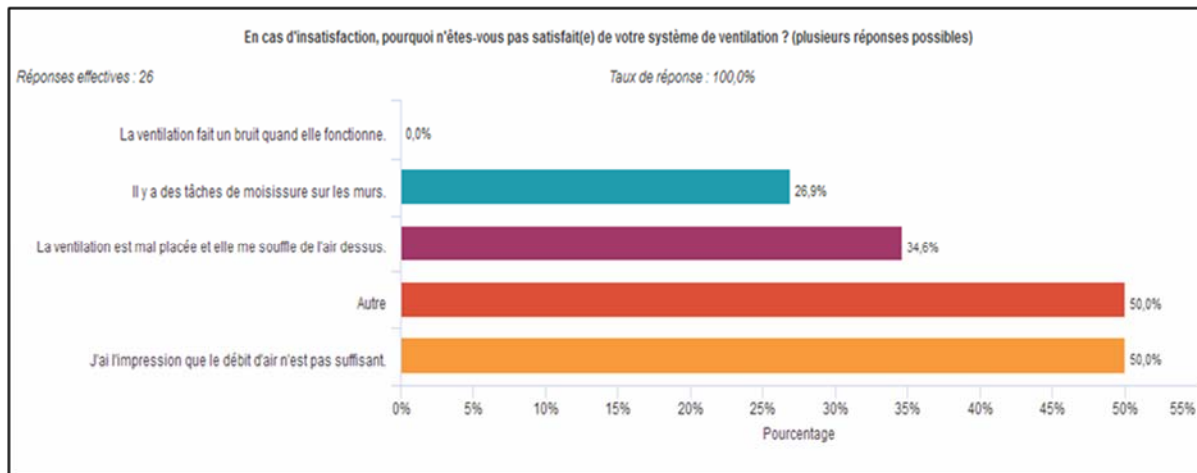


Figure 27 - Insatisfaction vis-à-vis de la ventilation

Nous avons souhaité creuser les causes des insatisfactions liées à la ventilation étant donné l'importance de ce système révélée par les analyses techniques. Pour le système de ventilation, 26 personnes sur 95 répondants ont répondu que **le système ne répondait pas à leurs besoins**. Pour plus de 80% des personnes insatisfaites, la technique du système de ventilation semble défailante. 50% des répondants insatisfaits indiquent des **problèmes avec le débit d'air**. Ce phénomène ne semble donc pas uniquement présent dans le bâtiment B1.2.

Les questions liées à la satisfaction vis-à-vis des services énergétiques ont été partagées en deux groupes pour ne pas alourdir le questionnaire. En effet, le maximum recommandé pour comparer plusieurs items dans un questionnaire est de 7 items différents en même temps. Voici les résultats du deuxième groupe de services énergétiques.

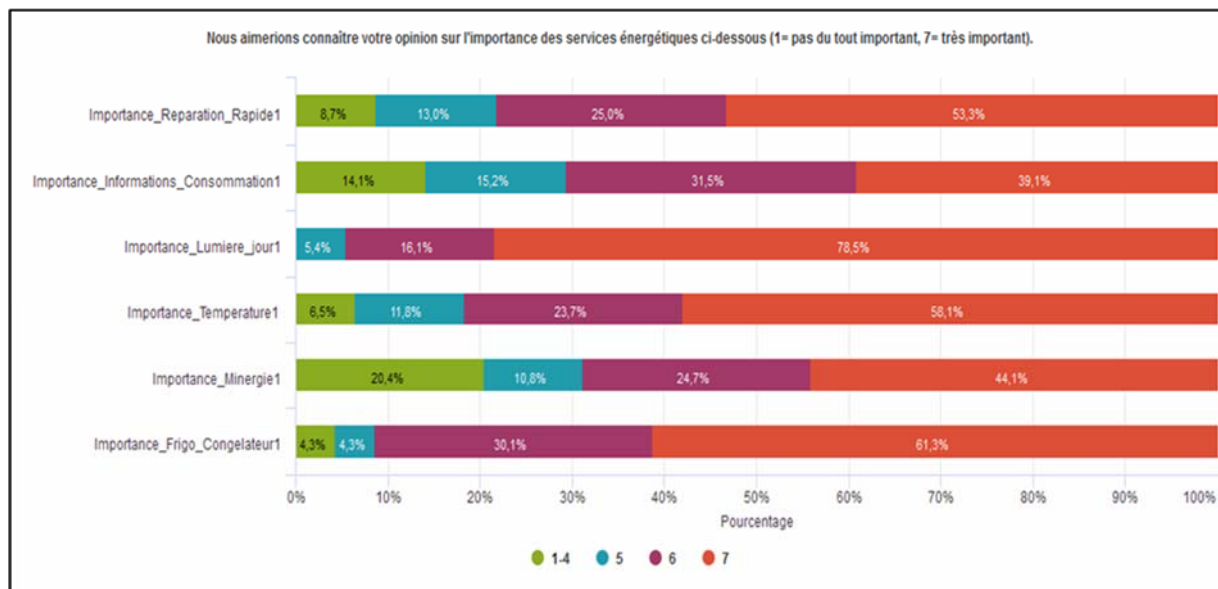


Figure 28 - Importance d'autres services énergétiques pour les habitants



La satisfaction vis-à-vis de ces services énergétiques est présentée ci-dessous :

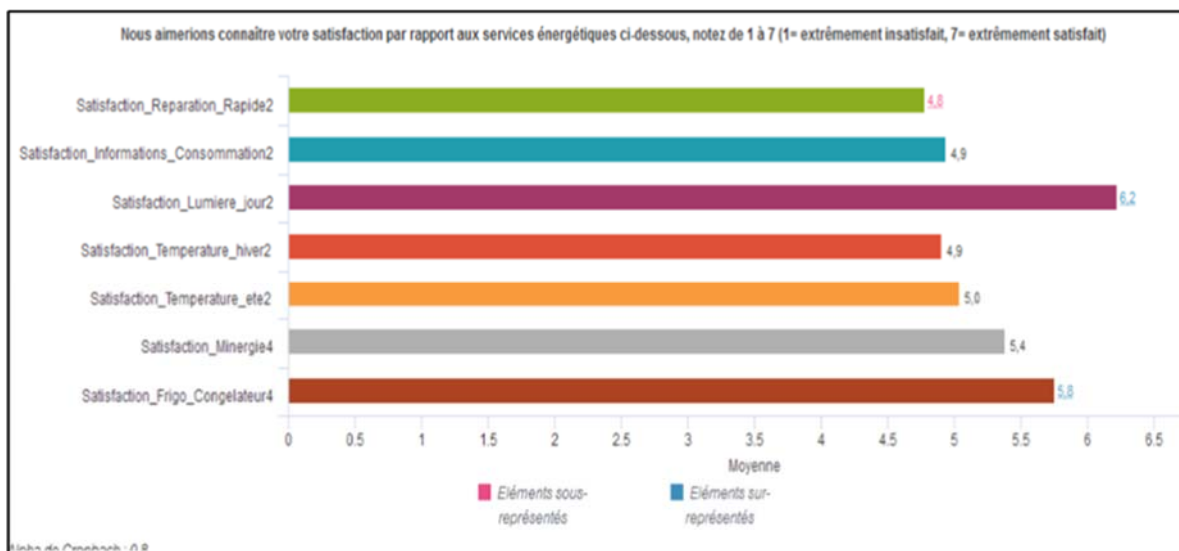


Figure 29 - Satisfaction d'autres services énergétiques pour les habitants

Avoir suffisamment de **lumière du jour dans chaque pièce** semble très important (entre 6 et 7) pour 95% des habitants. Ce service énergétique semble être satisfait pour la plus grande majorité (6.2/7). **Les appareils** pour réfrigérer ainsi que pour congeler les aliments sont également très importants pour 91% des répondants. **Le label Minergie** totalise près de 69% de personnes le jugeant très important, c'est l'item qui ressort en dernier dans le classement de l'importance. En termes de satisfaction, il se situe à 5.4/7.

Le service de dépannage rapide ne semble pas très satisfaisant aux yeux des habitants et totalise la moins bonne moyenne en termes de satisfaction : 4.8/7. En effet, nous avons constaté lors des entretiens qualitatifs de 2017 que les habitants ont de la peine à trouver le bon interlocuteur pour les réparations dans le quartier. Pour les **informations sur la consommation d'énergie**, le taux de satisfaction est assez bas : 4.9/7 alors que l'importance de recevoir des informations sur sa consommation est jugée très importante (entre 6 et 7) pour 70% des répondants. **L'insatisfaction liée à la température** est également intéressante à creuser car le niveau de satisfaction est bas (4.9/7 en hiver et 5/7 en été) alors que 82% des répondants la jugent très importante (entre 6 et 7).



Voici une décomposition des causes potentielles d'insatisfaction liées à la température en été :

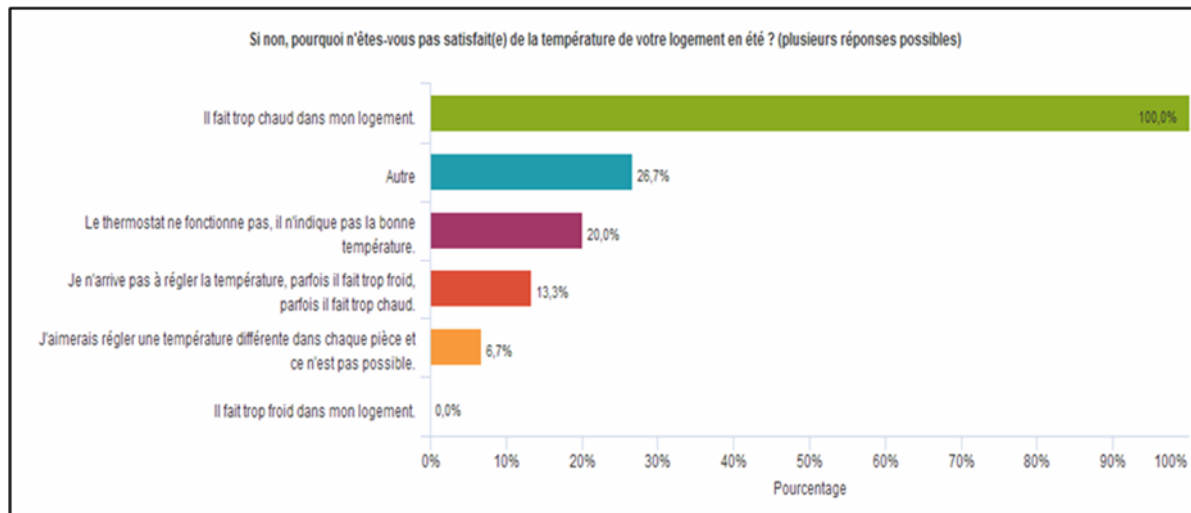


Figure 30 - Insatisfaction de la température du logement en été

Pour l'ensemble des personnes insatisfaites (15 observations) concernant la température du logement en été (23/95), tout le monde affirme qu'**il fait trop chaud**. Ces différents points d'insatisfaction sont à relever afin de pouvoir collaborer avec les responsables des services énergétiques afin de trouver des solutions ensemble. Et ceci est d'autant plus vrai lorsque nous aurons atteint des températures extérieures bien plus chaudes que celles que nous mesurons aujourd'hui.

En résumé, il semble que :

- les habitants accordent une importance primordiale à l'électroménager installé dans leur logement. Ils en sont dans l'ensemble satisfaits.
- Ils accordent également beaucoup d'importance à la possibilité d'ouvrir les fenêtres et à l'éclairage naturel, ils en sont également satisfaits.
- Par contre, ils ne sont pas tous satisfaits du système de ventilation de leurs logements et du débit d'air. C'est un point qui corrobore les analyses techniques.



L'analyse ci-dessous regroupe la satisfaction vis-à-vis de tous les services énergétiques étudiés.

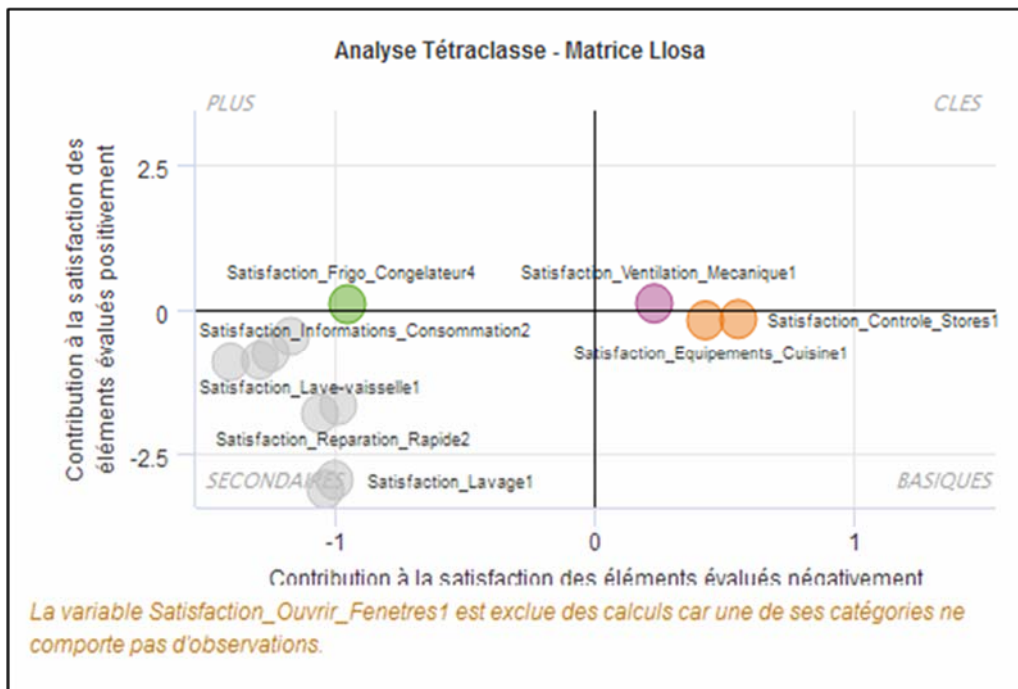


Figure 31 - Analyse Tétraclasse - Matrice Llosa

La matrice de Llosa permet de mieux comprendre la satisfaction, ici celle des habitants du quartier d'Eikenott face aux services énergétiques. Deux critères sont évalués sur la matrice : le niveau de performance des facteurs ainsi que leur influence sur la satisfaction globale.

Les éléments « clés » regroupés dans le cadran en haut à droite montrent les facteurs exerçant une influence fortement positive en cas de satisfaction et négativement en cas d'insatisfaction. **Il s'agit de la ventilation. Les habitants sont satisfaits de ce service lorsqu'il fonctionne bien, mais au contraire en sont grandement insatisfaits lorsqu'il ne fonctionne pas.** Nous avons pu le remarquer lors des entretiens lorsque des habitants ont affirmé boucher les trous d'aération car elle apportait trop d'air froid par exemple.

Pratiques des habitants en matière de consommation d'énergie

Cette section détaille les pratiques qu'adoptent les habitants vis-à-vis de l'utilisation des différents services énergétiques, principalement l'aération de l'appartement, la gestion de la chaleur et de la température des pièces, mais également d'autres services. Le but de cette partie du questionnaire est de **comprendre les pratiques qui ont un impact sur la consommation d'énergie au sein du logement.**



L'aération

Les pratiques d'aération du logement ont été mises en évidence dans le volet technique comme centrales pour mieux comprendre l'écart de performance énergétique et l'influencer. Les questions ci-dessous permettent d'analyser ces pratiques. On fera par la suite le lien avec leur influence sur la consommation de chauffage. Nous avons séparé les pratiques selon les saisons. Voici ci-dessous le résultat pour l'hiver.

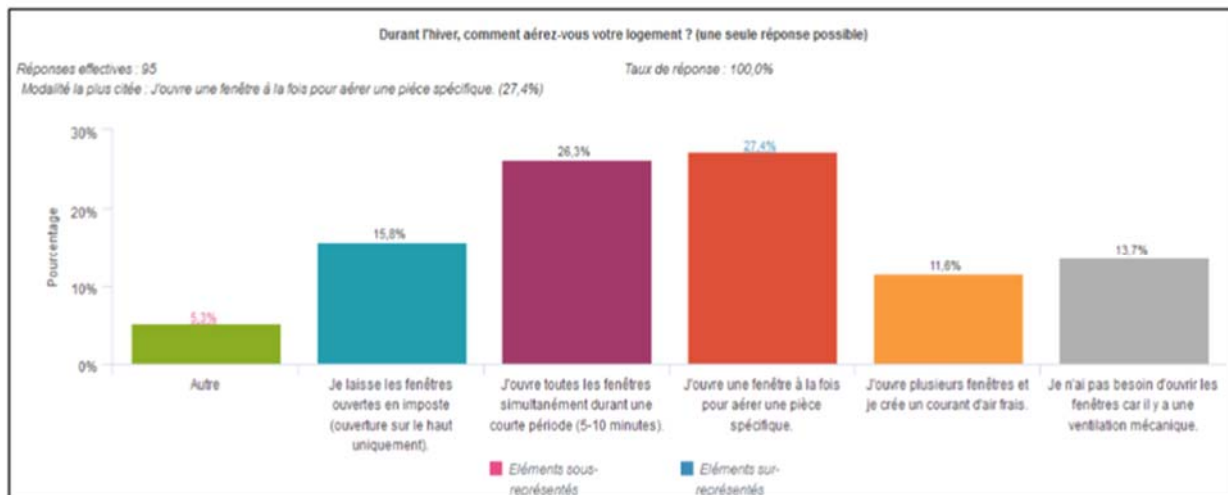


Figure 32 - Pratique d'aération du logement en hiver

Environ **16% des utilisateurs affirment laisser leurs fenêtres ouvertes en imposte durant l'hiver**. 26% ouvrent toutes les fenêtres durant un court laps de temps (5-10 minutes). 27% ouvrent une fenêtre à la fois pour aérer une pièce spécifique. 13% des personnes n'ouvrent pas du tout leurs fenêtres car ils font confiance au système de ventilation présent dans leur appartement. La pratique du "courant d'air" est utilisée par environ 12% de l'échantillon.

Au final, la grande majorité des habitants ouvre leurs fenêtres, mais de diverses manières. Ces réponses correspondent au comportement des habitants durant l'hiver. Il est donc important de relever qu'une proportion petite, mais tout de même présente (13%), ouvre ses fenêtres en imposte en continu durant l'hiver.

Dans le domaine de l'environnement, on assiste à un écart entre ce que les personnes déclarent et ce qu'elles réalisent (Kollmuss & Agyeman, 2002).

Cet écart peut, par exemple, être dû à un biais de désirabilité sociale : on ne veut pas passer pour la personne qui pollue. Ce qui est intéressant, c'est de corrélérer ces résultats avec la consommation d'énergie pour voir s'il y a de grandes différences entre le déclaratif et les consommations. C'est ce qui sera fait dans la suite du travail.



Nous nous intéressons ensuite au moment d'ouverture des fenêtres en hiver pour détailler les pratiques d'aération.

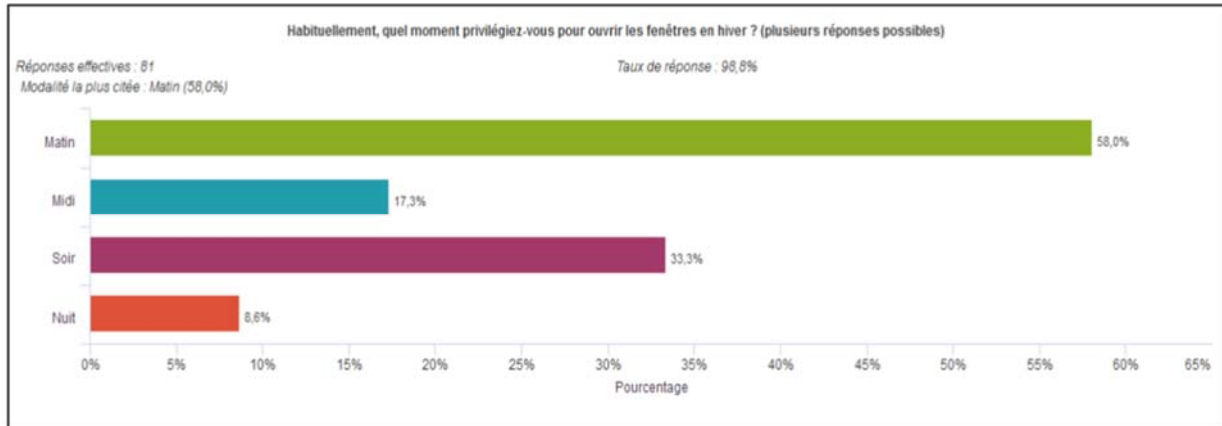


Figure 33 - Moment d'ouverture des fenêtres

Sur cette figure, nous pouvons constater **le moment pendant lequel les utilisateurs ouvrent leurs fenêtres**. Plus de la moitié ouvre leurs fenêtres le matin, un tiers les ouvre le soir. On voit que les pratiques d'aération varient et qu'**une seule manière d'aérer ne conviendrait pas à l'ensemble des groupes cibles**. En effet, il y a des personnes qui travaillent, d'autres qui sont au foyer, des retraités, des employés. De manière générale, il est important de donner des conseils aux ménages qui peuvent **s'insérer dans leurs pratiques et dans leur contexte de vie**.

La durée d'ouverture des fenêtres a aussi une importance sur l'impact énergétique. Nous avons fait la différence entre le jour et la nuit, les échelles de temps variant également.

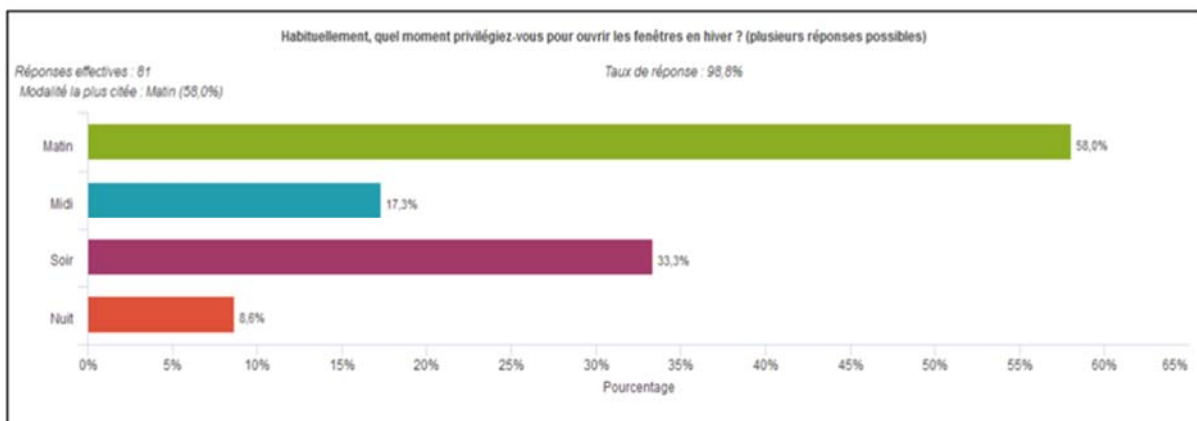


Figure 34 - Durée d'ouverture des fenêtres la nuit en hiver

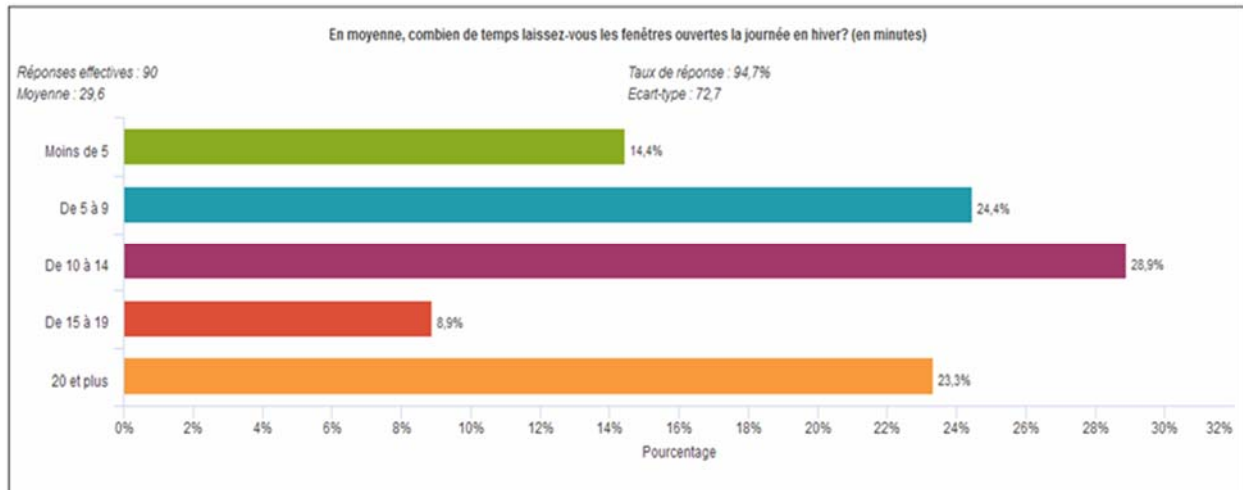


Figure 35 - Durée d'ouverture des fenêtres en journée en hiver

Grâce au premier graphique, nous constatons que 80% des personnes ouvrent leurs fenêtres moins de 20 minutes la nuit en hiver. Le second graphique permet d'avoir une durée plus précise d'ouverture des fenêtres en journée. Fort est de constater **que 23% des répondants affirment laisser ouvert leurs fenêtres plus d'une heure par jour en hiver.**

Pour résumer, les pratiques d'aération du quartier ne semblent pas optimales.

- Une défaillance du système de ventilation pourrait expliquer en partie les ouvertures fréquentes et longues des fenêtres. Un ménage nous a par exemple mentionné que le système de ventilation injectait des odeurs désagréables dans l'appartement.
- D'autres pratiques pourraient être liées aux habitudes des habitants. Par exemple, durant les entretiens qualitatifs, une personne âgée nous confiait qu'elle aimait aérer son logement en ouvrant les fenêtres, ce qui n'est plus forcément nécessaire avec une ventilation mécanique. Les personnes ne sont pas « formées » pour habiter dans ce type de logement très bien isolé et avec une ventilation mécanique.



La température

La partie suivante s'intéresse à la température, un des points également relevé comme critique lors des analyses techniques précédentes. **La température de confort est une donnée très personnelle, liée aux perceptions individuelles mais également à la culture.** L'entreprise Losinger Marazzi, à cheval sur deux pays, constate une différence dans les demandes des clients, la température considérée comme « normale » étant plus basse en France qu'en Suisse. Qu'en est-il de notre échantillon ?

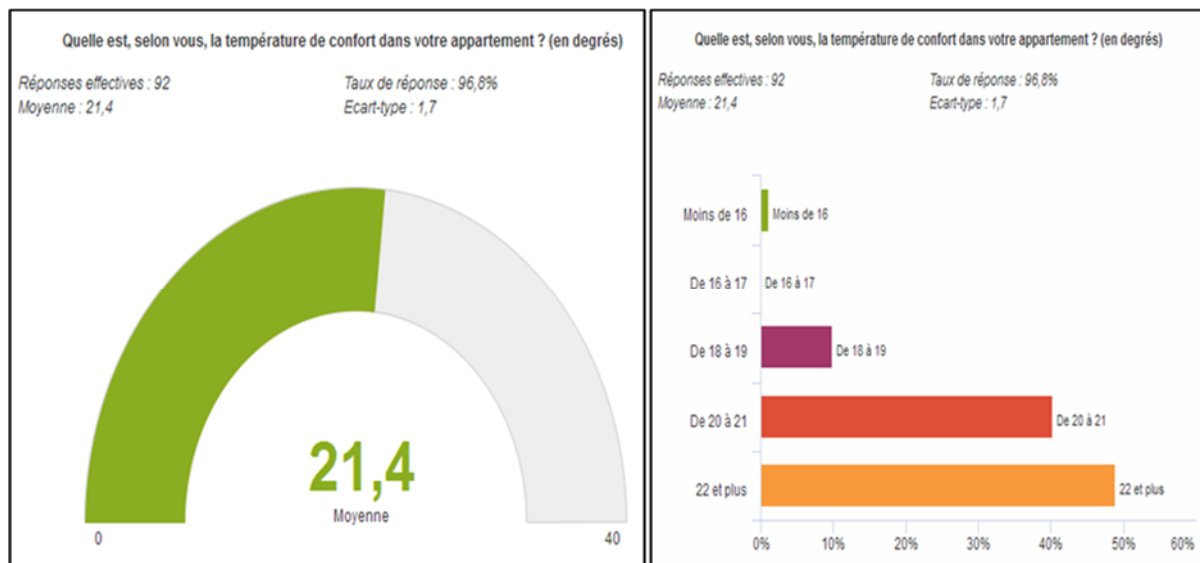


Figure 36 - Température de confort de l'appartement

La température idéale souhaitée est de 21.4 degrés en moyenne. Une grande partie des sondés affirme désirer une température dépassant les 22 degrés. On constate également que **la température de confort varie en fonction de groupes cibles.** Certains foyers aimeraient une température en-dessous de la norme et une partie souhaite une température en-dessus de la norme, cette deuxième catégorie étant plus nombreuse.

Lors des entretiens qualitatifs exploratoires de 2017 pour préparer le sondage, nous avons constaté que quelques ménages avaient installé un **chauffage d'appoint**. Il semble que des problèmes de régulations de la température la première année aient provoqué des températures basses durant une longue période, ce qui a incité des ménages à s'équiper de chauffages d'appoint. **Le problème de cette approche est le changement de la solution par défaut.** Ces ménages risquent d'avoir recours au chauffage d'appoint pour de courtes interruptions du chauffage également. Nous avons donc souhaité creuser ce point et quantifier notamment combien de ménages se sont équipés de chauffages d'appoint.

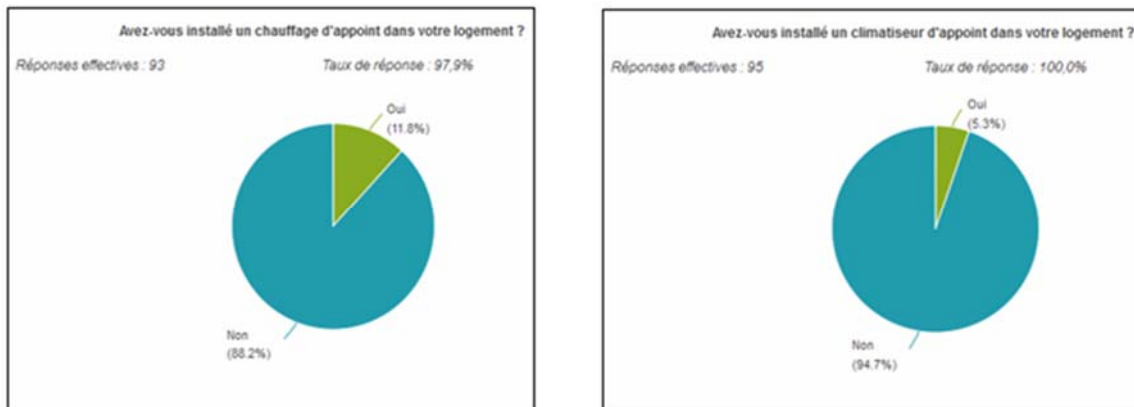


Figure 37 - Installation d'un chauffage d'appoint et d'un climatiseur

La présence de ventilateur est également intéressante (les ménages ont-ils chauds dans leurs logements ?).

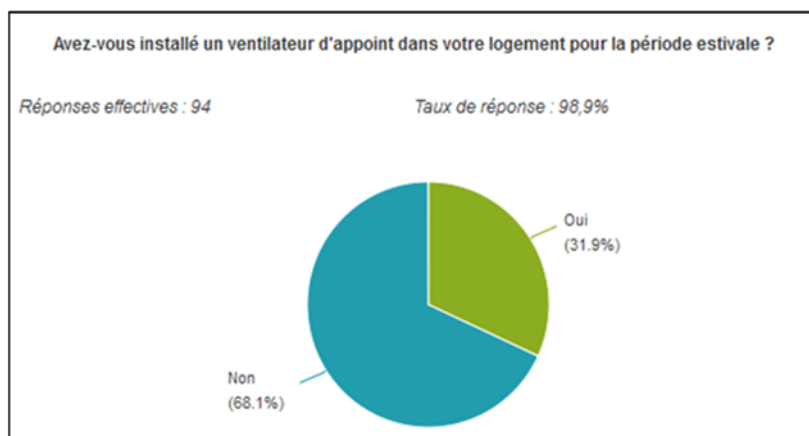


Figure 38 - Installation d'un ventilateur d'appoint

Malgré une gestion de la chaleur faite par le chauffage de l'appartement, **10% des habitants ont investi dans un chauffage. 5% des personnes ont investi dans un climatiseur, et finalement, 30% ont acheté un ventilateur.** Nous remarquons ici les limites du système de régulation de la température dans les appartements du quartier.

Grâce au questionnaire et aux différents graphiques ressortant des réponses, une partie des habitants n'agit pas de façon efficace. L'achat d'un chauffage d'appoint est par exemple problématique car une fois l'investissement initial effectué, les ménages ne vont pas hésiter à s'en servir, **les coûts d'exploitation étant moindre que les coûts d'investissement. Cela change le contexte par défaut de leur logement et peut avoir une influence sur leurs pratiques en matière de chauffage.**



Les stores

L'utilisation des stores constitue le troisième service énergétique étudié. C'est un facteur important qui influence la consommation énergétique dans les bâtiments récents et bien isolés, comme démontré dans l'étude technique. Il est intéressant de s'attarder sur les pratiques liées à l'utilisation des stores.

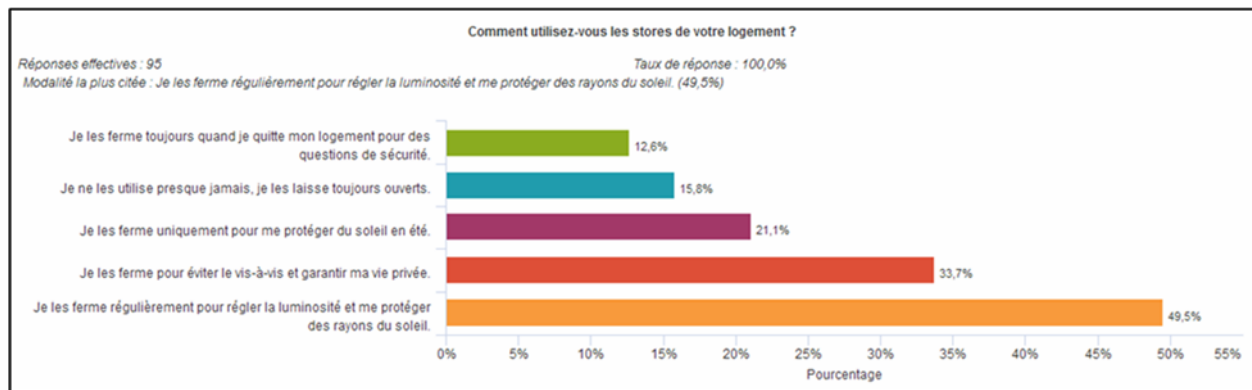


Figure 39 - Utilisation des stores du logement par les habitants

Il existe différentes raisons pour lesquelles les utilisateurs décident de fermer les stores. Pour un tiers des personnes, la raison est **de garantir la vie privée**, tandis que pour un petit pourcentage, cela consiste en une **raison de sécurité** (13%). Pour la moitié des répondants, la raison de fermeture des stores est de **régler la luminosité et de se protéger des rayons du soleil**. **Considérer les stores uniquement sous l'angle du réglage de la luminosité c'est oublier les autres rôles clés et les pratiques des habitants.**

Le graphique suivant présente la façon dont les stores sont utilisés pour la partie « jour » de l'appartement, c'est-à-dire pour le séjour, la cuisine, et d'autres pièces communes potentielles.

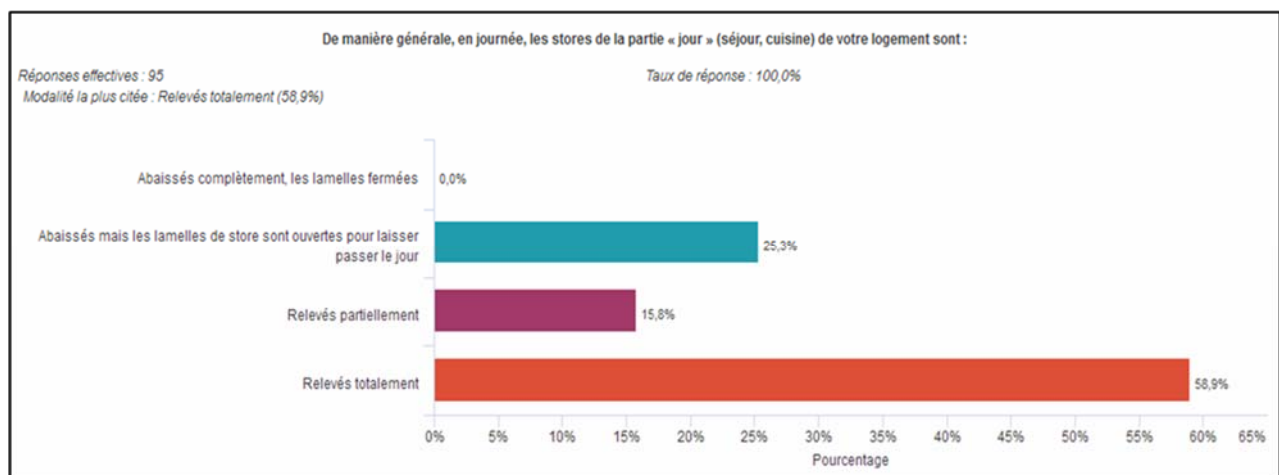


Figure 40 - Gestion des stores durant la journée



Dans les pièces communes, près de **60% des répondants affirment relever totalement leurs stores**. Personne n'affirme fermer complètement les lamelles dans les parties « jour », et un quart abaisse les stores mais laisse les lamelles ouvertes pour laisser passer la lumière du jour. **Cela fait écho à la partie technique qui s'interrogeait sur des modes d'utilisation des stores et vient appuyer l'analyse avec des données déclaratives.**

En comparaison avec les pièces « jour » de l'appartement dans la Figure 40, il est intéressant de constater les différences existantes dans les pièces de la partie « nuit ».

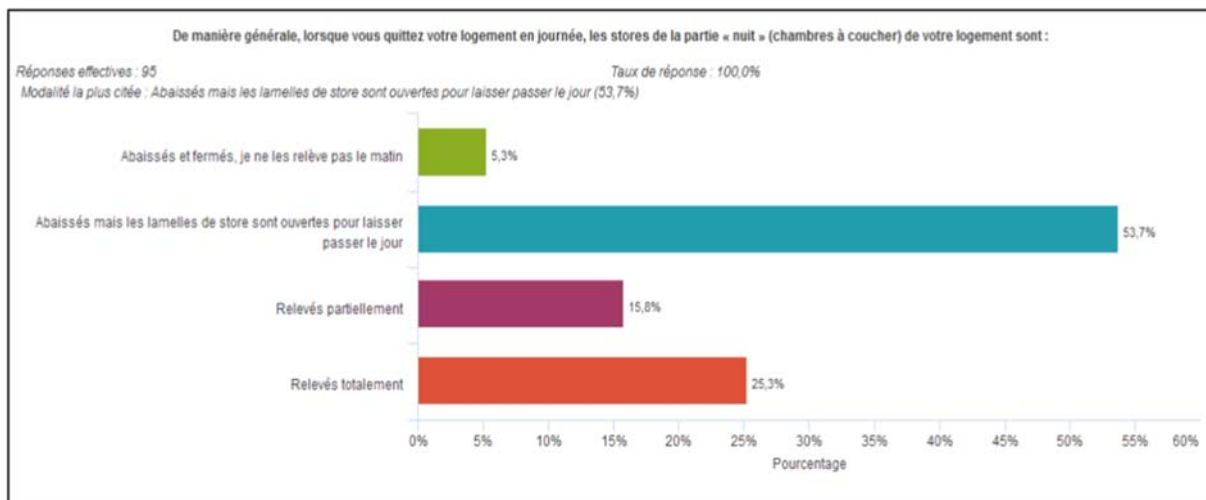


Figure 41 - Gestion des stores durant la nuit

La pièce « nuit » principalement représentée est la chambre à coucher. La différence est marquée entre les deux types de pièces. En effet, alors qu'un quart des personnes laisse les stores abaisés et oriente les lamelles dans les parties « jour », **plus de la moitié des habitants le font pour la pièce de la partie « nuit »**. La proportion des gens à relever totalement les stores a également baissé dans les pièces de la partie « nuit », ce qui est facilement explicable. L'impact de la « mauvaise » gestion des stores d'un point de vue chaleur passive est donc explicable par les autres fonctions exercées par les stores.

Autres services énergétiques

Après avoir analysé trois services énergétiques principaux, l'enquête s'est intéressée à l'utilisation du lave-linge et du sèche-linge, utilisation du lave-vaisselle, ou encore du congélateur et du réfrigérateur. Cette partie aura principalement un impact sur la consommation d'énergie électrique et sur la consommation d'ECS. Comme on l'a vu dans la partie technique, la consommation électrique du quartier ne pose pas de problème particulier, néanmoins, il est intéressant de comprendre les pratiques liées à la consommation des appareils électriques plus en détails.



Le lave-linge et le sèche-linge

L'écoquartier est composé de logements en location et d'appartements en copropriété. Dans les appartements mis en location, une buanderie commune est souvent à la disposition des habitants, selon un horaire déterminé. C'est la pratique courante en Suisse, pas forcément dans d'autres pays européens.

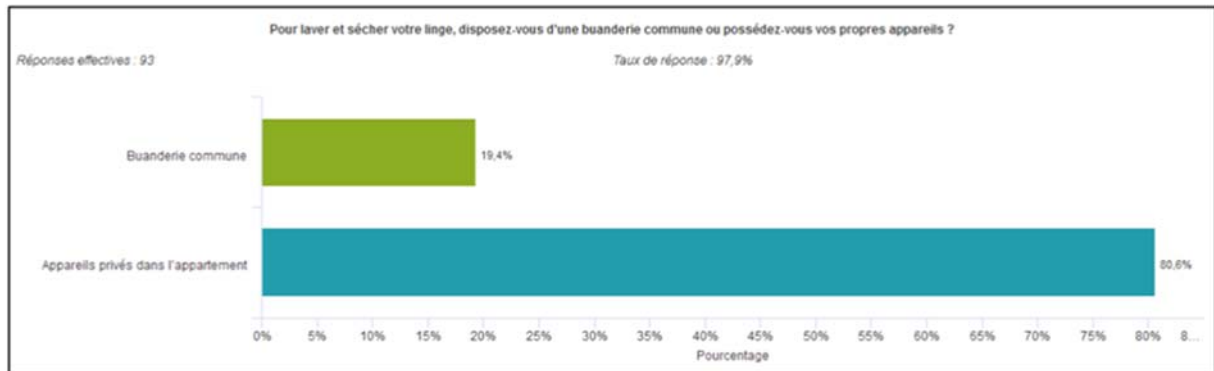


Figure 42 - Lave-linge et sèche-linge

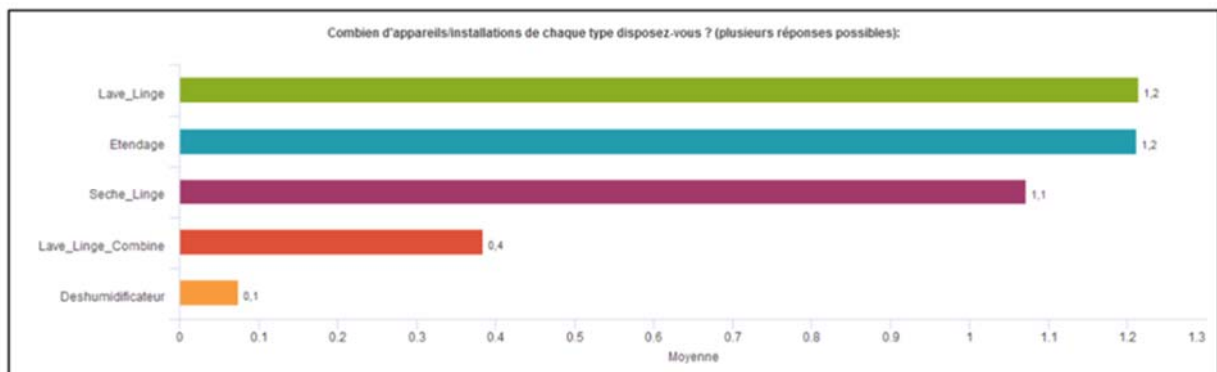


Figure 43 - Nombre d'installations à laver installées

Une grande majorité des habitants ont installés un appareil à laver et à sécher dans leur appartement. En moyenne, une machine à laver et un sèche-linge sont installés dans l'appartement. Cette information est intéressante car il faut mettre en évidence que **ce sont pour 80% des locataires qui disposent d'une buanderie commune dans leur bâtiment.** Il y a sept régies immobilières dans le quartier et selon les entretiens qualitatifs, des règles interdisent l'installation de machines à laver et à sécher le linge dans les appartements.

Néanmoins, selon les entretiens qualitatifs, les habitants installent quand même ces appareils pour plusieurs raisons : **pannes des appareils communs, horaires inadaptés à leurs modes de vie, soucis de se faciliter la tâche.**



La fréquence d'utilisation des appareils a également été étudiée pour comprendre l'impact sur la consommation d'énergie.

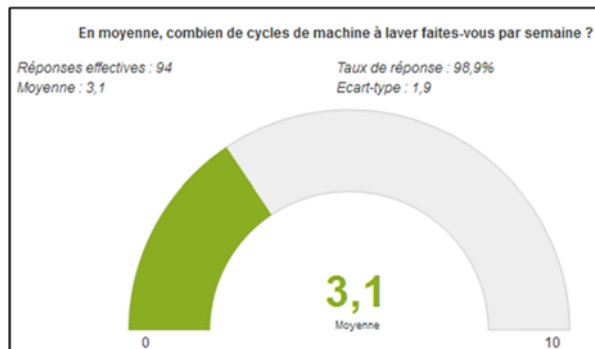


Figure 44 - Nombre de cycles de machine à laver par semaine

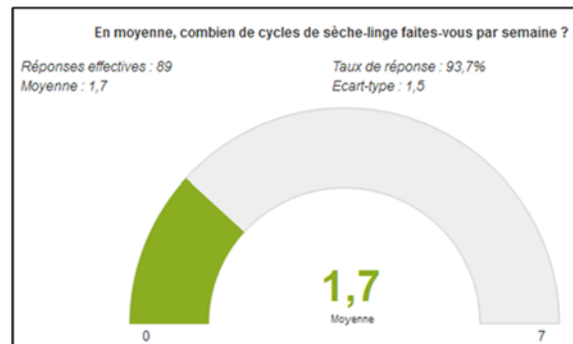


Figure 45 - Nombre de cycles de sèche-linge par semaine

Les répondants au questionnaire affirment effectuer en moyenne **plus de trois cycles de machine à laver**, et **moins de deux pour le sèche-linge**. Selon les entretiens qualitatifs, les logements disposent de grands balcons, ce qui favorise le **séchage du linge à l'air libre**.

Le lave-vaisselle

L'utilisation du lave-vaisselle peut également engendrer une consommation d'énergie électrique et d'ECS. Tous les appartements disposent d'un lave-vaisselle. Il est recommandé d'utiliser en priorité le lave-vaisselle plutôt que le lavage à la main. Durant les entretiens qualitatifs de 2017, cette information était bien connue des répondants, ce qui est illustré quantitativement dans les réponses de la **Figure 46**.

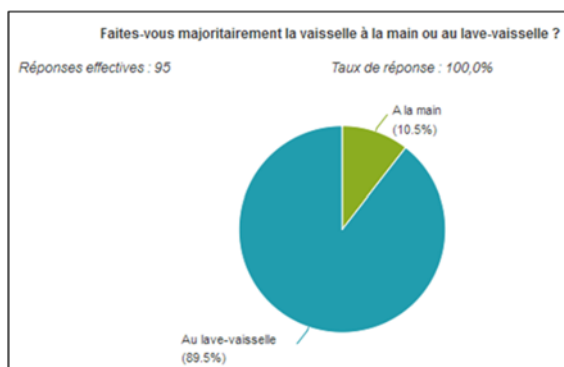


Figure 46 - Façon de faire la vaisselle

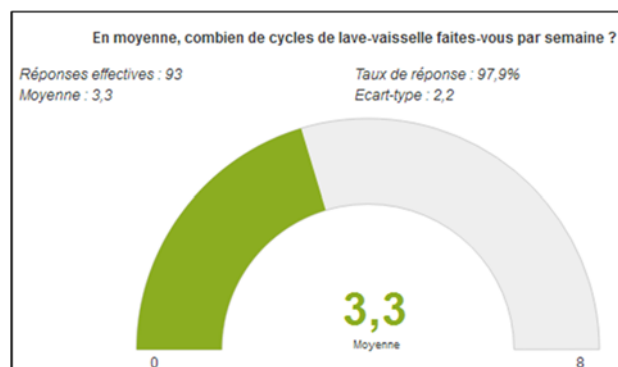


Figure 47 - Nombre de cycles de lave-vaisselle par semaine

Nous pouvons constater que le lave-vaisselle est privilégié par près de 90% des répondants. Ils font en moyenne 3 cycles de lave-vaisselle par semaine.



Le réfrigérateur et le congélateur

Chaque appartement est équipé d'un réfrigérateur mais pas forcément d'un congélateur. La taille de ceux-ci a également une influence sur la consommation d'énergie.

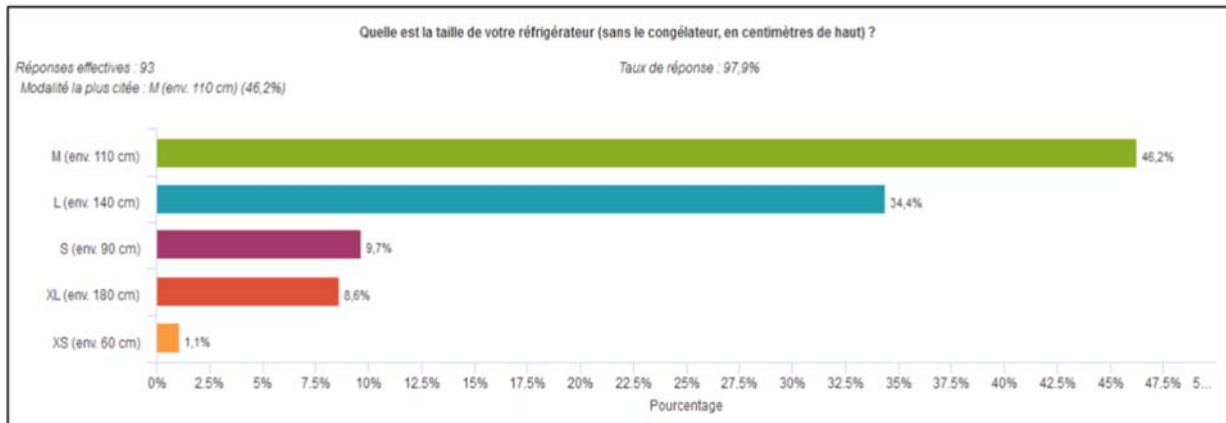


Figure 48 - Taille du réfrigérateur

Il est à noter qu'un réfrigérateur qui ne dispose pas d'un compartiment de congélation consomme en moyenne la moitié d'un réfrigérateur avec un petit bac de congélation.

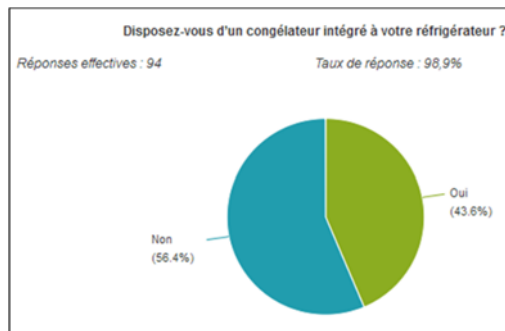


Figure 49 - Congélateur intégré ou non

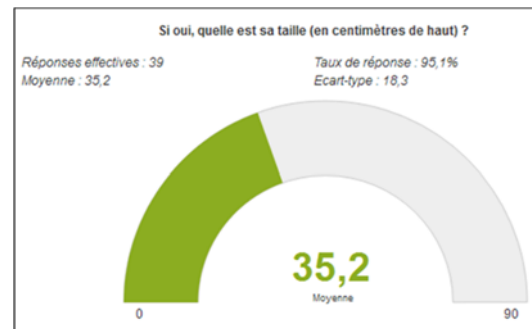


Figure 50 - Taille du congélateur

Dans l'échantillon des répondants, la majorité des réfrigérateurs ne disposent pas de partie de congélation (56%), ce qui est une bonne nouvelle en matière de consommation d'énergie électrique (si elle n'est pas compensée par l'achat d'un grand congélateur séparé).



La majorité des répondants (66%) dispose d'un congélateur séparé, l'emplacement de ce congélateur est important pour connaître sa consommation d'énergie. Pour près de 85%, le congélateur est situé **soit dans la cuisine, soit dans la cave**

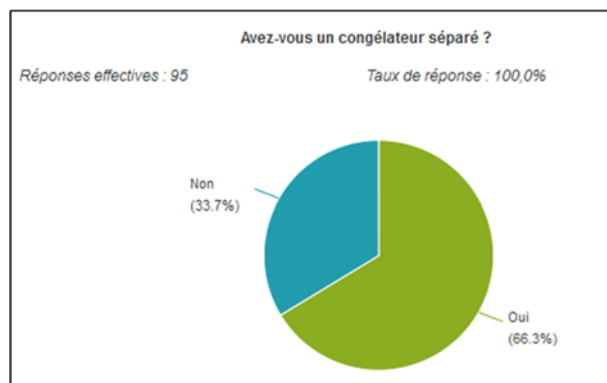


Figure 51 - Existence d'un congélateur séparé

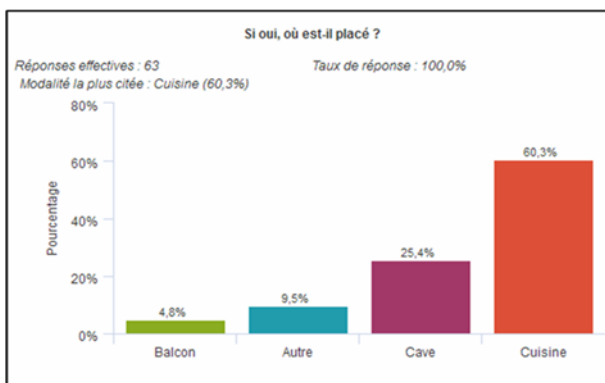


Figure 52 - Placement du congélateur

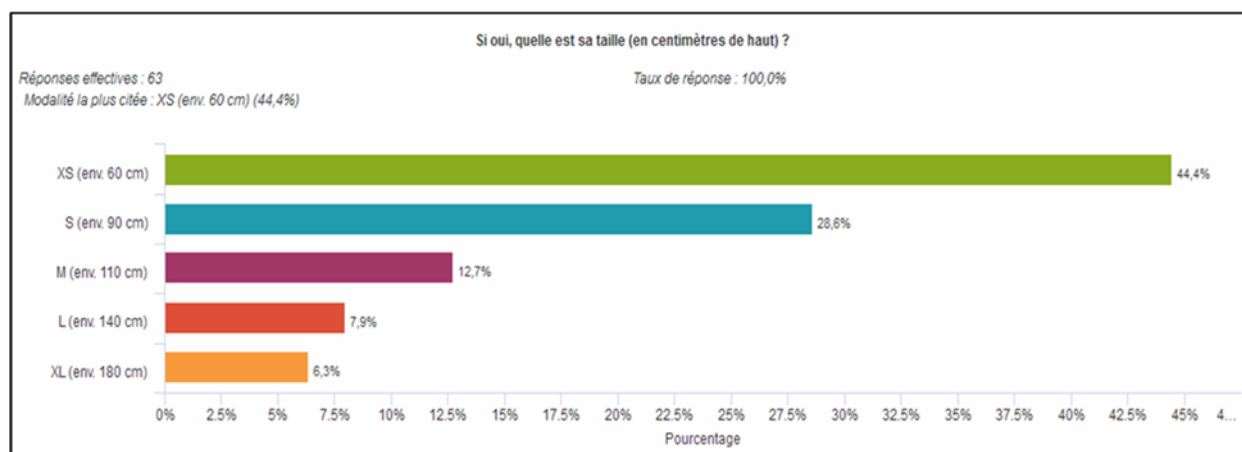


Figure 53 - Taille du congélateur

La taille moyenne du congélateur intégré représente 35 centimètres.

Plus des deux tiers des habitants disposent d'un congélateur séparé. Quasiment la même proportion de personnes a répondu ne pas disposer d'un congélateur intégré dans son frigo. Cela semble donc corrélé, et compréhensible par le fait que **les personnes ne disposant pas d'office de congélateur chez eux en achètent un congélateur externe afin d'avoir de la place à disposition.**

Sa taille moyenne est plus importante, se situant entre 60cm et 90cm. Ce n'est pas optimal en termes de consommation d'énergie, le congélateur étant de préférence à placer à la cave ou dans un endroit froid.

Que ce soit pour la ventilation, le chauffage, les stores, ou tout autre service énergétique (lave-linge, lave-vaisselle, réfrigérateur, etc.), chacun de ces appareils consomme de l'énergie. Grâce à ce questionnaire, nous avons pu analyser l'utilisation des services énergétiques, la satisfaction des habitants face à ces derniers, mais également pu apprendre les différentes caractéristiques socio-démographiques des habitants du quartier.



Pour la dernière partie de ce questionnaire, l'objectif est de comprendre comment les habitants se situent face à la problématique énergétique, quelles sont leurs **connaissances** ainsi que leurs **attitudes** vis-à-vis de l'énergie.

Connaissances du prix de l'énergie

Dans les entretiens qualitatifs exploratoires de 2017, nous avons pu entendre que « l'énergie est trop chère » ou au contraire « trop bon marché ». **Les ménages du quartier connaissent-ils le prix de l'électricité ou parlent-ils de ressenti en la matière ?** Les leviers économiques sensés aider à l'efficacité énergétique font l'hypothèse que les habitants savent combien coûte l'énergie et combien ils vont économiser en réduisant leur consommation. Nous avons posé la question aux habitants de l'éco quartier d'Eikenott et voici les résultats par rapport au prix de l'énergie.

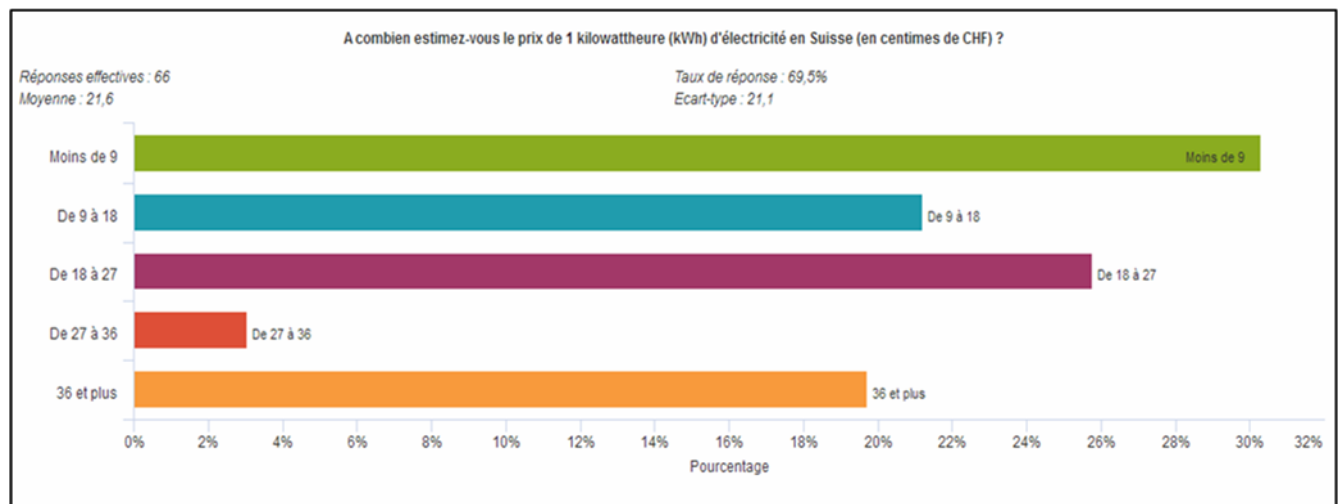


Figure 54 - Estimation du prix d'un kWh

La plupart des ménages ne savent pas combien coûte un kWh d'électricité. Cela représente une toute petite partie de leurs dépenses (le fameux « panier de la ménagère »).

On a pu entendre dans les entretiens qualitatifs que les ménages avec des revenus plus faibles sont plus conscients du prix de l'énergie et suivent plus leurs dépenses. Après avoir fait les calculs, il semble que **la corrélation entre le revenu et la connaissance du prix de l'énergie ne soit pas significative.**

Baser des programmes d'EE sur la notion de coût, d'économie d'argent est donc périlleux.



Attitudes vis-à-vis de l'environnement

Afin de **classer les ménages du quartier en fonction de leur attitude vis-à-vis de l'environnement**, des informations liées aux comportements énergétiques (déclarés) peuvent a posteriori valider ou pas le modèle de frontière stochastique (SFA). Sur la base de l'article de l'OCDE « Attitudes générales des ménages envers l'environnement » (2014), dans la partie « Vers des comportements plus environnementaux : Vue d'ensemble de l'enquête 2011 »³, nous voulons mesurer trois groupes : les **écomotivés**, les **écosceptiques** et les **techno-optimistes**. Les trois premières questions permettent de déterminer le statut « écomotivé » du groupe. La question 4 détermine le « techno-optimisme » des habitants.

Affirmations à tester :

1. « Cela me préoccupe quand je pense aux conditions environnementales dans lesquelles nos enfants et petits-enfants devront probablement vivre. »
2. « Si les choses continuent ainsi, nous allons bientôt vivre une catastrophe écologique majeure ».
3. « Lorsque je lis dans le journal ou vois à la télévision des reportages sur les problèmes environnementaux, je suis souvent indigné ou en colère. »
4. « Il y a des limites à la croissance économique, et notre monde industrialisé les a déjà dépassées ou n'est pas loin de les atteindre »

Dans quelle mesure êtes-vous en accord ou en désaccord avec les affirmations suivantes ?									
	Pas d'accord du tout	Plutôt pas d'accord	Partagé(e)	Plutôt d'accord	Tout à fait d'accord	Total	Moyenne	Médiane	Ecart-Type
1__Cela_me_preoccupe_quand_je_pense_aux_	2,5%	0,0%	10,0%	42,5%	45,0%	100,0%	4,3	4,0	0,8
2__Si_les_choses_continuent_ainsi_nous_a	2,5%	2,5%	10,0%	40,0%	45,0%	100,0%	4,2	4,0	0,9
3__Lorsque_je_lis_dans_le_journal_ou_voi	0,0%	0,0%	22,5%	32,5%	45,0%	100,0%	4,2	4,0	0,8
4__Il_y_a_des_limites_a_la_croissance_ec	2,5%	5,0%	17,5%	40,0%	35,0%	100,0%	4,0	4,0	1,0
Total	1,9%	1,9%	15,0%	38,8%	42,5%		4,2	4,0	0,9

■ Éléments sous-représentés ■ Éléments sur-représentés

Alpha de Cronbach : 0,8

Figure 55 - Réponses aux questions liées aux attitudes

³ <http://dx.doi.org/10.1787/9789264195493-6-fr>

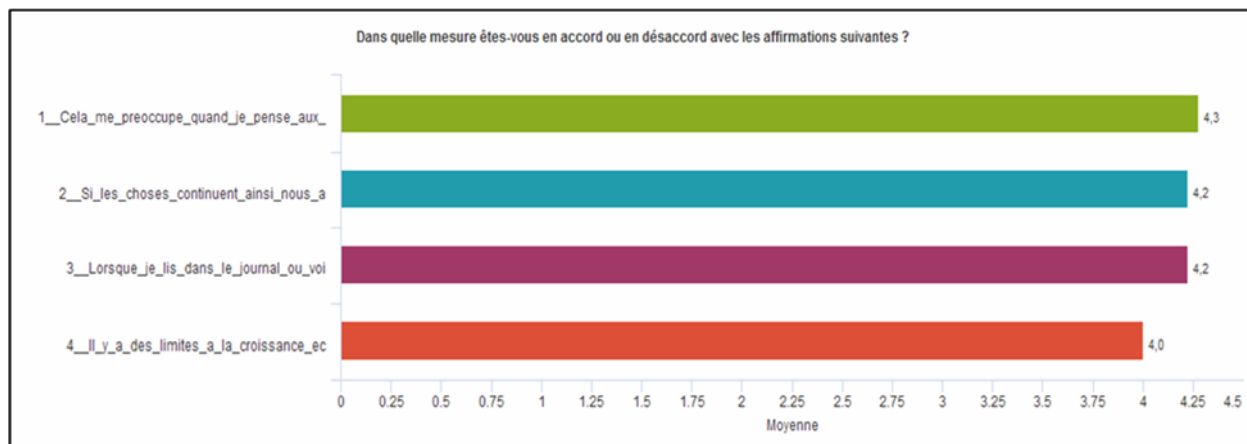


Figure 56 - Réponses liées aux attitudes II

Sur une échelle de 1 à 5, les réponses liées à « l'écomotivation » démontrent que **les répondants se déclarent concernés par l'état actuel du changement climatique**. Près de la moitié des habitants ont affirmé être « tout à fait d'accord » en lien avec la responsabilité des générations futures, la catastrophe écologique éminente, mais aussi la réaction face aux informations dans ce domaine-là. Pour eux, la limite à la croissance serait atteinte. En effet, seulement 7% affirme ne pas être d'accord avec ces propos.

Voici la suite des affirmations à tester pour effectuer les groupements.

5. « De nos jours, la plus grande partie de la population continue à se comporter de façon irresponsable vis-à-vis de l'environnement ».
6. « À mon avis, les problèmes environnementaux et leur impact sont présentés de façon exagérée par les écologistes ».
7. « Les responsables politiques restent encore aujourd'hui beaucoup trop passifs par rapport à l'environnement ».
8. « Nous devrions tous être prêts à modérer notre train de vie pour protéger l'environnement ».
9. « Il faut absolument que des mesures soient prises en faveur de la protection de l'environnement, même si cela nuit à l'emploi ».

Dans quelle mesure êtes-vous en accord ou en désaccord avec les affirmations suivantes ?									
	Pas d'accord du tout	Plutôt pas d'accord	Partagé(e)	Plutôt d'accord	Tout à fait d'accord	Total	Moyenne	Médiane	Ecart-Type
5_De_nos_jours_la_plus_grande_partie_d1	0,0%	7,5%	10,0%	42,5%	40,0%	100,0%	4,2	4,0	0,9
6_A_mon_avis_les_problemes_environneme1	52,5%	17,5%	17,5%	12,5%	0,0%	100,0%	1,9	1,0	1,1
7_Les_responsables_politiques_restant_1	0,0%	2,5%	10,0%	30,0%	57,5%	100,0%	4,4	5,0	0,8
8_Nous_devrions_tous_etre_prets_a_mode1	0,0%	0,0%	7,5%	45,0%	47,5%	100,0%	4,4	4,0	0,6
9_Il_faut_absolument_que_des_mesures_s1	2,5%	15,0%	30,0%	27,5%	25,0%	100,0%	3,6	4,0	1,1
Total	11,0%	8,5%	15,0%	31,5%	34,0%		3,7	4,0	1,3

■ Éléments sous-représentés ■ Éléments sur-représentés

Alpha de Cronbach : 0,3

Figure 57 - Réponses liées aux attitudes III

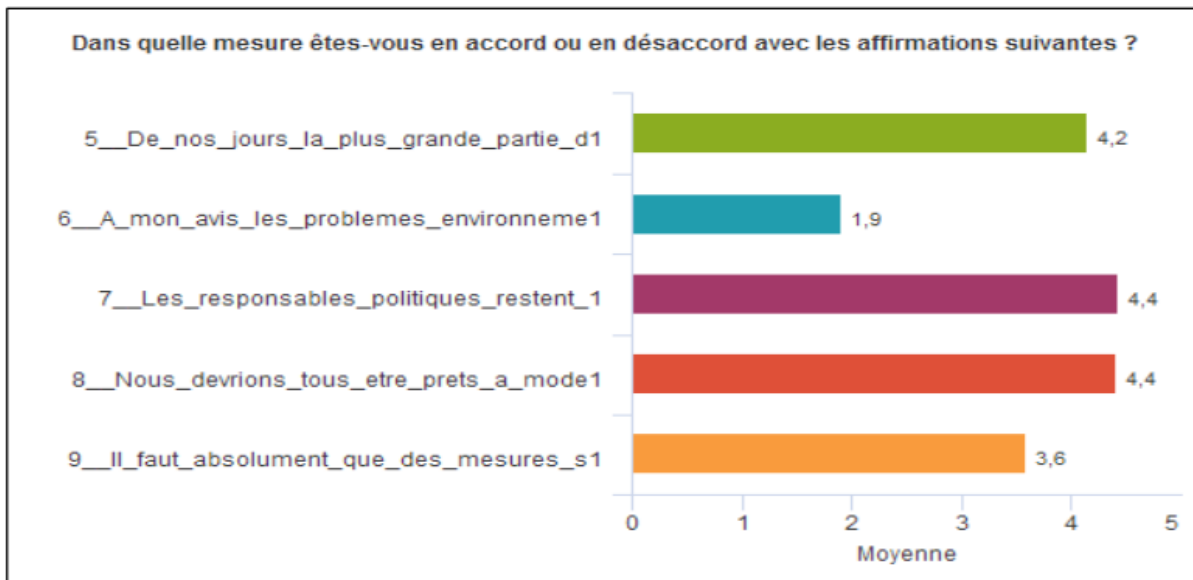


Figure 58 - Réponses liées aux attitudes IV

La question 6 concerne les « écosceptiques ». Les habitants pensent clairement que ces affirmations en faveur de l'environnement ne sont pas exagérées et reflètent réellement la situation actuelle.

Les responsables politiques restent à l'heure actuelle, encore trop absents face aux questions écologiques selon les répondants (Question 7). Ce sujet est d'actualité, pour donner suite aux votations du 20 octobre 2019 sur l'élection des nouveaux conseillers aux Etats qui représenteront notre pays pour les quatre prochaines années.



Résultats des analyses multivariées

Après avoir pu décrire l'aspect **socio-démographique** des habitants ayant répondu au questionnaire, **la satisfaction** de ces habitants face aux services énergétiques a pu être présentée. **Les comportements énergétiques** des habitants ont ensuite pu être analysés, et finalement, **l'attitude générale des répondants face à la question climatique** a été mise en avant.

Grâce aux différentes **analyses descriptives**, tous ces éléments ont pu être décrits. Nous pouvons désormais croiser et corrélérer les différentes variables entre elles grâce aux **analyses multivariées**. Cela nous permettra de comprendre l'influence des caractéristiques socio-démographiques, des comportements et des attitudes sur la consommation d'énergie, et de déterminer si un lien entre plusieurs de ces facteurs existe, et si oui, de chercher à l'expliquer.

Croisement des données par type de service énergétique avec attitude, comportement et données socio-démographiques

Comme mentionné dans l'analyse technique, la moitié du quartier est équipé de smart meter de la société eSmart⁴ qui remontent les données de consommation l'électricité, d'ECS et de chauffage ainsi que les températures de consigne et les températures réelles dans la partie « jour » et dans la partie « nuit ». Nous allons ci-dessous analyser finement la consommation de chauffage qui est excédentaire dans ce quartier (17% d'EdP selon la méthode probabiliste) pour **comprendre les facteurs qui influencent cette consommation**. Les analyses seront tout d'abord bivariées puis multivariées (économétriques). Nous avons utilisé la consommation de chauffage moyenne par année sur les trois ans de relève à disposition. **Sur les 95 répondants au sondage, nous avons réussi à lier les données de consommation de chaleur de 34 ménages**. D'une part la moitié des ménages ne disposent pas de smart meter, d'autre part, il a été très ardu de pouvoir lier les numéros de compteurs aux appartements et aux répondants du sondage. Nous avons à plusieurs reprises envoyé des personnes sur place pour relever les numéros des compteurs et retrouver les numéros d'appartement. D'autre part, nous avons travaillé avec les numéros d'identifiants du distributeur d'énergie local pour augmenter le nombre de ménages ou nous disposons à la fois des données de consommation et de sondages. Cet échantillon a demandé des années de travail de collecte de données provenant de plusieurs sources.

Analyses multivariées du chauffage

L'échantillon se base sur la consommation de chaleur annuelle en kWh. Une proportion de quasiment la moitié des répondants consomment pour leur chauffage plus de 360 kWh par année en moyenne sur les trois années de mesure à disposition au moment de l'analyse. **La consommation moyenne de chaleur par ménage est de 322 kWh.**

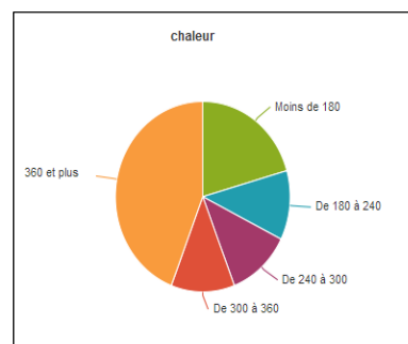


Figure 59 - Description des échantillons de consommation de chaleur

⁴ eSmart, 2019 : <http://www.myesmart.com/produits/une-technologie-exclusive/>



Corrélation des données socio-démographiques des habitants avec les données de consommation de chaleur dans les ménages

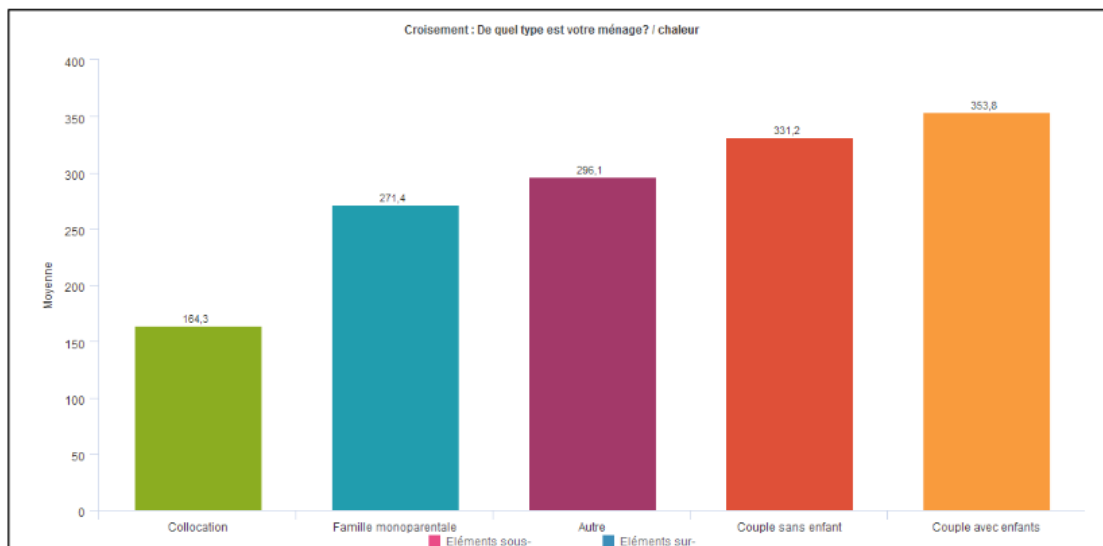


Figure 60 - Corrélation du type de ménage avec la chaleur

Sans surprise, le type de ménage et sa composition ont un fort impact sur la consommation moyenne de chauffage par ménage. En effet, la corrélation est expliquée par le nombre d'individus habitant dans le ménage. La consommation la plus faible de chauffage est représentée dans les collocations. Dans un ménage familial, avec un couple et plusieurs enfants, la consommation est la plus élevée.

La **Figure 61** croise la variable du niveau d'éducation et la consommation de chaleur :

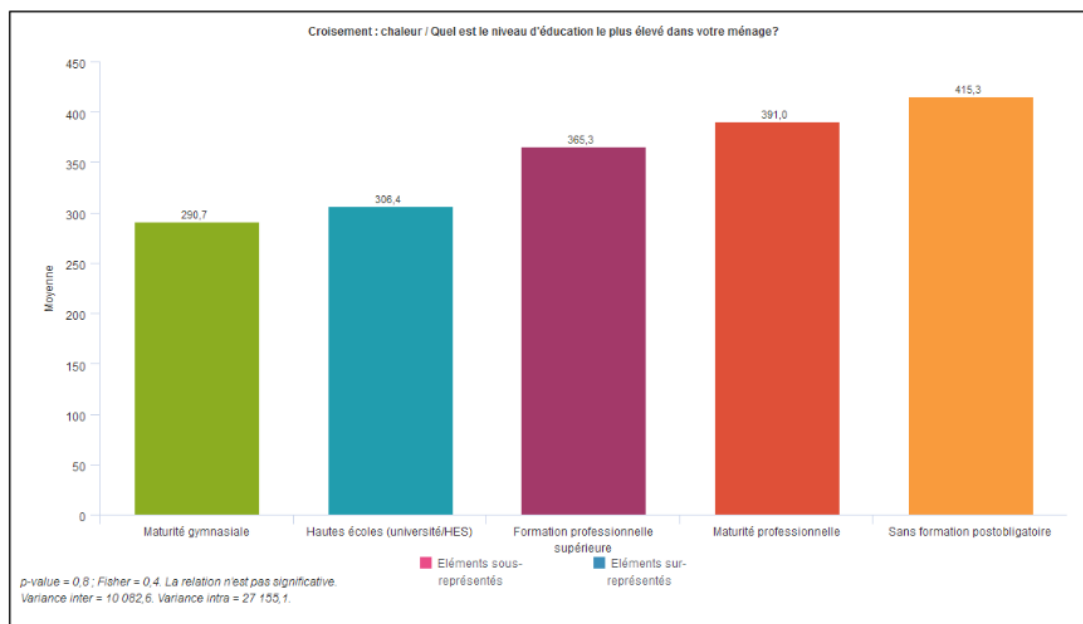


Figure 61 - Corrélation de la formation sur la consommation du chauffage



Cette corrélation est très intéressante, car elle démontre que **le niveau d'études (primaire, secondaire ou tertiaire), influence la consommation de chauffage**. La moyenne la plus élevée de consommation correspond aux ménages sans aucun membre ayant une formation post obligatoire. En revanche, les habitants possédant une maturité gymnasiale ainsi qu'une formation de niveau tertiaire (Université, HES,..) comme niveau d'éducation le plus élevé dans le ménage consomment moins de manière générale. L'importance de la formation et de la sensibilisation aux questions d'économie d'énergie et plus globalement de développement durable est parfaitement représentée.

La relation bivariée suivante testée est le lien entre la consommation de chaleur et le revenu :

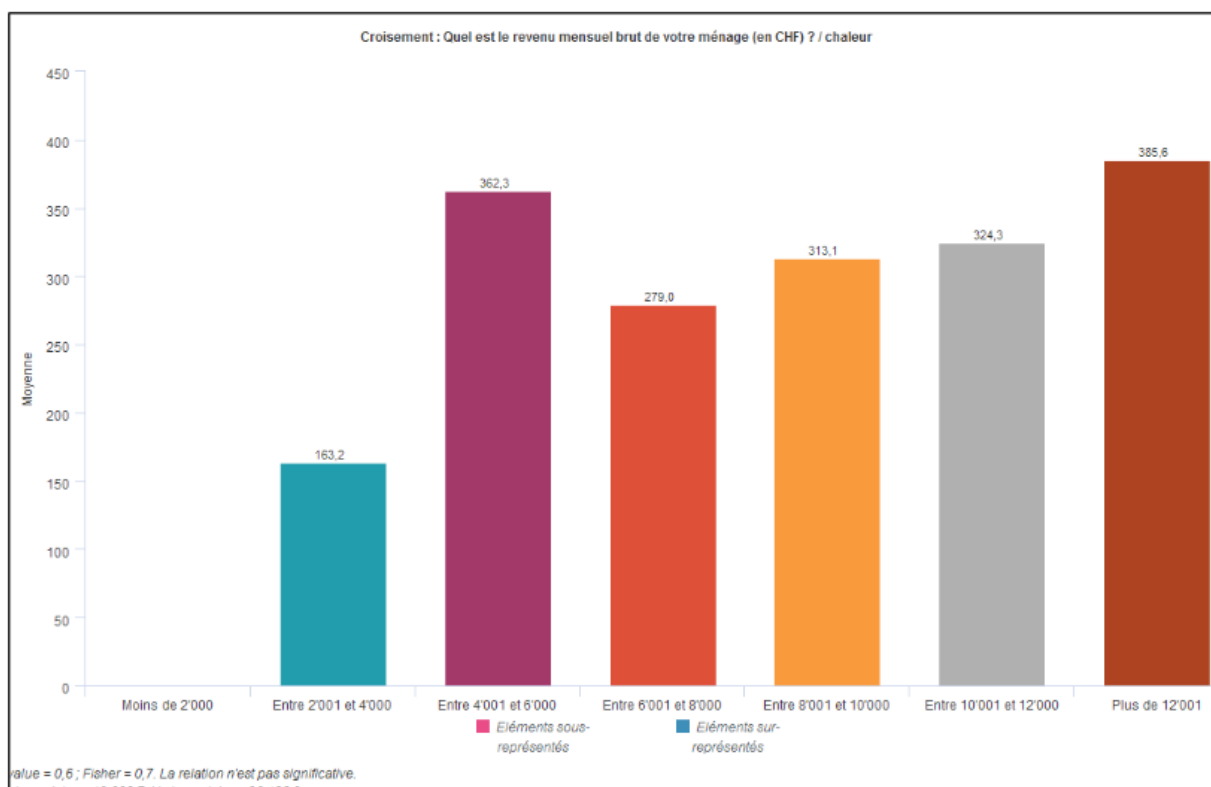


Figure 62 - Corrélation du salaire sur la consommation du chauffage

À partir d'un revenu mensuel de CHF 6'000 par ménage, nous constatons une croissance de la consommation en fonction du revenu. Le groupe des ménages touchant entre CHF4'000.- et CHF6'000.- mensuellement consomme beaucoup d'énergie : ces ménages consomment autant que les ménages possédant un revenu de plus de CHF 12'000.-. Afin d'optimiser son efficacité énergétique, il serait intéressant de trouver des solutions avec les ménages consommant le plus de chauffage, ici ceux touchant entre CHF 4'000.- et CHF6'000.- francs mensuellement et ceux touchant plus de CHF12'000.-



La **Figure 63** représente le croisement entre les âges des répondants et la consommation par ménage.

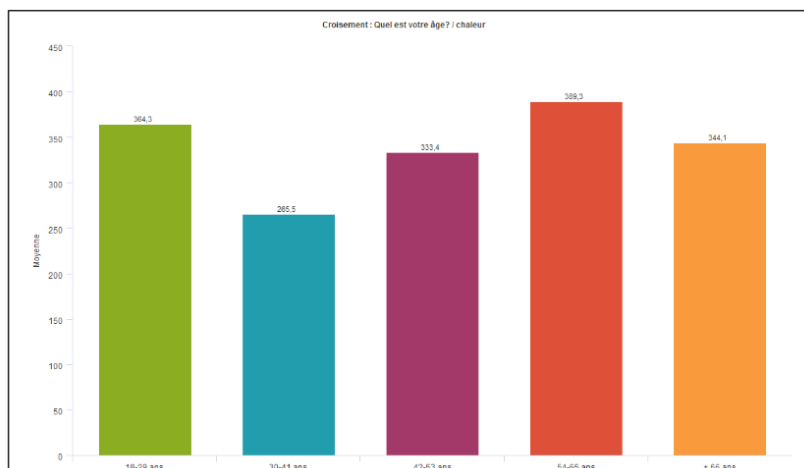


Figure 63 - Corrélation de l'âge sur la consommation du chauffage

À partir de 30 ans, plus le répondant est âgé et plus la consommation est élevée. Par contre, pour les personnes retraitées (de plus de 65 ans), la consommation de chauffage est similaire aux personnes se situant dans la tranche d'âge 42-53 ans. Les jeunes de moins de 30 ans consomment également plus. Ce sont les plus grands consommateurs avec les adultes entre 42 et 53 ans. Il faut mentionner que **cette analyse tient compte de l'âge du répondant au sondage et pas de l'âge de la personne la plus âgée du ménage**. C'est une approximation pour éclairer le lien entre âge et consommation de chauffage. Il s'agit d'effectuer une analyse multivariée pour tenir également compte d'autres variables comme la taille du ménage ou le nombre d'enfants.

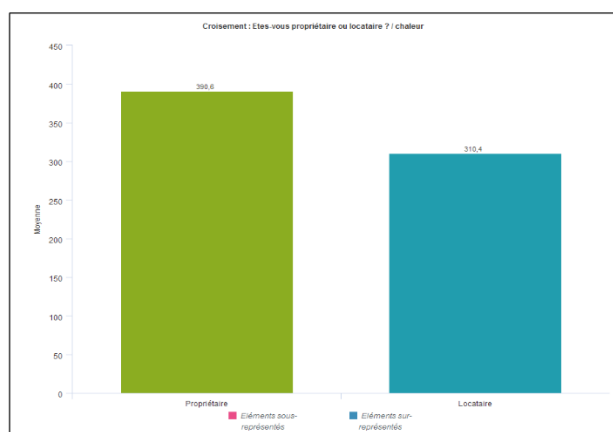


Figure 64 - Corrélation de la chaleur avec le fait d'être propriétaire

Le fait d'être propriétaire a une influence sur la consommation de chaleur. Les personnes propriétaires consomment plus d'énergie pour se chauffer que les locataires. A nouveau, **cette déclaration ne tient pas compte de la grandeur du logement par exemple, une analyse multivariée est nécessaire**.

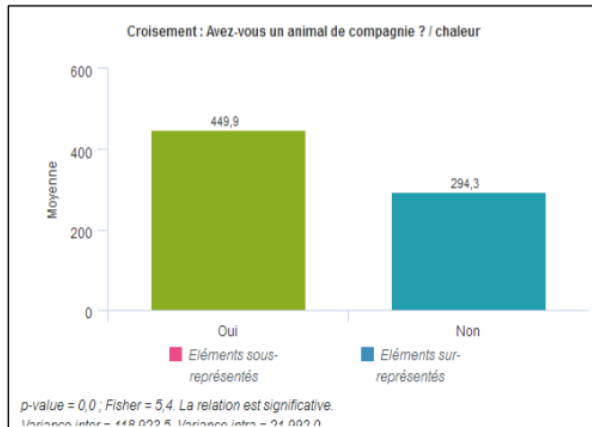


Figure 65 - Corrélation de la chaleur avec le fait d'avoir un animal de compagnie

Cette question sur **la possession d'un animal de compagnie** peut prêter à sourire. Elle provient de la littérature et effectivement **les ménages possédant un animal de compagnie dépensent en moyenne presque 50% de plus de consommation de chaleur que les personnes n'en possédant pas.**

Notre hypothèse est la suivante : les propriétaires laissent la fenêtre partiellement ouverte pour laisser sortir l'animal sur le balcon ou au jardin.

La Figure 66 représente le lien entre la consommation de chaleur et le nombre de personnes du ménage.

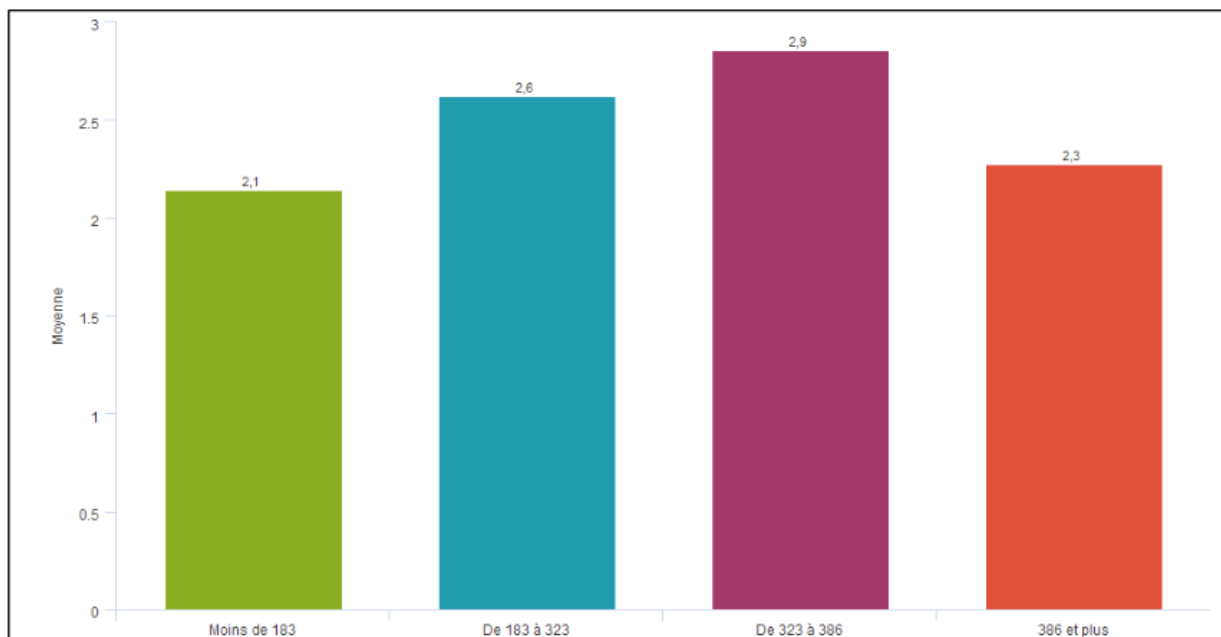


Figure 66 - Corrélation de la chaleur avec le nombre de personnes dans le ménage

Les ménages consommant le plus sont ceux ayant en moyenne 2 personnes. Les ménages composés de trois personnes ne consomment pas plus. Il y a donc un lien entre le nombre de personnes et la consommation, mais il est contredit par un des résultats.



Corrélation des données sur le comportement des habitants face aux services énergétiques ainsi que leur attitude générale avec la chaleur

Les analyses techniques ont montré **que l'aération jouait un rôle important sur la (sur)consommation d'énergie**. Avant d'effectuer des modèles multivariés, le croisement entre la pratique d'aération et la consommation moyenne annuelle de chauffage est intéressante.

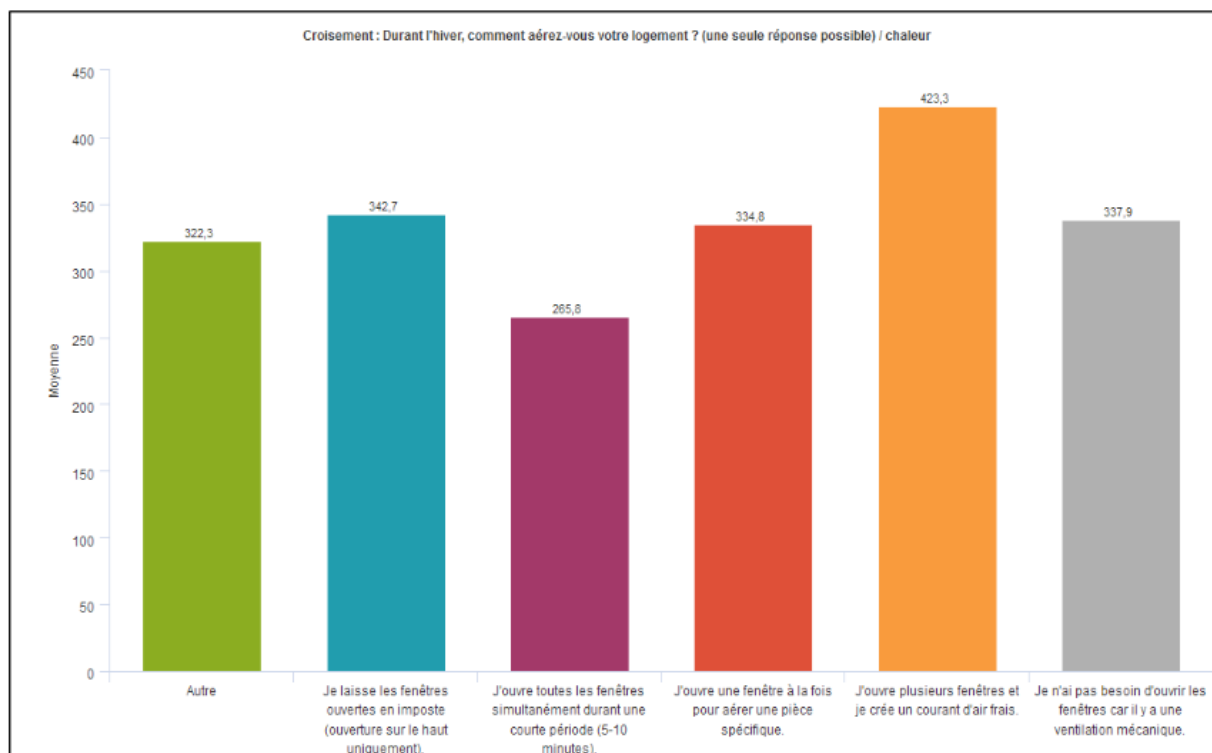


Figure 67 - Aération du logement et corrélation avec la consommation de chauffage

Les différentes pratiques des habitants vis-à-vis de l'utilisation des fenêtres changent la moyenne annuelle de consommation de chaleur. Afin d'être le plus efficace, il est recommandé d'ouvrir les fenêtres entre 5 et 10 minutes par jour. **Les personnes laissant les fenêtres ouvertes en imposte toute la journée consomment beaucoup plus (343 kWh/an) que celles ouvrant seulement pour une courte période (266 kWh/an).** Les personnes n'ouvrant pas les fenêtres ne détiennent pas la consommation la plus faible (338 kWh/an). **Ce sont celles qui les ouvrent simultanément entre 5 et 10 minutes par jour qui consomment le moins (266 kWh/an).**

De manière générale, nous pouvons constater que l'ouverture des fenêtres pendant une durée importante aura des conséquences sur la consommation de chaleur. Les personnes qui ouvrent les fenêtres une pièce à la fois consomment 335 kWh/an, presque autant que celles qui déclarent laisser les fenêtres en imposte. **« La palme » de la consommation revient aux ménages qui déclarent aérer en créant des courants d'air (423 kWh).**



Le moment pour ouvrir les fenêtres est ensuite croisé avec les données de consommation de chaleur.

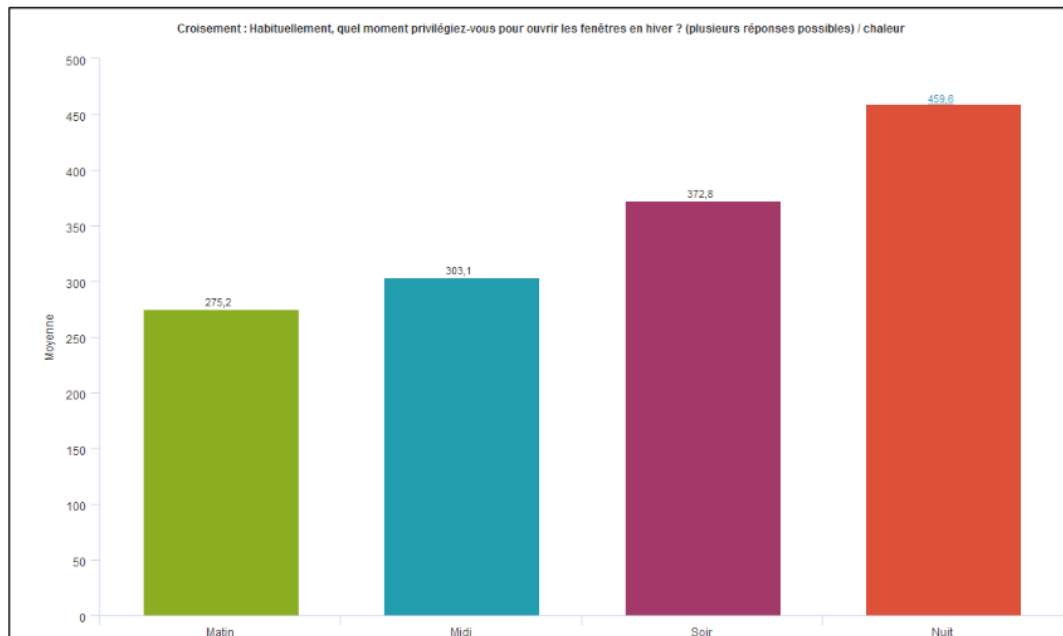


Figure 68 - Corrélation entre la chaleur et le moment d'ouverture des fenêtres en hiver

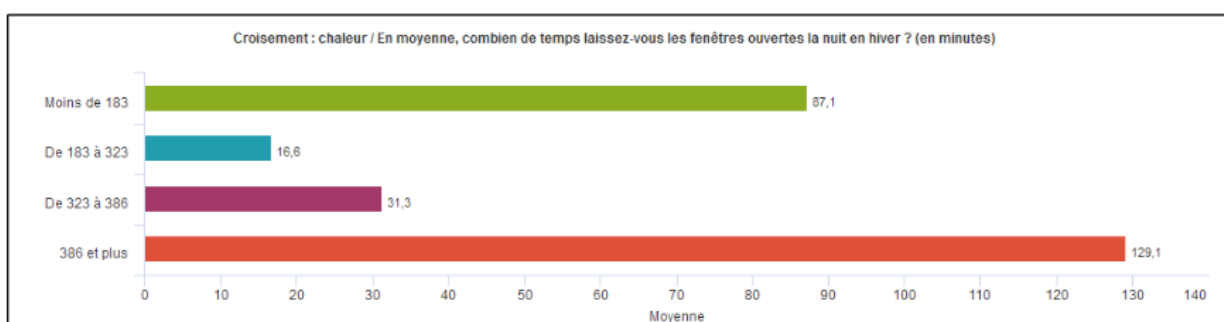


Figure 69 - Corrélation du temps d'ouverture des fenêtres la nuit en hiver avec la chaleur

Les différentes pratiques des habitants par rapport à l'ouverture des fenêtres en hiver a un impact sur les moyennes de consommation de chauffage. Le fait d'ouvrir ses fenêtres durant la matinée semble diminuer la consommation de chaleur. **Les habitants ouvrant leurs fenêtres durant la nuit consomment le plus d'énergie et ne sont pas du tout efficaces énergétiquement parlant.**

Plus les personnes gardent leurs fenêtres ouvertes longtemps et plus la consommation sera importante, représenté graphiquement par la croissance des trois dernières barres. En revanche, la première barre en vert est expliquée par le fait qu'une seule personne affirme laisser toute la nuit ses fenêtres ouvertes, donc la moyenne de temps d'ouverture a beaucoup grandi (87.1 minutes alors que la réponse de cette personne est de 480 minutes, soit 8 heures). **La consommation de chauffage est faible pourtant, car il possède un chauffage d'appoint, utilisant de l'électricité (d'où l'intérêt d'étudier en parallèle la consommation de différents types d'énergie pour comprendre ce type de dérive d'usage).**



De manière cohérente, la **Figure 70** exprime le fait que les personnes laissant les fenêtres ouvertes plus longtemps durant la journée consomment moins de chaleur.

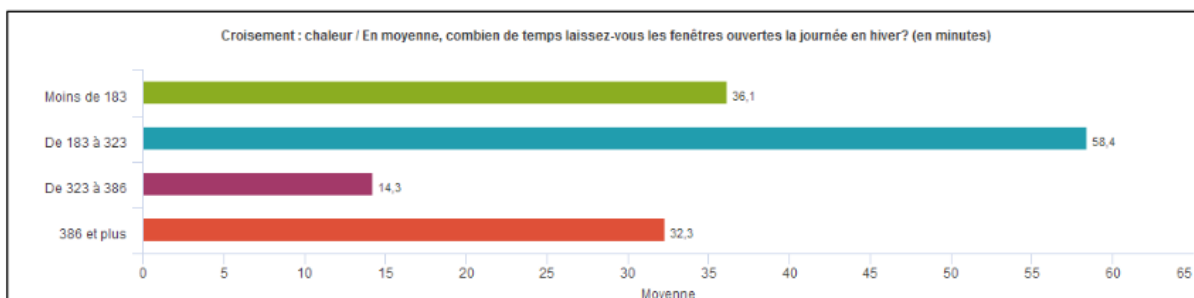


Figure 70 - Temps d'ouverture des fenêtres le jour en hiver corrélé à la chaleur

Cela est applicable parce que les habitants laissent leurs fenêtres ouvertes durant la journée. Donc le soleil permet de chauffer les habitations avec moins d'impact sur la consommation de chauffage.

La température souhaitée a ensuite été croisée avec la consommation de chaleur moyenne annuelle.

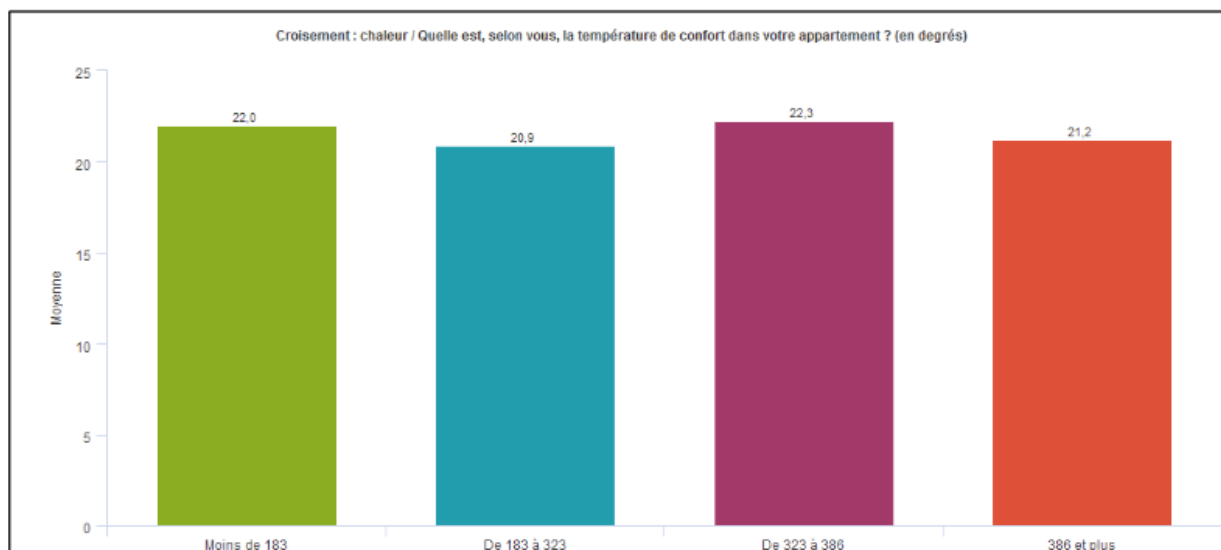
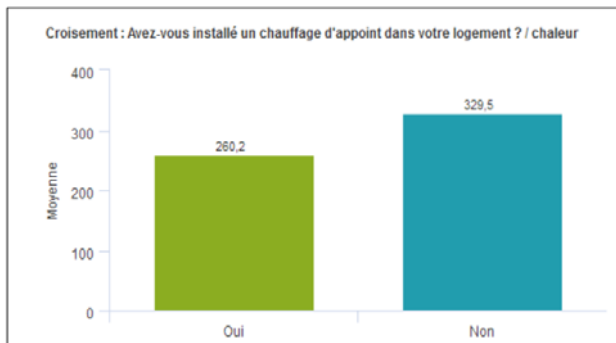


Figure 71 - Croisement entre la température de confort souhaitée et la chaleur moyenne annuelle

Ce sont les pratiques (comme l'ouverture des fenêtres) qui impactent la consommation moyenne de chaleur, et non les « attitudes » des habitants, définissant une température idéale. Les personnes consommant le plus de chaleur, (386 et plus), pensent que la température de confort de leur appartement devrait être de 21 degrés en moyenne. Cependant, ceux pensant que la température idéale devrait être de 22 degrés consomment moins de chaleur, ce qui ne semble pas cohérent. **La température idéale souhaitée et la consommation de chaleur réelle ne sont pas corrélées** dans notre échantillon de 34 répondants. Il faudrait donc co-développer des solutions s'appuyant sur les pratiques des habitants plutôt que sur les attitudes vis-à-vis de la consommation de chauffage.



Le croisement entre l'installation d'un chauffage d'appoint et la consommation de chaleur est étudié :



Les personnes qui ont installé un chauffage d'appoint consomment en moyenne 26.5% de moins d'énergie pour le chauffage. Cela est expliqué par le fait qu'ils utilisent moins le chauffage intégré de leur appartement, mais plus le chauffage d'appoint. En revanche, l'impact sur la moyenne d'électricité consommé sera plus fort, mais l'échantillon est trop petit pour généraliser le résultat.

Figure 72 - Croisement entre la présence d'un chauffage d'appoint dans le logement et la chaleur moyenne annuelle

Le croisement suivant s'intéresse au lien entre satisfaction vis-à-vis de la température en hiver et consommation de chaleur :

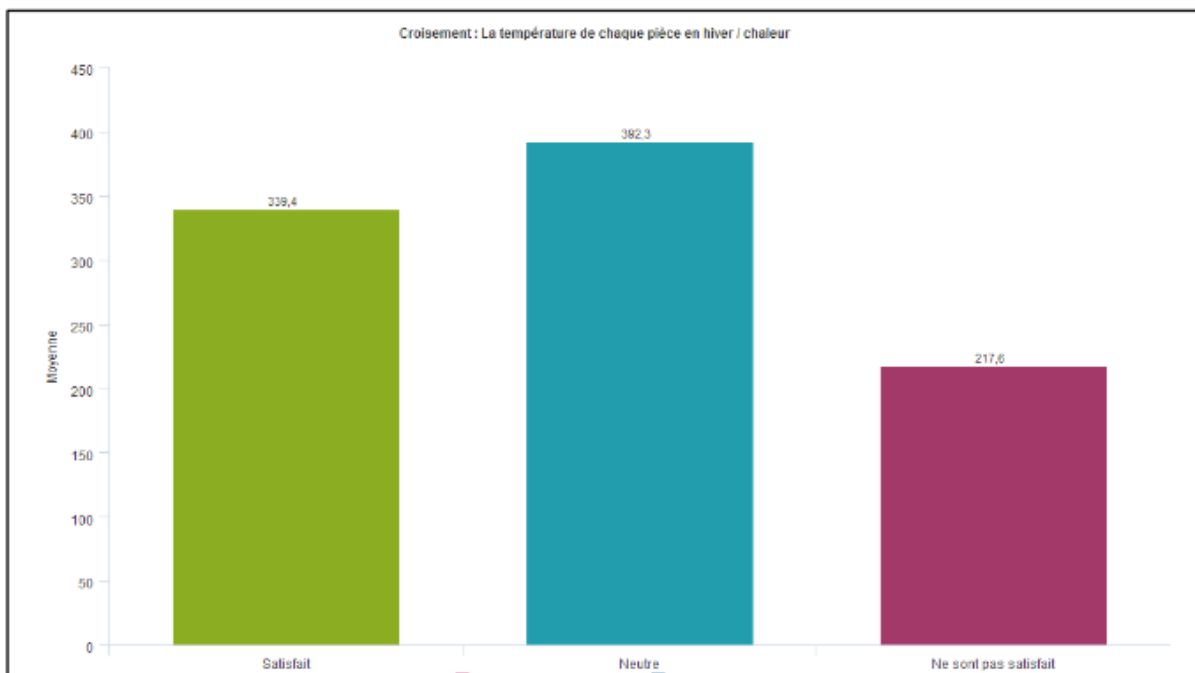


Figure 73 - Croisement de la température moyenne de chaque pièce en hiver et la consommation de chaleur annuelle moyenne

Il y a corrélation entre la satisfaction vis-à-vis de la température de chaque pièce en hiver et la consommation annuelle moyenne de chaleur. Les personnes ayant répondu « neutre » concernant la satisfaction vis-à-vis de la température des pièces consomment le plus. Il peut sembler étonnant que les personnes insatisfaites sont celles qui consomment le moins de chaleur en moyenne. Toutefois, cela peut être lié au fait qu'ils n'interviennent pas directement sur leur consommation de chaleur.



En effet, le système de chauffage du quartier est dimensionné de manière à offrir 21 degrés aux habitants en moyenne en hiver. **Les interfaces de réglage de la température ont été largement décriées durant les entretiens qualitatifs.** En effet, elles indiquent jusqu'à 25 degrés alors qu'il n'est théoriquement pas possible d'augmenter la température de son logement à 25 degrés, en lien avec le dimensionnement du chauffage et la volonté du constructeur de respecter le label Minergie. Pour plus de détails, un article scientifique y est consacré dans la thèse de doctorat de Joelle Mastelic (Mastelic, 2019).

Résultats du sondage dans le quartier relatif aux stores

Dans le sondage auprès des habitants du quartier, des questions liées à l'utilisation des stores ont été posées pour mieux comprendre les usages des stores. En effet, il y a **très peu d'automatismes installés dans le quartier pour les stores car c'était une option que pouvaient choisir les propriétaires lors de la construction.** Or ce facteur semble déterminant en vue de la réduction de consommation de chaleur, comme illustré dans l'analyse technique. Voici ci-dessous les résultats résumés pour l'utilisation en journée et le croisement avec la consommation moyenne annuelle de chaleur :

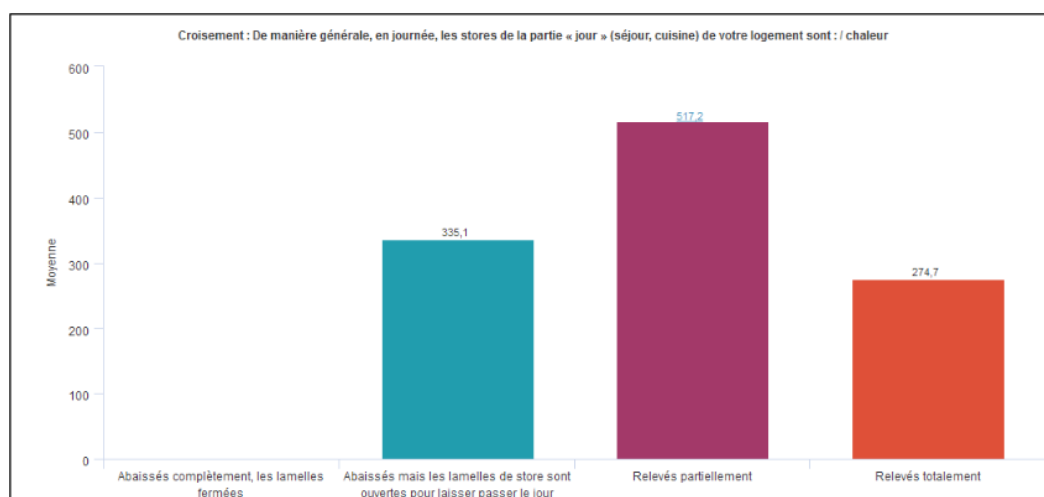


Figure 74 - Croisement entre l'abaissement des stores et la consommation de chaleur annuelle moyenne

Malgré le faible nombre d'observations (34 appartements) on peut remarquer que **la consommation de chauffage est plus basse en moyenne annuelle dans les ménages qui disent relever totalement les stores en journée (275 kWh/an) que dans les ménages qui ne relèvent que partiellement les stores (517 kWh/an).** En analysant les usages, cela conforte l'analyse technique du bâtiment sur le rôle prépondérant des stores et de la chaleur passive.

Les apports thermiques liés aux pratiques des habitants avec les stores montrent que la consommation de chaleur est impactée. Les personnes relevant complètement leurs stores consomment 29.3% de moins de chaleur comparé aux personnes abaissant les stores, et presque 88% de moins que les personnes relevant les stores partiellement.



Une autre question liée à l'utilisation des stores explique les déterminants de l'usage des stores : « Comment utilisez-vous les stores de votre logement » ?

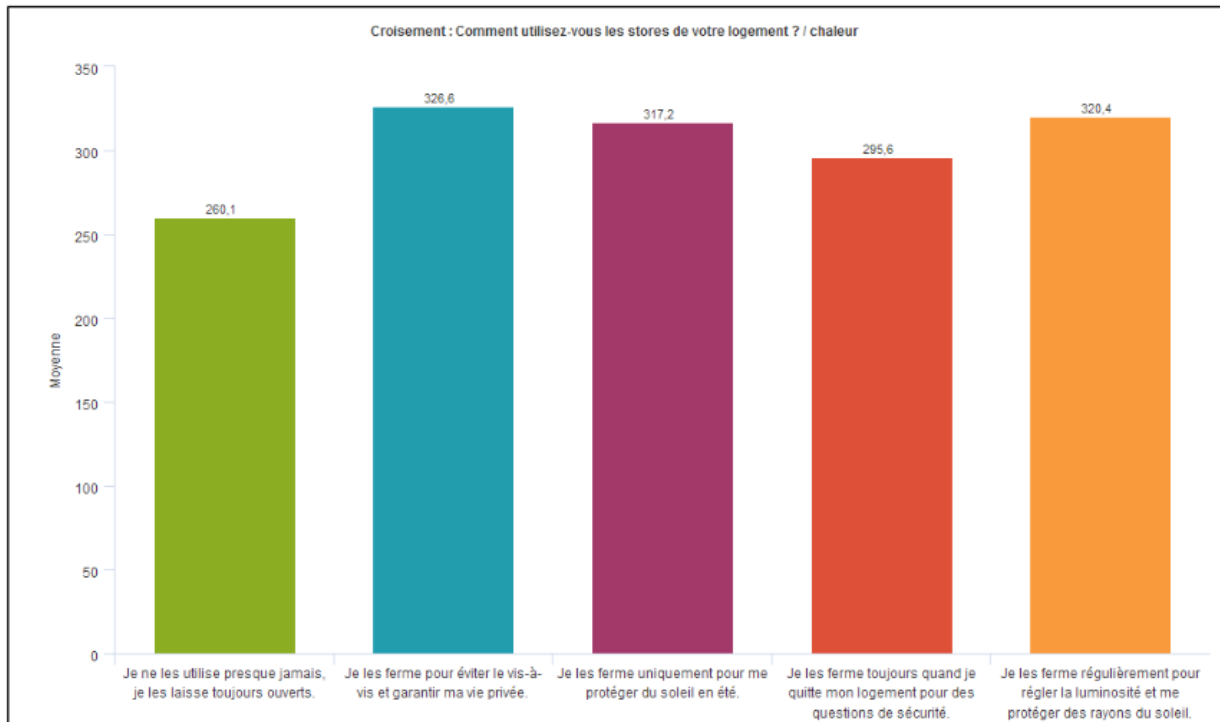


Figure 75 - Croisement entre l'utilisation des stores et la consommation de chaleur annuelle moyenne

Les ménages qui laissent les stores toujours ouverts consomment moins en moyenne annuelle (260) que ceux qui les ferment. C'est la catégorie qui ferme les stores pour éviter le vis-à-vis et garantir la vie privée qui consomment le plus de chaleur (326), puis ceux qui les ferment pour régler la luminosité et se protéger des rayons du soleil (320).

- Le rôle des stores semble donc prédominant dans la consommation de chaleur dans le quartier et il s'agit **d'optimiser leur utilisation, peut-être en sensibilisant les habitants à la chaleur passive en hiver.**
- Il est également important de prendre en compte l'aspect de vis-à-vis et de vie privée à la conception du quartier. **Les pratiques des habitants vont influencer directement la consommation de chaleur moyenne.** Ces pratiques sont motivées par des besoins, engendrant une motivation dans certaines pratiques, comme la fermeture complète des stores pour des questions de sécurité ou encore de vie privée. L'impact du design du quartier est prédominant : en évitant le vis-à-vis, la vie privée est respectée et les habitants ont moins tendance à baisser les stores la journée.
- **En installant de la domotique pour descendre et monter les stores automatiquement** en fonction des conditions extérieures et de la présence des habitants, cela simplifie les tâches des habitants.



Les attitudes vis-à-vis de l'environnement ont-elles une influence sur la consommation ?

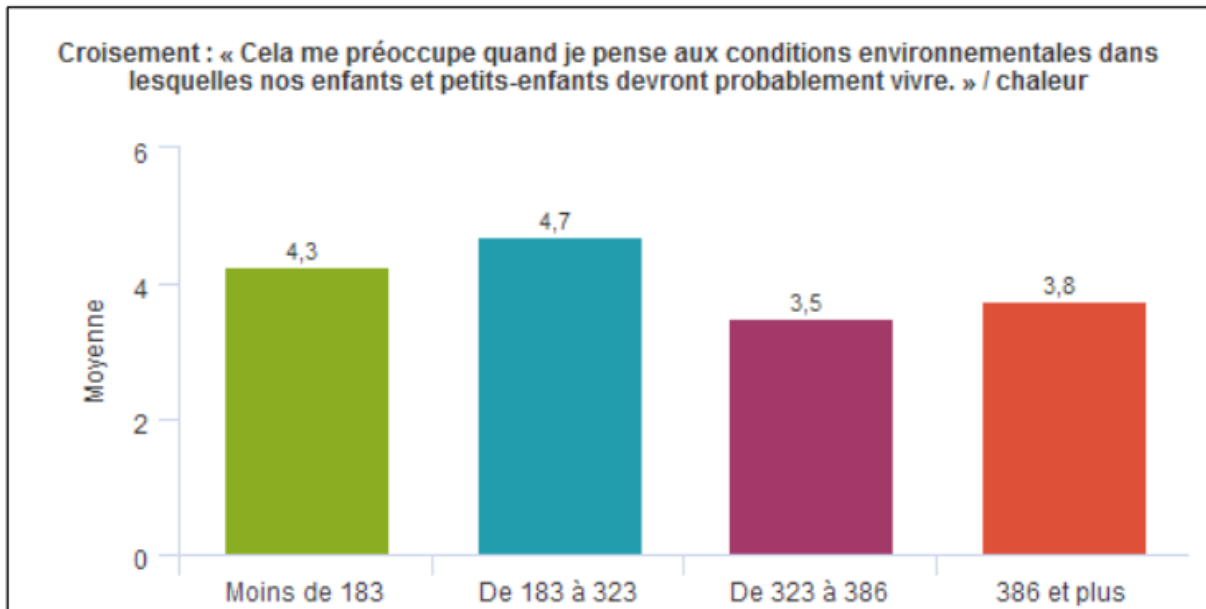


Figure 76 - Croisement entre la préoccupation concernant les conditions environnementales et la consommation de chaleur

Les personnes les plus anxieuses face aux générations futures consomment en effet moins que la moyenne en termes de chauffage. La catégorie de personnes consommant le moins est effectivement consciente de ce problème et influence leur comportement en conséquence.

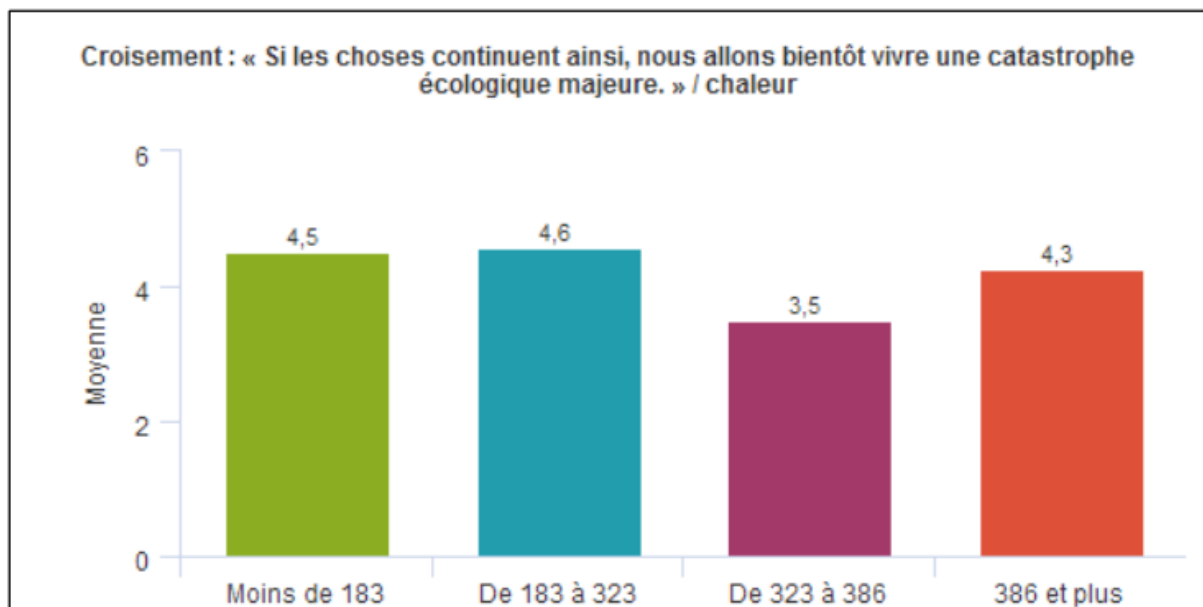


Figure 77 - Croisement entre la conscience des habitants et la chaleur



Malgré le fait que la plupart des personnes conscientes des catastrophes écologiques potentielles consomment moins, certains gros consommateurs, comme la dernière catégorie, consommant plus de 386 kWh par ménage, restent également soucieuses des questions environnementales. Ce n'est pas forcément le fait d'avoir certaines opinions vis-à-vis de l'environnement qui influencera la consommation. **C'est bel et bien dans les pratiques des habitants que des changements doivent avoir lieu afin d'augmenter en efficacité énergétique.**

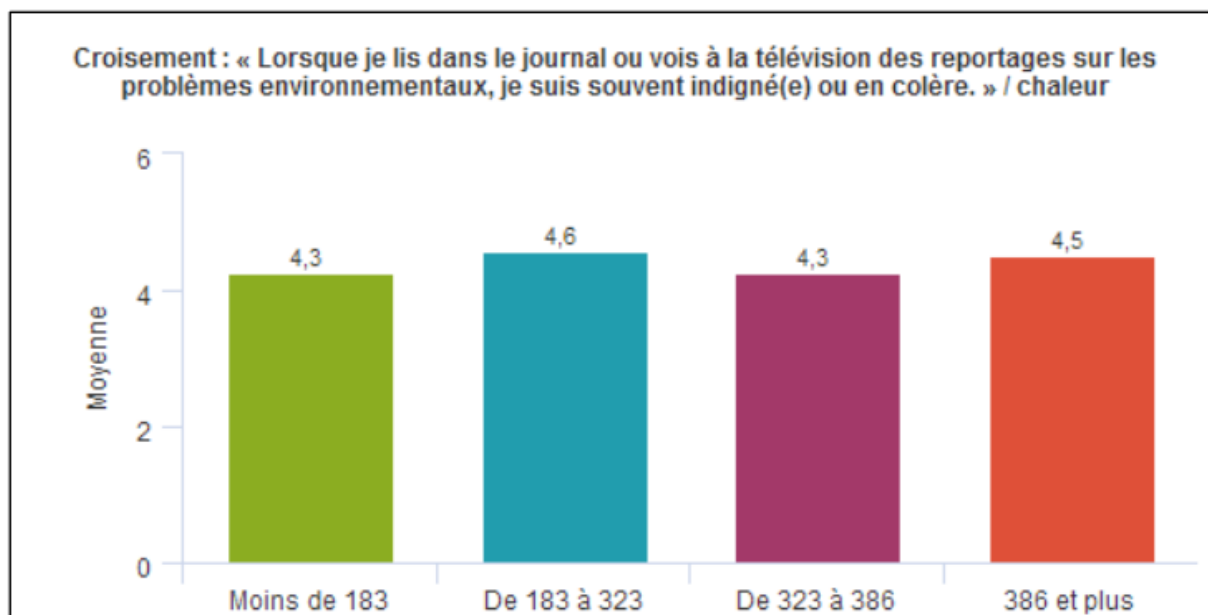


Figure 78 - Croisement entre la conscience des personnes et la consommation de chauffage

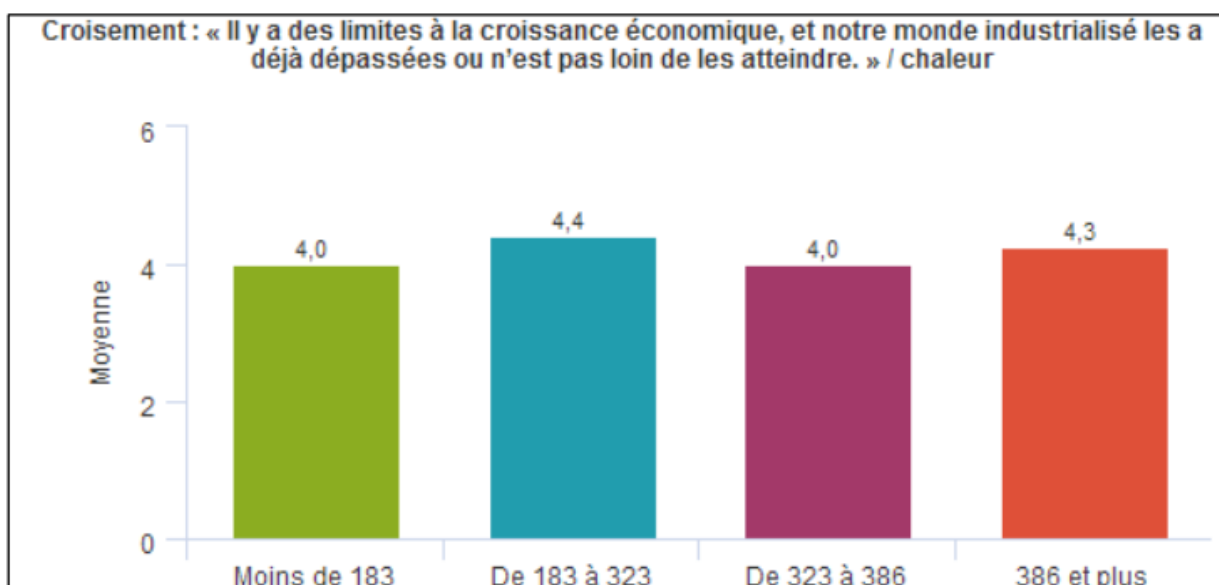


Figure 79 - Croisement entre le scepticisme des habitants et leur consommation de chaleur



Dans les Figure 80 et 81, on voit à nouveau que la typologie de résident et leur attitude vis-à-vis de l'environnement n'explique pas la consommation de chaleur de manière déterminante.

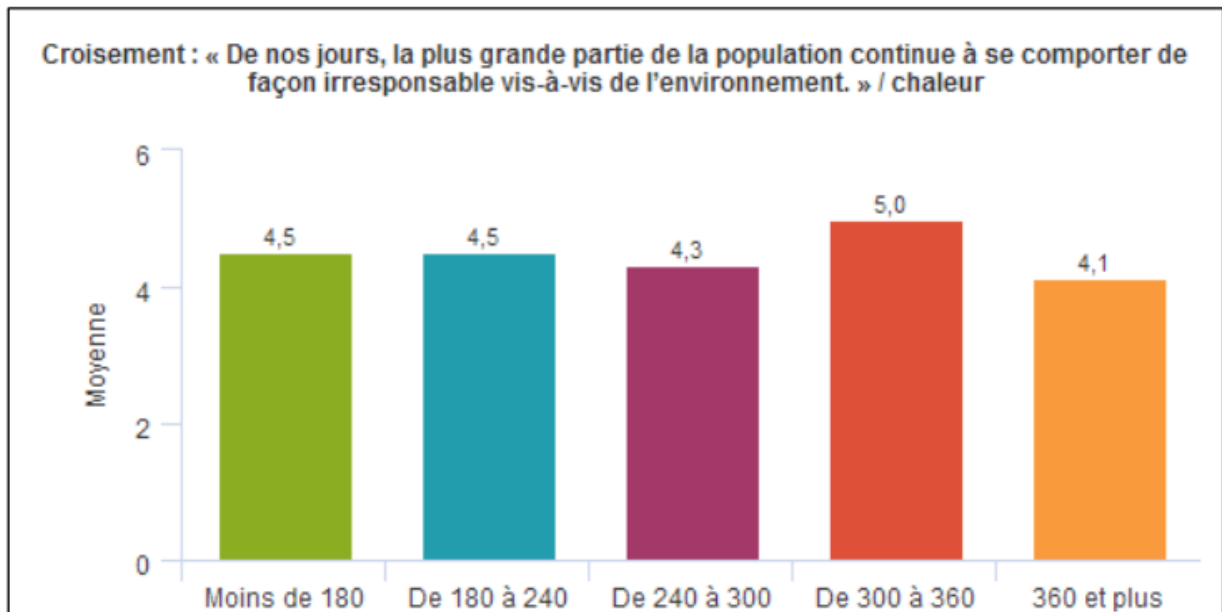


Figure 80 - Croisement entre la responsabilité face à la question énergétique et les consommations de chaleur

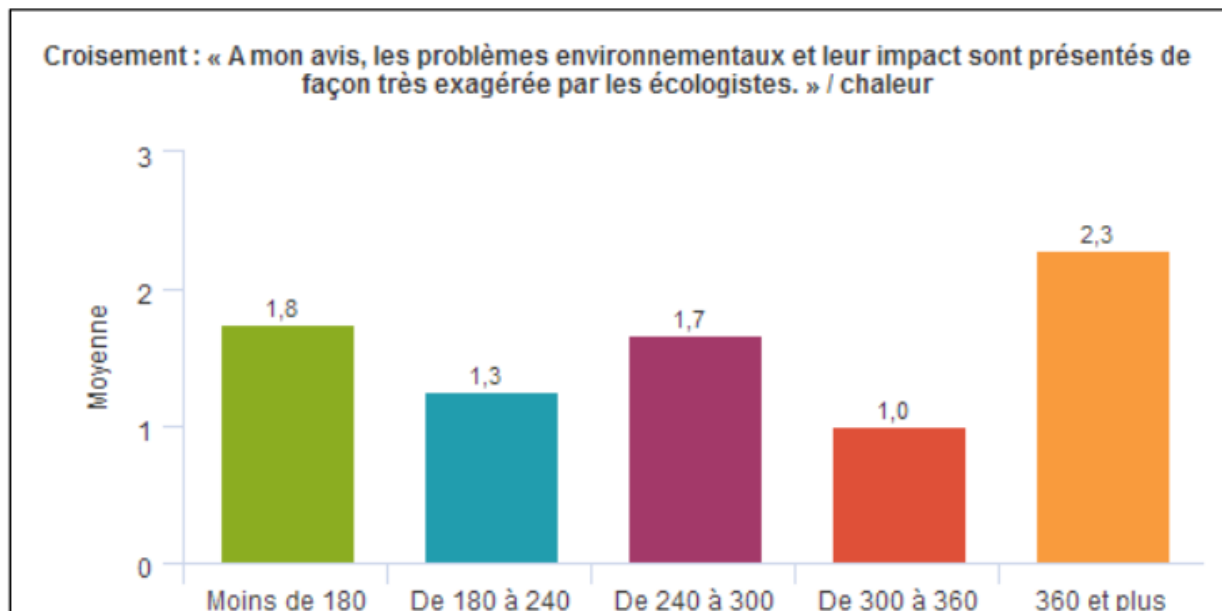


Figure 81 - Croisement entre le scepticisme face aux écologistes et la consommation de chaleur

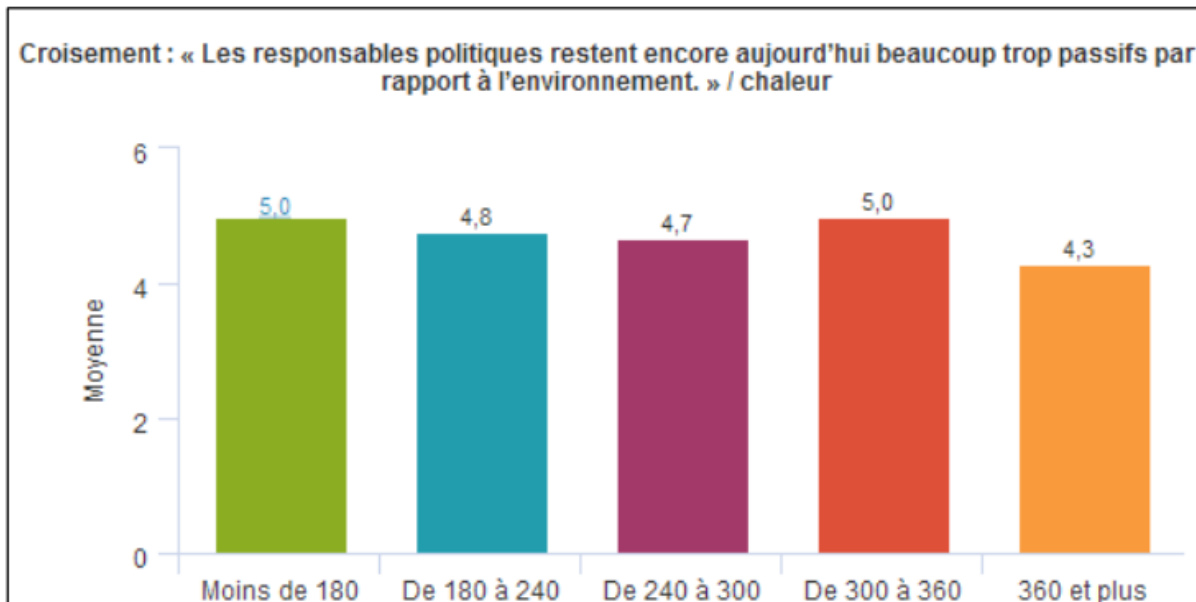


Figure 82 - Croisement entre l'avis des habitants sur les politiciens et la consommation de chauffage

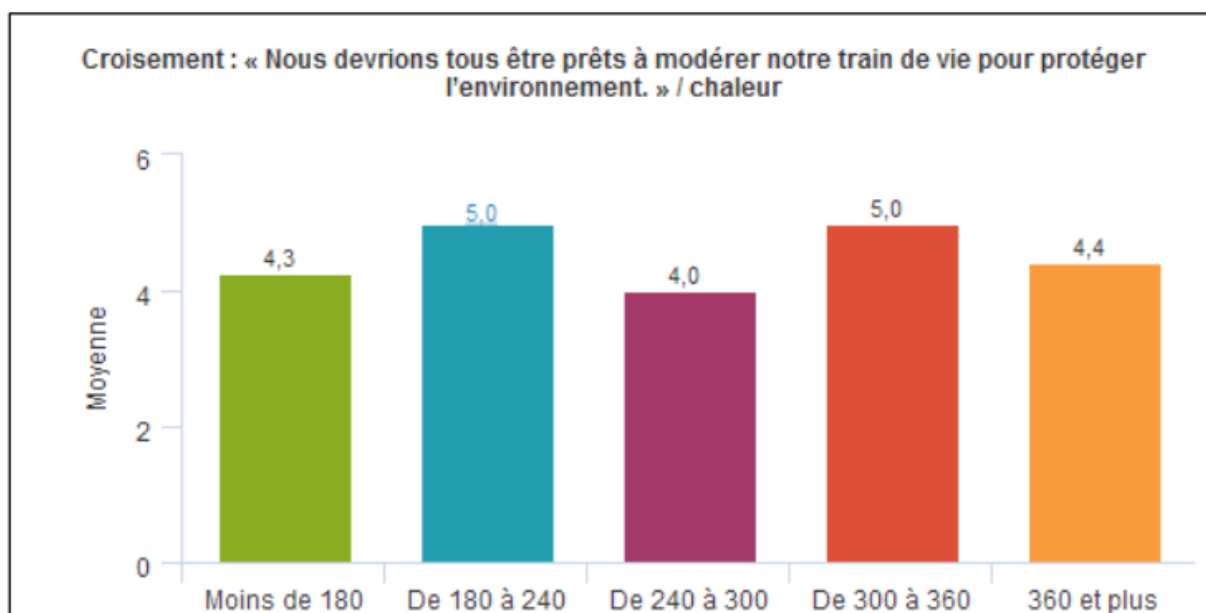


Figure 83 - Croisement entre l'espoir de l'humain sur le DD et la consommation de chaleur

Pour conclure, nous avons classé les répondants dans des catégories en fonction de leurs attitudes vis-à-vis de l'environnement. Le déclaratif et les attitudes n'ont que peu d'influence sur la consommation réelle de chaleur dans le logement. Ce n'est pas un facteur explicatif très corrélé. La limite de l'étude (34 ménages avec tous les types de données) ne nous permet pas une généralisation et des précautions doivent être prises avec les résultats (test dans d'autres quartiers par exemple).



Electricité

Concernant l'électricité, les résultats ne sont pas significatifs et n'apportent pas de conclusion concluante. Nous avons effectué ses analyses qui sont à disposition sur demande. Elles n'ont par contre pas été intégrées au présent rapport car elles apportent un niveau explicatif faible. De plus, l'écart de performance énergétique se situe au niveau de la consommation thermique (+17%) et non électrique (-15%) par rapport à la norme SIA.

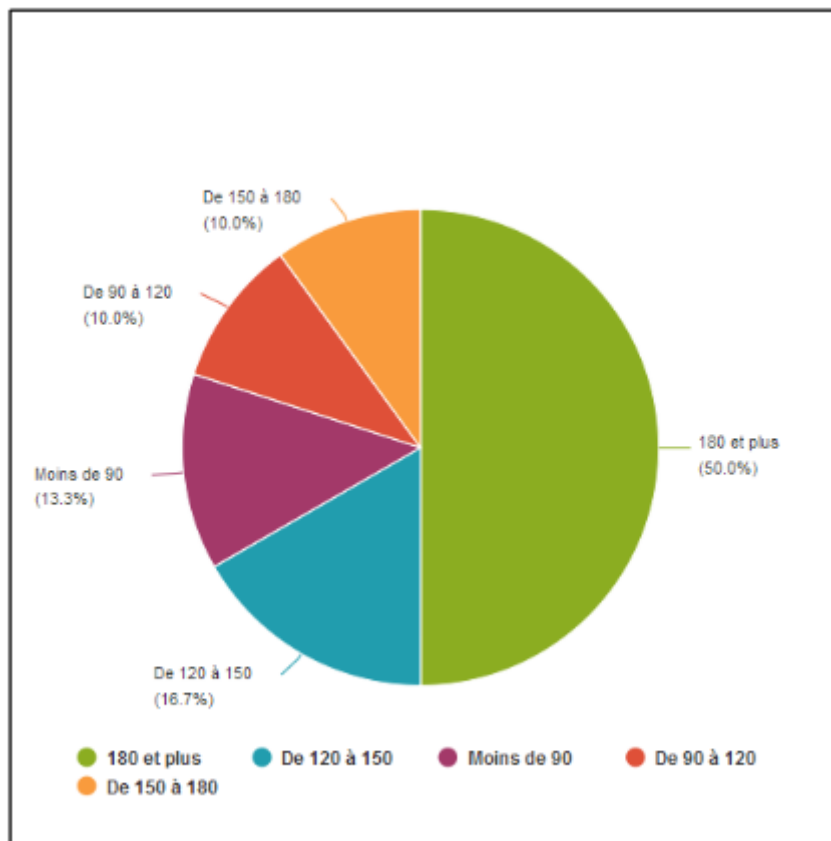


Figure 84 - Description de l'échantillon concernant l'électricité



Analyses de la consommation d'eau chaude sanitaire

La consommation d'ECS par ménage a également été analysée. Il a ensuite été possible de croiser les différents jeux de données : (1) les données socio-démographiques provenant du sondage, (2) les attitudes provenant du sondage également ainsi que (3) les comportements grâce au relevé de la consommation moyenne d'ECS. Voici dans la **Figure 85** la consommation moyenne d'eau. L'unité représente la consommation d'eau moyenne mensuelle en m³ entre 2016 et 2017.

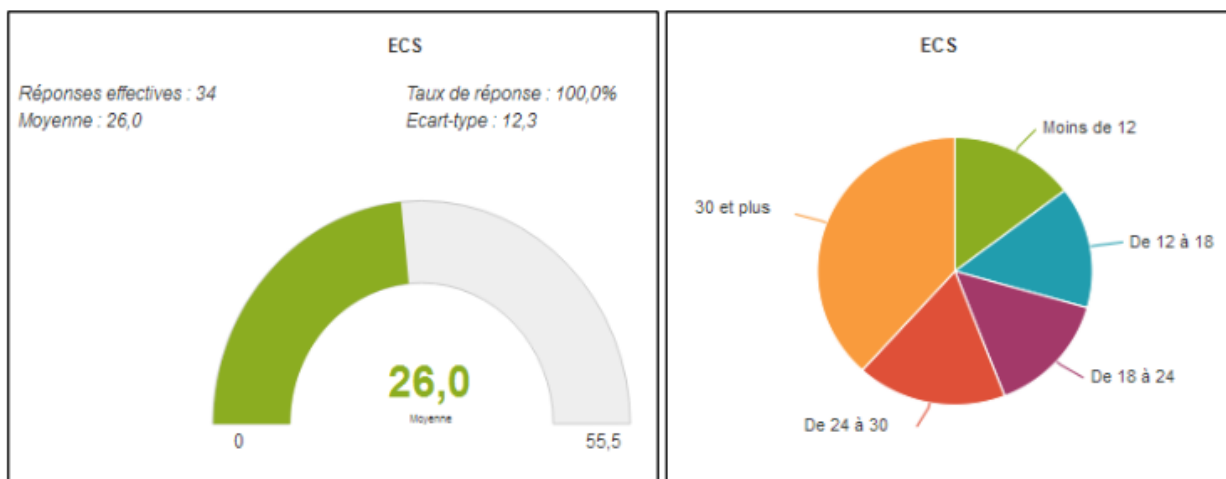


Figure 85 - Description de l'échantillon concernant l'eau

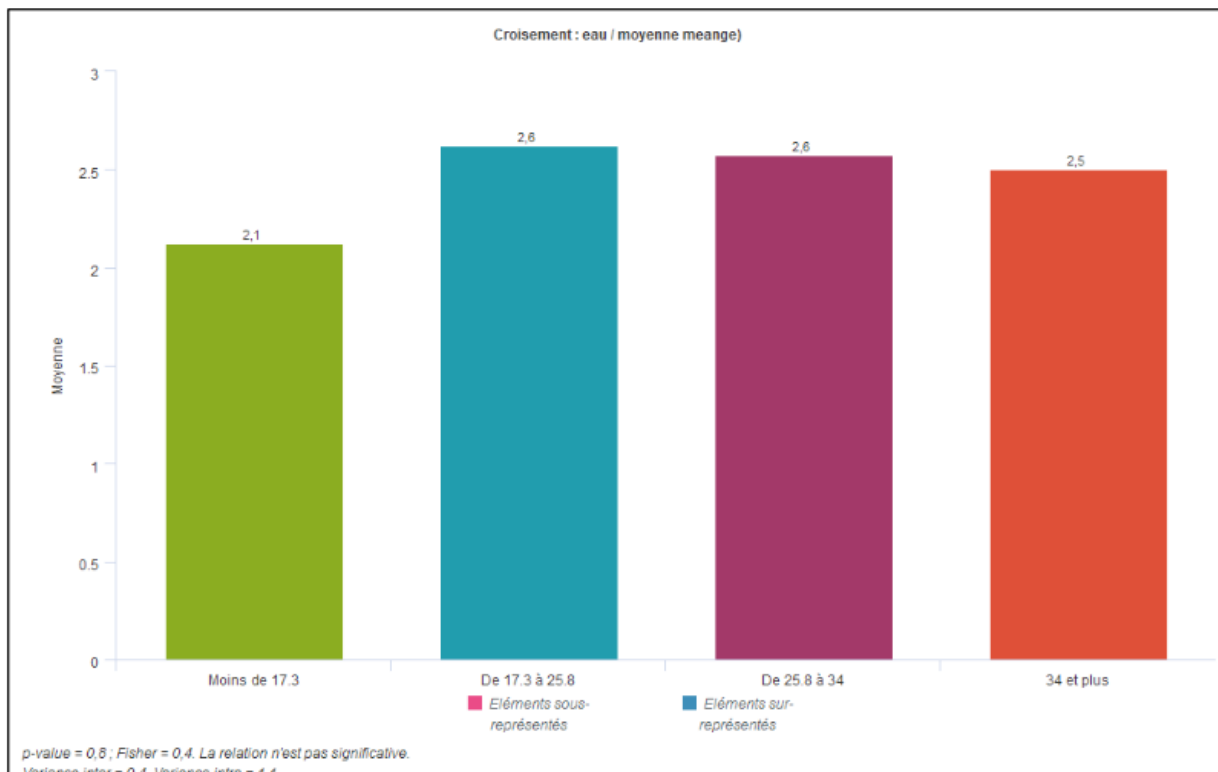


Figure 86 - Croisement entre l'eau et la consommation moyenne



Dans la **Figure 87**, on constate de manière assez cohérente, que les ménages comportant le plus de personnes consomment en moyenne plus d'eau. Par contre, on remarque que les couples sans enfants consomment plus d'eau en moyenne que ceux avec des enfants.

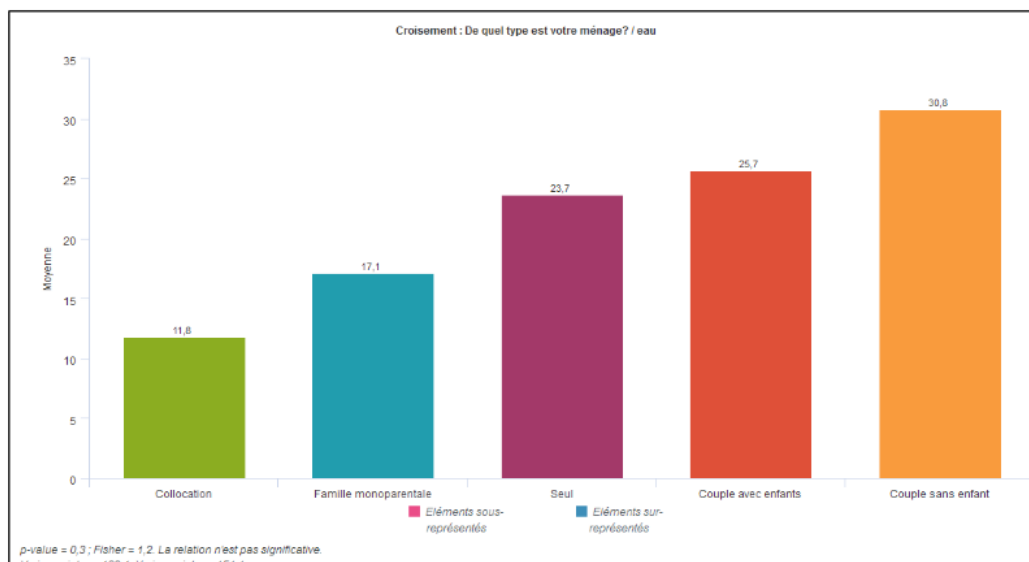


Figure 87 - Consommation d'eau croisée au type de ménage

Contrairement à la chaleur, la consommation d'eau ne semble pas avoir de lien significatif avec le niveau d'éducation le plus élevé du ménage. Les personnes ayant une formation de degré tertiaire sont les deuxièmes plus gros consommateurs. Les personnes sans formation post-obligatoire sont celles consommant le moins.

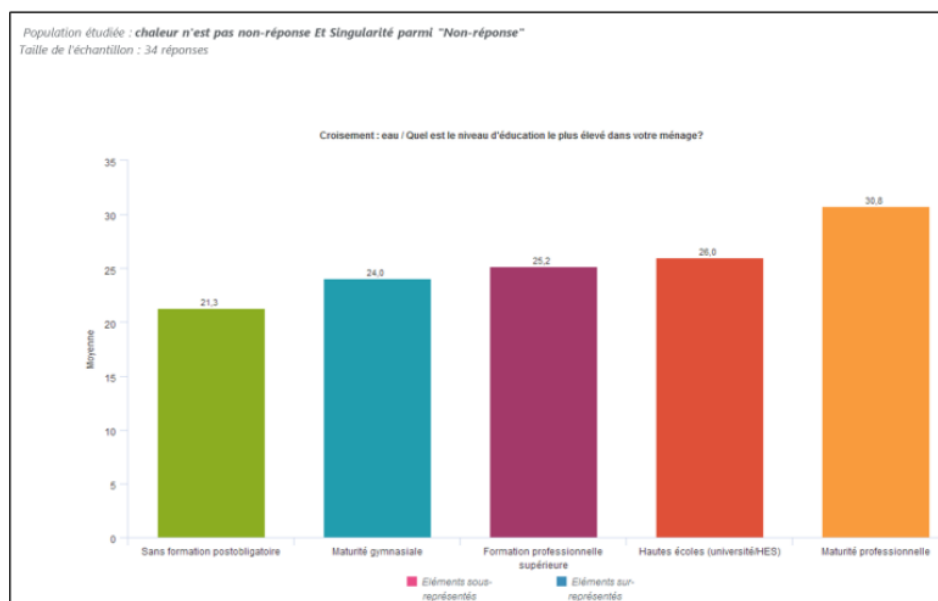


Figure 88 - Croisement de la consommation d'ECS avec le niveau d'éducation le plus élevé du ménage



On remarque sur la **Figure 89** que **plus l'on vieillit, et plus la consommation d'eau augmente**. En revanche, les personnes les plus jeunes sont celles consommant le plus d'ECS. Des résultats plus ou moins similaires avaient pu être observés avec le chauffage.

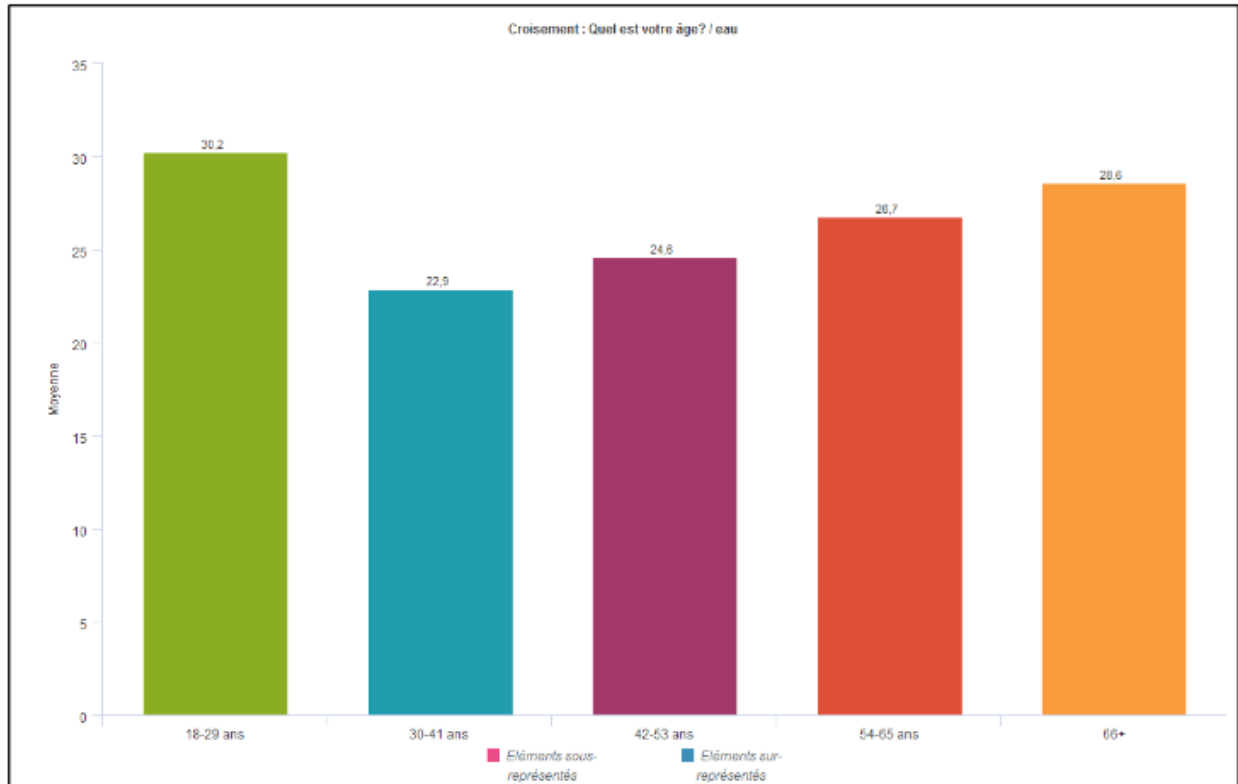


Figure 89 - Croisement entre l'âge et la consommation d'eau

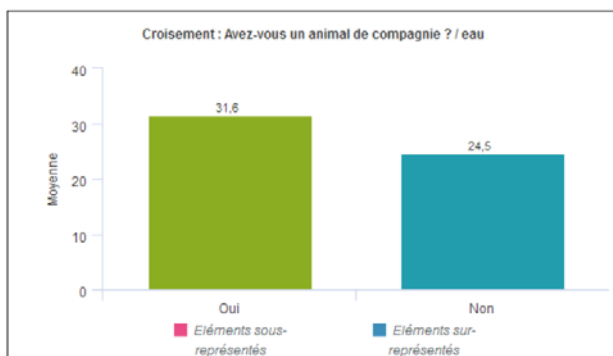


Figure 90 - Corrélation de la consommation d'eau avec la possession d'un animal de compagnie

La **Figure 90** exprime le lien entre la possession d'un animal de compagnie dans le ménage avec la consommation moyenne d'eau. De manière similaire à la chaleur, les ménages possédant un animal de compagnie consomment plus d'eau.



La **Figure 91** exprime la corrélation entre la consommation moyenne d'eau chaude sanitaire et la satisfaction des habitants vis-à-vis du label Minergie.

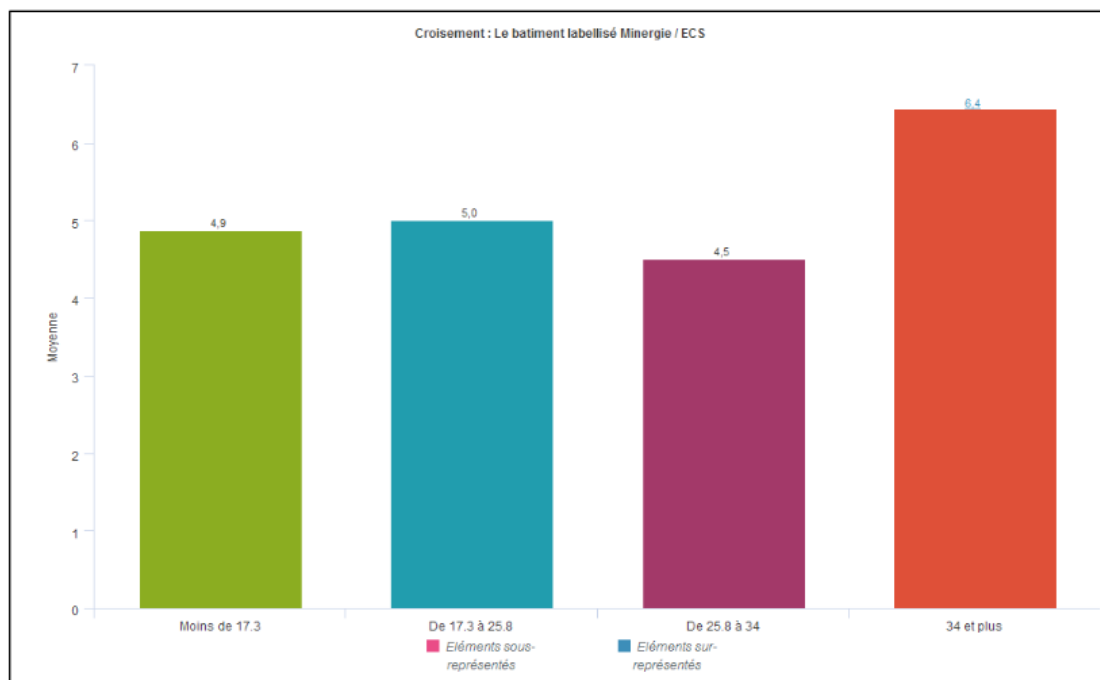


Figure 91 - Corrélation de la consommation d'eau avec la satisfaction du label Minergie

Les habitants qui se sentent les plus satisfaits du label Minergie sont ceux consommant le plus d'eau chaude sanitaire. Nous avons déjà pu conclure cela dans la partie sur le chauffage. Le fait d'avoir analysé un deuxième service énergétique nous a permis d'arriver aux mêmes conclusions.

Après avoir pu croiser les données socio-démographiques des personnes avec leur consommation d'ECS, il est intéressant de croiser les attitudes des habitants face à la question écologique avec leur consommation d'eau.

Les deux graphiques ci-dessous illustrent le croisement de deux questions liées à la perception des conditions environnementales avec leur consommation d'eau :

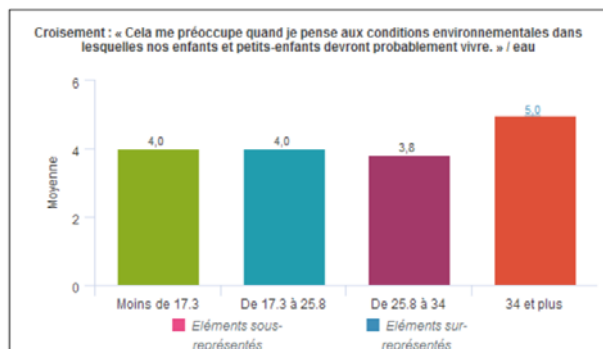


Figure 92 - Croisement « éco-anxiété » et consommation d'ECS

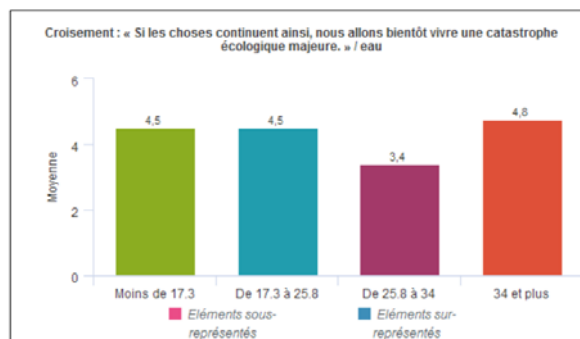


Figure 93 - Croisement entre catastrophe majeure et consommation d'ECS



Selon les Figures 92 et 93, les personnes se déclarant les plus anxieuses face à la situation des conditions environnementales pour les générations futures ainsi que celles qui sont le plus sceptiques quant au futur de notre planète, sont les plus gros consommateurs en moyenne d'ECS parmi les ménages étudiés.

L'analyse de la consommation d'ECS dans le ménage apporte des **résultats significatifs et plutôt similaires à ceux du chauffage** étudié au point précédent. Il est intéressant de remarquer le lien entre la consommation de ces services énergétiques et la satisfaction, mais également de comprendre la corrélation entre le scepticisme des habitants face à cette question écologique et leur consommation.

- Les études qui se basent uniquement sur des données déclaratives sur les attitudes qui ne sont pas croisées avec des données de consommations peuvent avoir des **marges d'erreur très importantes** car les attitudes ne sont pas toujours corrélées avec le comportement réel.
- Déclarer ne pas être soucieux de l'environnement ne veut pas dire que ce sont des personnes qui consomment plus que les autres en matière de chauffage, d'électricité ou d'ECS.
- Les conclusions vont dans le même sens que ce que l'on sait déjà grâce à l'article « Mind the Gap » de Kollmuss & Agyeman (2002).
- Il faudrait la comparaison avec les données d'un deuxième quartier (impossibles à obtenir dans le cadre de ce projet) pour généraliser les résultats et renforcer la taille de l'échantillon. Il serait aussi possible (et peut-être plus aisé) de refaire une étude longitudinale dans le même quartier pour voir si les résultats évoluent dans le temps.



Analyses économétriques

Afin de mener à bien les analyses économétriques, il est nécessaire de relier les données de consommations du logement avec les données socio-économiques du ménage habitant dans ce logement. Bien qu'il y ait **226 ménages dans le quartier d'Eikenott pour qui les relevés de consommation avec e-smart sont disponibles depuis 2015**, le lien entre avec les données socio-économiques n'a pu être établi que pour un **sous-échantillon de 33 ménages**. Cela s'explique par deux raisons. Premièrement, même si l'ensemble des habitants du quartier ont été invités à répondre au questionnaire en ligne, seule une partie d'entre eux ont accepté de le faire. Le nombre de répondants au questionnaire en ligne s'élève à 93 soit environ un taux de retour d'un quart des ménages. D'autre part, il n'a pas été possible d'apparier toutes les données socio-démographiques collectées car **les identifiants n'ont pas pu être déterminés avec certitude pour un certain nombre de ménages**. C'est donc sur un échantillon de 33 ménages que nous sommes en mesure d'effectuer les régressions qui permettent d'expliquer les consommations d'énergie (chauffage, eau chaude, électricité).

Il faut donc admettre que le nombre de ménages sur lequel cette analyse économétrique repose est relativement limité en comparaison avec les échantillons de grande taille qui sont parfois disponibles dans d'autres études dans ce domaine. Cependant, il faut insister sur le fait que **la base de données est malgré tout d'une taille tout à fait raisonnable**. En effet, les données de consommation utilisées sont accessibles de janvier 2015 à juin 2019 et avec une granularité journalière. Nous avons donc à disposition (jusqu'à) 1'642 observations journalières par ménage, et ce pour trois domaines de consommation différents, soit près de 5'000 observations par ménage. **La base de données utilisées pour les régressions où sont intégrées des éléments socio-démographiques contient ainsi plus de 100'000 observations, ce qui est remarquable. Le fait d'avoir les consommations dans différents domaines est également une caractéristique exceptionnelle de cette base de données.** À l'exception de Jessoe et al. (2017), nous n'avons en effet pas connaissance d'utilisation de base de données où les consommations de différents domaines peuvent être reliées au niveau des ménages.

Problèmes liés à l'acquisition et au traitement des données de consommation

Les données de consommation proviennent de compteurs intelligents (*smart meters*) eSMART et sont ici utilisées avec une **granularité journalière**. Un certain nombre de difficultés ayant été rencontrées dans ce contexte méritent d'être signalées. Il s'agit de difficultés d'ordre logistique ainsi que de difficultés relatives à la qualité des données.

Une première série de difficultés s'est présentée **dès la phase d'obtention des données de consommations des ménages**. En effet, même si leur nombre est en augmentation, il existe aujourd'hui encore relativement peu de fournisseurs qui possèdent des données provenant de compteurs intelligents capables de mesurer la consommation de manière autonome et donc à haute fréquence. Surtout, pour que ces données soient utiles dans une analyse économétrique, **il est nécessaire qu'elles soient disponibles sur un horizon temporel suffisamment long**. En ce sens, un compteur intelligent ayant été installé récemment n'est pas spécialement utile puisque l'historique des consommations n'est pas suffisant pour une analyse robuste. Ensuite, même lorsqu'ils possèdent des données provenant de compteurs intelligents, **les fournisseurs sont souvent réticents à les partager pour des raisons de confidentialité, et ce même à des fins de recherche et après signature de contrats garantissant l'anonymisation des données individuelles**. Finalement, on rencontre parfois des **barrières purement techniques liées à l'extraction des données** depuis les systèmes informatiques des fournisseurs. En effet, la plupart des fournisseurs qui disposent de telles données les utilisent principalement pour leur facturation et il n'est pas toujours évident d'extraire les données brutes de ces systèmes afin de pouvoir les



utiliser dans un but différent de celui pour lequel elles sont initialement prévues. **Ces difficultés ont toutes été rencontrées à un degré plus ou moins important au cours du projet, ce qui a malheureusement causé une perte de temps et de ressources considérable.**

Dans le cas du quartier d'Eikenott, des solutions ont pu être trouvées et les données de consommation sont finalement disponibles pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et l'électricité pour l'ensemble des 226 ménages habitant dans le quartier et ayant un smart meter installé (la moitié des ménages). **C'est cependant le seul quartier pour lequel des données ont pu être obtenues.** Des discussions avec un nombre important d'autres fournisseurs portant sur d'autres quartiers n'ont en effet jamais abouti. Il est à espérer que **le projet de création d'un centre de données énergétiques (datahub national)** proposé par le Conseil fédéral (voir DETEC, 2019) permette de trouver des réponses à ces problèmes. **Les données énergétiques sont une des clés de la transition énergétique.** Avoir accès à des données de qualité et en grande quantité constitue une condition nécessaire à l'obtention de conclusions pertinentes.

Une fois la première série de difficultés passée et les données obtenues, se pose un deuxième genre de problèmes, liés à la **qualité des données**. En effet, contrairement à ce qu'on pourrait attendre étant donné que les relevés de consommations se font de manière automatisée, **les mesures effectuées par des compteurs intelligents ne sont pas toujours d'une qualité irréprochable.** À ce stade, on rencontre ainsi deux types de problèmes. Tout d'abord, il arrive que les relevés cessent pendant des périodes relativement longues de plusieurs jours voire parfois plusieurs mois. Pendant ces périodes de non-fonctionnement, seule la consommation totale peut être obtenue, grâce à la différence entre la première valeur de l'index à la fin de l'interruption des mesures et sa dernière valeur observée avant l'interruption. Il est alors possible de reconstruire les séries en distribuant la consommation entre les jours pour lesquels les relevés manquent, mais cette méthode repose évidemment sur des hypothèses et ne pourra jamais permettre de déterminer exactement ce qui s'est réellement passé. Nous avons ici opté pour un **remplissage uniforme des données manquantes**. Par exemple, si la consommation est manquante pendant une semaine, on répartit la consommation totale observée sur les 7 jours de manière identique entre les 7 jours. Cela permet d'éviter de perdre un nombre non-négligeable d'observations, puisque cette problématique concerne **environ 10% de toutes les observations** de la base de données.

À ce stade, il convient une fois encore de rappeler que le but premier de relever les consommations, même de manière automatisée, reste pour le fournisseur d'établir sa facturation. Dans cet optique, obtenir une (seule) mesure de consommation de temps en temps est suffisant puisque la facturation est mensuelle, bimensuelle, voire même annuelle (avec paiement d'acomptes intermédiaires fixes. Cependant, **la problématique de la fiabilité des compteurs intelligents pourrait devenir primordiale si l'on souhaite passer à des tarifications dynamiques dans le temps** (c'est-à-dire un tarif variable jour par jour, voire heure par heure). En effet, afin de pouvoir proposer des tarifications dynamiques, telles qu'elles sont aujourd'hui envisagées comme moyen de gestion de la demande, **la fiabilité des compteurs est une condition incontournable et des problèmes techniques pourraient entraver de manière rédhibitoire leur mise en place.** Pour pouvoir passer à des tarifications dynamiques, il conviendra auparavant de s'assurer que les données transmises par les compteurs sont suffisamment précises pour permettre d'appliquer le juste tarif à chaque consommation en fonction de l'instant auquel elle aura eu lieu. **À l'heure actuelle, il ressort que certains compteurs intelligents bénéficient d'un niveau de fiabilité insuffisant pour imaginer un passage à une tarification dynamique.** Ainsi, il semble que des enseignements importants peuvent être déduits des difficultés liées à la qualité des données, d'autant plus que des problèmes similaires ont été rencontrés ailleurs (voir notamment Perret et al., 2019).



En plus de la problématique des données manquantes se pose celle des **données aberrantes**. En effet, il arrive parfois que des **valeurs de consommation extrêmes et clairement non-plausibles** soit enregistrées. On peut ainsi par exemple observer des consommations d'électricité s'élevant à plusieurs milliers de kWh pour un seul ménage en une journée, ce qui ne fait évidemment aucun sens. De même, il existe parfois des **consommations négatives** enregistrées. Avant toute analyse statistique, il convient donc de **nettoyer ces données aberrantes**. Pour ce faire, nous avons commencé par supprimer toutes les valeurs négatives. Nous avons ensuite supprimé toutes les valeurs supérieures à la valeur du 3^{ème} quartile plus 1.5 fois l'intervalle interquartile (IIQ) (Tukey, 1977). Il est également à noter que des mesures aberrantes poseraient un problème similaire aux données manquantes lors de la mise en place d'une tarification dynamique.

Description des données de consommation

Les Figures 94 à 96 montrent les **consommations journalières d'énergie** dans les trois domaines à analyser (chauffage, ECS et électricité). On observe une **grande hétérogénéité entre les ménages**, ce qui est encourageant en prévision de l'analyse économétrique, puisque c'est précisément grâce à la variabilité qu'il est possible de détecter des relations entre les variables. On note ensuite de la **saisonnalité dans les trois domaines**. C'est évident dans le domaine du chauffage, où la consommation passe de zéro en été à des montants dépassant 30 kWh de moyenne lors de certains jours d'hiver. Même si elle est d'amplitude moindre, **on observe également de la saisonnalité pour l'eau chaude et l'électricité, avec des consommations clairement plus élevées durant les périodes hivernales**. Dans les trois figures, on distingue par endroits des traits horizontaux. Cela correspond aux périodes pour lesquelles les données étaient initialement manquantes et ont été reconstituées de façon uniforme selon la méthode décrite ci-dessus. Les observations relatives aux 33 ménages pour lesquels il est possible de recouper les données de consommation avec les données du questionnaire sont colorées en vert. Cela permet de constater qu'il n'existe pas de différence systématique entre les consommations de l'ensemble des ménages du quartier (en noir) et celles de l'échantillon (en vert). On peut donc considérer que **les ménages pour lesquels on dispose de toutes les informations sont représentatifs de l'ensemble des ménages du quartier**.

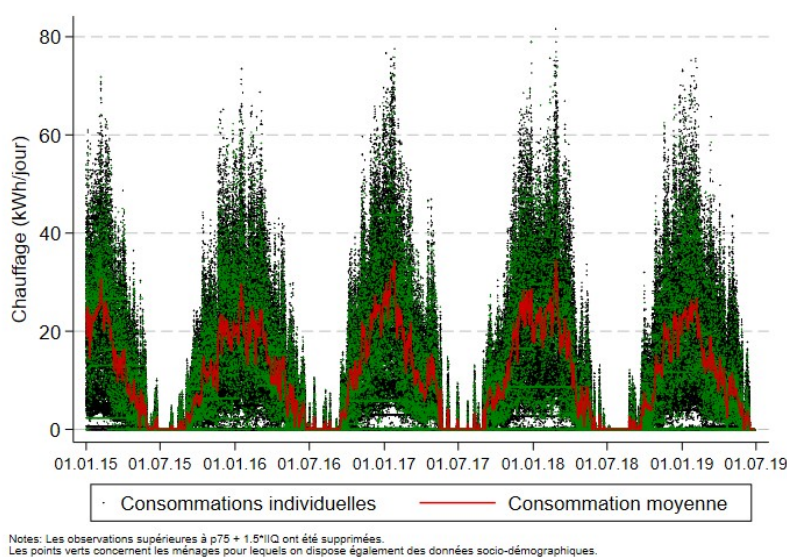


Figure 94 - Consommation de chauffage

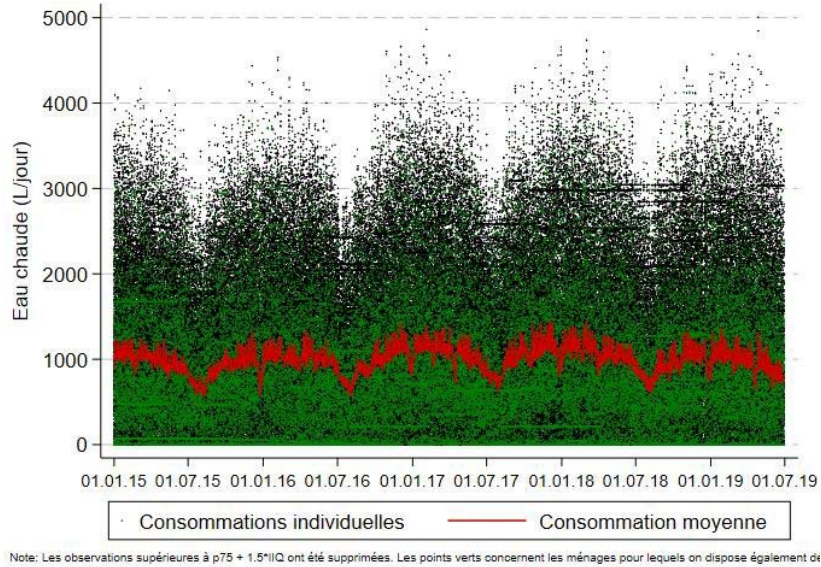


Figure 95 - Consommation d'eau chaude sanitaire

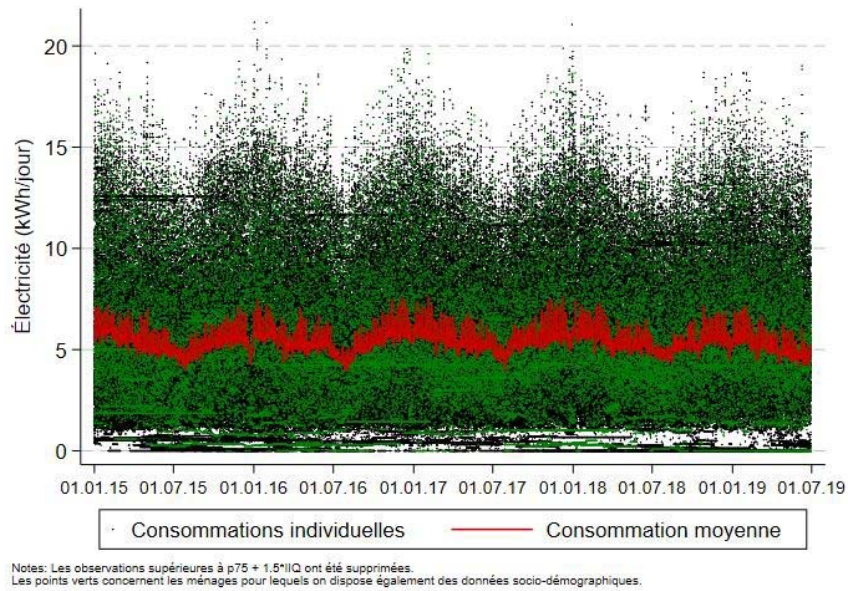


Figure 96 - Consommation d'électricité



Description des variables explicatives

Parmi les facteurs explicatifs des consommations, nous insérons non seulement des **caractéristiques socio-démographiques des ménages** mais également des **éléments techniques liés aux logements et à l'environnement**. Les données socio-démographiques et une partie des caractéristiques des logements ont été collectées directement auprès des ménages via le questionnaire en ligne décrit de manière détaillée dans la section précédente. D'autre part, la surface des logements est disponible directement dans la base de données *eSMART*. Finalement, nous utilisons également des variables relatives à la météo, qui sont mises à disposition par MétéoSuisse (via son portail IDAweb). Les données utilisées sont la **température**, les **précipitations** et l'**ensoleillement** de la station météorologique de Changins/Nyon, qui est située à seulement 5 kilomètres d'Eikenott.

Ces données supplémentaires à celles obtenues au travers du questionnaire nous permettront non seulement de **capturer une partie importante de la saisonnalité** discutée ci-dessus, mais également de réaliser des estimations en mettant de côté les variables socio-démographiques provenant du questionnaire. L'intérêt de réaliser des estimations sans tenir compte des informations provenant du questionnaire est que nous aurons alors la possibilité d'utiliser les données de consommation de la totalité des 226 ménages du quartier équipés de smart meters. De telles analyses servent en même temps de "**test de robustesse**" pour les estimations effectuées sur l'échantillon de 33 ménages.

Étant donné le nombre de ménages analysés, il a fallu opérer des choix quant aux variables explicatives à retenir dans les modèles, puisqu'ajouter un trop grand nombre de variables n'aurait pas de sens dans un tel échantillon. Certaines caractéristiques potentiellement intéressantes ont finalement dû être écartées soit car elles ne présentaient pas suffisamment de variabilité soit car elles étaient trop fortement corrélées avec d'autres (multicolinéarité), ce qui empêchait l'identification simultanées des effets des variables corrélées. Nous n'avons ainsi pas pu intégrer dans les estimations les variables relatives à la disponibilité d'une buanderie commune dans l'immeuble ou à la présence d'un chauffage d'appoint dans le logement car cela ne concernait respectivement que 2 et 4 ménages de l'échantillon. Nous avons également décidé de supprimer la variable distinguant les propriétaires des locataires car cette variable était fortement (et positivement) corrélée avec le revenu, le nombre de personnes dans le ménage et la surface du logement. Nous n'avons pas non plus été en mesure d'intégrer un indice des préoccupations environnementales (voir Maloney & Ward, 1973, et Best & Mayerl, 2013), car le problème provient dans ce cas du nombre de valeurs manquantes : cet indice est en effet construit à partir d'une série de neuf questions, pour lesquelles les répondants indiquent dans quelle mesure ils sont d'accord ou en désaccord sur une échelle allant de 0 (totalement en désaccord) à 4 (tout à fait d'accord). Pour la moitié des répondants, en raison de réponses incomplètes, il était en effet impossible d'obtenir une valeur pour cet indice des préoccupations environnementales.

Le modèle final comprend donc les variables explicatives disponibles qui permettent de capturer une part substantielle de la variabilité entre les ménages et dans le temps. Il s'agit des variables météorologiques (température, précipitations, ensoleillement), d'une variable relative au logement (surface), et de variables socio-démographiques (nombre de personnes dans le ménage, âge du répondant, revenu du ménage, température de confort).



Stratégie économétrique

Les modèles économétriques à estimer sont de la forme suivante :

$$\ln E_{ijt} = \alpha_{jt} + \beta_j X_{it} + \gamma_j Z_i + \delta_j W_i + \eta_j (WZ)_i + u_i + \varepsilon_{ijt} \quad (1)$$

avec E_{ijt} la consommation d'énergie par le ménage i à l'instant t dans le domaine j , X_{it} les caractéristiques variables avec le temps, Z_i les caractéristiques sociodémographiques du ménage, W_j les caractéristiques du logement, α_j des effets fixes, u_i l'effet aléatoire propre au ménage, et ε_{ijt} un terme d'erreur idiosyncratique. Les paramètres du modèle représentent les effets (en termes de semi-élasticités) des variables correspondantes. En particulier, **un signe négatif représente un effet d'efficacité ou de sobriété alors qu'un signe positif représente un effet pervers**. Notre hypothèse de départ est que la composante technique est captée par les variables techniques explicatives et que la composante technique/usage est représentée par les variables explicatives interagies technique-usages. L'écart restant est en partie expliqué par les facteurs humains observés dans le modèle et en partie par le terme aléatoire spécifique au ménage.

Un autre type de modèle envisagé afin **d'estimer les écarts de performance énergétique pour chaque ménage ainsi que les facteurs ayant une influence sur ces écarts sont les *stochastic frontier models*** (voir Kumbhakar & Lovell 2000). Sur la base de ces modèles, on peut en effet déterminer une frontière d'efficacité indiquant la consommation relative minimale qu'un ménage pourrait atteindre en fonction des éléments techniques de son logement, sachant que la frontière d'efficacité absolue n'est pas estimée, car elle serait déterminée par la consommation théorique minimale que nous devrions observer si les ménages se comportaient d'une manière optimale. **La distance de chaque ménage par rapport à cette frontière peut également être déterminée et interprétée comme l'écart de performance énergétique**. La forme générique du *stochastic frontier model* est la suivante :

$$\ln E_{it} = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{jit} + u_i + v_{it} \quad (2)$$

où E_{it} est la consommation d'énergie par le ménage i à l'instant t , les x sont les éléments techniques du logement, $u_i \sim N^+(0, \sigma^2_u)$ est le terme d'inefficience et est distribué selon une loi demi-normale, et v_{it} est un terme d'erreur idiosyncratique. Sur la base de cette régression, il est donc possible d'obtenir une estimation du terme d'inefficience pour chaque ménage (\hat{u}_i). L'écart de performance énergétique peut ensuite être utilisé comme variable dépendante d'une nouvelle régression, afin de déterminer quelle sont les caractéristiques socio-démographiques du ménage qui l'influencent :

$$\hat{u}_i = \alpha_0 + \sum_{j=1}^k \alpha_j w_{ji} + \varepsilon_i \quad (3)$$

où \hat{u}_i est le terme d'inefficience estimé grâce à l'équation (2) pour le ménage i et w sont les caractéristiques socio-démographiques du ménage.

L'approche SFA est illustrée schématiquement dans la **Figure 92** qui représente la consommation d'énergie E (par exemple dans le domaine du chauffage) en fonction d'une caractéristique du logement x (par exemple la surface habitable). Les points représentent des observations (fictives) et la courbe bleue représente la frontière d'efficacité qui serait atteinte par les ménages les moins gourmands en termes d'énergie. La plupart des ménages sont placés au-dessus de la frontière, indiquant que l'on s'attend à ce que la majorité d'entre eux possèdent une marge d'amélioration en ce qui concerne leur consommation



d'énergie. À noter que cette méthodologie n'exclut pas formellement que certaines observations se situent en-dessous de la frontière, comme illustré par l'observation 2 (en vert) dans la **Figure 92**. En effet, puisque le modèle comporte un élément aléatoire (v), il est possible que cet élément soit suffisamment négatif pour qu'une observation se situe en-dessous de la frontière. Le terme mesurant l'inefficacité (u) en revanche est par définition toujours positif. C'est cet élément qui permet de caractériser l'efficacité de chaque ménage et de les comparer entre eux.

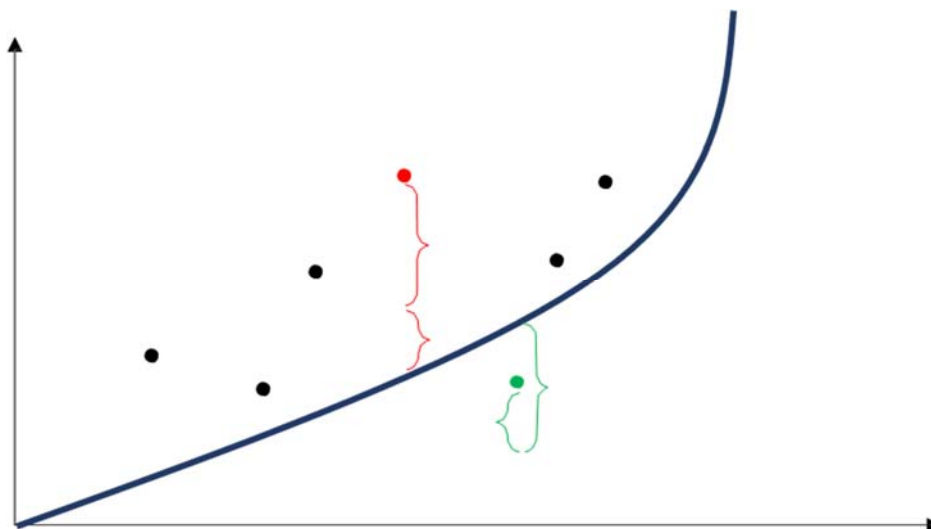


Figure 92 : Représentation schématique d'une frontière stochastique

Résultats empiriques : Modèles à effets aléatoires

Le **Tableau 11** présente les résultats des estimations économétriques basées sur l'équation (1) et en prenant chaque type d'énergie de manière séparée. Afin de pouvoir fournir des résultats comparables entre les différents types d'énergies (chauffage, eau chaude sanitaire et électricité), qui sont mesurés dans des unités différentes et dont les niveaux sont très différents, les variables dépendantes ont été transformées en logarithmes. Ainsi, les coefficients peuvent être interprétés comme des semi-élasticités ou des élasticités lorsque la variable indépendante est également transformée en logarithmes. C'est-à-dire que les coefficients indiquent la variation de la consommation en pourcentage associée avec une variation d'une unité de la variable indépendante. Afin de ne pas perdre toutes les observations pour lesquelles la consommation est nulle, c'est en fait le logarithme de la consommation augmentée d'une unité ($\ln(E+1)$) a été utilisé.

Afin d'isoler les effets de chaque bloc de variables (météo, logement, socio-démographiques), chacun de ces blocs a été tout d'abord introduit séparément dans les régressions. Les colonnes (1)-(3) ne contiennent ainsi que des variables relatives à la météo, les colonnes (4)-(6) ne contiennent que la surface du logement, et les colonnes (7)-(9) ne contiennent que les variables socio-démographiques. Finalement, les colonnes (10)-(12) contiennent toutes ces variables simultanément.



Cette analyse met en évidence que le pouvoir explicatif est nettement différent entre les blocs de variables et les types de consommations. En effet, on remarque que le coefficient de détermination (R^2) varie entre 63% pour la chaleur lorsque les variables météorologiques sont introduites seules (colonne (1)) et une valeur inférieure à 10^{-3} lorsque les variables socio-démographiques sont les seuls déterminants du modèle (colonnes (7) à (9)).

Parmi les variables météorologiques, toutes sont fortement significatives et vont dans la direction attendue. Pour tous les types de consommation d'énergie, une augmentation de la température extérieure ou de l'ensoleillement engendre une réduction de la consommation, alors qu'une augmentation des précipitations engendre une augmentation de la consommation. On constate logiquement que l'impact le plus marqué est celui de la température extérieure sur le chauffage, puisqu'**une hausse d'un degré est associée avec une réduction de consommation d'énergie liée au chauffage de l'ordre de 14%**. Il est logique d'obtenir des résultats très significatifs, étant donné que les consommations d'énergie et les variables météo sont liées par des lois physiques.

Considérée de manière isolée, la surface du logement semble exercer un impact positif sur l'ensemble des consommations d'énergie. Cet impact apparaît cependant comme non-significatif pour la consommation de chauffage. **Chaque augmentation de 10 m² de la surface du logement est associée avec une consommation d'eau chaude et d'électricité plus élevée d'environ 6% chacune.** Ici, serait intéressant de pouvoir prendre en compte l'emplacement du logement à l'intérieur du bâtiment. Dans des bâtiments de hautes performances énergétiques, l'enveloppe périphérique est en effet très performante, ce qui permet la transmission de chaleur entre les appartements. L'emplacement d'un appartement à l'intérieur du bâtiment est donc stratégique en ce qui concerne la consommation de ce dernier.

Parmi les variables socio-démographiques, peu ressortent comme étant statistiquement significatives. Pour la consommation de chaleur, seul l'âge apparaît comme déterminant. Pour tenir compte de possibles non-linéarités dans cette relation, une forme quadratique a été utilisée. Il semble donc que **la consommation de chauffage augmente avec l'âge, mais seulement jusqu'aux alentours de 50 ans, lorsque la consommation liée à la production de chaleur atteint son maximum.** Il faut de plus remarquer que quelques ménages parmi les tranches d'âge intermédiaires poussent encore la température de leur logement en y ajoutant des chauffages d'appoint électriques (4 ménages), de sorte que leur consommation de chaleur est encore plus importante qu'elle n'apparaît au travers de ces résultats. **Dans le domaine de la consommation d'eau chaude sanitaire, c'est le nombre de personnes composant le ménage qui apparaît comme déterminant.** Cette consommation est en effet largement supérieure (de près de 70%) parmi les ménages composés de trois personnes ou plus par rapport à ceux de deux personnes ou moins. De plus, **il existe un lien entre l'ECS et la surface du logement (environ 6% d'augmentation de la consommation pour chaque augmentation de 10 m²)** : dans des logements neufs, il paraît logique d'avoir des logements adaptés à la constitution familiale. Ce n'est que lorsque que les enfants seront sortis de la famille que l'on pourrait observer des logements trop grands par rapport au nombre de personnes. **Il en va de même pour la consommation d'électricité, qui est mesurée comme étant 21% supérieure dans les grands ménages.**



- **La consommation d'énergie se caractérise par des économies d'échelle : la consommation augmente de manière moins que proportionnelle à la taille du ménage.** En effet, une augmentation de 50% de la taille du ménage (de deux à trois personnes) n'entraîne qu'une augmentation négligeable de la consommation de chaleur et d'environ 20% de la consommation d'électricité. En matière de **consommation d'eau chaude**, il apparaît en revanche que **la consommation est relativement proportionnelle à la taille du ménage**, ce qui revient à dire que chaque personne consomme une quantité relativement semblable.
- **Par rapport à la taille du logement, les résultats parlent également en faveur d'économies d'échelle.** Une augmentation de 10 m² correspond en moyenne à une augmentation de 10% de la surface des logements (le logement moyen de notre base de données est de 98.6 m²). Or, cette augmentation n'entraîne qu'un accroissement de 6% de la consommation d'eau chaude et d'électricité, et encore moins en matière de chauffage.

Les autres variables explicatives ne semblent pas exercer d'impact sur la consommation. Le revenu du ménage, bien qu'étant lié aux consommations par des coefficients légèrement positifs, apparaît comme non-significatif dans toutes les estimations. De même, la température de confort (déclarée par les répondants lors du sondage) n'apparaît jamais comme un déterminant significatif de la consommation d'énergie.

L'ensemble de ces remarques ne changent pratiquement pas lorsque les trois blocs de variables sont intégrés simultanément dans le même modèle. Cela aurait été étrange de trouver d'autres résultats, compte tenu du fait que les variables explicatives ont été sélectionnées en supprimant celles qui étaient corrélées entre elles. Ainsi, les variables météorologiques conservent leur impact fortement significatif et l'ampleur des coefficients est très stable. Le coefficient de la surface du logement reste positif et significatif dans les estimations concernant l'eau chaude et l'électricité, de même que celui des ménages avec trois personnes ou plus. L'âge du répondant conserve quant à lui un léger effet significatif sur la consommation de chauffage, bien que le seuil de significativité soit plus faible que dans les estimations comprenant moins de variables explicatives.



Tableau 11 - Estimations économétriques des déterminants de la consommation d'énergie

	(1) Chaleur [ln(kWh)]	(2) Eau chaude Ln([m³])	(3) Électricité [ln(kWh)]	(4) Chaleur [ln(kWh)]	(5) Eau chaude [ln(m³)]	(6) Électricité [ln(kWh)]	(7) Chaleur [ln(kWh)]	(8) Eau chaude [ln(m³)]	(9) Électricité [ln(kWh)]	(10) Chaleur [ln(kWh)]	(11) Eau chaude [ln(m³)]	(12) Électricité [ln(kWh)]
Température extérieure (°C)	-0.137*** (0.002)	-0.023*** (0.002)	-0.005*** (0.001)	-	-	-	-	-	-	-0.139*** (0.005)	-0.030*** (0.007)	-0.006*** (0.002)
Précipitations (cm/jour)	0.044*** (0.003)	0.008 (0.007)	0.004*** (0.002)	-	-	-	-	-	-	0.048*** (0.007)	-0.021 (0.015)	-0.001 (0.005)
Ensoleillement (h/jour)	-0.006*** (0.001)	-0.002 (0.002)	-0.003*** (0.000)	-	-	-	-	-	-	-0.008*** (0.002)	-0.004 (0.004)	-0.004*** (0.002)
Surface du logement (10 m²)	-	-	-	0.014 (0.014)	0.057*** (0.020)	0.057*** (0.007)	-	-	-	-0.021 (0.032)	0.063** (0.027)	0.056*** (0.012)
Taille du ménage: 3 ou +	-	-	-	-	-	-	0.015 (0.173)	0.672*** (0.232)	0.207** (0.099)	0.026 (0.180)	0.684*** (0.233)	0.163* (0.090)
Âge (10 ans)	-	-	-	-	-	-	1.352** (0.654)	-0.321 (0.880)	-0.190 (0.469)	1.209* (0.622)	-0.435 (0.744)	-0.221 (0.375)
Âge²	-	-	-	-	-	-	-0.141** (0.072)	0.023 (0.100)	0.018 (0.052)	-0.127* (0.069)	0.038 (0.085)	0.022 (0.044)
Revenu (en logarithme)	-	-	-	-	-	-	0.240 (0.199)	0.386 (0.367)	0.134 (0.150)	0.235 (0.204)	0.380 (0.376)	0.139 (0.175)
Température de confort (°C)	-	-	-	-	-	-	-0.050 (0.050)	-0.029 (0.043)	0.020 (0.026)	-0.031 (0.046)	-0.039 (0.042)	0.015 (0.025)
Constante	3.275*** (0.048)	6.211*** (0.064)	1.779*** (0.024)	1.621*** (0.136)	5.375*** (0.199)	1.148*** (0.072)	-2.399 (2.424)	3.579 (3.299)	0.475 (1.678)	-0.646 (2.334)	3.730 (3.125)	0.127 (1.621)
# Obs.	343,979	349,519	348,752	340,737	346,256	345,547	41,249	42,490	41,589	39,627	40,855	39,950
# Ménages	226	226	226	224	224	224	33	33	33	32	32	32
R² within	0.634	0.008	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.683	0.014	0.015

Notes : * / ** / *** dénote un seuil de significativité statistique de 10/5/1%. Erreurs standard robustes (clusters au niveau des ménages) entre parenthèses. Les variables dépendantes sont toutes transformées en logarithmes ($\ln(E + 1)$), donc les coefficients peuvent être interprétés comme des semi-élasticités (ou des élasticités lorsque la variable indépendante est également transformée en logarithmes). Pour finir sur ce tableau, nous observons encore la perte de significativité de la constante dans le modèle complet, cela est expliqué par l'utilisation de toute les variables explicatives qui incorporent, dans le modèle complet, l'explicativité prise, dans les modèles partiels, par la constante.



Le **Tableau 12** présente une analyse similaire, mais avec **toutes les consommations regroupées en une seule variable dépendante**. Afin de tenir compte des différences entre les trois domaines de consommation, le modèle comprend désormais des effets fixes par domaine (et les consommations sont toujours mesurées en logarithmes, ce qui permet d'interpréter les différences comme des pourcentages). Hormis les effets fixes, **les variables explicatives sont les mêmes qu'auparavant**. L'hypothèse implicite de ce modèle est donc que l'effet des autres variables est constant entre les domaines. **Cette façon de faire permet d'asseoir la stabilité des estimations puisque le nombre d'observations augmentent substantiellement**. Les résultats des estimations groupées corroborent largement ceux qui ont été discutés précédemment. De manière globale, **la consommation d'énergie des ménages apparaît donc comme étant largement influencée par les conditions météorologiques. Lorsque la température extérieure baisse d'un degré, la consommation d'énergie augmente d'environ 6%**. Les précipitations entraînent une légère augmentation alors que l'ensoleillement entraîne une légère réduction de consommation. **Les caractéristiques du logement, ici capturées uniquement par sa surface, sont importantes. Toute augmentation de 10 m² de la surface du logement est associée avec une augmentation de 5% de la consommation d'énergie**. Parmi les caractéristiques socio-démographiques, **seule la taille du ménage apparaît comme significative, les grands ménages consommant 22% de plus que les plus petits**. L'âge et le revenu ont tous deux un impact positif, mais même si leur coefficient est d'ampleur relativement élevée, il n'est pas précisément estimé et on ne peut pas affirmer qu'il soit statistiquement différent de zéro.

	(1)	(2)	(3)	(4)
Température extérieure (°C)	-0.054*** (0.001)	-	-	-0.057*** (0.003)
Précipitations (cm/jour)	0.018*** (0.003)	-	-	0.014** (0.006)
Ensoleillement (h/jour)	-0.003*** (0.001)	-	-	-0.004** (0.002)
Surface du logement (10 m ²)	-	0.049*** (0.010)	-	0.048*** (0.015)
Taille du ménage: 3 ou +	-	-	0.241* (0.124)	0.220* (0.123)
Âge (10 ans)	-	-	0.666 (0.525)	0.629 (0.452)
Âge ²	-	-	-0.078 (0.058)	-0.073 (0.049)
Revenu (en logarithme)	-	-	0.225 (0.155)	0.227 (0.168)
Température de confort (°C)	-	-	-0.028 (0.033)	-0.034 (0.034)
Effet fixe: eau chaude	4.225*** (0.065)	4.221*** (0.065)	4.128*** (0.151)	4.110*** (0.155)
Effet fixe: électricité	-0.024 (0.035)	-0.026 (0.035)	-0.021 (0.104)	-0.024 (0.108)
Constante	2.375*** (0.036)	1.273*** (0.100)	-1.120 (1.598)	-0.772 (1.578)
# Obs.	1,110,457	1,100,612	161,645	156,723
# Ménages	226	224	33	32
R ² within	0.666	0.639	0.646	0.676

Tableau 12 - Estimations économétriques des déterminants de la consommation d'énergie

Notes: */**/** dénote un seuil de significativité statistique de 10/5/1%. Erreurs standard robustes (clusters au niveau des ménages) entre parenthèses. Les variables dépendantes sont toutes transformées en logarithmes ($\ln(E+1)$), donc les coefficients peuvent être interprétés comme des semi-élasticités (ou des élasticités lorsque la variable indépendante est également transformée en logarithmes).



Résultats empiriques : Stochastic frontier model

Dans un deuxième type d'analyse, nous appliquons des modèles à frontière stochastique (*stochastic frontier model*) tels que décrits par l'équation (2). Nous nous focalisons dans ce cas sur les ménages pour lesquels nous disposons de toutes les données, c'est-à-dire un **échantillon de 32 ménages** (parmi les 33 ménages pour lesquels nous avons à la fois les données de consommations et les données socio-démographiques, il est un ménage pour lequel la surface du logement est manquante).

Dans la première partie de cette analyse, présentée dans le **Tableau 13**, nous effectuons des estimations basées sur l'équation (2) pour chaque domaine séparément. Ces estimations ne comportent que des variables relatives aux conditions météorologiques et aux caractéristiques du logement et visent à déterminer l'efficacité (ou inefficacité) de chaque ménage par rapport à une frontière. Ce que ce modèle permet d'obtenir en plus du précédent est donc une **estimation de l'inefficacité de chaque ménage**, que l'on suppose invariable pour un ménage tout au long de la période d'observation mais propre à chaque domaine de consommation d'énergie.

Les coefficients du **Tableau 13** sont très similaires à ceux obtenus dans l'analyse précédente, et il n'est par conséquent pas nécessaire de revenir sur chacun d'entre eux. La différence réside finalement dans le terme d'erreur, qui est désormais décomposé en deux éléments : u , qui est le terme d'inefficacité distribué selon une loi semi-normale, et v , qui est un terme idiosyncratique distribué selon une loi normale. Les déviations standard de ces deux termes d'erreur sont reportées dans le **Tableau 13**, afin de fournir une mesure de leur importance. On remarque que la déviation standard du terme d'inefficacité correspond à une fraction s'élevant 76/37/64% de la déviation standard du terme idiosyncratique. Cela signifie que, **même en tenant compte des différences d'efficacité entre les ménages, cela ne permet pas toujours d'expliquer une grande partie des consommations entre eux**. Une bonne partie des différences reste en effet non-expliquée, ce qui transparaît dans ce modèle dans la variabilité importante du terme idiosyncratique.

	(1) Chaleur [ln(kWh)]	(2) Eau chaude [ln(m ³)]	(3) Électricité [ln(kWh)]
Température extérieure (°C)	-0.139*** (0.001)	-0.030*** (0.002)	-0.006*** (0.000)
Précipitations (cm/jour)	0.048*** (0.006)	-0.021 (0.017)	-0.001 (0.004)
Ensoleillement (h/jour)	-0.008*** (0.001)	-0.004 (0.003)	-0.004*** (0.001)
Surface du logement (10 m ²)	-0.025 (0.036)	0.080* (0.042)	0.060*** (0.018)
Constante	2.141*** (0.662)	3.509*** (0.601)	0.498** (0.231)
# Obs.	39,627	40,855	39,950
# Ménages	32	32	32
LogL	-42,491.5	-84,529.2	-25,434.9
std(u)	0.533	0.698	0.292
std(v)	0.705	1.912	0.456

Tableau 13 - Estimations de la frontière efficiente

Notes: */**/** dénote un seuil de significativité statistique de 10/5/1%. Erreurs standard entre parenthèses. Les variables dépendantes sont toutes transformées en logarithmes (ln(E+1)), donc les coefficients peuvent être interprétés comme des semi-élasticités (ou des élasticités lorsque la variable indépendante est également transformée en logarithmes).



Grâce aux estimations du **Tableau 14**, il est possible d'obtenir **une estimation de l'inefficience de chaque ménage et pour chaque type de consommation**. Ces inefficiences sont représentées dans la **Figure 97**, qui permet de constater qu'il **existe une grande dispersion des ménages**, certains étant proches de 0 (ménages efficaces) mais d'autres obtenant des valeurs relativement élevées (ménages inefficients). Il est à remarquer que la dispersion des termes d'inefficience dépend du type de consommation.

De manière cohérente avec les déviations standard observées dans chaque domaine, on constate que les écarts entre les ménages les plus et les moins efficaces sont relativement faibles pour l'électricité, mais plus importants pour la chaleur et surtout pour l'eau chaude.

Ainsi, cela indique que les écarts de performance, ou autrement dit les gains d'énergie qui pourraient être réalisés, sont surtout élevés dans pour l'eau chaude et le chauffage, mais moins pour l'électricité.

Un autre élément intéressant qui émane de la **Figure 97** concerne le classement des ménages dans les différents domaines de consommation. En effet, **les ménages relativement efficaces dans un domaine sont souvent les plus efficaces dans les autres domaines**. Cela est illustré par les droites de régression superposées aux nuages de points, et dont les pentes sont toutes positives et montrent que les corrélations entre les termes d'inefficience sont positives. La relation entre les termes d'inefficience pour l'eau chaude et l'électricité est particulièrement marquée. Ce résultat corrobore en quelque sorte celui de Jessoe et al. (2017), qui ont montré que fournir des messages d'information relatifs à la consommation d'eau avait non seulement un impact sur la consommation d'eau, mais également sur la consommation d'électricité, soit des **effets dits de *spillovers***.

Globalement, on peut donc dire qu'il existe des ménages globalement performants et d'autres qui le sont moins. En termes de politique économique, cela implique que cibler les "mauvais" ménages (plutôt qu'un type précis de consommation) pourrait permettre de réduire la consommation de manière substantielle.

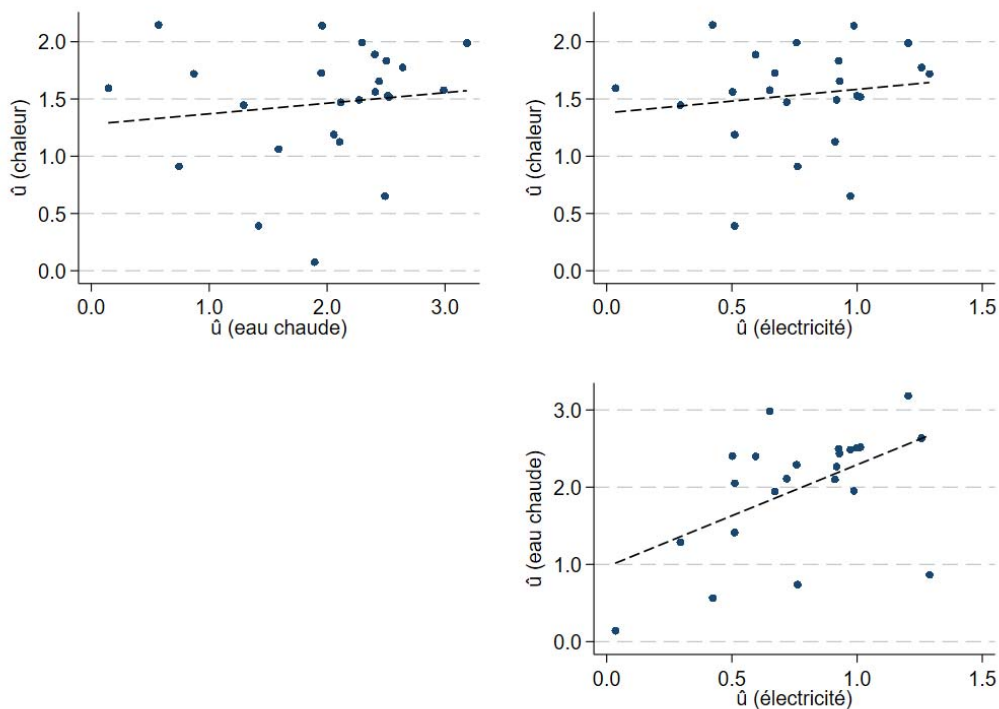


Figure 97 - Représentation schématique d'une frontière stochastique



Le **Tableau 14** montre comment les caractéristiques socio-démographiques d'un ménage influencent son inefficience (équation (3)). Les trois domaines de consommation d'énergie sont, comme dans l'analyse précédente, groupées en une seule estimation qui comporte des effets fixes afin de tenir compte de possibles différences entre eux. À nouveau, **c'est la taille du ménage qui ressort comme l'élément le plus marquant**. Le revenu, bien que non-significatif statistiquement parlant, possède un coefficient d'une certaine ampleur. **Ces deux caractéristiques identifient par conséquent les ménages dans lesquels les gains potentiels sont les plus élevés**. De plus, comme le montrent les effets fixes par domaine dans cette régression, **les gains le plus substantiels pourraient être obtenus grâce à des réductions de la consommation d'eau chaude. Des économies importantes seraient également possibles en matière de chauffage. L'électricité apparaît en revanche comme moins propice aux économies d'énergie**.

Taille du ménage: 3 ou + (0.134)	0.372***
Âge (10 ans) (0.486)	0.035
Âge2 (0.055)	-0.008
Revenu (en logarithme) (0.181)	0.272
Température de confort (°C) (0.034)	-0.040
Effet fixe: eau chaude (0.151)	0.512***
Effet fixe: électricité (0.155)	-0.693***
Constante (1.877)	-0.397
<hr/>	
# Obs.	73
R2	0.535
<hr/>	

Notes: */**/** dénote un seuil de significativité statistique de 10/5/1%. Erreurs standard entre parenthèses.

Tableau 14 - Déterminants de l'inefficience



3.3 Mise en place d'un processus Living Lab dans le quartier

La présentation des résultats se fait dans un ordre logique et linéaire en partant de l'analyse de la thermique d'un bâtiment, à l'analyse socio-démographique et économétrique. Des écarts de performance dans le domaine du chauffage ont été identifiés (17%) ce qui n'est pas le cas pour le domaine de la consommation électrique (-16%). La situation idéale aurait été de pouvoir obtenir le résultat des analyses précédentes de manière séquentielle puis de démarrer le co-design des interventions. Malheureusement, la réalité du terrain, de la difficulté de collecte, d'extraction et de croisement des données a nécessité de faire des hypothèses sur les écarts de performance pour alimenter le processus de co-design d'intervention. Il y a donc un décalage entre les analyses précédentes et les pistes d'action en termes d'interventions proposées. Ce n'est pas limitant car les pistes d'interventions peuvent inspirer d'autres cas d'étude.

Une thèse de doctorat s'est donc concentrée sur l'apport de la méthode Living Lab dans le domaine de la consommation d'énergie (Mastelic, 2019). Un processus a été développé et il a été déployé dans le quartier. L'idée qui sous-tend ce laboratoire vivant est qu'un plan d'efficacité énergétique pour réduire l'écart de performance sera mieux accepté s'il est co-développé par toutes les parties prenantes clés.

Résultats de l'identification des parties prenantes (Tâche 3.1)

Le travail de compréhension des acteurs en présence dans le quartier à haute performance énergétique commence par un **listing des parties prenantes** (Bryson, 2004). Puis ils sont répartis sur une **matrice pouvoir/intérêt** (Eden & Ackermann, 1998). Cette matrice sert à comprendre qui a le pouvoir d'agir sur l'écart de performance et qui a un intérêt à le faire. Elle est réalisée en deux temps : les chercheurs posent des hypothèses sur le pouvoir et sur l'intérêt des parties prenantes à réduire l'écart de performance. Puis lors d'entretiens qualitatifs, on regarde la perspective des divers acteurs (locataires, propriétaires, régies, distributeur d'énergie, commerçants...) sur leur niveau de pouvoir et d'intérêt.

19 entretiens qualitatifs ont été réalisés dans le quartier en automne 2017. Ils viennent compléter les **40 entretiens qualitatifs qui avaient été réalisés lors de l'enquête de satisfaction dans le quartier en 2015**. Les résultats sont similaires à la première étude réalisée par la même équipe de recherche. Comme souvent dans ce type d'étude sur la consommation énergétique, le pouvoir de réduire les consommations est reporté sur une autre partie prenante, personne ne se sentant totalement maître des consommations. C'est peut-être lié à la complexité du système énergétique qui est un système sociotechnique et qui combine donc les deux dimensions. C'est pour cela que nous analysons dans cette étude à la fois la dimension technique et la dimension humaine.



À partir des 19 entretiens qualitatifs, une matrice pouvoir/intérêt a pu être construite. Elle est présentée dans la **Figure 98**.

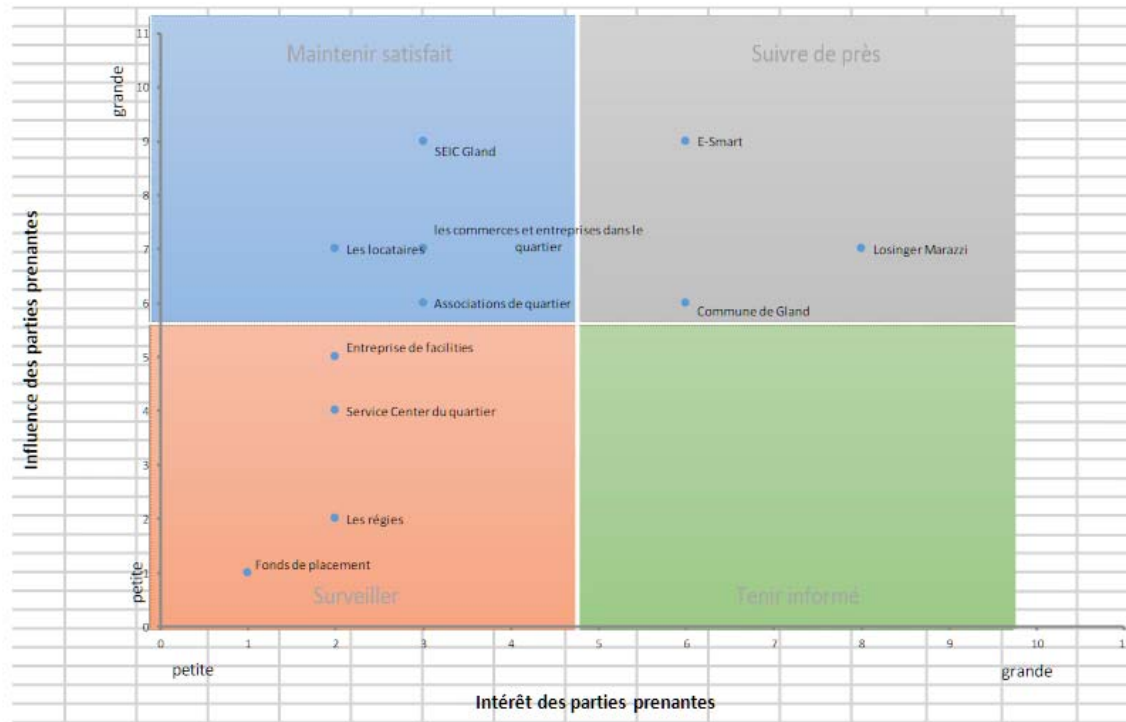


Figure 98 - Matrice pouvoir / intérêt

En premier, les différentes parties prenantes ont été regroupées dans un fichier Excel, puis disposées sur la matrice. Cette matrice a pour but de « catégoriser » les parties prenantes par groupe cible. Chaque groupe de parties prenantes doit ensuite être soit « maintenus satisfaits », « suivis de près », « surveillé » ou simplement être « tenus informés ». Il est donc possible ensuite d'entreprendre différentes actions allant dans ce sens, et de savoir comment réagir avec les différentes parties prenantes, en fonction de leurs divers besoins. Nous constatons donc dans ce schéma que les habitants du quartier doivent être maintenus satisfaits. L'analyse détaillée des acteurs figure dans les pages suivantes.

Projet UserGap – HES-SO Valais – Les menaces dans

Parties prenantes	Caractéristiques	Rôle pour le projet	Impact sur le projet	Impact potentiel pour la suite	Intensité de l'intérêt	Intensité du pouvoir
Les locataires	Ils louent un appartement par choix ou par défaut dans le quartier. Ils ne connaissent pas forcément toutes les informations liées au quartier	Co-crédation et mise en place de mesures permettant la réduction de la consommation énergétique	Degré de motivation et de participation pour la co- création et à l'implémentation des mesures	Implémentati on à longs termes des mesures d'économies d'énergie	2	7
Les propriétaires	Ils ont acheté un appartement dans le quartier. Ils avaient toutes les informations lors de l'achat	Co-crédation et mise en place de mesures permettant la réduction de la consommation énergétique	Degré de motivation et de participation pour la co- création et à l'implémentation des mesures	Implémentati on à longs termes des mesures d'économies d'énergie	3	7
Les régies	Sont responsables de louer des appartements qu'ils gèrent pour des fonds d'investissements.	Peuvent influencer la perception du quartier lors de la location du bien	Description du quartier aux futurs locataires		2	2
Entreprise de facilities	Gère le nettoyage, les petites réparations dans le quartier, le déblayage, etc.	Responsable de l'entretien du quartier. Peut aussi être un interlocuteur important pour les habitants en cas de problèmes.	Interlocuteur potentiel pour les habitants en cas de problèmes avec certains services énergétiques		2	5
les commerces et entreprises dans le quartier	ont décidé de localiser leur commerces ou entreprises dans le quartier			Implémentati on à longs termes des mesures d'économies d'énergie	3	7
SEIC Gland	Gère la fourniture électrique du quartier	Mise à disposition des données de consommation	Mise à disposition des données de consommations		3	9
-Smart	Fournisseur de l'application pour tablette permettant de gérer plusieurs facettes de l'appartement.	Mise à disposition des données de consommation	Mise à disposition des données du smart meter	Amélioration de la plateforme	6	9
Losinger Marazzi	Constructeur du quartier	Participant au proejets, diffusion des résultats au sein du groupe, mise à disposition de 2 quartiers	Mise à disposition des quartiers et diffusion des résultats	Implémentati on des recommandati ons dans les futurs quartiers durables	8	7
Fonds de placement	Ont placé une partie de leur capital dans un ou plusieurs immeubles du quartier.				1	1
Commune de Gland	La commune a élargi son offre en logement				6	6
Associations de quartier	Essaie de fédérer les habitants du quartier et de l'animer.	Fédération des habitants et soutien pour la co- création de mesures	Implication des habitants d'Eikenott dans le projet		3	6
Service Center du quartier	Permet de rendre service aux habitants du quartier et de solutionner des problèmes				2	4

Projet UserGap – HES-SO Valais – Les menaces dans

Parties prenantes	Caractéristiques	Rôle pour le projet	Impact sur le projet	Impact potentiel pour la suite	Intensité de l'intérêt	Intensité du pouvoir
Les locataires	Ils louent un appartement par choix ou par défaut dans le quartier. Ils ne connaissent pas forcément toutes les informations liées au quartier	Co-crédation et mise en place de mesures permettant la réduction de la consommation énergétique	Degré de motivation et de participation pour la co-crédation et à l'implémentation des mesures	Implémentation à longs termes des mesures d'économies d'énergie	2	7
Les propriétaires	Ils ont acheté un appartement dans le quartier. Ils avaient toutes les informations lors de l'achat	Co-crédation et mise en place de mesures permettant la réduction de la consommation énergétique	Degré de motivation et de participation pour la co-crédation et à l'implémentation des mesures	Implémentation à longs termes des mesures d'économies d'énergie	3	7
Les régies	Sont responsables de louer des appartements qu'ils gèrent pour des fonds d'investissements.	Peuvent influencer la perception du quartier lors de la location du bien	Description du quartier aux futurs locataires		2	2
Entreprise de facilités	Gère le nettoyage, les petites réparations dans le quartier, le déblayage, etc.	Responsable de l'entretien du quartier. Peut aussi être un interlocuteur important pour les habitants en cas de problèmes.	Interlocuteur potentiel pour les habitants en cas de problèmes avec certains services énergétiques		2	5
les commerces et entreprises dans le quartier	ont décidé de localiser leur commerces ou entreprises dans le quartier			Implémentation à longs termes des mesures d'économies d'énergie	3	7
SEIC Gland	Gère la fourniture électrique du quartier	Mise à disposition des données de consommation	Mise à disposition des données de consommations		3	9
E-Smart	Fournisseur de l'application pour tablette permettant de gérer plusieurs facettes de l'appartement.	Mise à disposition des données de consommation	Mise à disposition des données du smart meter	Amélioration de la plateforme	6	9
Losinger Marazzi	Constructeur du quartier	Participant au projets, diffusion des résultats au sein du groupe, mise à disposition de 2 quartiers	Mise à disposition des quartiers et diffusion des résultats	Implémentation des recommandations dans les futurs quartiers durables	8	7
Fonds de placement	Ont placé une partie de leur capital dans un ou plusieurs immeubles du quartier.				1	1
Commune de Gland	La commune a élargi son offre en logement				6	6
Associations de quartier	Essaie de fédérer les habitants du quartier et de l'animer.	Fédération des habitants et soutien pour la co-crédation de mesures	Implication des habitants d'Eikenott dans le projet		3	6
Service Center du quartier	Permet de rendre service aux habitants du quartier et de solutionner des problèmes				2	4



Construction d'une typologie de consommateurs

Pour mieux comprendre qui se cache derrière les consommations d'énergie, un travail sur la **typologie des habitants** a aussi été réalisé sur la base d'un sondage. La méthode permet de regrouper les profils de consommation similaires sur la base des courbes de charge. Puis on regroupe les profils socio-démographiques similaires et on compare ces deux types de groupement, grâce à des méthodes statistiques pour voir quelles inférences sont possibles. Pour plus de détails, un article scientifique a été présenté à ce sujet (Cimmino, 2017). Une typologie de consommateurs est définie en nous basant sur les données sociodémographiques disponibles pour 69 appartements. A l'aide d'une analyse des correspondances (MCA), 5 groupes de consommateurs ont pu être définis. 36% de la variance peuvent ainsi être expliqués.

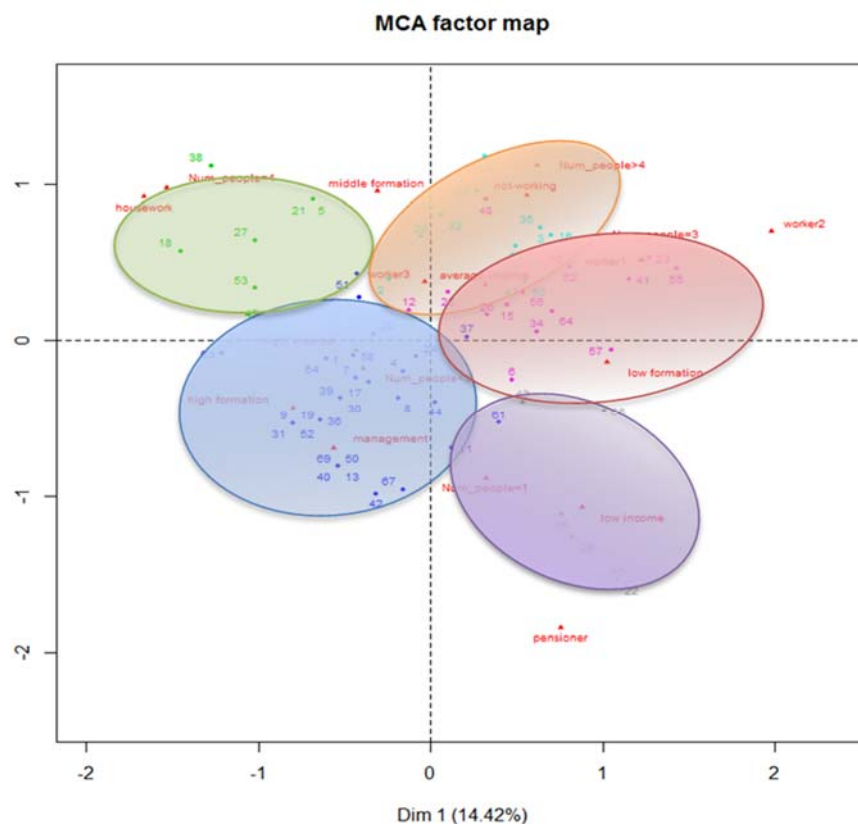


Figure 99 - Analyse des correspondances pour les variables socio-démographiques

Comme le montre la **Figure 99**, la typologie des résidents est composée de cinq groupes et leur interprétation est la suivante :

- Bleu** Ménages ayant une formation supérieure, un revenu plus élevé un travail à responsabilité et un ménage de moins de 3 personnes.
- Orange** Ménages de plus de 4 personnes, d'éducation moyenne et à revenu moyen.
- Vert** Ménages composés de 4 personnes et éducation moyenne.
- Rouge** Ménages ayant un revenu moyen et un faible niveau d'éducation, la plupart d'entre eux sont des travailleurs et ont un noyau familial de trois personnes.
- Violet** Ménages d'une personne, à faible revenu, dont une partie sont des retraités



Nous avons comparé ces classes avec les données de consommation d'électricité. Nous avons privilégié les « clustering » avec les données électriques car la littérature sur le sujet est plus vaste. Cela permet de faire un benchmark avec les autres articles. Pour se faire, les courbes de charge ont été regroupées à l'aide de deux méthodologies différentes : (1) l'approche experte et (2) l'approche statistique :

- (1) **L'approche experte** est basée sur un interview d'experts suisses dans le domaine de l'énergie (3-4 personnes). Les experts ont identifié trois méthodes possibles : la moyenne, le maximum et la durée d'utilisation de la puissance (DUP).
- (2) Pour les **méthodes statistiques**, le paquet TSclust R (Montero & Vilar, 2014) a été choisi, car il est l'un des outils les plus exhaustifs pour le clustering de séries temporelles. La liste des outils est : la distance euclidienne, la distance de déformation dynamique (DWR), la distance de corrélation (Spearman et Kendall), la distance périodogramme et la distance de densité spectrale. L'ensemble de ces modèles est complété par l'analyse de la distance périodique (Dudek et al., 2013) et par la méthodologie SOM (Wehrens, Buydens & autres 2007).

Par la suite, le cluster provenant de MCA a été croisé avec les clusters des courbes de charge dans le tableau suivant. Le chi-carré et le test de Cramer ont été appliqués.

Type de cluster	p-valeur du test χ^2	Phi du test de Cramer
Moyenne	0.20	0.39
Moyenne / Max	0.27	0.40
DUP	0.27	0.40
Moyenne périodique 24	0.36	0.35
SOM	0.06	0.42
Peridogramme	0.15	0.40
Densité spectrale	0.01	0.48
DWR	0.63	0.30
Distance euclidienne	0.09	0.60
Kendal	0.14	0.44
Spearman	0.50	0.32

Tableau 15 - Le paquet TSclust R

Les trois meilleurs modèles expliquant le mieux la consommation en fonction des typologies sont la distance euclidienne, le SOM et la densité spectrale. Le modèle ayant le meilleur Phi est la distance euclidienne.

Les analyses ont été effectuées sur deux jeux de données provenant de fournisseurs différents :

- Les mesures de compteurs de facturation fournies par la SEIC (données mensuelles)
- Les mesures des smart-meters fournies par eSmart (données au quart d'heure)



La cohérence des données entre ces deux jeux de données a été analysée. Dans l'ensemble, les données sont similaires à +/- 5%, cependant, on constate plusieurs interruptions des télémesures ainsi que des remises à zéro, surtout au début de l'occupation du bâtiment (télémesures pas encore au point). Par conséquent, seules les données de eSmart, plus détaillées, ont été utilisées pour l'analyse.

Comme les informations de superficie et de nombre d'habitants n'étaient pas encore disponibles durant cette analyse préliminaire, toutes les mesures ont été agrégées par bâtiment. La moyenne de consommation électrique par appartement a ensuite été extraite. Les résultats de ces moyennes donnent les informations résumées dans le Tableau 16 :

	2014	2015	2016	2017
Consommation moyenne par appartement	1'574	1'808	1'853	2'097
Consommation maximum relevée	3'576	4'006	4'515	5'198
Consommation minimum relevée	308	500	110	548

Tableau 16 - Résumé des relevés de consommation électrique par bâtiment

Les consommations minimums nous donnent une information peu pertinente. En effet, il est très possible que le minimum relevé en 2016 soit dû à un appartement non occupé durant cette période. De plus, les périodes de non-fonctionnement des compteurs peuvent également avoir faussé les données.

Les autres consommations (moyenne et maximum) montrent une consommation électrique relativement faible par appartement. La moyenne correspond à un appartement de 75 à 90 m², avec cuisinière électrique, utilisé par 2 ou 3 personnes. Nous nous attendons donc à des résultats qui seront nettement inférieurs à la norme SIA.

La première étape, nettement plus chronophage que prévue, a été de réunir les informations socio-démographiques pour effectuer les analyses de gap électrique. La réconciliation entre les appartements et les compteurs a également été très complexe, ce qui nous a surpris. Cependant nous disposons à présent du jeu de données suffisant pour effectuer une analyse plus détaillée.

Conclusion sur la typologie des habitants et des courbes de charge

Cette analyse préliminaire a permis de déterminer qu'il est important de **séparer les consommateurs du quartier en groupes cibles**, en fonction de critères socio-démographique afin d'analyser plus finement les consommations. La collecte et l'analyse des données socio-démographiques et leur croisement avec les données de consommation est compliquée car **on doit faire la balance entre les besoins de l'étude et le respect de la vie privée**. Il est important de travailler avec tous les partenaires (distributeur d'énergie, installateur du smart meter, commune, habitants, association de quartier...) pour être capable de collecter les données dans le respect des souhaits des habitants (consentement dans le sondage).



Résultats de la sélection de pratiques (Tâche 3.2)

Cette phase se situe après l'analyse des parties prenantes dans le processus Living Lab Intégré. Il s'agit de centrer les efforts sur quelques pratiques des habitants.

Il semble, suite aux entretiens, qu'il y ait un problème lié au **chauffage** depuis le démarrage du quartier (mis en évidence en 2015 et en 2017). D'une part, le chauffage semble ne pas avoir été réglé au démarrage du quartier. D'autre part, il y a un important problème de communication relevé par les habitants, une partie des habitants n'ayant pas été informés que le quartier était conçu pour offrir 21 degrés dans les appartements. De plus, ils ne comprennent pas l'inertie du bâtiment et ne voient pas de changement quand ils augmentent la température, soit sur le smart meter, soit sur le thermostat. Un problème supplémentaire est lié à l'interface entre la technique et l'humain : le thermostat mentionne 15/20/25 degré or le chauffage ne peut pas monter à plus de 21 degrés dans les appartements, ce qui cause un problème pour les personnes qui ont froid, comme les personnes âgées dans les appartements protégés. Ils se sont équipés de chauffages électriques, ce qui n'est visible que si l'on analyse à la fois la consommation thermique et électrique.

La **ventilation** à double flux pose également problème. Nous avons pu constater durant les entretiens à domicile en 2017 que quelques bouches de ventilation avaient été scotchées. De plus, de nombreux habitants continuent à aérer les pièces en laissant les fenêtres en imposte durant toute la nuit, ce qui peut générer des surconsommations. Ces problèmes sont bien connus et ce qui nous importe dans ce projet, c'est de co-développer des mesures avec les parties prenantes pour contourner ces barrières aux pratiques ayant un fort impact sur la consommation d'énergie et pouvant générer un écart de performance.

Aucun problème n'a été relevé actuellement concernant l'**eau chaude sanitaire**. Quelques adaptations ont été effectuées sur l'infrastructure qui peuvent avoir un impact sur la consommation d'eau chaude comme par exemple l'installation de machines à laver dans les appartements en location, les horaires de la buanderie commune étant considérés comme trop contraignants. Quelques habitants ont également changé leurs mitigeurs avec économiseurs d'eau pour d'autres modèles qui consomment plus d'énergie ou ont installé un pommeau de douche qui consomme également plus.

Concernant la **consommation électrique**, les ménages sont globalement satisfaits de leurs appareils. Certains ont installé des multiprises avec un interrupteur pour chaque appareil. La consommation des radiateurs électriques va bien entendu être mise en avant par les analyses des courbes de charge.

En 2017, nous avons réalisé 19 entretiens qualitatifs avec les parties prenantes clés dans le quartier de Eikenott (Commune de Gland, Distributeur d'énergie, commerces dans le quartier, locataires, propriétaires, régies). Nous avons mis en évidence, grâce aux entretiens qualitatifs les éléments confirmés par les analyses techniques des chapitres précédents (problèmes liés au chauffage et à la ventilation principalement).

L'enquête de satisfaction qui avait été réalisée auprès des habitants en 2014 avec le constructeur avant le démarrage du projet Usergap dans le quartier a comporté un problème majeur : le numéro d'appartement avait été jugé comme une information trop intrusive par le constructeur et avait été supprimée avant l'envoi du questionnaire de satisfaction dans le quartier. Nous n'avons donc pas pu utiliser ces données quantitatives pour faire remonter les données socio-démographiques et nous avons dû re-collecter ces données pour les besoins du projet UserGap à l'aide d'un nouveau sondage séparé dans le quartier de Eikenott en juin 2018. Cela nous a permis de collecter également des données sur la satisfaction des habitants vis-à-vis des services énergétiques et de l'importance qu'ils accordent à ces services. La **Figure 100** représente une matrice importance/satisfaction, qui suit la méthode proposée par Martilla et James (1977). **Cette étape n'était pas prévue et a impacté la durée totale du projet.** Nous avons pu collecter 95 questionnaires auprès des habitants de Eikenott (sur les 400 appartements que compte le quartier) durant le mois de juin 2018.

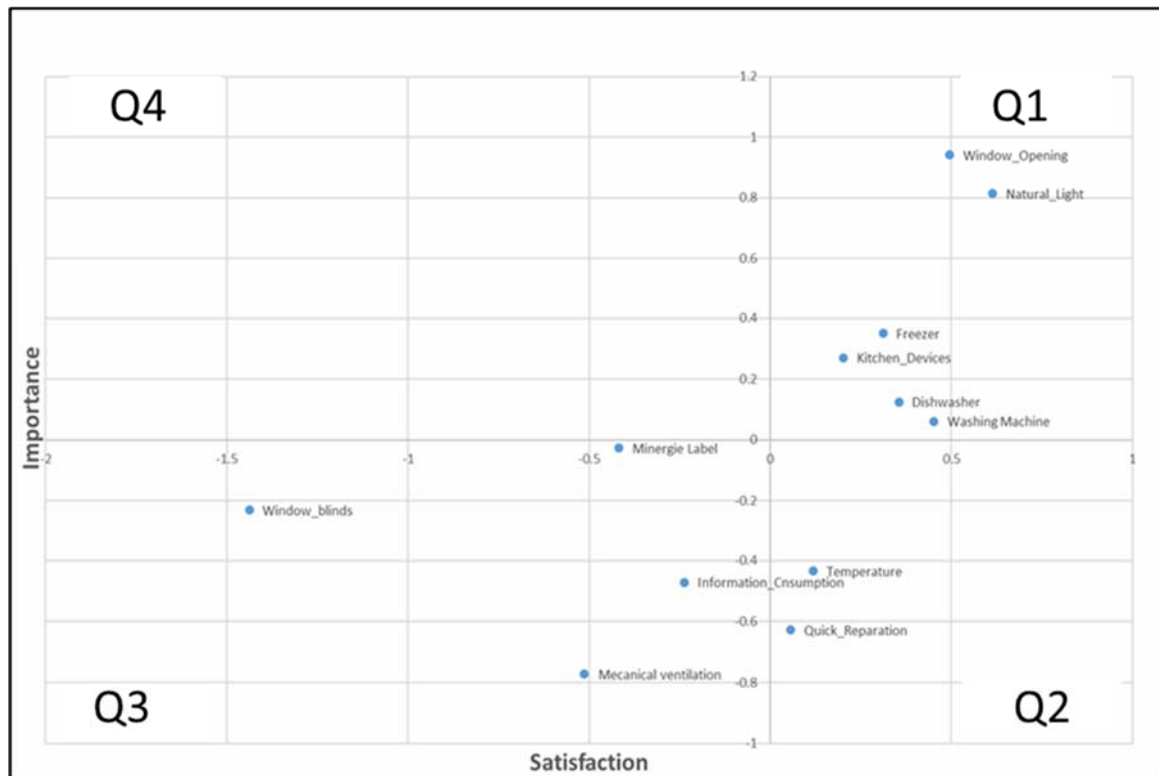


Figure 100 - Matrice importance / satisfaction

Dans le quadrant Q1 de la matrice : on constate que les habitants apprécient le fait de pouvoir **ouvrir les fenêtres** de leurs logements et ils y accordent une grande importance. C'est le facteur le mieux évalué du sondage, tant au niveau de la satisfaction que de l'importance. Ils apprécient également beaucoup la **lumière naturelle** qui est également très importante à leurs yeux. Les différents **appareils ménagers** mis à disposition (congélateur, lave-vaisselle, machine à laver...) semblent également les satisfaire, ils y accordent toutefois une importance moindre.

Dans le quadrant Q2, on constate que deux points sont importants pour les habitants et pour lesquels ils ne sont pas satisfaits : la **température** et les **réparations rapides**. En effet, comme nous l'avons étudié en 2017 grâce aux entretiens qualitatifs, les habitants se plaignent de la température bloquée à 21 degrés. Les personnes âgées en appartements subventionnés par la commune particulièrement. Il semble important, pour éviter que les habitants n'installent des chauffages d'appoints électriques (ce que nous avons pu constater dans les verbatim), de **bien réfléchir au profil d'habitants** (probablement que des personnes âgées, peu mobiles et restant de longues heures à domicile supportent moins bien les températures plus basses) et également à la **manière de communiquer sur la température bloquée** (7 agences immobilières ont communiqué des messages divergents aux habitants par rapport à la température bloquée). Concernant les **réparations rapides**, nous avons également retrouvé des éléments concordants explicatifs dans les entretiens qualitatifs. D'une part, des propriétaires qui avaient un problème avec leur ventilation et qui, après de nombreux contacts avec le constructeur, l'entreprise mandatée pour la ventilation, les services (facility) étaient très mécontents non seulement du défaut mais surtout de la **complexité de trouver le bon interlocuteur**, de la **communication défailante**.



Dans le quadrant Q4, on constate qu'il n'y a pas de service considéré comme moins important en moyenne et qui sont satisfaisants, ce qui est une information importante. Un investissement dans un service qui est satisfaisant mais qui n'est pas jugé comme important par les habitants est en effet inutile.

Le cadrant Q3 concerne les services qui ne sont pas satisfaisants mais qui sont jugés moins importants. Dans ce quadrant, on trouve les **stores, un élément jugé central dans les analyses techniques mais qui n'est pas considéré comme central par les habitants**. La satisfaction est inférieure à la moyenne pour les stores. Le **Label Minergie** est proche de la moyenne en ce qui concerne la satisfaction mais est inférieur à la moyenne de l'importance accordée aux différents services énergétiques. Ce n'est pas une surprise car c'est également un élément qui était ressorti dans les entretiens qualitatifs. En effet, au vu du taux de logement vacants, les habitants du quartier ne possèdent pas forcément des valeurs pro-environnementales, comme décrit dans le sondage. C'est un plus pour une partie des habitants de vivre dans un logement Minergie mais ce n'est pas le cas de tous les habitants. **L'information sur la consommation** d'énergie figure également dans ce cadrant. Nous avons déjà mis en évidence dans les entretiens qualitatifs que les smart meters sont considérés par une partie des habitants comme des « gadgets », l'intérêt porté aux tablettes allant décroissant dans le temps.

Le service qui donne le moins satisfaction du sondage et qui est également jugé comme moins important en moyenne c'est la **ventilation mécanique**. Ce n'est pas une surprise, les discussions durant les entretiens qualitatifs en 2017 ont beaucoup porté sur la ventilation. **Il semble que le débit d'air ne soit pas satisfaisant**. Une des propriétaires avait même collé un ruban sur la bouche d'aération pour voir si le ruban bougeait (resp. si de l'air sortait). Elle nous a montré sa solution « bricolée » car elle était très insatisfaite de la ventilation. Suite au sondage, on constate que ce n'est pas un fait unique mais une préoccupation partagée. **Et en confrontant ces résultats aux analyses techniques, on pose l'hypothèse d'un dysfonctionnement important de la ventilation, d'où une campagne de mesures séparée concernant le débit d'air en janvier 2019.**

Si on met les différents quadrants en perspective, on peut voir que la **température** et la **ventilation** posent problèmes et que les habitants sont satisfaits de pouvoir **ouvrir les fenêtres** pour réguler l'air et la température. On peut faire l'hypothèse que cela explique une bonne partie de la surconsommation de chauffage.

Suite aux recherches faites dans le cadre de ce projet, les recherches ont conclu que **les perceptions des services énergétiques n'influencent pas ou pas directement la satisfaction de vie dans un écoquartier durable**.

On se rend compte que lorsque que tout va bien, la satisfaction est générale mais personne ne le remarque. Par contre, dès lors que les services énergétiques deviennent un problème, l'insatisfaction est générale. **Il faut donc accentuer et mettre en avant quand les services énergétiques correspondent aux besoins de la population, parce qu'actuellement, les gens ne remarquent que lorsque cela est négatif. Ils associent donc les services énergétiques à quelque chose de négatif.**

En conclusion, trois pratiques ont été sélectionnées.

(1) « **Se chauffer** » : La température est actuellement un critère ayant beaucoup d'importance pour les habitants, et pour lesquels ils ne sont pas satisfaits.

(2) « **Utilisation des stores** » : En revanche, l'utilisation des stores ne semble pas importante pour les habitants, et pourtant représente un impact majeur dans la consommation. Grâce à ces analyses, nous pouvons affirmer qu'il y aurait certaines fonctionnalités à ajouter pour gagner en efficacité énergétique.

(3) « **Ouverture des fenêtres** », qui comme représenté dans les analyses multivariées, engendre des impacts sur la consommation de chauffage.



Résultat de la co-crédation de mesures énergétiques (Tâche 3.3)

Après avoir diagnostiqué et mesuré les problèmes d'écart de performance, identifié les pratiques qui sont la cause de ces écarts, les attitudes des parties prenantes, leur pouvoir et leur intérêt face à la consommation d'énergie, cette phase se concentre sur le co-développement de solutions. On peut se demander pourquoi les mesures d'efficacité énergétiques ne se concentrent pas uniquement sur les pratiques identifiées. D'une part, la collecte et l'analyse des données a été retardée et les activités d'intégration des parties prenantes devaient avoir lieu. Des hypothèses ont donc été faites sur les écarts de performance et les secteurs dans lesquels agir. Les mesures se concentrent sur les trois domaines : électricité, ECS et chauffage.

Premier workshop et soirée co-design

On fait l'hypothèse que le plan d'efficacité énergétique co-développé par les parties prenantes correspondra mieux à leurs besoins et sera plus efficace qu'un plan sans impliquer les parties prenantes. Un premier workshop a été organisé dans le quartier en novembre 2017. Il a réuni 15 participants (propriétaires, locataires, prestataires de services, commune, académiques) qui ont travaillé à partir des barrières qui ont été mises en évidence.

Suite à une première soirée de co-design fin 2017 qui avait généré de nombreuses idées de mesures énergétiques en impliquant toutes les parties prenantes, nous avons participé à la Journée de l'Energie organisée par la ville de Gland dans le quartier de Eikenott. Elle a eu lieu le 3 février 2018. La déléguée à l'énergie de la commune de Gland nous a mis à disposition un espace dans lequel nous pouvions interagir avec les habitants et autres visiteurs.

Sélection de trois mesures d'efficacité énergétique

Suite à la soirée de co-design de novembre 2017 et à la Journée de l'Energie, **les ingénieurs participant au projet ont sélectionné trois mesures pouvant être réalisées par la suite dans le quartier et répondant à des besoins des habitants.** Les mesures ont des caractéristiques communes :

1. **Coût réduit** : le matériel coûte moins de CHF100.- pour chaque mesure. En effet, le budget lié à l'achat de matériel étant réduit dans le projet, il n'était pas possible d'agir par exemple sur l'automatisation des stores.
2. **Aspect ludique** : nous avons voulu utiliser des artefacts colorés et visuellement attractifs pour tangibiliser l'énergie
3. **Feedback direct et indirect**, le premier influence plus directement les comportements, selon un rapport de l'agence européenne de l'environnement (European Environment Agency, 2013)
4. **Simplicité d'installation et d'utilisation** proche du « plug and play »
5. **Nudge** : changement de la solution par défaut installée qui a une influence sur les pratiques (Sunstein, 2017). L'effet est plus pérenne dans le temps car l'intervention change le contexte d'usage et diminue l'effort de l'habitant.



Les trois mesures sélectionnées pour être testées dans le quartier sont les suivantes :

1) Température des pièces : installation de vannes connectées dans les chambres qui ne disposent pas de thermostat. En effet, suite aux entretiens qualitatifs, on constate que les parents souhaitent régler une température de consigne plus basse dans leur chambre que dans celle des enfants, ce qui n'est pas possible pour l'instant. Ils ouvrent donc les fenêtres pour régler la température, comme mesuré dans le sondage. Pour éviter ce phénomène et des investissements importants en installation, un système sans fil est testé. Cela change le contexte d'utilisation de la régulation, diminue les efforts pour le réglage car il peut être fait à distance.

2) Eau chaude sanitaire : pommeau de douche économique et connecté : les habitants ont mentionné à plusieurs reprises la volonté de visualiser leur consommation électrique, mais aussi d'eau chaude sanitaire. Nous avons sélectionné un pommeau de douche qui donne un **feedback direct** (couleur qui change en fonction de la durée) et **indirect** (application Bluetooth qui regroupe les données historiques et qui permet le calcul des économies d'eau et d'argent). Il peut être utilisé par tout public, même de jeunes enfants, grâce aux codes couleurs émis par la douche.



Figure 101 - Exemple de vanne connectée et de douche connectée Hydrao

3) Consommation électrique : Bouton rouge programmable éteignant toutes les consommations électriques superflues dans l'appartement. C'est une idée qui a été proposée à plusieurs reprises lors des ateliers de co-design. A l'image de ce qui se fait dans les hôtels avec la carte de la chambre, ils aimeraient un moyen rapide d'arrêter toutes les consommations en une seule opération en quittant le logement. C'est un gain de temps, la simplicité et l'efficacité.



Figure 102 - Exemple de bouton connecté programmable



L'idée de bouton rouge paraît simple conceptuellement mais est plus complexe à mettre en place. En effet, quand les habitants disent « tout » vouloir couper en partant. Est-ce bien réaliste ? Quelles sont les consommations électriques qui peuvent réellement être coupées sans risque ? Une soirée de co-design le 20 mars 2018 a réuni 10 habitants, l'entreprise qui a développé le smart meter et les académiques dans l'appartement d'un des propriétaires. L'idée était de co-développer une solution par défaut pour les futurs quartiers ou à ajouter dans les appartements existants. L'hypothèse principale repose sur les bénéfices du co-design, notamment d'augmenter l'« acceptation sociale » des solutions co-développées (Steen et al, 2011). Lors de cette rencontre, une liste d'appareils ne devant pas être éteints a été établie. Il s'agit des appareils suivants :

- Tablette e-Smart
- Régulateur de chauffage
- Réfrigérateur et congélateur
- Prise qui alimente le réveil matin...
- Box TV (en fonction des modèles, cela peut poser problème)
- Alarme
- Four (pour ne pas dérégler l'horloge)
- Lampe de sécurité (il existe des lampes de sécurité qui fonctionnent avec des batteries)

Par exemple, il est apparu que les habitants ne souhaitent pas que le four s'éteigne, car ils devraient à chaque fois reprogrammer l'horloge qui clignote. Cette dernière doit impérativement fonctionner pour pouvoir utiliser certaines fonctionnalités comme la programmation de fin de cuisson. L'entreprise E-Smart était également présente afin de pouvoir par la suite faire les mises à jour nécessaires pour la mise en place du bouton rouge et des thermostats par pièce.

De nombreux freins sont apparus dans les logements existants et nous testons d'autres fonctionnalités que pourrait commander ce bouton, comme par exemple savoir quand les habitants sont présents ou absents pour remonter les stores automatiquement (impact important comme vu dans l'analyse technique du bâtiment).

La soirée de prototypage du bouton ON/OFF a permis de récolter les barrières à cet appareil, les différents services énergétiques que l'on aimerait lier ou non, de lister tous les appareils ne devant pas être éteints. Ce concept de simplicité (« low-tech ») a séduit un partenaire d'implémentation qui a testé cette solution dans un nouveau quartier à bâtir en Valais, et destiné à une cible de seniors.

Développement du jeu sérieux « Poker Design »

Finalement, la dernière étape de co-design de mesures énergétiques dans le quartier a consisté au développement d'un nouveau jeu de cartes dit jeu « sérieux ». Il comprend : (1) Des personas (sorte de profil type de parties prenantes), (2) des cartes d'usages (lessive, éclairage...), (3) des cartes d'action (ex. récompenser, informer...). Les freins et motivations ont tout d'abord été mis en évidence grâce aux entretiens réalisés en 2017. Puis des mesures ont été développées en combinant une carte de chaque catégorie. Ce jeu de cartes a été développé suite à la constatation que le comportement des habitants face aux services énergétiques avait un impact direct sur l'efficacité énergétique. **L'intérêt du jeu consiste à « associer de manière originale des « aspects sérieux » comme des informations sur le changement climatique ou d'autres crises environnementales, « dans une visée sensibilisatrice et éducative... »** (Gagnebien, 2012). Le jeu de rôle permet de dépersonnaliser la perception via la simulation. Il est plus facile de s'exprimer au nom d'une autre personne pour identifier les dérives de consommation par exemple. Les personas créés également à partir des entretiens qualitatifs dans le quartier représentent les acteurs clés du quartier, exprimant leurs besoins ainsi que leurs attentes vis-à-vis du quartier et de ses services énergétiques. Le but de ce jeu est de co-développer un plan d'efficacité énergétique dans un quartier.



Figure 103 - Cartes Persona



Figure 104 - Cartes d'action



Figure 105 - Cartes d'Usages

Puis une version plus courte a été développée, soit un jeu d'une vingtaine de minutes. Il s'inspire du jeu de l'oie où chaque case représente une pièce dans un bâtiment qu'il faut traverser en proposant à chaque fois une mesure d'efficacité énergétique (EE) avec l'aide des cartes d'action. Ce jeu a été testé durant la journée de l'Energie dans le quartier de Eikenott.

Résultat de la mise en place d'interventions ciblées dans le quartier (Tâche 3.4)

Avec les mesures identifiées précédemment, un plan d'efficacité énergétique a été mis en place dans le quartier de Eikenott. Celui-ci contient un descriptif de la mesure en spécifiant la pratique, les indicateurs de suivi de consommation et comment ces indicateurs sont calculés.

Afin de communiquer et de mettre en place ces mesures, le concept des soirées « TupperWatt » a été proposé. Une telle soirée a été organisée en janvier 2019. Le but de la rencontre était de présenter les trois mesures sélectionnées et de motiver les habitants à participer (objectif : 10 ménages). Un ingénieur leur a également expliqué comment installer, régler et utiliser les artefacts techniques. De plus, des mesures d'efficacité complémentaires ont été présentées afin de sensibiliser les habitants à la thématique. La soirée TupperWatt a également été pilotée dans un autre ménage hors du quartier et participant à l'émission RTS « Une seule planète », offrant de la visibilité au consortium du projet UserGap.



Un électricien s'est déplacé dans le quartier d'Eikenott afin de récolter les informations des compteurs de différents appartements en amont. Puis, plusieurs sondes de température ont été installées dans les pièces qui n'en disposaient pas encore. Un module de commande de la vanne de chauffage a également été installé dans 4 appartements. 6 ménages ont également été équipés de multiprises télécommandées, installées dans le salon. Un pommeau de douche connecté Hydrao a été offert en cadeau lors de la soirée TupperWatt. Il change de couleur en fonction de la durée de la douche et communique les informations de consommation par bluetooth sur une application mobile.

Concernant la problématique des stores, ces derniers n'ont que peu d'importance aux yeux des utilisateurs selon le sondage, mais une grande conséquence sur la consommation selon l'analyse technique. Actuellement, il n'existe pas de domotique installée sur les stores. Lors de la construction du quartier, cette fonction était proposée en option. Etant donné que les analyses électriques ont révélé qu'il n'y avait pas d'écart de performance d'un point de vue électrique, le bouton central de commande à distance pourrait être utilisé à une autre fin. En effet, il reste « low-tech », ludique, simple et bon marché.

L'idée est de coupler l'utilisation du bouton avec la présence ou l'absence des habitants dans l'appartement. Il serait possible de piloter la commande des stores avec le bouton rouge en fonction de la saison, de la température extérieure et de l'ensoleillement, des critères jugés très importants dans l'analyse technique et économétrique. Le budget du projet ne permet pas de mettre en place ce type de mesure dans un bâtiment existant mais pourrait être testé dans un projet ultérieur.

Evaluation des consommations réelles après la mise en place du Living Lab (Tâche 3.5)

La mise en place des mesures a été effectuée dans un nombre très faible d'appartements. Elles ne permettent pas la généralisation des résultats. Il était tout de même important aux yeux de l'équipe de recherche de proposer et de tester une méthode simple et peu onéreuse pour mesurer l'impact des mesures de performance énergétique. En effet, des outils comme IPMVP ne s'appliquent que difficilement à l'échelle d'un ménage si on doit tenir compte de son coût de mise en œuvre.

Evaluation des consommations réelles d'eau chaude sanitaire : Les pommeaux de douche encourageant à une consommation plus faible d'eau chaude sanitaire ont été distribués à 6 ménages habitant dans 5 bâtiments différents. Les données des 6 ont pu être récupérées. Ces données couvrent 6 mois précédant la distribution des pommeaux de douche (de février à juillet 2018), ainsi que les 6 mois identiques suivant la distribution des pommeaux de douche (de février à juillet 2019).

Une analyse plus précise des données a été également effectuée pour vérifier les points suivants : (1) données existantes sur l'ensemble des périodes analysées, (2) pas de changement dans l'enveloppe des courbes qui pourrait faire soupçonner un changement de locataire. Après analyse précise des données, la consommation d'un ménage a dû être éliminée, car les données n'étaient pas fiables.

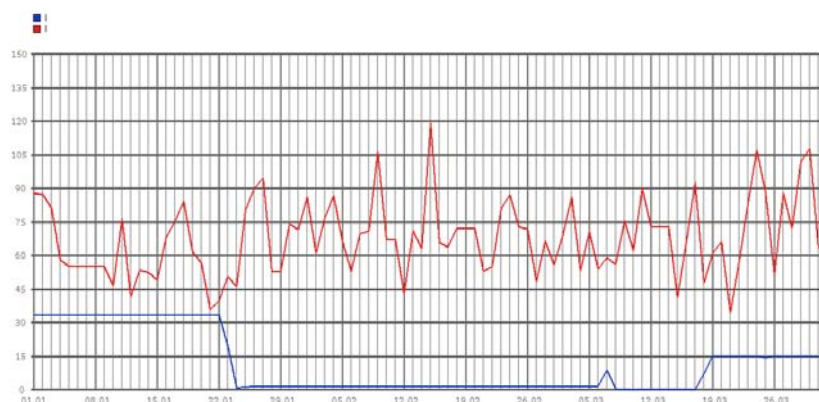


Figure 106 - Représentation des mesures journalières d'eau sanitaire pour un ménage

La **Figure 106** représente les mesures journalières d'eau chaude sanitaire pour les premiers trimestres 2018 (bleu) et 2019 (rouge). La courbe 2018 montre des informations erronées. Le ménage a été éliminé de l'échantillon. Pour les cinq échantillons restants, la moyenne des 6 mois de 2018 avec celle des 6 mois de 2019 ont été comparées :

Echantillon	Moyenne 2018 (litres/jour)	Moyenne 2019 (litres/jour)	Différence %
1	98.6	90.1	- 8.63 %
2	146.1	114.3	- 21.78 %
3	75.5	102.0	+ 34.97 %
4	62.0	63.4	+ 2.14 %
5	46.3	44.1	- 4.75 %

Tableau 17 - Moyenne de consommation d'eau sanitaire comparée

Nous constatons que deux ménages ont diminué leur consommation de 8 et 22% alors que deux autres ménages ont augmenté leur consommation de 35 et 2%. Il n'est pas possible de dire que les pommeaux de douche hydroaero ont permis de diminuer la consommation d'eau. Il faudrait répliquer cette expérimentation sur un plus grand nombre de ménages pour en tirer des conclusions généralisables.



4. Conclusions et résumé

Cette section résume les enseignements tirés du projet, tout d'abord pour le constructeur du quartier puis également en vue de faire évoluer les normes SIA 380/1 et 380/4.

5.1 Recommandations à destination des entreprises de construction

Le quartier d'Eikenott est un des premiers quartiers durables ayant été développé par l'entreprise en Suisse, il fait figure de pionnier mais également de test pour les futurs quartiers. Nous avons constaté que ce quartier consomme environ 17% de plus que la norme en matière de chauffage, si on calcule avec la méthode probabiliste, la plus favorable. Cet écart a pu être expliqué d'un point de vue technique et également social grâce aux analyses effectuées. La consommation d'électricité ne semble pas poser problème, nous allons donc orienter les recommandations sur la partie thermique.

Utilisation non optimale des stores : les habitants utilisent les stores non seulement pour se protéger du soleil mais également pour des questions de sécurité et de vis-à-vis. Or, dans l'analyse technique, le bon usage des stores, ouverts complètement en hiver et fermé en été peut réduire de manière importante la consommation d'un bâtiment bien isolé et donc l'EdP. Nous recommandons aux entreprises de construction de bien orienter le bâtiment (exposition au sud), en essayant de limiter le vis-à-vis, de proposer de la domotique par défaut pour monter et descendre les stores. De plus, il serait intéressant d'utiliser un bouton central qui indiquerait la présence ou l'absence des occupants et monterait/descendrait les stores selon la saison de manière automatique. En effet, la mise en place d'une solution optimale par défaut est très importante pour diminuer l'effort des habitants et diminuer la consommation. Il serait également intéressant de sensibiliser les habitants à la question en expliquant la différence entre une protection externe (stores) qui empêche la chaleur d'entrer et une protection interne (rideaux) qui peut très bien faire l'affaire en matière de vis-à-vis et de vie privée sans bloquer les rayons du soleil en hiver. Encourager les ménages à utiliser des rideaux et non des stores pour des questions de vie privée dans les bâtiments nouvelle génération pourrait être intéressant d'un point de vue énergie. C'est tout l'intérêt de ce projet d'allier des recommandations techniques et de prendre en compte les aspects sociaux des usages.

Ventilation mécanique mal réglée : la ventilation mécanique ne donne pas satisfaction dans le bâtiment étudié (analyses techniques) et dans le quartier en général (analyse sociale). Le manque de débit d'air encourage les habitants à ouvrir les fenêtres notamment en hiver et à les laisser en imposte. L'entreprise qui a conçu le système de ventilation a fait faillite et plus aucun suivi n'a été effectué sur le système de ventilation. Les données n'étaient plus remontées et une fois la vérification des données effectuées, le débit d'air était insuffisant. Si une donnée par défaut est programmée dans l'automate de régulation et qu'aucun suivi n'est effectué par la suite, le système peut être défaillant très longtemps, jusqu'à ce que quelqu'un se plaigne et se saisisse du problème. Nous recommandons donc aux entreprises de construction de **réfléchir en amont sur la maintenance du système**. Les habitants et les régies doivent avoir une personne de contact en cas de problème, que ce soit pour la ventilation ou pour le chauffage. Nous avons eu des retours des habitants qui se plaignent de ne pas savoir à qui s'adresser quand ils ont un problème technique. Même le service de facility management proposé dans le quartier ne sait pas comment trouver le bon interlocuteur en matière d'énergie. La phase d'exploitation de ces quartiers doit pouvoir être réfléchi en amont pour que le design du quartier soit effectué en conséquence. De plus, les réclamations des habitants devraient être collectées de manière systématique (feedback) pour améliorer l'efficacité des systèmes et également éviter les erreurs dans les quartiers futurs (feedforward).



Ouverture des fenêtres en hiver : les analyses sociales montrent que les habitants laissent les fenêtres ouvertes en hiver. L'énergie n'est pas tangible, ce n'est pas comme lors d'une fuite d'eau dans le logement, très tangible et que l'on répare immédiatement. Quand une fenêtre reste ouverte en hiver, c'est une fuite d'énergie qui n'est pas perçue. Il y a tout d'abord des habitudes à changer : un bâtiment Minergie ne s'aère pas comme une maison vétuste, mal isolée et sans système de ventilation mécanique. Des recommandations concrètes pourraient être proposées. Elles se baseraient sur la bonne volonté des habitants de les respecter, ce qui est un peu optimiste. L'autre partie de la problématique est technique : il n'y a qu'une sonde thermostatique pour la partie « nuit » et une pour la partie « jour ». Les entretiens qualitatifs ont révélé que des habitants chauffaient la chambre des enfants à une température différente de la chambre des parents. Avec l'absence d'une sonde par pièce, la baisse de température de la chambre des parents est effectuée par une ouverture de la fenêtre en impose la nuit. Nous avons tenté de régler ce problème en ajoutant une sonde thermostatique télécommandée à partir du smart meter. Des technologies existent mais ne sont pas très instinctives à installer (nécessité de faire venir un électricien, ce qui engendre des coûts pour les ménages). Depuis la construction du quartier, de nouvelles lois cantonales obligent la mise en place d'une sonde par pièce mais elles ne sont pas toujours appliquées par les installateurs dans une période de transition. Il faudrait également sensibiliser les installateurs à cette problématique car ce sont eux qui sont au contact avec les habitants, dans les constructions individuelles par exemple.

Température bloquée à 21 degrés : on remarque que la température réelle des logements ne respecte pas les 20 degrés prévus dans la norme SIA 380/1 ni même les 21 degrés prévus dans le calibrage du quartier. Une partie des habitants souhaiterait une température plus basse mais ils ont de la peine à l'obtenir dans des logements collectifs. En fonction de l'emplacement de leur appartement et de la manière dont chauffent les voisins, c'est difficile d'obtenir une température plus basse. Une autre partie des habitants souhaite une température plus élevée, c'est notamment le cas des personnes âgées dans les appartements protégés. Bien entendu, il est difficile de prévoir quel type de population va occuper les logements en location. Mais si on prévoit des logements sociaux subventionnés et que des personnes âgées, peu mobiles vont les occuper, il faut prévoir qu'elles aient froid à 21 degrés et qu'elles s'équipent de chauffages d'appoints électriques. Il est d'ailleurs intéressant de faire une analyse multi-fluides pour constater ces dérives d'usage qui ne peuvent pas être vues sur la consommation de chaleur uniquement. Le thermostat a également son importance car dans le quartier étudié le thermostat indique jusqu'à 25 degrés alors que le quartier est calibré pour offrir 21 degrés. Une partie des habitants nous ont informé qu'ils ont tenté tout l'hiver d'augmenter la température, sans succès. L'interface doit donc éviter d'induire en erreur, le thermostat ne devrait pas indiquer de température mais plutôt des plus ou des moins pour augmenter ou baisser la température perçue. Il faudrait également se poser la question, dans des bâtiments bien isolés et basse consommation, de la température de référence, 20 degrés ne semblent pas très réalistes si on étudie les usages. On peut bien entendu demander aux habitants de mettre des pulls, on verra quoi qu'il arrive une partie des habitants s'équiper de chauffages d'appoint.

Profil des habitants : nous avons pu mettre en lumière que ce ne sont pas les habitants qui se disent les plus écologiques qui consomment le moins. De plus, ce n'est pas l'argument écologique qui attire en premier les habitants d'un quartier durable. La vie sociale, les relations dans le quartier, les services à disposition, la proximité des agglomérations attire d'avantage que l'aspect écologique selon notre sondage. Ce n'est pas valable que pour les quartiers durables, si on prend l'exemple des voitures, l'argument écologique n'est pas le premier critère de choix mais vient renforcer les premiers critères. Par contre, nous avons démontré des liens entre le type de profils (éducation, revenu) et la consommation d'énergie. En fonction de la clientèle cible du constructeur, les consommations d'énergie peuvent beaucoup varier pour un même quartier. L'analyse sociologique en amont de la



construction, comme le réalise l'entreprise Losinger, est très importante dans cet ordre d'idée pour anticiper le type de profil d'habitants. La typologie développée dans le projet peut également aider à inférer les futures consommations d'énergie en fonction du type d'habitant. L'outil n'est pas encore d'une grande précision mais avec une plus grande base de données (croisement entre critères socio-démo et consommation d'énergie), on pourrait augmenter la robustesse de ces méthodes d'inférence.

Type de feedback aux habitants : selon les études européennes, les feedbacks directs ont un impact plus important que les feedbacks indirects. Prenons l'exemple des pommeaux de douche Hydrao qui ont été installés dans les ménages test. La couleur du pommeau change en fonction de la durée de la douche et en fonction de la température de l'eau. C'est un exemple type de feedback direct aux habitants. Il est intéressant de l'installer par défaut à la construction pour que l'effet perdure, sans avoir besoin de travailler sur les usages. La douche hydrao propose également un feedback indirect avec une application. Il semble que l'effet du feedback indirect s'estompe avec le temps. Le feedback direct et tangible (couleur), ludique apporte une réelle information sur l'usage et sur les potentielles dérives d'usage (douche qui vire au orange puis rouge au bout d'un certain temps, programmable par l'utilisateur). Ce type d'appareil qui tangibilise l'énergie n'existe à notre connaissance pas pour la gestion de la température du logement. Pourtant, un feedback direct, en couleur, ludique et facile à comprendre pourrait être intéressant à tester dans ce domaine également. Pour ce qui est du smart meter, les avis divergent. Certains habitants trouvent qu'il est intéressant de regarder le smart meter en cas de panne, comme par exemple lors de problèmes liés au chauffage à distance durant le démarrage du quartier. Cela reste pour beaucoup un outil que l'on utilise pour vendre l'appartement (plus-value à l'achat) mais qui n'est pas beaucoup utilisé pour le suivi des consommations d'énergie, mis à part quelques exceptions (profils d'habitants plutôt techniques).

Gouvernance énergétique du quartier : comme mentionné plus haut, il est difficile de trouver le bon interlocuteur quand un problème arrive sur le chauffage ou la ventilation. De plus, il ne semble pas que les habitants mettent l'énergie au sommet de leurs priorités. Il serait intéressant de proposer des contrats de performance énergétique pour la gestion et la maintenance du quartier. Avoir un acteur dont c'est la priorité et qui est rémunéré sur l'efficacité énergétique dans le quartier pourrait être utile, surtout dans un quartier avec sept agences immobilières différentes, qui donnent des informations différentes aux habitants. Certaines régions ont par exemple omis de mentionner que le quartier était calibré pour 21 degrés. Il n'est pas facile de trouver un acteur qui soit d'accord d'établir des contrats de performance énergétique étant donné la difficulté de prévoir l'écart de performance. Nous espérons que ce projet pourra aider à réduire l'EdP afin d'encourager l'utilisation des CPE également dans les logements collectifs

Formation des habitants et vie de quartier : nous avons découvert durant le projet l'existence du «Neighbour Hub », un concept de module qui s'installe dans les quartiers, qui apporte à la fois un lieu de rencontre pour les habitants, de formation avec un programme de conférence, une démonstration des technologies et des usages efficients de l'énergie. Ce concept entre tout à fait dans une logique de quartier durable, avec une association de quartier qui pourrait faire vivre ce type de lieu où l'on parle d'énergie dans un contexte plus large que l'innovation technique mais également sociale. C'est un concept très inspirant qui pourrait être testé dans les quartiers durables et qui pourrait également être combinés avec les contrats de performance énergétique pour lui offrir un modèle de revenu parfaitement aligné avec la vocation du NeighborHub. Nous recommandons de tester ces modules dans l'un des quartiers durables du groupe et de remonter du feedback intéressant pour modifier les futurs quartiers.



Soirées TupperWatt : dans le même ordre d'idée, les soirées TupperWatt développées dans le cadre du projet UserGap ont permis de parler d'énergie avec les habitants, avec des mots qu'ils comprennent (des enfants ont participé aux soirées TupperWatt). Du petit matériel d'efficacité énergétique peut être vendu lors de ces soirées pour en diminuer le coût. C'est un concept intéressant qui s'appuie sur les dynamiques de groupe et qui remet l'énergie au centre des discussions et des priorités pour ensuite proposer des mesures concrètes pour diminuer les consommations (ou pourquoi pas disséminer les technologies d'énergies renouvelables comme les panneaux solaires ou les pompes à chaleur). Nous recommandons aux distributeurs d'énergie de tester ce dispositif d'innovation sociale chez leurs clients.

Poker design : l'outil de poker design qui a été développé dans le cadre du projet permet de co-concevoir un plan d'efficacité énergétique pour un quartier. On réunit diverses parties prenantes comme le délégué à l'énergie de la commune, le distributeur d'énergie, des propriétaires et des locataires, des installateurs également. Le jeu sérieux permet à chacun de contribuer et de donner des idées, les problématiques des utilisateurs sont mis en exergue, avec leurs propres mots et les peuvent mieux comprendre ce qui pose problème et adapter leurs offres. Nous souhaitons mettre à disposition le jeu en « creative commons » pour que tout un chacun puisse l'utiliser. Nous souhaitons également trouver un financement pour le faire passer du prototype à la phase de production.

Recommandations pour le développement des normes SIA

Ce projet UserGap a mis en lumière plusieurs retours intéressants sur la manière de mesurer la performance énergétique des bâtiments. Il est en effet intéressant de constater qu'on arrive à améliorer la précision des modèles avec l'approche probabiliste développée par l'équipe du LESBAT. Faire varier les paramètres d'entrée du modèle peut être très intéressant pour tenir compte du contexte des bâtiments et d'explorer différents scénarios.

Il semble également intéressant de tenir compte du lieu géographique de référence car la météo peut être totalement différente sur le plateau et au bord du lac Léman. En modifiant la station de référence et en recalculant l'énergie ex-ante, on s'approche des valeurs ex-post.

Un élément qui nous a semblé également central est **l'intégration d'une équipe pluridisciplinaire pour l'établissement des normes SIA**. Si on prend l'exemple de la norme SIA 380/1, on s'aperçoit qu'il n'y a pas de spécialiste des sciences sociales. Et pourtant, on développe une table de référence sur l'« utilisation standard de l'énergie ». Il est intéressant d'avoir des spécialistes de l'usage pour proposer un usage standard.

De plus, les normes comme la 380/1 est calibrée pour analyser ce que nous avons appelé le niveau «MESO », le bâtiment. On se focalise sur un bâtiment et on considère que l'analyse d'un quartier est une addition de bâtiments, ce qui néglige une vision MACRO de la consommation d'un quartier.



Dans la suite du rapport, les articles scientifiques publiés par l'équipe de recherche permettront au lecteur d'aller plus loin que le rapport final. L'équipe de recherche se tient également volontiers à disposition pour toute question.

Quand on veut agir sur la performance énergétique, on agit sur un système complexe et la manière privilégiée de tester si une intervention a un effet ou non, est la quasi-expérimentation. Pour cette raison les auteurs ont testé l'approche des laboratoires vivants (living lab) pour co-développer des actions d'efficacité énergétique avec les parties prenantes.

« Un Living Lab est un intermédiaire d'innovation, qui orchestre un écosystème d'acteurs dans une région spécifique. Son objectif est de co-concevoir des produits et des services, de manière itérative, avec les principales parties prenantes, dans le cadre d'un partenariat public -privé-personnes et dans un environnement réel. L'un des résultats de ce processus de co-design est la co-création de valeur sociale (bénéfique). Pour atteindre ses objectifs, le Living Lab mobilise les outils et méthodes d'innovation existants ou en développe de nouveaux. » (Mastelic, 2019)

L'approche permet de mieux comprendre les barrières à l'action selon différentes perspectives. Un regard neuf et « naïf » est posé sur le challenge énergétique. En effet, les barrières ne se trouvent pas toujours où on les attend. La première étape est de mettre les partenaires en réseau et de définir une vision commune. Les interactions et la médiation favorisent l'établissement de la confiance et le partage de connaissances (intelligence collective). La méthode ELL permet de jeter des ponts entre les acteurs et entre les disciplines.

Un autre élément important est l'augmentation du pouvoir perçu par les acteurs du changement. Les parties prenantes ont parfois le sentiment de ne pas pouvoir agir. Dans nos projets, les parties prenantes ont aussi besoin d'exemples, d'être accompagnés, d'être rassurés pour leur donner confiance qu'ils peuvent agir. Nous avons testé les soirées TupperWatt (parues aussi durant l'émission de la RTS « une seule planète »), des ateliers qui réunissent les voisins autour du thème de l'énergie. Un expert vient présenter des solutions techniques. Les freins des participants peuvent être exprimés librement et les échanges d'expériences sont riches d'enseignement. Ils prennent ainsi conscience qu'ils peuvent agir, à leur échelle.

On assiste à un changement du rôle des utilisateurs. Ils deviennent actifs et codesigners du service énergétique et même pro-sommateurs. Les utilisateurs ont bien souvent perdu le lien avec l'énergie primaire. Ils deviennent de passifs consommateurs de services automatisés. Dans le cadre des activités du ELL, nous essayons de leur redonner un rôle actif de co-designers, au côté des spécialistes. Nous avons par exemple développé un jeu sérieux : le poker design. Les parties prenantes ont ainsi pu combiner les cartes pour développer un plan d'économie d'énergie pour le quartier. Les personnes permettent de prendre du recul par rapport à leurs propres usages, de déculpabiliser. Le jeu stimule les discussions et le co-développement de solutions à mettre en place dans le quartier.

Quand les parties prenantes proposent des idées pour améliorer les services énergétiques, ils expriment leurs propres besoins. Les solutions co-développées sont plus proches de ces besoins. Elles sont d'autant plus facilement adoptées par les acteurs, même s'ils n'ont pas participé au processus de co-design.



Comment atteindre la transition énergétique avec l'ensemble des acteurs économiques ? La part de consommation énergétique des ménages en Suisse est très importante, elle représente environ 50 % de la consommation énergétique du pays. Il est donc illusoire d'imaginer une transition énergétique sans eux. Comme il est aussi tout à fait vain d'imaginer qu'en les informant uniquement, cela puisse suffire à ce qu'ils changent drastiquement leur manière de consommer.

Il faudra passer du temps pour comprendre quels types d'approches permettraient aux ménages d'accueillir chez eux les dernières technologies innovantes compatibles avec la transition énergétique et d'adapter leurs comportements pour devenir des acteurs de la transition énergétique. Cette transition devra être rapide et ne se fera pas, ou très difficilement, sans des approches de co-construction efficace. Les approches de ELL s'inscrivent parfaitement dans cet esprit, car les solutions co-développées sont beaucoup plus facilement acceptées et ce qui est vrai pour les ménages peut aussi très bien s'appliquer aux entreprises qui consomment l'autre part des 50% d'énergie.



5. Bibliographie

Banfi, S., Farsi, M., Filippini, M., & Jakob, M. (2008). Willingness to pay for energy-saving measures in residential buildings. *Energy Economics*, 30(2), 503–516. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2006.06.001>

Best, H., Mayerl, J., (2013) Values, beliefs, attitudes: an empirical study on the structure of environmental concern and recycling participation. *Soc. Sci. Q.* 94 (3), 691-714.

Burman, E., Mumovic, D., & Kimpian, J. (2014). Towards measurement and verification of energy performance under the framework of the European directive for energy performance of buildings. *Energy*, 77, 153–163. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.102>

Bundesamt für Energie. (2016), Überblick über den Energieverbrauch der Schweiz im Jahr 2015, Auszug aus der Schweizerischen Gesamtenergiestatistik 2015. Retrieved from: http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00542/00631/index.html?lang=en&dossier_id=00763

Chesbrough, H. W. (2006). *Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology*. Harvard Business Press.

Chesbrough, H. W. (2011). Bringing Open Innovation to Services. *MIT Sloan Management Review*, Cambridge, 52(2), 85–90.

Competence Center for Research in Energy, Society and Transition CREST, (2016). Work package 2: Change of Behavior. Retrieved from: <https://www.sccer-crest.ch/research/work-packages-of-sccer-crest/work-package-2-change-of-behavior>

Cook, S. W., & Berrenberg, J. L. (1981). Approaches to encouraging conservation behavior: A review and conceptual framework. *Journal of Social Issues*, 37(2), 73-107.

Davies, A. R., Doyle, R., & Pape, J. (2011). Future visioning for sustainable household practices: spaces for sustainability learning? *Area*, 44(1), 54–60. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4762.2011.01054.x>

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

DETEC (2019): Révision de la loi sur l’approvisionnement en électricité (ouverture complète du marché de l’électricité, réserve de stockage et modernisation de la régulation du réseau) – Rapport sur les résultats de la consultation, Département fédéral de l’environnement, des transports, de l’énergie et de la communication DETEC, Confédération Suisse, Septembre 2019.



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

Dupont, L., Mastelic, J., Nyffeler, N., Latrille, S., Seuillet, E. (2018), Living Lab as a Support to Trust for Co- creation of Value: Application to the Consumer Energy Market, *Journal of Innovation Economics and Management*, DeBoeck Superior.

ENoLL (2018), What are Living Labs. Available online: <https://enoll.org/about-us>

Estiri, H. (2014). Building and household X-factors and energy consumption at the residential sector: A structural equation analysis of the effects of household and building characteristics on the annual energy consumption of US residential buildings. *Energy Economics*, 43, 178-184.

European Commission. (2013). Report from the commission to the European parliament and the council, Poggess by Member States towards Nearly Zero-Energy Buildings, COM (2013) 483 final/2, European Commission. Retrieved from: <https://eur-lex.europa.eu>

Fell, M. J. (2017). Energy services: A conceptual review. *Energy Research & Social Science*, 27, 129–140. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.02.010>

Gassmann, O., Enkel, E., & Chesbrough, H. (2010). The future of open innovation. *R&D Management*, 40(3), 213–221. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9310.2010.00605.x>

Gavard-Perret, M. L., Gotteland, D., Haon, C., & Jolibert, A. (2008). *Méthodologie de la recherche: réussir son mémoire ou sa thèse en sciences de gestion*. Paris: Pearson Education France.

Geels, F. W. (2004). From sectoral systems of innovation to socio-technical systems: Insights about dynamics and change from sociology and institutional theory. *Research Policy*, 33(6), 897–920. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2004.01.015>

Grönroos, C., & Voima, P. (2013). Critical service logic: making sense of value creation and co-creation. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 41(2), 133–150. <https://doi.org/10.1007/s11747-012-0308-3>

Guillen, G. and M. Nicolau (2013). BIG 2050: Because living sustainably today is possible! Pathways, scenarios and backcasting for sustainable and low-carbon lifestyles: Comparing methods, cases and results. Rotterdam, The Netherlands, SCORAI Europe proceedings.



Hastings, G. (2017) "Rebels with a cause: the spiritual dimension of social marketing", *Journal of Social Marketing*, Vol. 7 Issue: 2, pp.223-232, <https://doi.org/10.1108/JSOCM-02-2017-0010>

Jessoe, K., Lade, G. E., Loge, F., & Spang, E. (2017). Spillovers from behavioral interventions: Experimental evidence from water and energy use, E2e Working Paper 033.

Kavousian, A., Rajagopal, R., & Fischer, M. (2013). Determinants of residential electricity consumption: Using smart meter data to examine the effect of climate, building characteristics, appliance stock, and occupants' behavior. *Energy*, 55, 184-194

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

Kollmuss, A., & Agyeman, J. (2002). Mind the gap: why do people act environmentally and what are the barriers to pro-environmental behavior? *Environmental education research*, 8(3), 239-260. <https://doi.org/10.1080/13504620220145401>

Kotler, P., & Zaltman, G. (1971). Social Marketing: An Approach to Planned Social Change. *Journal of Marketing*, 35(3), 3. <https://doi.org/10.2307/1249783>

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>

Maloney, M.P., Ward, M.P., (1973) Ecology: let's hear from the people: an objective scale for the measurement of ecological attitudes and knowledge. *Am. Psychol.* 28 (7), 583.

Martilla, J.A., & James, J.C. (1977). Importance-Performance Analysis. *Journal of Marketing*, 41(1), 77-79. <https://doi.org/10.2307/1250495>

McKenzie-Mohr, D. (2000). Fostering sustainable behavior through community-based social marketing. *American Psychologist*, 55(5), 531-537. <http://dx.doi.org/10.1037/0003-066X.55.5.531>

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



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»

Patterson, M. G. (1996). What is energy efficiency?: Concepts, indicators and methodological issues. *Energy Policy*, 24(5), 377–390. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(96\)00017-1](https://doi.org/10.1016/0301-4215(96)00017-1)

Parasuraman, A., Zeithaml, V. A., & Berry, L. L. (1988). Servqual: A multiple-item scale for measuring consumer perceptions of service quality. *Journal of Retailing*, 64(1), 12-40. Retrieved from

<https://search.proquest.com/docview/228609374?accountid=15920>

Perret L, Chevillat Y, Wyrsh N, Bloch L, Holweger J, Weber S, Péclat M (2019): "FLEXI 2: Déterminer le potentiel de flexibilisation de la demande d'électricité des ménages", project Office fédéral de l'énergie.

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

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

Sahakian, M., & Wilhite, H. (2014). Making practice theory practicable: Towards more sustainable forms of consumption. *Journal of Consumer Culture*, 14(1), 25–44. <https://doi.org/10.1177/1469540513505607>

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>

Sanders, E. B. N., & Stappers, P. J. (2008). Co-creation and the new landscapes of design. *Co-design*, 4(1). <https://doi.org/10.1080/15710880701875068>



Santin, O. G. (2011). Behavioural patterns and user profiles related to energy consumption for heating. *Energy and Buildings*, 43(10), 2662-2672.

Saunders, M., Lewis, P. & Thornhill, A., (2016). *Research Methods for Business Students*, Seventh Edition, Pearson Education Limited, Essex, England.

Schuurman, D. (2015). Bridging the gap between Open and User Innovation?: exploring the value of Living Labs as a means to structure user contribution and manage distributed innovation (Doctoral dissertation, Ghent University).

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

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)

Steen, M., Manschot, M., & De Koning, N. (2011). Benefits of co-design in service design projects. *International Journal of Design*, 5(2), 53-60.

Sunstein, C. R. (2017). Default rules are better than active choosing (often). *Trends in cognitive sciences*, 21(8),

Swiss Federal Office for Energy SFOE, (2016), *Energy Strategy*, retrieved from: <https://www.uvek.admin.ch/uvek/en/home/energie/energy-strategy-2050.html>

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

Tukey JW (1977): "Exploratory data analysis", Addison-Wesley.

Vargo, S. L., & Lusch, R. F. (2004). Evolving to a New Dominant Logic for Marketing. *Journal of Marketing*, 68(1), 1-17. <https://doi.org/10.1509/jmkg.68.1.1.24036>

Von Hippel, Eric A., (2005). *Democratizing Innovation*. MIT Press, Cambridge, MA.

Wacker, J. G. (1998). A definition of theory: research guidelines for different theory-building research methods in operations management. *Journal of Operations Management*, 16(4), 361-385. [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(98\)00019-9](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(98)00019-9)