



Développement durable et territoires

Économie, géographie, politique, droit, sociologie

Vol. 8, n°2 | Juillet 2017

Lutte contre le changement climatique et maîtrise de la demande d'énergie

Variables explicatives de la consommation de chauffage dans l'habitat : les leçons de l'analyse d'une copropriété sur données journalières

The behaviour of residential heating energy consumption: lessons from a local case study on daily data

Ghislaine Destais



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/developpementdurable/11766>

DOI : 10.4000/developpementdurable.11766

ISSN : 1772-9971

Éditeur

Association DD&T

Référence électronique

Ghislaine Destais, « Variables explicatives de la consommation de chauffage dans l'habitat : les leçons de l'analyse d'une copropriété sur données journalières », *Développement durable et territoires* [En ligne], Vol. 8, n°2 | Juillet 2017, mis en ligne le 28 juillet 2017, consulté le 21 décembre 2020. URL : <http://journals.openedition.org/developpementdurable/11766> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.11766>

Ce document a été généré automatiquement le 21 décembre 2020.



Développement Durable et Territoires est mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale 4.0 International.

Variables explicatives de la consommation de chauffage dans l'habitat : les leçons de l'analyse d'une copropriété sur données journalières

The behaviour of residential heating energy consumption: lessons from a local case study on daily data

Ghislaine Destais

Avec la participation de Marion Albaladejo, Thibault De la Fournière, Sylvain Divo, Marwan Fadly, Kévin Loesle, Basile Nicolsky, Lukas Sikora, Paul Wipf, Jan Zezulka, étudiants à Grenoble-INP ENSE³, filière Systèmes Énergétiques et Marchés, au moment de la réalisation de l'étude.

- 1 Les consommations énergétiques résidentielles représentent aujourd'hui 26 % de la consommation énergétique finale en France¹. En 2013, ce sont ainsi 45,6 Mtep² qui étaient consommées, dont 39,6 Mtep pour les 28 millions de résidences principales. Sur ces 39,6 Mtep, les deux tiers sont consacrés au chauffage, le reste aux usages cuisson, eau chaude et électricité spécifique. Le chauffage constitue donc le poste essentiel de cette consommation, bien qu'en diminution relative³. Les 26,5 Mtep qui lui étaient consacrées au niveau national en 2013 sont moindres que le maximum de 35 Mtep atteint en 2002, mais restent très proches des montants observés au début des années 1980 du fait de l'accroissement important du nombre de résidences⁴, et cela malgré une baisse de la consommation moyenne par logement⁵ due à la construction de logements neufs plus performants, au développement des rénovations et à la diffusion de systèmes de chauffage plus efficaces.
- 2 Mais la France s'est fixé des objectifs plus ambitieux encore dans la perspective du facteur 4⁶. La loi Grenelle 1 de 2009⁷ affichait l'ambition de réduire les consommations d'énergie du parc des bâtiments existants d'au moins 38 % par rapport à 2008 avant 2020, avec un

objectif de rénovation complète de 400 000 logements chaque année à compter de 2013. La loi TECV de 2015⁸ vise quant à elle une réduction des consommations finales totales, par rapport à 2012, de 20 % avant 2020 et 50 % avant 2050 (en vue de diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050) et la rénovation énergétique de 500 000 logements par an à compter de 2017 pour disposer d'un parc immobilier dont l'ensemble des bâtiments sont rénovés en fonction des normes « bâtiment basse consommation » ou assimilées, à l'horizon 2050.

- 3 Paul Delduc, commissaire général au développement durable, convenait cependant dans un éditorial de *La Revue du CGDD* que « *selon les estimations réalisées par le CGDD, les principales politiques aujourd'hui mises en œuvre ne permettraient de réduire la consommation d'énergie du parc existant que de 18 % en 2020, et les émissions de gaz à effet de serre que de 49 % en 2050 par rapport à 1990* ». Il ajoute que « *d'autres mesures seront donc nécessaires. Favoriser les rénovations des logements et maîtriser les consommations énergétiques nécessite d'agir sur les comportements des ménages, en les incitant [notamment] à une plus grande sobriété [...]* » (Ayong Le Kama, 2015 : 3). De fait, les économies d'énergie apportées par la rénovation ne sont souvent pas à la hauteur des attentes, comme le montrent les études *ex post* des résultats de certaines opérations (voir par exemple Carassus J. *et al.*, 2013 ; Enertech, 2012) et toute la littérature sur l'effet rebond, bien résumée par Ray Galvin (2016). Atteindre des objectifs plus ambitieux de maîtrise des consommations réelles de chauffage résidentiel impose de chercher à mieux comprendre les différents facteurs influençant cette consommation de manière à identifier les modes d'action possibles.
- 4 Or, s'il est habituel d'évaluer l'impact des paramètres techniques des logements neufs sur leur consommation théorique à l'aide d'outils de modélisation, en vue du respect de la réglementation thermique en vigueur⁹, la compréhension détaillée des consommations réelles reste un sujet peu exploré. Nous nous proposons ici d'y ajouter une petite pierre en nous intéressant à la consommation d'énergie d'une copropriété de dix maisons individuelles similaires construites en 1988 dans l'agglomération grenobloise. L'intérêt de ce petit échantillon est qu'il présente des caractéristiques techniques et environnementales très homogènes (architecture, isolation, orientation) et une unité géographique, et donc climatique, limitant par là le nombre de paramètres susceptibles d'expliquer des différences de consommation d'un logement à l'autre. L'originalité de ce travail est en outre de combiner une étude empirique sur courte période avec une analyse modélisée.
- 5 Après une revue de travaux qui essaient d'identifier les facteurs explicatifs de la consommation de chauffage (paragraphe 2), et une présentation de la méthodologie de notre étude (paragraphe 3), on confronte l'évaluation des consommations de chauffage à partir des relevés de compteurs avec celle fournie par un modèle (paragraphe 4). On procède ensuite à l'analyse descriptive des déterminants sociodémographiques et comportementaux de ces consommations (paragraphe 5). Puis l'apport de la modélisation à la compréhension des facteurs explicatifs de la consommation de chauffage est développé (paragraphe 6).

1. Une littérature limitée dont on peut tirer quelques enseignements

- 6 La littérature sur les consommations réelles de chauffage peut être classée en deux catégories : les études évaluant les performances des opérations de rénovation énergétique par rapport aux attentes, et les travaux qui s'intéressent de façon plus générale aux déterminants des consommations d'énergie résidentielles. Sans prétendre à une revue exhaustive qui est hors de propos ici, nous examinons quelques publications importantes, notamment parmi celles parues dans les revues *Energy Policy* et *Energy and Building*, et quelques retours d'expérience dont nous tirons des enseignements pour notre propre étude. On y rencontre une palette de travaux concernant plusieurs centaines de logements à une seule habitation. Leur méthodologie combine à des degrés divers des approches mathématiques, sociologiques et techniques par la mise en œuvre d'analyses statistiques, d'enquêtes, de mesures expérimentales et de modélisation.
- 7 Morley et Hazas (2011) font une revue de littérature qui montre que le facteur de variabilité de la consommation d'énergie de chauffage peut atteindre 3,7 pour des logements « homogènes ». Leur étude de 38 logements étudiants identiques hébergeant chacun douze occupants, avec des relevés journaliers sur sept semaines, établit que certains logements consomment 1,9 fois plus de gaz pour le chauffage que d'autres. Pour expliquer ces écarts, ils invitent à explorer l'hypothèse de pratiques différentes des occupants, confirmée par les interviews qu'ils ont menées, mais regrettent qu'un approfondissement de l'analyse nécessite des données détaillées à un micro-niveau, dont ils ne disposent pas, « difficiles à collecter empiriquement » et « rarement mentionnées dans la littérature ».
- 8 Yu *et al.* (2011) ont utilisé une méthode de classification pour subdiviser un échantillon de 80 maisons au Japon en quatre sous-groupes aux caractéristiques techniques similaires. Les différences de consommation au sein d'un même sous-groupe sont attribuées aux variables comportementales et sociodémographiques. Sept facteurs influençant la consommation d'énergie ont pu être isolés, sans pour autant que leurs poids respectifs ne soient mesurés.
- 9 Le rapport des campagnes de mesures très détaillées effectuées par Enertech (2012) à la zone d'aménagement concerté (ZAC) de Bonne à Grenoble pendant un an, avec un pas de dix minutes sur 44 logements (soit 10 % du total), montre que « la notion de prévision d'une consommation est un concept certes séduisant, mais tout à fait illusoire et irréaliste ». Par exemple, la température extérieure locale peut différer, au même instant, des données météorologiques voisines utilisées dans la modélisation. Par ailleurs, l'identification des paramètres les plus influents sur la consommation réelle de chauffage conduit à mettre en avant la température de chauffage choisie par les occupants, le débit effectif de renouvellement d'air, le régime des vents et donc des infiltrations, et les apports internes via la consommation électrodomestique.
- 10 Passant outre la mise en garde précédente, Raynaud (2014) cherche à évaluer les performances d'un modèle thermique dynamique mono-zone pour reproduire les consommations réelles de chauffage de plusieurs centaines de logements individuels avant et après travaux d'amélioration. Les variables d'entrée comportementales du modèle ont été déterminées à partir d'enquêtes menées auprès des occupants pour

s'approcher au mieux de la réalité. Un travail d'analyse statistique a permis d'identifier les principales sources d'écart entre simulations et observations, et notamment de montrer qu'ils dépendent plus de la performance thermique théorique du bâtiment que de celle des systèmes énergétiques. Des pistes de perfectionnement du modèle sont avancées.

- 11 L'étude de Carassus *et al.* (2013) pour Cerqual¹⁰ constitue un retour d'expérience sur 18 logements basse consommation. Elle montre qu'il existe toujours une différence, parfois importante, entre le calcul conventionnel BBC des consommations, qui repose sur des hypothèses de comportement conventionnelles¹¹, et les consommations réelles, influencées par l'usage et le comportement réels des occupants. Six facteurs explicatifs sont mis en évidence suite aux interviews menées ; ils rejoignent ceux identifiés précédemment : le nombre de personnes dans le logement (facteur appelé densité d'occupation), la durée d'occupation durant la journée, la semaine et l'année, le niveau d'équipement d'appareils domestiques et l'intensité de leur usage, la température intérieure choisie en hiver, les pratiques d'aération du logement, notamment l'ouverture des fenêtres et des portes sur jardin, la plus ou moins bonne maîtrise de la chaudière, de la ventilation, des volets et du chauffe-eau solaire quand il y en a un.
- 12 L'étude de Cayla *et al.* (2010) pour l'*American Council for an Energy Efficient Economy* avait des ambitions quantificatrices. Ces auteurs ont travaillé sur un échantillon constitué de 923 foyers à travers un sondage, un modèle statistique et l'utilisation d'un logiciel de thermique du bâtiment. Différents facteurs ont été analysés, notamment la gestion de l'espace et de la température de consigne, le taux de ventilation, ou encore les attributs sociodémographiques (âge, revenu, taille de la famille...). Il en résulte que 60 % de la consommation en chauffage a pu être expliquée, les 40 % restants pouvant être dus à diverses causes non précisées. Les paramètres techniques semblent expliquer les deux tiers de ces 60 % de la consommation totale de chauffage, les aspects sociodémographiques influençant le tiers restant, tandis que l'aspect comportemental strict n'a été crédité que d'une influence de 4 %. Ce dernier point est cependant nuancé par le fait que les auteurs considèrent que les réponses aux sondages proposés aux habitants vis-à-vis de leurs habitudes de consommation en énergie peuvent être biaisées par rapport à leurs pratiques réelles.
- 13 Audenaert *et al.* (2011) ont cherché pour leur part à expliquer les différences entre les consommations théoriques de chauffage et les consommations estimées à partir des relevés de factures sur un an par un logiciel d'audit énergétique. Ils s'appuient sur une analyse précise de cinq maisons situées en Belgique, et le dépouillement d'un questionnaire permettant de caractériser le comportement des occupants. Ils montrent que la méthode utilisée par le logiciel pour évaluer les consommations réelles liées au chauffage à partir des factures est trop fruste : ils se contentent, lorsque la source d'énergie est la même, de déduire des factures les consommations liées à l'eau chaude sanitaire (ECS) et la cuisson en appliquant un coefficient constant par tête, ce qui peut se révéler loin de la réalité. Ces auteurs émettent par ailleurs l'hypothèse que la gestion temporelle et spatiale (différenciée par pièce) du chauffage par les habitants peut influencer fortement les consommations de chauffage.
- 14 L'étude de De Meester et De Herde (2012) ne porte pas sur des consommations observées. Elle s'est intéressée, à l'aide d'un modèle, à l'impact du comportement des habitants sur les consommations de chauffage en considérant trois facteurs principaux : le nombre d'occupants, la gestion du système de chauffage et la gestion de l'espace chauffé. À

travers des simulations réalisées sur une seule maison prenant en compte deux modes d'occupation, quatre types de consignes de chauffage, deux modes de gestion de l'espace chauffé et sept niveaux différents d'isolation, les chercheurs ont montré qu'une baisse de la température de consigne de quelques degrés durant une période d'inoccupation (journée) peut diminuer d'environ 10 % (voire plus en fonction de l'isolation du bâtiment) les consommations annuelles de chauffage. Ils ont également établi que les consommations de chauffage sont d'autant plus influencées par le mode de vie des occupants que le bâtiment est mieux isolé, notamment à travers les gains internes. Les facteurs influents mis en évidence ici rejoignent ainsi ceux de l'étude précédente.

- 15 Le premier enseignement que l'on peut tirer de ces travaux concerne la difficulté à conclure de ceux qui ont été menés sur de grands échantillons et invite à se restreindre à des groupes homogènes de logements. Ce point nous confortera dans notre choix de nous centrer sur un petit nombre de maisons similaires. Il apparaît ensuite que pratiquement toutes ces études s'intéressent aux consommations énergétiques d'une année entière, probablement en partie pour obtenir une vision globale sur une saison de chauffe, en partie pour des questions d'accès aux données. Ce n'est pas l'option que nous avons retenue, confortés par la suggestion de Morley et Hazas (2011) sur la nécessité de s'orienter vers des données détaillées à un micro-niveau.
- 16 Au niveau méthodologique, l'étude bibliographique a également montré la difficulté à reproduire la consommation réelle à partir des modèles, et la nécessité de procéder à des simulations incrémentales, ou variantes, à la manière de De Meester et De Herde, c'est-à-dire des simulations faisant varier les paramètres chacun leur tour d'un petit montant à partir d'un scénario de référence, pour isoler l'effet de chacun.
- 17 En ce qui concerne les résultats, les travaux consultés mettent en évidence d'importantes disparités de consommation d'énergie entre logements « homogènes », le degré d'homogénéité variant d'une étude à l'autre. Différentes variables explicatives sont identifiées pour expliquer les écarts de consommation entre logements aux caractéristiques propres voisines (même type collectif/individuel, même taille). Nous les regroupons en trois catégories :
 - les variables que l'on qualifiera d'environnementales : données météorologiques de température et d'ensoleillement, orientation des logements et ombres portées, régime des vents ;
 - les variables techniques : nature de l'isolation extérieure, vitrages, équipement de chauffage et système de ventilation ;
 - les variables qu'on appellera sociodémographiques et comportementales : nombre d'habitants, leur taux de présence, utilisation des équipements électriques, gestion temporelle et spatiale du chauffage, pratiques d'aération.

2. Une étude originale d'un échantillon restreint et homogène de logements, combinant analyse descriptive sur courte période et modélisation : les aspects méthodologiques

2.1. Un échantillon restreint et homogène de logements

- 18 Pour notre part, nous avons mené une étude sur une copropriété de dix maisons individuelles de 83 m², similaires, alignées (dont quatre sont jumelées deux à deux), construites en 1988 dans l'agglomération grenobloise. Elles sont occupées par leurs propriétaires et chauffées au gaz. Ces maisons ont toutes la même configuration architecturale, la même orientation sud-est (sauf deux qui sont inversées) et une isolation identique des murs, ce qui limite le nombre de paramètres susceptibles d'expliquer des éventuelles différences de consommation d'un logement à l'autre. Cette copropriété fait partie des 57 % de résidences principales qui sont des maisons individuelles, des 58 % qui sont occupées par leurs propriétaires, des 42 % chauffées au gaz et des 9 % construites dans les années 1980 (ADEME, 2016). Elle appartient à la catégorie des maisons individuelles de 70 à 100 m², dont la consommation énergétique annuelle moyenne s'élève à 1,567 tep/an¹², soit 18 280 kWh (source).

2.2. Une étude sociotechnique resserrée dans le temps

- 19 Une analyse sur longue période avait préalablement permis d'identifier d'importantes disparités sur les consommations annuelles des familles : en 2010/2011, celle de gaz allait de 9 022 à 13 280 kWh, et celle de l'ensemble gaz-électricité de 13 280 à 20 039 kWh¹³, soit un facteur 1,5. Mais les difficultés d'analyse mises en évidence lors de la revue de littérature sont vite apparues : faute d'informations précises sur les usages sur longue période, il s'avérait difficile d'isoler la part du chauffage dans les consommations annuelles de gaz, et impossible de quantifier l'effet des pratiques des occupants sur ces consommations.
- 20 C'est pourquoi nous avons opté pour une étude empirique de type sociotechnique sur courte période qui ne vise pas à expliquer les consommations annuelles, mais à identifier plus précisément les facteurs explicatifs des consommations relevées sur cette période d'étude. Nous avons donc observé le fonctionnement de ces logements sur une période hivernale de 48 heures à partir de deux types d'informations : des relevés de consommation effectués trois jours de suite à heures fixes en février 2015, et les réponses à un questionnaire distribué aux habitants le premier jour et récupéré dans la semaine. On peut supposer que cette échelle de temps très réduite associée à des questions très précises a permis d'obtenir des informations au plus près de la réalité.

2.3. Le recueil d'informations : mesures et questionnaire

- 21 Les compteurs de gaz des dix maisons ont été relevés le mardi 24, le mercredi 25 et le jeudi 26 février 2015 à 19 heures, de manière à pouvoir évaluer les consommations sur deux journées complètes successives pendant une semaine froide. Les températures extérieures relevées par la station météorologique de Saint-Martin-d'Hères toute proche

sont, pour le minimum des deux journées, respectivement de 3 et 1 °C, et pour le maximum de 8 et 11 °C. Le temps était nuageux, le vent faible. Les données de consommation de gaz sont exprimées en mètres cubes.

- 22 Par ailleurs, un questionnaire détaillé a été rédigé à l'attention des habitants de la copropriété. Composé de deux parties distinctes, il a permis dans un premier temps de mettre à jour la base de données concernant les spécificités techniques de chaque maison, notamment en cas de remplacement du matériel chauffant ou isolant (nouvelle chaudière, double vitrage...) ou d'un réaménagement de l'habitation (aménagement des combles notamment). La seconde partie du questionnaire concernait les caractéristiques sociodémographiques et comportementales des usagers pendant la période des relevés : taux d'occupation, consigne de température intérieure du thermostat centralisé pour le chauffage, usages eau chaude (douches et bains) et usage cuisson. Les réponses sur les autres usages du gaz ont permis d'évaluer au mieux l'énergie consacrée exclusivement au chauffage, celles sur le mode d'occupation du logement et les consignes de température visaient à quantifier leur impact respectif sur la consommation de chauffage.

2.4. Détermination de la consommation de gaz pour le chauffage

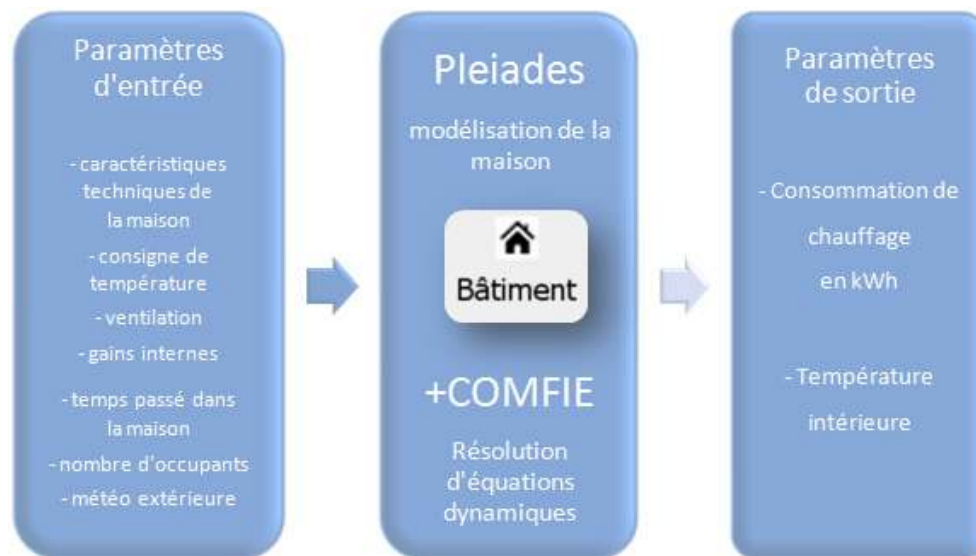
- 23 Une difficulté bien connue, relevée dans la littérature, provient de ce que les relevés de compteurs apportent une connaissance globale de la consommation de gaz, et non par usage. Audenaert *et al.* (2011) montraient que l'utilisation de coefficients standard de consommation par tête pour l'ECS et la cuisson ne permet pas de passer de façon satisfaisante de la consommation globale à la consommation de chauffage. Nous présentons ici les moyens mobilisés pour évaluer le plus précisément possible la consommation de gaz pour le chauffage durant les deux jours d'étude, ce qui constitue en soi un apport important de notre travail.
- 24 La consommation de gaz pour l'ECS a été estimée à partir d'une évaluation du nombre de litres d'eau chaude utilisés pour les douches et bains, et de leur température. La méthode s'est basée au maximum sur les réponses aux questionnaires, et elle est de ce fait très spécifique. Lorsque les informations manquaient, les hypothèses et estimations standard répertoriées dans le tableau en annexe ont été utilisées ; ce tableau reprend aussi les valeurs des constantes de conversion utilisées. À cela il faut ajouter la consommation d'eau chaude additionnelle – l'eau que l'on utilise quotidiennement pour la vaisselle, se laver les mains ou les dents – qui est couramment estimée à 7 litres par jour et par personne à une température de 35 °C. Une fois la quantité d'eau utilisée connue, le nombre de litres d'eau chaude consommé en sortie de chaudière est déduit (à une température de 60 °C, d'après le constructeur des chaudières) ainsi que l'énergie que la chaudière doit fournir pour faire passer cette quantité d'eau de la température de l'eau de ville (8,2 °C à Grenoble) à la température requise. La consommation de gaz nécessitée s'en est déduite, compte tenu de son pouvoir calorifique.
- 25 Lorsque le gaz était aussi utilisé pour la cuisine, la consommation correspondante a été estimée à partir des temps de cuisson donnés par chaque foyer, compte tenu d'une puissance moyenne des feux de 5 kW (données constructeurs) et d'un rendement moyen des brûleurs domestiques de 58 %.
- 26 La consommation de gaz relative au chauffage a enfin été obtenue en soustrayant aux valeurs relevées aux compteurs – converties en kWh au moyen du coefficient local de

conversion – les consommations de gaz estimées pour l'ECS et la cuisson. C'est cette consommation qui fait l'objet d'une étude descriptive dans la suite.

2.5. La mise en œuvre d'une modélisation numérique

- 27 En complément de l'analyse descriptive des résultats obtenus, et pour tenter de mieux comprendre l'impact respectif des différents facteurs explicatifs de la consommation, l'ensemble des dix maisons a été modélisé sur le logiciel de modélisation thermique dynamique Pleiades+COMFIE (P+C).
- 28 Ce logiciel, édité par IZUBA énergies, permet de résoudre numériquement des problèmes complexes de thermique. Une fois les maisons finement modélisées dans l'interface P+C, l'utilisateur n'a qu'à décrire des scénarios de fonctionnement selon les paramètres auxquels il s'intéresse. L'outil de simulation dynamique Comfie résout alors le système d'équations différentielles temporelles et spatiales décrivant l'ensemble des zones, avec un pas horaire, et simule la consommation de chaque logement pour les paramètres d'entrée considérés (figure 1).

Figure 1. Schéma de principe du logiciel Pleiades+COMFIE (P+C)



- 29 Pour la collecte des données, nous avons bénéficié de l'accès aux données météo locales, aux caractéristiques d'ensemble fournies par le constructeur et vérifiées sur place (architecture, isolation des murs) et de la collaboration des propriétaires qui nous ont informés des modifications apportées aux logements (changement de fenêtres, de chaudière et isolation des combles) et sur leur comportement les jours considérés, en répondant au questionnaire. Nous avons notamment pu rassembler des données précises à même d'alimenter une modélisation fine de la copropriété sur P+C (Figure 2) Il est à noter que l'orientation générale de la copropriété est est/sud-est tandis que les maisons 2 et 4, à droite sur le schéma, sont avancées et « retournées » vers le nord-ouest.

Figure 2. La copropriété modélisée



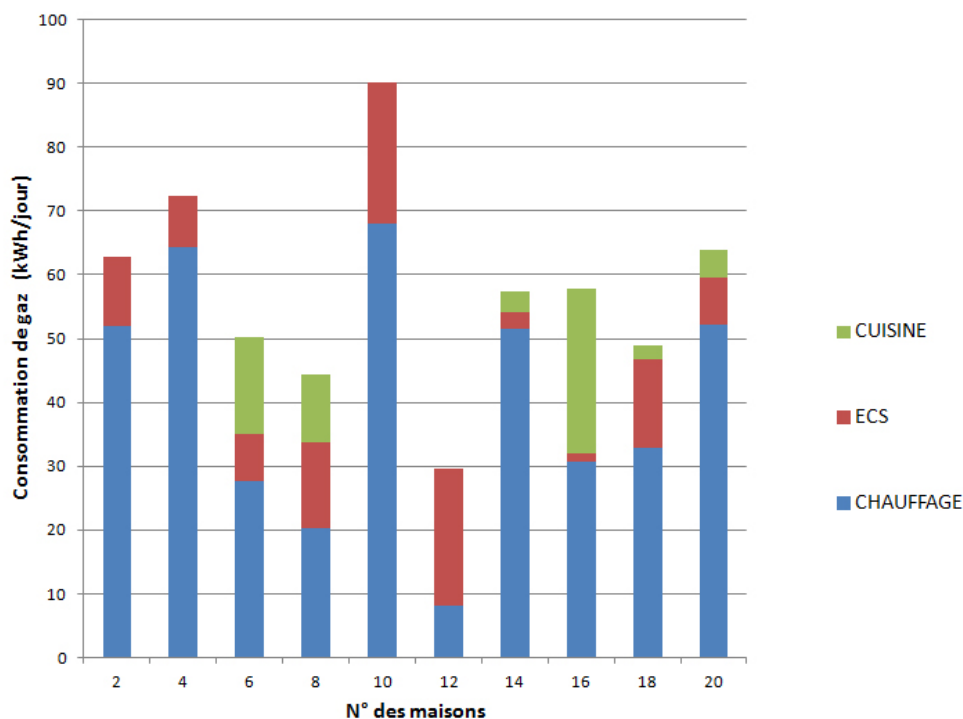
- 30 Deux types de simulations ont ensuite été réalisées sur le logiciel. Nous avons procédé de manière classique, comme le suggèrent Yan *et al.* (2015).
- 31 Un scénario de référence vise à évaluer la consommation de chauffage théorique de ces habitations. Ensuite, l'étude de l'effet de chacun des paramètres identifiés précédemment est menée par le biais de la réalisation d'une ou plusieurs variantes, correspondant à la variation de ce seul paramètre, tous les autres étant fixés à leur valeur d'origine. L'effet du paramètre considéré s'obtient en comparant la consommation de chauffage de la variante à celle du scénario de référence.
- 32 La combinaison de ces deux méthodes d'analyse, descriptive et modélisée, a ainsi permis de tirer des enseignements utiles quant à la compréhension des différents facteurs influençant la consommation d'énergie des maisons étudiées.

3. Un résultat important : de fortes disparités de consommations de chauffage entre les maisons

3.1. Un facteur 3,4 entre les consommations extrêmes

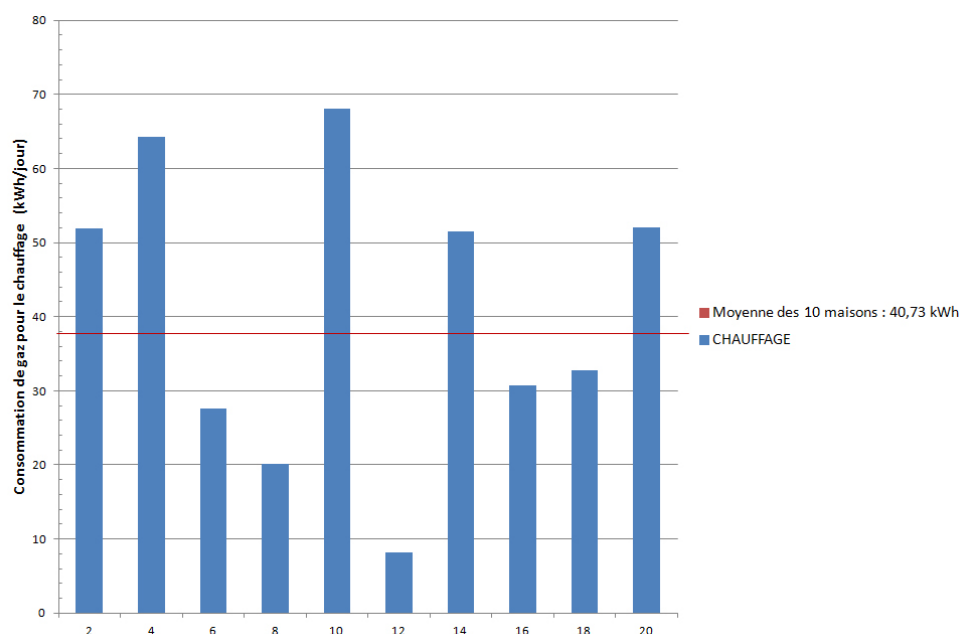
- 33 Les dix maisons sont identifiées de 2 à 20, par leur adresse. Le constat qui s'impose à la lecture des résultats (Figure 3) est d'abord celui d'une très forte disparité des consommations totales de gaz entre les familles, celle-ci allant du simple (30 kWh/jour) au triple (90 kWh), confirmant les observations effectuées sur les consommations annuelles. Paradoxalement, ce sont les familles qui n'utilisent pas le gaz pour la cuisine qui ont la plus forte consommation totale. Celles qui l'utilisent en consomment de 2 à plus de 20 kWh. Les consommations pour l'ECS présentent une amplitude encore plus importante, allant de 1 à 22 kWh : pour certaines familles, ce n'était pas le jour des douches. Pour ces postes ECS et cuisson, les fluctuations sont donc extrêmement importantes d'un foyer à l'autre, pouvant aller jusqu'à un facteur 20.

Figure 3. Consommation de gaz par logement (kWh/jour)



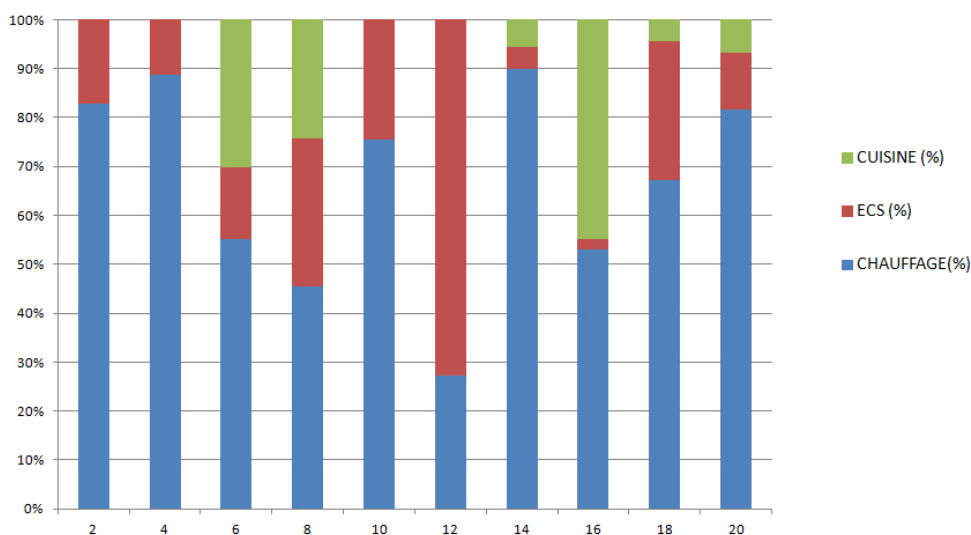
- 34 Concernant le chauffage (Figure 4), la moyenne s'élève à 40,7 kWh, mais on note le cas d'une consommation particulièrement faible, de 8 kWh pour la maison 12 chauffée essentiellement au bois. Les autres consomment entre 20 et 68 kWh, soit une amplitude de 3,4 pour la consommation de chauffage, plus importante encore que celle de la consommation d'ensemble. On rejoint ici les résultats présentés par Morley et Hazas (2011). Il est à noter que deux maisons jumelées (les 16 et 18) ont une consommation proche, inférieure à la moyenne, tandis que les deux autres (les 8 et 10) ont au contraire des consommations extrêmes. Les maisons 2 et 4, qui ont une orientation inversée, plus défavorable, se situent dans la fourchette haute des consommations.

Figure 4. Consommation de gaz pour le chauffage (kWh/jour)



- 35 Finalement, si l'on excepte la maison chauffée au bois, le chauffage peut représenter de 45 % à 90 % de la consommation de gaz (Figure 5) : un facteur 2 à ne pas négliger dans les analyses globales.

Figure 5. Part des usages du gaz par logement (en %)



3.2. Des consommations simulées éloignées de la réalité

- 36 Comme l'ont constaté plusieurs auteurs cités précédemment, il est impossible de reproduire ou prédire la réalité avec un modèle, pour de multiples raisons. Nous en faisons une démonstration supplémentaire. Un scénario de référence a été établi avec le modèle P+C, correspondant à une simulation réalisée avec des valeurs d'entrée conformes à celles des jours des relevés de compteurs. Pour les besoins de la comparaison avec les

valeurs simulées par le modèle, les données de consommation mesurées sur deux jours ont été extrapolées à des valeurs hebdomadaires.

- 37 On observe (Tableau 1) que, globalement, les valeurs simulées sur le logiciel sont deux fois moins élevées que celles évaluées à partir des relevés compteurs. Autrement dit, les consommations réelles estimées se révèlent être le double de celles attendues à partir des simulations.

Tableau 1. Consommation pour le chauffage simulée *versus* consommation réelle (en kWh pour une semaine)

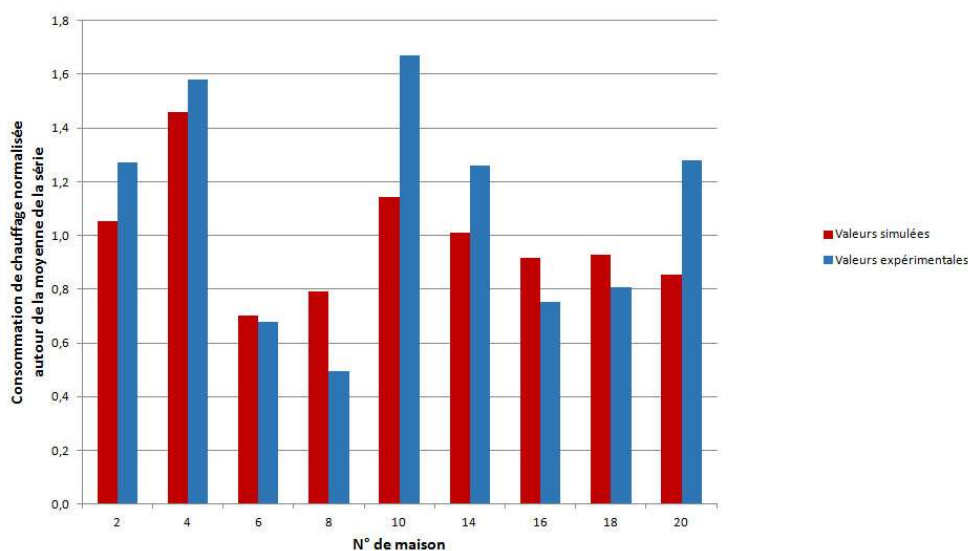
Maison	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	moyenne
<i>relevés</i>	364	452	193	141	477	57	360	215	231	365	285,5
<i>simulation</i>	153	212	102	115	166	166	147	133	135	124	145,3

- 38 Nous avons identifié trois types d'explications possibles à ce constat désagréable qui rejoint ceux faits dans la littérature :
- une modélisation imparfaite des logements sur le logiciel (impossibilité de représenter le toit –utilisation du toit standard – et d'implanter des fenêtres de toit) ;
 - une défaillance de certaines valeurs d'entrée (impossibilité de préciser les apports internes précis et les flux de ventilation (scénario standard choisi), différence de météo entre la réalité et celle générée par le logiciel (le logiciel crée son propre scénario de météo journalier à partir des données mensuelles) ;
 - une modélisation propre de la dynamique des transferts thermiques par le logiciel ne correspondant pas parfaitement au comportement des logements, l'outil étant conçu pour effectuer des simulations sur une durée plus longue que celle étudiée ici.
- 39 Des études complémentaires, à la manière de celle de Raynaud (2014), seraient nécessaires pour identifier les causes dominantes de divergence.

3.3. Une bonne correspondance entre données normalisées et réalité

- 40 Pour pallier la difficulté précédente, nous avons mis en œuvre une procédure classique de normalisation en divisant chacune des valeurs par la moyenne des valeurs du groupe auquel elle appartient (simulé ou relevé). Avec ces nouvelles valeurs dites normalisées, nous pouvons comparer les résultats des deux groupes selon une même et unique échelle.

Figure 6. Comparaison des consommations de chauffage normalisées aux valeurs expérimentales



- 41 Nous observons (Figure 6) que, si l'on met à part la maison 12 chauffée principalement au bois, les deux ensembles de valeurs suivent la même dynamique sans toutefois se superposer. Ainsi le facteur 3,4 entre les consommations réelles extrêmes n'est-il qu'un facteur 2,1 pour le modèle. Dans la suite, le modèle sera utilisé « en variante » pour étudier l'effet de la variation d'un seul paramètre à la fois, à partir du scénario de référence précédent. On peut donc émettre l'hypothèse que ses résultats auront tendance à sous-estimer l'amplitude des effets, par rapport à ce qu'ils seraient dans la réalité.

4. Les enseignements de l'analyse descriptive des consommations de chauffage

- 42 Il s'agit ici de mettre en relation les écarts de consommation de chauffage entre les différents foyers avec les variables explicatives identifiées dans la littérature. L'analyse porte sur les consommations estimées à partir des relevés de compteurs. Compte tenu de la particularité de la maison 12, un chauffage essentiellement au bois, nous l'avons exclue de l'étude qui suit pour éviter que sa spécificité ne biaise l'analyse.

4.1. Une analyse qui sera centrée sur les variables sociodémographiques et comportementales

- 43 L'homogénéité de l'échantillon visait à limiter le nombre de variables explicatives possibles. Les maisons étant similaires, regroupées en un même lieu, et alignées, la plupart des variables environnementales et techniques (température extérieure, ensoleillement, orientation, isolation des murs...) prennent une valeur identique pour toutes.
- 44 Seule l'orientation de deux maisons (les 2 et 4) est inversée par rapport à l'ensemble qui est orienté sud-est, ce qui peut expliquer que leur consommation se situe au-dessus de la moyenne. La question des ombres portées ne peut faire l'objet d'une étude descriptive, elle sera abordée par la suite. Par ailleurs, trois maisons ont fait l'objet d'un

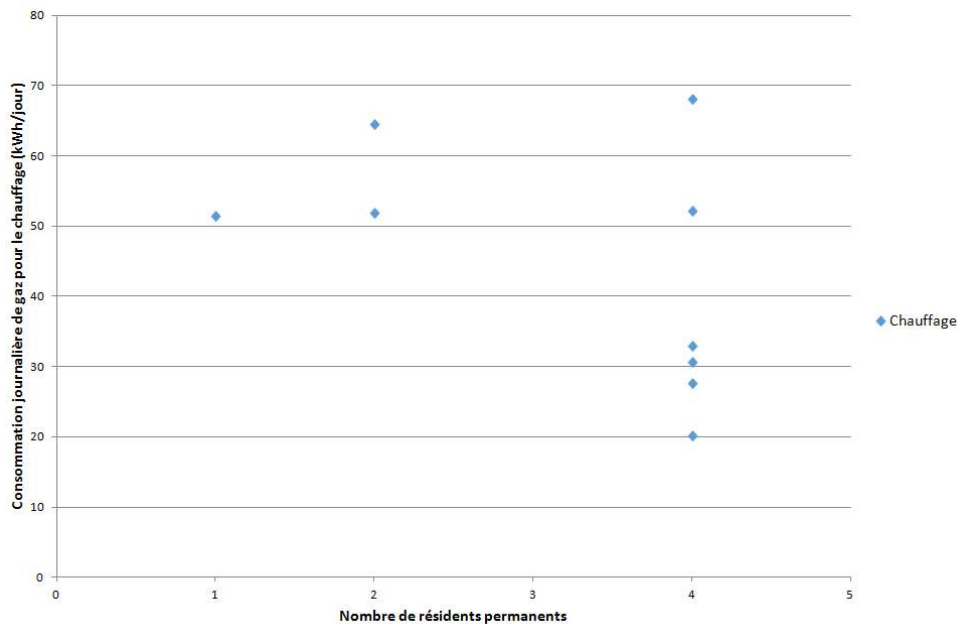
investissement dans des fenêtres plus performantes que celles d'origine, les 14,18 et 20. Deux d'entre elles consomment cependant plus que la moyenne.

- 45 Il reste donc à identifier le rôle possible des variables que l'on a qualifiées de sociodémographiques et comportementales : nombre d'habitants, taux de présence, utilisation des équipements électriques, gestion temporelle et spatiale du chauffage, pratiques d'aération.

4.2. Une absence d'influence du nombre de résidents

- 46 Lorsque l'on représente la consommation de gaz de chauffage en fonction du nombre d'habitants de chacun des foyers (Figure 7), on n'observe pas de corrélation, mais une verticale au-dessus du 4 – chiffre qui représente le nombre d'occupants de six des logements –, ce qui traduit une forte dispersion des consommations pour un même nombre d'habitants.

Figure 7. Consommation de gaz de chauffage et nombre d'habitants

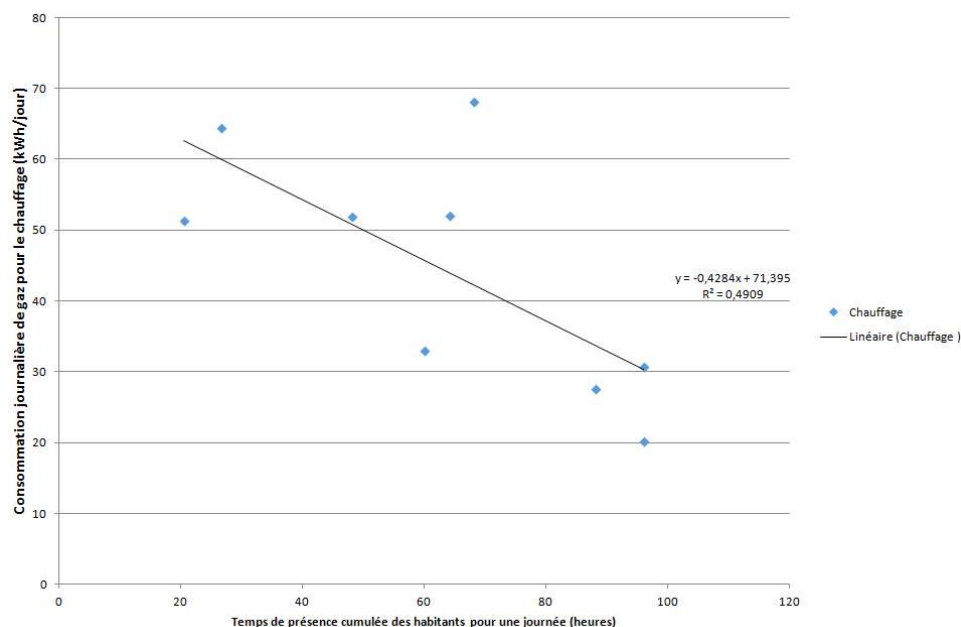


- 47 Ce graphique confirme que, dans notre étude, le nombre de résidents permanents n'est pas un facteur influent. Il s'agit de 10 maisons qui ont les mêmes caractéristiques d'ensemble, et surtout la même surface à chauffer (83 m²) – dans le cas où les combles sont aménagés, le chauffage se fait par des radiateurs électriques et ne fait pas appel au chauffage central au gaz. Ainsi, les volumes à chauffer sont identiques et le nombre de résidents n'apparaît pas discriminant.

4.3. Une influence contre-intuitive du temps de présence

- 48 Nous avons aussi interrogé les habitants sur leur présence au sein de leur logement pendant la durée des mesures, ce qui nous a permis de calculer le temps de présence cumulé des habitants de chaque foyer en additionnant les temps de présence de chacun des membres d'une même famille.

Figure 8. Consommation de gaz de chauffage et temps de présence des habitants

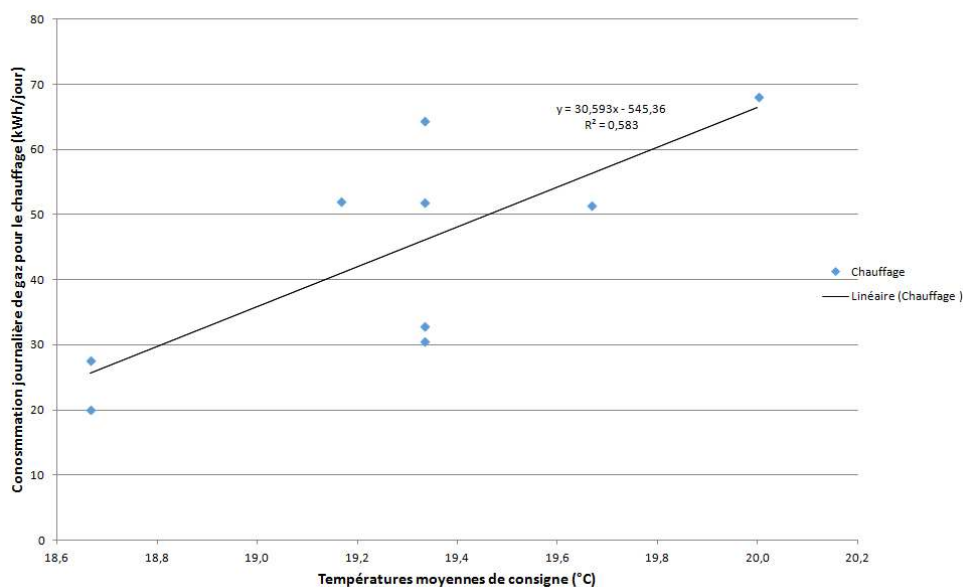


- 49 Le résultat obtenu (Figure 8) semble confirmer une certaine influence du temps de présence sur la consommation de chauffage qui pourrait paraître contre-intuitive *a priori*. En effet, selon la courbe de tendance obtenue, avec une corrélation de qualité moyenne, 10 heures de présence supplémentaire cumulée diminueraient de 4,3 kWh la consommation de chauffage, soit une baisse d'environ 10 %. Il ne s'agit pas là d'un paramètre essentiel, mais son influence semble bien réelle sur la consommation ; elle peut être reliée à l'ensemble des apports thermiques fournis par les habitants et les équipements qu'ils utilisent, pour lesquels nous n'avons pas d'information détaillée.

4.4. Une influence déterminante des consignes de thermostat : la température de consigne confirmée comme facteur explicatif essentiel de la consommation

- 50 Les logements sont tous équipés d'un thermostat d'ambiance dans la pièce principale. Nous utilisons les consignes de températures annoncées par les occupants pour le jour et la nuit, pondérées par leur durée de fonctionnement, soit 16 heures le jour et 8 heures la nuit, personne n'ayant annoncé avoir modulé la consigne de température de jour en fonction de l'occupation des locaux.

Figure 9. Consommation de gaz de chauffage et consigne des thermostats



- 51 Il apparaît ainsi (Figure 9) qu'à deux exceptions près les logements sont gérés par une consigne de température moyenne supérieure aux 19 °C recommandés pouvant aller jusqu'à 20 °C. En mettant ces consignes en relation avec la consommation de gaz pour le chauffage, il se dégage une tendance notable que nous pouvons matérialiser, en première approximation, par une droite ($R^2 = 0,58$). Elle traduit que 1 °C de consigne pondérée jour-nuit en plus au-delà de 19 °C induit une augmentation tendancielle de consommation de 30,6 kWh/jour/habitation, soit presque 3 m³ de gaz, et donc plus du doublement de la consommation par rapport à la base de 20 kWh ! On est loin des 7 % supplémentaires par degré habituellement annoncés.
- 52 À la lumière de ce graphique, la consigne de température semble donc être un facteur déterminant dont l'influence est largement sous-estimée. Il convient toutefois de rester prudent dans l'utilisation des valeurs précédentes, compte tenu du faible nombre de points d'observation, d'un raisonnement qui n'est pas totalement « toutes choses égales par ailleurs », même si les maisons sont semblables, et de l'existence d'une forte variabilité autour de la tendance pour la consigne moyenne de 19,3 °C.
- 53 Enfin, les deux dernières variables évoquées, la gestion spatiale du chauffage et les pratiques d'aération, ne peuvent être mises en cause ici puisque les maisons disposent toutes d'un thermostat centralisé, que les habitants ont déclaré ne pas jouer sur le réglage individuel des radiateurs et que l'aération est effectuée par une ventilation mécanique contrôlée (VMC) à laquelle les habitants ne touchent pas.

5. L'apport de la modélisation à la compréhension des facteurs explicatifs de la consommation

- 54 Au-delà des simulations d'ensemble, la modélisation permet de quantifier l'effet particulier de chacun des paramètres identifiés en réalisant des variantes, c'est-à-dire en ne changeant qu'un seul paramètre à la fois à partir du scénario de référence. Nous avons

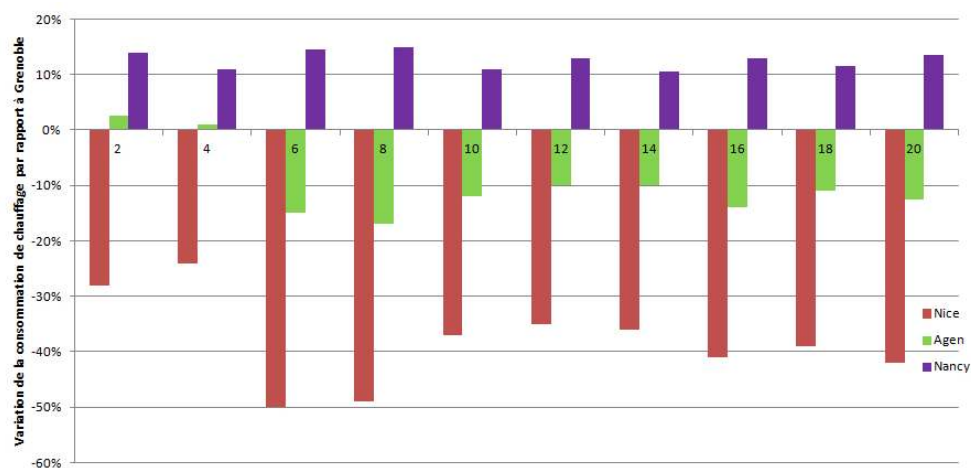
réalisé de telles variantes sur toutes les catégories de paramètres : environnementaux, techniques et sociodémographiques/ comportementaux.

5.1. L'effet des paramètres environnementaux : impact essentiel des conditions météorologiques et importance de l'orientation

- 55 Ces paramètres regroupent les conditions météorologiques de température, d'ensoleillement, de régime des vents, l'orientation des logements ainsi que l'impact des ombres portées sur les maisons par leur environnement proche.

5.1.1. Les conditions météorologiques : un impact inévitable

Figure 10. Influence des conditions météorologiques



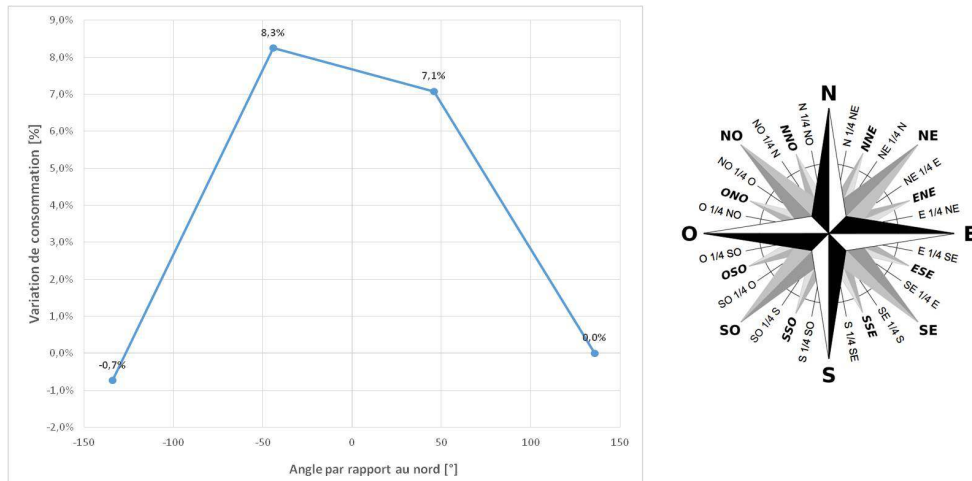
- 56 Nous avons testé quatre scénarios différents pendant une semaine de février correspondant à quatre villes françaises – tous déjà implantés dans le logiciel, excepté celui de Grenoble qui est notre scénario de référence. À Nancy, l'ensoleillement est proche de celui de Grenoble, avec des températures très proches également en journée, mais avec des nuits bien plus fraîches. À Agen, les journées sont plus ensoleillées, avec des températures en journée supérieures d'environ 2 °C, mais inférieures la nuit de 2 à 4 °C. Et à Nice, l'ensoleillement est légèrement supérieur à celui de Grenoble et les températures sont supérieures de jour comme de nuit de 4 °C en moyenne.
- 57 Il apparaît (Figure 10) que la consommation d'une même maison pourrait être diminuée jusqu'à 50 % si elle était située à Nice, ou augmentée jusqu'à 15 % si elle avait été construite à Nancy.
- 58 Le cas d' Agen est très intéressant. On remarque que les maisons 2 et 4 ont une très légère augmentation de consommation de chauffage, alors que les huit autres maisons ont une diminution de consommation d'environ 10 %. L'explication de ces résultats vient de l'influence du soleil. En effet, la température moyenne entre Agen et Grenoble est quasiment identique, mais pas l'ensoleillement. Or les maisons 2 et 4, du fait de leur position et de leur orientation inversée (vers le nord), bénéficient moins des apports solaires. Cela montre bien que le rayonnement du soleil possède une réelle influence sur la consommation de chauffage, et que la température extérieure n'est donc pas l'unique variable météorologique à analyser. On retrouve le même phénomène à Nice, avec une

moins consommation due aux températures supérieures. Ce point va être confirmé au paragraphe suivant.

5.1.2. Orientation des maisons : l'intérêt des apports solaires

- 59 L'orientation initiale des maisons est de 134 par rapport au nord, soit une orientation sud-est (sauf deux qui sont « retournées »). Elles forment une rangée parallèle. Nous avons fait varier de +/-90° cette orientation afin d'observer l'influence du rayonnement reçu sur la consommation totale de la copropriété.

Figure 11. Effet de l'orientation des maisons sur la consommation



- 60 Sans surprise, on constate (Figure 11) qu'une orientation des maisons vers le nord a un impact sur leur consommation de chauffage, qui augmente entre 7 et 8 %. Cela s'explique par un rayonnement moins important reçu. Si ce paramètre ne peut être modifié pour des maisons déjà construites, son importance est bien connue et généralement prise en compte lors des nouvelles constructions. De surcroît, il est également possible d'installer davantage de fenêtres sur le côté sud pour récupérer de la chaleur naturelle l'après-midi.

5.1.3. Faible effet des ombres portées

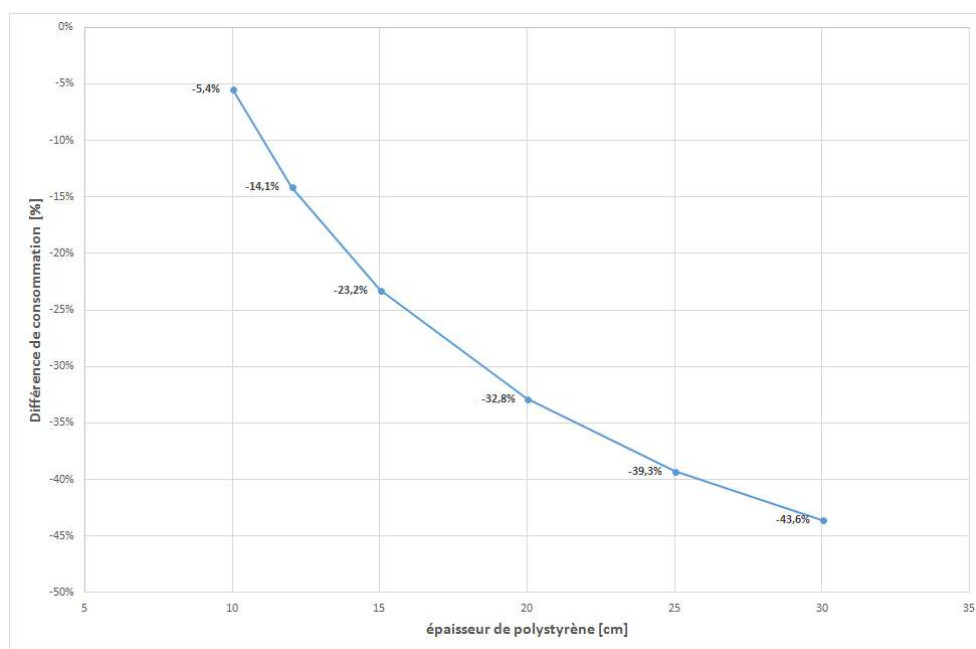
- 61 En effectuant deux simulations, l'une de l'ensemble de la copropriété, l'autre en additionnant la consommation des maisons prises individuellement, on fait apparaître une influence moyenne de 2,3 % des ombres sur la consommation de chauffage, car elles font varier le rayonnement solaire direct reçu par les maisons. Néanmoins, cette influence demeure faible par rapport aux autres paramètres analysés précédemment.
- 62 On remarque néanmoins que cette diminution est plus importante pour les maisons situées au milieu de la copropriété (jusqu'à -4,3 %) que pour les maisons situées aux extrémités (-0,8 % pour celle située à l'extrémité ouest).

5.2. L'effet des paramètres techniques : de l'intérêt de changer ses fenêtres

- 63 Bien que l'influence des paramètres techniques soit bien connue et démontrée dans de nombreuses études, il reste intéressant d'en examiner certains dans notre cas. Les

maisons étant toutes équipées d'une VMC sur laquelle les occupants n'interviennent pas, l'effet du paramètre « système de ventilation », pourtant important, n'a pas été étudié. Il en va de même du rôle des équipements de chauffage, les chaudières ayant toutes été changées assez récemment.

Figure 12. Influence de l'isolation des murs extérieurs



5.2.1. Isolation extérieure des murs : un gain au rendement décroissant

- 64 Les maisons étudiées possèdent une isolation par l'intérieur de 10 cm d'épaisseur, à base de polystyrène. Nous avons testé l'influence qu'aurait une augmentation de l'isolation des murs extérieurs. Nous constatons (Figure 12) une diminution de la consommation de chauffage attendue de -4 % pour une augmentation de 1 cm de l'épaisseur de polystyrène, -10 % pour une augmentation de 3 cm, et -17 % pour 6 cm d'épaisseur supplémentaire.
- 65 On obtient un autre résultat très intéressant. La relation n'est pas linéaire mais de forme hyperbolique : il n'est plus intéressant d'augmenter l'épaisseur d'isolant sur les parois extérieures au-delà d'un certain palier. En effet, passer de 10 à 15 cm d'isolant permet d'effectuer des économies d'énergie de 18 %, alors que passer de 25 à 30 cm ne fait diminuer que de 4,3 % la consommation de chauffage.

5.2.2. Fenêtres : des gains potentiels élevés

- 66 Dans certaines maisons, les baies vitrées, et parfois la porte d'entrée, ont été changées pour renforcer l'isolation. Nous avons analysé l'influence d'un tel changement. Il apparaît très important dans le cas des fenêtres. En effet, celles initialement installées ayant un coefficient de transfert thermique U_w de $2,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ induisent une surconsommation de 44 % par rapport à un double vitrage à argon ($U_w = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$) ou, dit autrement, le changement des fenêtres devrait induire une diminution de 30 % de la consommation. Il apparaît pourtant que les maisons concernées par ce changement (14,18 et 20) ne sont pas les moins consommatrices d'énergie.

5.3. L'effet important des paramètres sociodémographiques et comportementaux

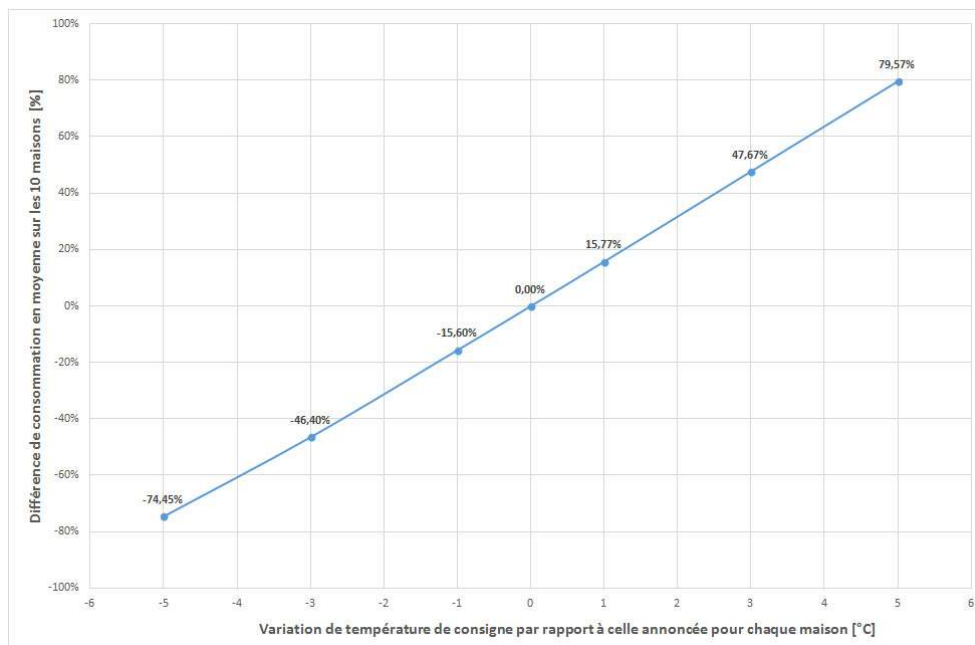
- 67 En effet, l'analyse descriptive a montré qu'une autre catégorie de paramètres joue considérablement. Si elle a exclu le rôle du nombre d'habitants, elle a mis en avant celui du temps de présence et des consignes de température.

5.3.1. Temps de présence des résidents : confirmation de l'effet constaté empiriquement

- 68 Les simulations, qui tiennent compte d'apports thermiques internes liés à la présence des occupants, principalement via l'utilisation des appareils électriques domestiques, montrent une relation linéaire décroissante entre le temps de présence et la consommation de chauffage. Le résultat est très proche de ce qui avait été trouvé pour les données réelles, avec une baisse de 11 % de la consommation de chauffage pour une augmentation de 10 heures de la présence des habitants. Évidemment, ce point est à nuancer si les occupants réduisent la consigne de chauffage en leur absence, ce qui ne semble pas encore être le cas.

5.3.2. Consignes de température interne : plus 15 % de consommation par degré supplémentaire

Figure 13. Influence de la consigne de température



- 69 Nous avons fait varier la température de consigne de +/-5 °C par rapport à la température de consigne indiquée pour chaque logement, puis avons pris la moyenne des variations de consommation obtenues.
- 70 Avec une augmentation de la consommation d'environ 15 % par degré supplémentaire de température de consigne (Figure 13), nous sommes dans la plage annoncée par Parent

(2012) qui évalue cette augmentation entre 8 % et 25 %, donc au-delà des 7 % traditionnellement évoqués. En revanche la conclusion est bien différente de celle obtenue par l'analyse empirique affichant un doublement de la consommation de chauffage par degré de consigne supplémentaire autour de 19 °C.

Conclusion

- 71 L'objectif de notre étude était de contribuer à faire progresser la connaissance des déterminants de la consommation de chauffage dans le bâtiment. Nous sommes partis du constat suivant : la diminution des consommations d'énergie dans le secteur résidentiel et tertiaire est un enjeu majeur de la décennie à venir, mais les calculs thermiques dans le bâtiment sont actuellement réalisés lors de la phase d'élaboration des projets et les résultats sont rarement confrontés à la consommation d'énergie réellement constatée à l'usage.
- 72 Pour éviter les écueils des travaux sur données annuelles évoqués dans notre revue de littérature, notre étude comporte le relevé détaillé sur deux jours d'hiver des consommations de gaz d'une copropriété de 10 maisons similaires, l'exploitation des réponses apportées par les habitants à un questionnaire simultané, l'analyse empirique des résultats et la réalisation de simulations avec un logiciel de calculs thermiques dans le but de parvenir à une meilleure compréhension de l'influence des différents paramètres (environnementaux, techniques, sociodémographiques et comportementaux) sur la consommation réelle. S'il n'a pas été possible de retrouver par la modélisation les valeurs de consommations estimées à partir des relevés de compteurs, le logiciel a toutefois permis d'établir des consommations de chauffage théoriques dont les variations en fonction de certains paramètres ont pu être étudiées.
- 73 Le premier enseignement de ce travail est la confirmation de la disparité des consommations d'un foyer à l'autre, puisqu'on constate un facteur 3,5 entre la maison la plus économe (20 kWh de gaz par jour) et la plus énergivore (70 kWh), sans tenir compte de celle qui est chauffée principalement au bois. L'analyse synthétisée dans le tableau 1 montre, au-delà de l'effet connu des paramètres techniques (isolation extérieure et fenêtres en tête) et environnementaux (surtout l'orientation), la grande importance des facteurs sociodémographiques et comportementaux - à travers principalement la consigne de température des logements, mais aussi le taux de présence. Ces facteurs peuvent atteindre des niveaux d'impact aussi élevés que le facteur météorologique, et nettement plus importants que celui des ombres. Ce résultat, propre à notre échantillon d'une dizaine de maisons aux caractéristiques particulières, renforce celui des études qui mettent en avant l'impact du comportement sur le niveau de consommation, sans toujours le quantifier.

Tableau 2. Synthèse des résultats

Consommation de chauffage au gaz sur 2 jours en février 2015 de 10 maisons de 83 m ² similaires et alignées datant de 1988 à Grenoble			
Moyenne 40,7 kWh par jour – facteur 3,5 entre la plus économe et la plus énergivore (facteur 2,1 selon le modèle P+C qui sous-estime les consommations de moitié environ)			
Variables explicatives	Méthode (V : variante avec le modèle; E : constat empirique)	Effet identifié sur la consommation	
environnementales	données météorologiques de température et d'ensoleillement	V comparaison Grenoble, Nancy, Agen, Nice E Huit maisons sud-est, deux nord-ouest V différentes orientations sur l'ensemble de la copropriété	Nice jusqu'à - 50 %, Nancy jusqu'à + 5 % Les maisons mal orientées consomment plus. Une orientation nord peut augmenter la consommation de 7 à 8 % par rapport à une orientation sud.
	orientation des logements		
	ombres portées	V Comparaison avec les ombres portées dans la copropriété et sans	Influence moyenne : surconsommation de 2,3 %
	régime des vents	identique pour toutes, non étudié	
techniques	architecture	identique pour toutes, Six maisons individuelles, quatre maisons jumelées, E	Les maisons jumelées ont des consommations très dispersées
	nature de l'isolation extérieure	identique pour toutes, V	+ 1 cm d'isolant devrait réduire de 4 % la consommation
	vitrages	3 ont un double vitrage renforcé, V et E	Le double vitrage renforcé devrait réduire la consommation de 30 %, pas en pratique
	équipement de chauffage et système de ventilation	chaudières récentes, VMC analogues. Effet pris en compte dans le scénario de référence, non testé en variante	
sociodémographiques et comportementales	nombre d'habitants	entre 1 et 5, majoritairement 4, E	Effet insignifiant
	taux de présence	entre 20 et 96 heures cumulées, E, V	Effet négatif -10 à 11 % pour 10 heures de présence cumulées suppl.) supposé lié à l'impact calorifique des présents et équipements électriques utilisés
	gestion temporelle et spatiale du chauffage	thermostat centralisé, V et E	+ 1 °C de consigne : V : + 15 % de consommation, E : doublement de la consommation
	pratiques d'aération	VMC pour tous	Non étudié

- 74 Nous avons également montré que les critiques concernant le manque de fiabilité des calculs utilisés pour établir les diagnostics de performance énergétique peuvent aussi s'étendre à ceux qui s'appuient sur des logiciels sophistiqués de simulation dynamique, pour les raisons suggérées. Ce constat, que nous ne sommes pas seuls à opérer, ouvre la perspective de tout un champ de recherches encore embryonnaires centrées sur la validation des modèles et des protocoles d'utilisation à partir de données réelles de consommation. Le développement de l'instrumentation, pour des études de cas, devrait à ce titre permettre de mieux connaître les consommations par poste que ce que ne permettent les réponses des habitants aux questionnaires.
- 75 Au-delà, il faut rester prudents dans l'utilisation qui est faite des simulations thermiques. Après le grand mouvement de réglementation thermique engagé à la fin des années 1970 qui a abouti à la RT 2012, peut-être convient-il maintenant de s'intéresser plus aux consommations réelles qu'aux consommations simulées dans la perspective d'un développement effectif de la maîtrise de l'énergie ? On peut penser qu'une telle orientation aboutirait à des résultats plus satisfaisants et efficaces d'un point de vue économique qu'un simple renforcement de la réglementation sur le bâti existant pour ce type de logements relativement récents, renforcement qui poserait notamment des problèmes de financement considérables (Lagandré, 2010). Relever ce défi invite à prêter plus d'attention à des travaux comme ceux de Han *et al.* (2013) qui donnent la parole aux occupants et s'interrogent sur les moyens de faire évoluer leurs comportements, sans bien sûr négliger les données techniques telles que présentées par exemple par Pineau *et al.* (2013). La complexité de la problématique de la maîtrise de l'énergie dans l'habitat est telle qu'elle constitue une pressante invitation à développer une collaboration fructueuse entre ingénieurs et spécialistes des sciences humaines et sociales. Un formidable défi !

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME, 2015, « Les chiffres clés climat, air et énergie », édition 2014, <http://multimedia.ademe.fr/catalogues/chiffres-cles-climat-air-energie-2014/data/catalogue.pdf>, consulté le 13/11/2016.
- Audenaert A., Briffaerts K., Engels E., 2011, « Practical versus theoretical domestic energy consumption for space heating », *Energy Policy*, n° 39, p. 5219-5228.
- Ayong Le Kama Alain (éd.), 2015, « La rénovation thermique des logements : quels enjeux, quelles solutions ? » *La Revue du CGDD*, janvier, 146 p., <http://www.developpement-durable.gouv.fr/La-renovation-thermique-des.html>, consulté le 13/11/2016.
- Carassus J., Laumonier C., Sesolis B., Janvier D., Wrona R., 2013, « Vivre dans un logement Basse Consommation d'énergie. Une approche socio-éco-technique – Retour d'expérience de six résidences labellisées BBC EFFINERGIE® » (rapport d'étude générale), CERCAL, 41 p., https://www.qualite-logement.org/fileadmin/user_upload/documents/Referentiels_Documentation/Dossiers_Thematiques/Rapport_Synthese_Vivre_dans_un_logement_BBC.pdf, consulté le 13/12/2016.
- Cayla J.-M., Allibe B., Laurent M.-H., 2010, « From practices to behaviors: estimating the impact of household behavior on space heating energy consumption », 2010 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, p. 26-38.
- De Meester T., De Herde A., 2012, *Suburban Areas Favoring Energy efficiency (SAFE) : l'impact du comportement des occupants*, Université catholique de Louvain, mars.
- Denjean M., 2015, « Consommation énergétique des ménages en 2012 », *Observation et statistiques, CGDD*, n° 645, juin, 9 p., http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Chiffres_et_statistiques/2015/chiffres-stats645-conso-energetiques-des-menages2012-juin2015.pdf, consulté le 13/12/2016
- Enertech, 2012, « Grenoble – ZAC de Bonne. Évaluation par mesure des performances énergétiques des 8 bâtiments construits dans le cadre du programme européen Concerto », rapport de synthèse, 145 p., http://www.enertech.fr/pdf/66/zdb_rapport-synthese-vl.pdf, consulté le 13/11/2016.
- Galvin R., 2016, *The Rebound Effect in home Heating, A guide for policymakers and practitioners*, London, Routledge, 144 p.
- Guerra Santin O., 2011, Behavioural Patterns and User Profiles related to energy consumption for heating, *Energy and Buildings*, vol. 43, Issue 10, October, p. 2662-2672.
- Han Q., Nieuwenhijzen I., de Vries B., Blokhuis E., Schaefer W., Huebner G.-M., Cooper J., Jones K., 2013, « Domestic energy-consumption – What role do comfort, habit, and knowledge about the heating system play? », *Energy and Buildings*, vol. 66, p. 626-636.
- INSEE, 2016, « Nombre de résidences principales par type, 1982-2016 », <http://www.insee.fr/fr/themes/series-longues.asp?indicateur=residences-principales-type>, consulté le 13/11/2016.
- Lagandré X., Marchio D., Rivière Ph., Jorio M., 2010, « Quels niveaux de performance pour la rénovation énergétique ? Un détour conceptuel pour éclairer les débats », *Revue de l'Énergie*, n° 598, nov-déc, p. 392-397.

Lin H-W., Hong T., 2013, « On variations of space heating energy use in office buildings », document de travail du Laurence Berkeley Laboratory, may, 22 p., *Journal of Applied Energy*.

Morley J., Hazas M., 2011, « The significance of difference: Understanding variation in household energy consumption », ECEEE Proceedings, p. 2037-2046, [http://www.research.lancs.ac.uk/portal/en/publications/the-significance-of-difference\(cf9392fb-cdc1-4dc1-a2db-e66a02a867f4\).html](http://www.research.lancs.ac.uk/portal/en/publications/the-significance-of-difference(cf9392fb-cdc1-4dc1-a2db-e66a02a867f4).html), consulté le 13/11/2016.

Observatoire de l'énergie, 2004, octobre, « 20 ans de chauffage dans les résidences principales en France de 1982 à 2002 », 7 p., consulté le 13/11/2016.

Parent T., 2012, « Variation de consommation de chauffage et température de consigne, XPAIR », http://conseils.xpair.com/actualite_experts/variation-conso-chauffage.htm, consulté le 13/11/2016.

Pineau D., Rivière Ph., Stabat P., Haung Ph., Archambault V., 2013, « Performance analysis of heating systems for low energy houses », *Energy and Buildings*, vol. 65, p. 45-54.

Raynaud M., 2014, *Évaluation ex post de l'efficacité de solutions de rénovation énergétique en résidentiel*, thèse de doctorat, Mines Paris Tech, <https://tel.archives-ouvertes.fr/pastel-00973727/document>, consulté le 13/12/2016.

Service de l'Observation et des Statistiques du CGDD, 2014, « Bilan énergétique de la France 2013 », <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-densemble/1925/2019/ensemble-bilans-lenergie-france.html>, consulté le 13/11/2016.

Yan D., O'Brien W., Hong T., Feng X., Gunay H.B., Tahmasebi F., Mahdavi A., 2015, « Occupant behavior modeling for building performance simulation: current state and future challenges », *Energy and Buildings*, vol. 107, p. 264-278.

Yu Z., Fung B., Haghighat F., Yoshino H., Morofsky E., 2011, « A systematic procedure to study the influence of occupant behavior on building energy consumption », *Energy and Buildings*, vol. 43, p. 1409-1417.

ANNEXES

Annexe

Différentes constantes utilisées

			Sources
Température moyenne douche	38	C	ADEME : le chauffage, la régulation, l'eau chaude, 2002
Débit moyen douche	17	L/min	
Volume baignoire	225	L	

Température moyenne bain	37	C	
Température moyenne eau ville en février	8,2	C	http://www.tecsol.fr/Lettres/articles/Documents/ECSSolaire1.pdf
Coefficient de conversion m ³ de gaz en kWh	10,77		http://www.grdf.fr/particuliers/services-gaz-en-ligne/coefficient-conversion
Rendement brûleur feu ouvert	58 %		Énergie*, Architecture et Climat, faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI), Université catholique de Louvain (Belgique), réalisé avec le soutien de la Wallonie - DGO4. Disponible sur : http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11390
Nb litres eau chaude additionnelle	7	L/pers (35 ° C)	ADEME : le chauffage, la régulation, l'eau chaude

NOTES

- Données de ce paragraphe : ADEME, 2016, Insee, 2016, Observatoire de l'énergie, 2004, et Service de l'Observation et des Statistiques du CGDD, 2014 et calculs propres.
- Mtep = million de tonnes équivalent pétrole, 1 Mtep = 11,66 térawatt-heures = 11,66 milliards de kWh.
- Son poids était de 79 % en 1982, contre 67 % actuellement du fait de l'augmentation des usages spécifiques de l'électricité.
- Environ huit millions en plus entre 1982 et 2012 (Insee, 2016).
- La consommation annuelle moyenne de chauffage des résidences principales en France s'élevait à près de 2 tep par logement en 1973, 1,5 en 1990, 1,4 en 2002 et 0,95 en 2013 (Observatoire de l'énergie, 2004 et calcul propre). En 2013, elle s'élevait encore à 1,8 tep pour les maisons individuelles (Denjean, 2015).
- Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050, à laquelle la France s'est engagée devant la communauté internationale en 2003.
- Loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000020949548>, consulté le 13/11/2016.
- Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte, <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000031044385&categorieLien=id>, consulté le 13/11/2016.
- La réglementation en vigueur (RT 2012) impose aux logements neufs une limite de consommation primaire de 50 kWh/m²/an (modulable selon les zones climatiques) pour les usages chauffage, eau chaude sanitaire, refroidissement, éclairage, auxiliaires.
- Cerqual, Qualitel Certification, organisme certificateur garantissant la qualité des logements neufs.

11. Par exemple, les températures de consigne de chauffage sont de 19 °C en semaine jusqu'à 10 heures et après 18 heures et le week-end, et de 16 °C entre 10 heures et 18 heures les jours de semaine.

12. Denjean (2015), CGDD (2015).

13. Il est à noter que ces dernières valeurs encadrent la moyenne évoquée précédemment.

RÉSUMÉS

L'objectif de ce travail est d'apporter une contribution à la compréhension des facteurs explicatifs de la consommation réelle de chauffage dans l'habitat, à partir d'une étude de cas concernant la consommation de chauffage de dix maisons individuelles similaires situées près de Grenoble. En s'appuyant sur les relevés des compteurs de gaz lors d'une courte période hivernale, l'exploitation d'un questionnaire proposé aux habitants et une modélisation à l'aide du logiciel Pleiades+COMFIE, nous identifions de fortes disparités de consommation et démontrons l'importance du facteur comportemental, notamment le fait que la température de consigne a un impact direct beaucoup plus élevé que celui estimé habituellement.

The aim of this study is to understand which parameters imply the biggest variations of domestic heating consumption. For this purpose, we first gathered real consumption data thanks to the gas meters of ten nearly similar houses in France on two consecutive days. We also gave to the inhabitants questionnaires about their behaviour and the specificities of their own house. Finally, we modelled the houses using a software called Pleiades+COMFIE, and simulated the heat consumption through different scenarios. The comparison of the results show that there is a big difference among the family heating consumption and that the temperature setpoint has a direct impact on the consumption, which is bigger than the one estimated by previous studies.

INDEX

Mots-clés : chauffage résidentiel, consommation réelle d'énergie, données journalières, simulation thermique, comportement, température de consigne

Keywords : space heating, building actual energy consumption, daily data, thermal simulation, behaviour, temperature setpoint

AUTEUR

GHISLAINE DESTAIS

Ghislaine Destais est ingénieure, docteur en économie de l'énergie et enseignante à Grenoble-INP ENSE³ mais aussi chercheuse associée au laboratoire EDDEN. Elle est spécialisée en comptabilité énergétique, modélisation et analyse des consommations d'énergie, Ghislaine.destais@upmf-grenoble.fr