Les modèles de consommation énergétique des bâtiments Limites et perspectives Rapport final

Jean-Pierre Levy, Fateh Belaid

▶ **To cite this version:**

Jean-Pierre Levy, Fateh Belaid. Les modèles de consommation énergétique des bâtiments Limites et perspectives Rapport final. [Rapport de recherche] Chaire Eco-Conception. 2018, 30 p. hal-02014175

HAL Id: hal-02014175

https://enpc.hal.science/hal-02014175

Submitted on 11 Feb 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Chaire écc-conception

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

VINCI

Les modèles de consommation énergétique des bâtiments
Limites et perspectives

Rapport final

Mars 2018

Jean-Pierre Lévy et Fateh Belaïd

LATTS
LABORATOIRE TECHNIQUES
TERRITOIRES ET SOCIÉTÉS

Sommaire

Introduction 2

1. Sens et utilité de la modélisation de la consommation énergétique 3

2. Les modèles quantitatifs 5

2.1. Les approches statistiques 6

2.2. Les approches d'ingénierie 8

2.3. Une vision transversale des modèles quantitatifs 9

3. Les modèles qualitatifs 11

3.1. Des comportements multiformes 11

3.2. Une pratique sociale 12

4. Trois exemples d'approche transversale 14

4.1. Modéliser les comportements pour mesurer les performances énergétiques des bâtiments 14

4.2. Cycle de vie des ménages et consommations énergétiques 16

4.3. Une cartographie des comportements énergétiques 19

5. Perspectives 22

Références 27

INTRODUCTION

La nécessité d'une transition énergétique pour réduire les effets néfastes d'une consommation dont les impacts sont jugés dévastateurs pour le climat est aujourd'hui reconnue à l'échelle planétaire. Dans ce cadre, le secteur du bâtiment est pointé comme l'un des facteurs majeurs des consommations énergétiques globales et des émissions de gaz à effet de serre. A titre d'exemple et au seul niveau européen, ce secteur est estimé responsable de 36 % des émissions de GES (BPIE, 2013). Face à ce constat, des Directives incitatives internationales sont mises en place afin que les Etats prennent des mesures adéquates pour réhabiliter les immeubles vétustes et construire des bâtiments peu consommateurs d'énergie. Au niveau européen, c'est le cas des Directives sur la Performance Energétique des Bâtiments (DPEB) de 2002 et 2010 ou encore de la Directive sur l'Efficacité Energétique de 2012. Ces Directives sont transposées dans les législations nationales des Etats Membres. Ainsi, la plupart des pays de l'Union (et au-delà) adopte aujourd'hui des mesures financières incitatives ou des réglementations contraignantes pour parvenir à des économies d'énergie substantielles et des réductions de GES significatives à des horizons temporels d'une trentaine voire d'une cinquantaine d'années (BPIE, 2013).

En France, l'observation de l'évolution sectorielle de la consommation fait apparaitre une évolution à la hausse de la consommation énergétique du secteur du bâtiment depuis les trente dernières années, malgré une stagnation dans les années 2010. Celle-ci s'est accrue de près de 20% entre 1990 et 2012. Elle représente 45% des consommations énergétiques totales du pays en 2015. Les bâtiments résidentiels et tertiaires totalisent par ailleurs 20% des émissions en GES de l'ensemble des émissions nationales en 2014 (MEEM, 2017). Ainsi, les Directives européennes ont été traduites dans un cadre réglementaire par la nouvelle loi sur la transition énergétique qui fixe pour objectif, à l'horizon 2050, de réduire de 40% les émissions de GES par rapport à leur niveau de 1990. La France s'est également engagée à baisser de 50% sa consommation totale en énergie en 2030 par rapport au niveau de 2013 (MEEM, 2016). Pour parvenir à ces objectifs, des normes et des labels sont édictés pour améliorer les performances énergétiques des bâtiments tels : Bâtiments à Energie Positive (BEPOS), Haute Qualité Environnementale (HQE) ou Bâtiment Basse Consommation (BBC).

L'élaboration de ces mesures constructives repose généralement sur des modèles intégrant des variables liées aux matériaux, aux orientations, voire parfois au cycle de vie des bâtiments (Peuportier et *al*., 2013). Dans cette logique, les systèmes techniques sont censés résoudre des problèmes environnementaux mesurés et modélisés. Pour autant, malgré le succès de ces modèles dans le milieu opérationnel, la mise en place de normes contraignantes, le développement des énergies alternatives et l'investissement en innovation dans les technologies relatives à l'efficacité énergétique demeurent insuffisants pour régler les problèmes liés à la diminution de la consommation d'énergie des bâtiments. Ainsi, plusieurs travaux sur des

données françaises ou internationales constatent *un gap de la performance énergétique*, c'est-à-dire une différence entre la consommation observée et la consommation d'énergie modélisée (Cayla, 2011 ; Majcen et *al.*, 2013). L'origine de cet écart pourrait provenir de mauvaises estimations dans les modèles, notamment des conditions climatiques ou des caractéristiques thermiques des logements. Mais l'argument principal est celui d'une standardisation de l'usage énergétique du logement dans les modèles qui ne correspond pas à la réalité de leur diversité. Pourtant, même s'ils sont difficiles à estimer, la connaissance, la compréhension et l'intégration des comportements énergétiques des ménages dans des modèles globaux pourraient permettre d'optimiser l'efficacité des Directives et des normes qui en découlent (Ouyang and Hokao, 2009 ; Abrahamse et *al.*, 2007). Il semble en effet difficile dans ce domaine d'ignorer les comportements des ménages, dans la mesure où ils sont des usagers actifs dont on peut mesurer le niveau de consommation, alors que les bâtiments sont des objets énergivores statiques. La loi sur la transition énergétique prend d'ailleurs en compte cet aspect en élaborant des mesures d'information et d'accompagnement afin de sensibiliser les ménages aux économies d'énergie en développant des incitations économiques et fiscales (MEEM, 2016).

Dans ce contexte, ce chapitre s'intéresse aux différents modèles et approches concernant la consommation énergétique des ménages et des immeubles. Notre objectif vise à établir un cadrage global (technique, économique, social, etc.), à apporter un éclairage sur leurs logiques de construction, même s'il apparaît difficile d'effectuer un balayage complet de la littérature scientifique dans ce domaine compte tenu de son foisonnement.

1. SENS ET UTILITE DE LA MODELISATION DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE DES BATIMENTS

La pensée commune associe généralement un modèle à des approches quantitatives. Mais sa vocation n'est pas tant de fournir des algorithmes que de constituer un outil de connaissance susceptible d'apporter une vision simplifiée de la réalité. En quelque sorte une grille de lecture reproductible des processus complexes que l'on étudie. La théorie n'est donc jamais loin de la construction d'un modèle (Varenne, 2010), celui-ci constitue même un médiateur entre la théorie et le « monde réel » (Morgan et Morrison, 1999 ; Sergi, 2014). Tout modèle s'appuie donc *a priori* sur des constructions théoriques traduisant un niveau de connaissance des processus qui, *via* le modèle, seront à la fois validées mais également confrontées à leur propre simplification.

Il y a donc une portée heuristique dans le modèle, mais également une portée pratique et utilitaire. D'où une ambiguïté selon la finalité attribuée à son utilisation. Un modèle peut être une grille de lecture des enchaînements de causalité d'un processus dont on cherche à comprendre le fonctionnement. Dans ce cas de figure, il peut atteindre un niveau de complexité

que l'on n'essaiera pas forcément de réduire en indicateurs ou de numériser au risque d'en réduire la portée explicative. Mais il peut être également un outil de médiation entre le Savoir et le Pouvoir (Sergi, 2014). Il sera alors mis à la disposition d'un projet concret. La numérisation sera alors incontournable, car le modèle devra fournir des indicateurs permettant d'ajuster les choix opérationnels. Le technicien ou le politique en charge de l'opération utilisera ces indicateurs pour : aider à la conception et prédire les performances du projet, les évaluer une fois le projet réalisé, mesurer les écarts entre les performances simulées et les performances réelles.

La modélisation des consommations énergétiques des bâtiments s'inscrit totalement dans ce cadre. Elle peut être une description des enchaînements de causalité qui associent une pratique à un contenant matériel (le bâtiment). Si l'impact de la pratique sur la consommation finale du bâtiment sera *a priori* mesurable, en revanche il sera plus difficile de réduire un comportement social à un indicateur. D'où la difficulté à modéliser numériquement des comportements énergétiques, dont la connaissance est pourtant importante pour comprendre le processus de consommation. En ce sens, et faute de modèles numériques, la question d'une expérimentation de différentes pratiques reste ouverte.

D'un autre côté, lorsque le modèle s'appuie sur des éléments techniques comme par exemple les composantes du bâtiment (matériaux, ouvertures, fenêtres et vitrages, orientation…), l'impact sur la performance énergétique de l'immeuble sera plus aisé à évaluer. Cet impact sera alors directement mesurable à partir des indicateurs produits par le modèle. Dans ce cadre, il constituera un outil d'aide à la décision utile, par exemple pour déterminer les choix constructifs ou les stratégies de gestion des opérateurs.

Dans une construction théorique complète des consommations énergétiques des bâtiments, il n'est donc pas simple d'associer les aspects constructifs et les usages domestiques – si l'on est dans le champ résidentiel – ou des pratiques de bureau – si l'on est dans le champ tertiaire. Peu de modèles associent ces deux dimensions et les approches sont généralement segmentées selon les disciplines des auteurs. Parfois cependant, notamment dans les approches économiques, les modèles de consommation associent des variables sociales à des variables morphologiques sans que pour autant les usages, abordés comme des processus, soient pris en compte.

Le champ de la modélisation des consommations énergétiques des bâtiments est donc vaste, divers et implique de nombreuses disciplines des sciences sociales, de l'ingénierie, de la physique, de l'économie, de l'écologie, et la liste n'est pas exhaustive. Chaque discipline trouve dans cet objet un support à la connaissance d'une dimension de son champ : un fait social, une résistance de matériaux et leur isolation, une construction architecturale, un rapport entre nature et environnement construit… Tous entrent dans le champ environnemental visant à diminuer les consommations à travers la dimension étudiée. Mais les modèles produits ne s'inscrivent

pas nécessairement dans les mêmes perspectives. Certains ont une portée explicative, d'autres sont plus expérimentaux, tandis que les modèles associant expérimentation et explication, usages et conceptions, pratiques et techniques sont plus rares.

Pour tenter d'éclairer sur la façon dont ces modèles sont construits il est possible de s'essayer à des typologies dont on sait qu'elles seront forcément réductrices. Dans un premier temps les modèles peuvent être classés selon des oppositions méthodologiques apparentes.

- Des approches modélisatrices déductives, reposant sur des hypothèses construites à partir des expériences des auteurs ou de la connaissance accumulée dans le champ.
- Des approches modélisatrices inductives, construites à partir d'observations ou d'enquêtes de terrain permettant de mettre en évidence les enchaînements de causalité.

Les premières sont généralement mises en œuvre pour construire des modèles quantitatifs, mathématiques ou statistiques, les secondes permettent de décrire des processus qualitatifs qui n'aboutissent pas forcément à une numérisation (ils sont d'ailleurs qualifiés de déterministes par les physiciens ou les ingénieurs, signifiant ainsi une démarche descriptive plus qu'expérimentale).

Cette première typologie reste cependant très réductrice et trop dichotomique. Nous pouvons tenter de la dépasser en nous attachant à comprendre plus précisément comment sont construits les modèles quantitatifs ou qualitatifs. Dans ce cadre, la littérature scientifique sur les consommations énergétiques mobilise davantage les approches quantitatives que les démarches qualitatives. Ainsi, une étude menée par Benjamin K. Sovacool en 2014 sur la base de 4444 articles sur ce thème, publiés entre 1999 et 2013 par 9549 auteurs dans trois revues de premier plan spécialisées sur l'énergie (*Energy Policy, Electricity Journal, The Electricity Journal*), montre qu'à peine 19,6 % des auteurs ont une formation en sciences sociales. En outre, sur l'ensemble du corpus, 12,6% des articles utilisent des méthodes qualitatives et moins de 5 % des citations concernent des revues en sciences sociales et humaines.

2. LES MODELES QUANTITATIFS

Les approches quantitatives constituent donc l'essentiel de la production scientifique sur la question de la consommation énergétique. Dans leur grande majorité elles visent à construire des modèles permettant de simuler et d'expérimenter la réduction de l'intensité des consommations énergétiques résidentielles et tertiaires, sans nécessairement fournir les éléments explicatifs du processus. On insistera davantage ici sur la dimension domestique qui permet d'interroger la validité des modèles de consommation des bâtiments et la prise ou la non prise en compte des usages dans ces démarches.

2.1. Les approches statistiques

Le premier grand type d'approches quantitatives repose sur les calculs statistiques. Généralement, ils estiment la relation entre l'utilisation finale et la consommation d'énergie, pour déterminer la consommation énergétique de bâtiments représentatifs d'un stock d'immeubles le plus souvent résidentiels. L'approche statistique tente d'établir une relation de cause à effet entre la consommation énergétique des bâtiments, des usagers (individus ou ménages) et différentes variables contextuelles comme les conditions climatiques ou la densité urbaine. Nous pouvons distinguer trois méthodes de calcul.

- *La régression*. Elle permet de déterminer l'influence des paramètres d'entrée sur la consommation finale d'énergie, le plus souvent d'un logement ou d'un bâtiment résidentiel. Les variables d'entrée peuvent être aussi bien des informations socio-économiques sur les ménages occupants que des données comportementales et des caractéristiques plus techniques sur le logement ou le bâtiment (Belaïd, 2016 ; Tonn and White, 1988). L'estimation de la validité du modèle est évaluée à partir de la qualité de l'ajustement.
- *L'analyse de la demande conditionnelle* (*conditional demand analysis*). Cette modélisation utilise la régression de la consommation d'énergie sur des variables potentielles d'influence, mais fait intervenir un conditionnement à la présence d'équipements énergétiques (Nesbakken, 1999).
- *Les réseaux de neurone* (*Neural network*). Cette technique peu répandue utilise un modèle mathématique simplifié pour représenter les interconnections entre les différents usages énergétiques (Issa et *al*., 2001), à la manière des réseaux de neurones biologiques. De façon similaire à la régression, les modèles en réseau de neurone minimisent les erreurs d'estimation et permettent en outre de capturer la non linéarité des relations. Cette méthode a été utilisée jusqu'à présent pour faire des prévisions sur les variations de charge électrique des services énergétiques.

Ces différents modèles, largement utilisés dans les travaux économétriques sur les consommations énergétiques des bâtiments, s'accordent sur plusieurs variables explicatives des comportements énergétiques des ménages, tels que l'âge de la personne de référence, le revenu ou la taille du ménage.

Variables	Effets sur la consommation d'énergie	Sources
Statut d'occupation	Contrairement à la théorie qui spécifie que les locataires sont supposés consommer moins que les propriétaires occupants, les travaux empiriques ne permettent pas d'établir de consensus sur cet effet.	Charlier, 2015 ; Jones et al., 2015 ; Yohanis, 2012
Revenus	Le revenu a un effet positif sur la consommation d'énergie (élasticité prix en général inférieure à 0,15)	Cayla et al., 2011 ; Nesbakken, 2001 ; Belaïd, 2016 ; Labandeira et al, 2006 ; Santamouris et al., 2007
Nombre d'occupants	Plus le ménage compte d'occupants, plus la consommation d'énergie est élevée	Leahy and Lyons, 2010 ; Vaage, 2000
Age de la personne de référence du ménage	La consommation d'énergie est plus importante pour les ménages dont la personne de référence a entre 45 et 65 ans que pour les autres classes d'âge.	Brounen and Kok, 2011 ; Brounen et al., 2013 ;
Emploi	Les ménages positionnés à des emplois plus importants consomment moins d'énergie que les autres	McLoughlin et al., 2012
Type d'aire urbaine	L'effet de la densité de l'aire urbaine sur la consommation d'énergie ne fait pas consensus	Kaza, 2010
Prix de l'énergie	L'augmentation du prix de l'énergie entraîne une baisse de la consommation d'énergie (élasticité prix de -0,20 à -1,6)	Belaïd, 2016 ; Dubin and McFadden, 1984 ; B. Halvorsen and Larsen, 2001 ; Labandeira et al., 2006 ; Larsen and Nesbakken, 2004 ; Nesbakken, 1999 ; Risch and Salmon, 2017
Préférences pour le confort	Les préférences individuelles pour le confort jouent sur la consommation d'énergie de façon positive. Le potentiel d'économie d'énergie associé serait compris entre 1,1% à plus de 29%	Estiri, 2015 ; Jones et al., 2015 ; Lopes et al., 2012

Tableau 1. Quelques déterminants de la consommation énergétique des ménages (analyse conditionnelle et régression)

Au-delà des caractéristiques des ménages, les économistes s'intéressent également au rôle dissuasif du prix de l'énergie. Si ces résultats peuvent apparaître cohérents, les méthodes statistiques comportent néanmoins des limites. Elles ont vocation à mettre en évidence les variables explicatives de mécanismes dont on tente de donner une grille de lecture. Elles aboutissent à des algorithmes dans lesquels des coefficients indiquent les effets des variables intervenant sur la consommation énergétique. Toutes les variables utilisées dans la régression doivent être quantitatives, y compris celles concernant les ménages, ce qui exclut d'entrée tout indicateur concernant les comportements (même si des variables binaires permettent parfois de

les intégrer). L'algorithme traduira donc par des coefficients l'impact de chacune des variables, sans nécessairement donner les éléments permettant de comprendre les raisons pour lesquelles elles jouent un rôle. Cela signifie que la finalité de l'approche n'est pas tant l'explication du processus de consommation que sa modélisation. On en reste donc au stade de la démarche déductive, dans la mesure où le choix des variables explicatives repose sur des hypothèses, relevant de théories construites ou d'expériences. En d'autres termes, les variables sont abusivement qualifiées d'explicatives puisqu'elles reposent uniquement sur des méthodes hypothético-déductives qui, par définition, ne sont pas démonstratives. C'est la raison pour laquelle il arrive parfois que des résultats apparaissent contradictoires, sans que l'on puisse avoir les moyens de comprendre les mécanismes par lesquels des variables proches peuvent agir dans un sens opposé. C'est par exemple le cas de résultats montrant que le revenu a un effet positif sur la consommation énergétique, alors que les régressions portant sur l'emploi font apparaître que les personnes ayant les statuts professionnels les plus élevés sont parmi celles consommant le moins d'énergie (tableau 1).

2.2. Les approches d'ingénierie

L'autre grand type de modèle quantitatif est généralement élaboré par les ingénieurs. Il s'agit d'approches mathématiques visant à modéliser les consommations à partir d'algorithmes élaborés selon des démarches déductives. Ici, la quantification est nécessaire et les indicateurs s'appuient sur des théories reconnues ou des hypothèses. Ces modèles estiment la consommation en fonction de l'infrastructure technique de l'immeuble, du logement, de l'équipement des ménages, notamment en électroménagers, et de l'environnement physique (température extérieure, ensoleillement, etc.). Lorsqu'ils prennent en compte les comportements, les hypothèses concernent le plus souvent des temps de présence, des températures, des éclairages ou des ouvertures de fenêtres par exemple, afin d'intégrer dans le modèle les impacts des usages sur les variations des ambiances thermiques du bâtiment.

Nous pouvons distinguer trois méthodes de construction de ces modèles :

- *Les distributions.* Cette technique concerne surtout le calcul de la consommation énergétique finale des équipements domestiques. Elle s'appuie sur des estimations de leur distribution et de leur pénétration dans les logements. Le calcul utilise des coefficients d'efficacité usuels (Kadian et *al*., 2007).
- *Les archétypes*. Cette méthode s'appuie sur les caractéristiques de parc de logements (date de construction, type de bâtiments, taille, etc.). Il s'agit de modéliser la consommation d'énergie pour chaque archétype de logement ou groupe de logements. Le modèle sert ensuite à extrapoler les consommations à l'ensemble d'un parc immobilier (à une échelle déterminée : locale, régionale, nationale). Il est

cependant contraint par le nombre d'archétypes définis *ex ante* et les estimations aboutissent à une représentativité limitée du stock de logements (Huang and Brodrick, 2000).

- *L'échantillonnage*. Cette démarche s'appuie sur un échantillon représentatif de logements à l'échelle du périmètre étudié. Elle vise à estimer les variations des consommations entre les logements du corpus. Après extrapolation et sous réserve de la solidité de l'échantillon, la consommation énergétique du stock de logements peut être estimée (Swan and Ugursal, 2009).

2.3. Une vision transversale des modèles quantitatifs

Les modèles statistiques et mathématiques de consommation énergétique ne sont pas cloisonnés, même si les premiers sont surtout développés par des économistes et les seconds par des ingénieurs (climatologues, physiciens du bâtiment, écologues…). Ils se rejoignent notamment sur leurs modes d'entrées.

Une première approche des modèles quantitatifs consiste à utiliser des indicateurs globaux ou agrégés concernant les prix de l'énergie, les revenus des ménages, les possessions d'équipements à l'échelle nationale ou bien encore les grands types constructifs selon les matériaux utilisés, les contextes climatiques ou les orientations des bâtiments. Ces modèles, que l'on peut qualifier de « top-down » ou « généraux », s'appuient sur les résultats de grandes enquêtes ou de données nationales publiques généralement fournies par les services techniques de tel ou tel Ministère (finances, environnement…) . La qualité des données leur confère une fiabilité et une objectivité dans la mesure où ils peuvent être actualisés au fur et à mesure des évolutions des données d'entrée. Les modèles « top-down » sont utiles à une échelle macro (économique ou structurelle) et peuvent infléchir des politiques nationales de réductions de consommation énergétique. En revanche leur application est plus incertaine à une échelle micro. Ils sont donc peu utilisés dans le cadre de projets d'écoquartiers et notamment dans les estimations des consommations d'immeubles localisés.

Une autre approche, dite « bottom-up », s'inscrit dans une démarche inverse de la précédente. Elle ne porte pas sur la consommation d'énergie globale mais sur celle de types de logements ou de bâtiments. Les données d'entrée sont désagrégées et la projection du modèle micro à un ensemble plus large vise à fournir une estimation des consommations globales, sous la condition d'une prise en compte des diversités propres à chaque situation individuelle ou locale. Cette condition ignore par là-même que la globalité n'est pas égale à la somme des particularités, ce qui limite de fait la portée de ces modèles à une échelle macro.

Les modèles quantitatifs tentent également d'intégrer dans les variables d'entrée les comportements des usagers, car leur consommation énergétique contribue à celle de

l'immeuble, ne serait-ce que dans la déperdition de chaleur. Les modèles statistiques s'attachent davantage aux caractéristiques socio-démographiques des résidents des immeubles, les modèles mathématiques introduisent des données relatives à des usages d'ambiance thermique. Quelle que soit leur spécificité, ces données comportementales doivent impérativement être quantitatives pour être introduites dans un modèle mathématique ou constituer une variable d'un algorithme issu d'une régression statistique. Le résultat le plus marquant de ces travaux est d'avoir mis en évidence l'existence d'un *effet rebond*, qui correspond à l'augmentation de la consommation énergétique suite à l'introduction de nouvelles technologies dans le logement (Brookes, 1990 ; Wirl, 1997 ; Schipper et *al*., 2000 ; Orea et al., 2015). Cet effet peut être défini comme une réponse comportementale émanant d'une amélioration de l'efficacité énergétique du logement et du bâtiment (Binswanger, 2001). Mais les variables comportementales sont discrétisées et ne sont pas associées pour reconstituer un enchaînement d'usages qui permettrait d'aborder les comportements comme un processus logique, propre à des ménages socialement et démographiquement différenciés, localisés dans un environnement spécifique.

La confrontation des modes d'entrées des approches mathématiques et statistiques montre qu'au final un modèle quantitatif de consommation énergétique est valide à son niveau d'élaboration, mais qu'il est délicat de le concevoir comme un emboitement d'échelles. Il apparaît également que les probabilités affectées aux variables des modèles déductifs, y compris globaux, s'appuient souvent sur les traitements d'enquêtes locales ou nationales. En d'autres termes, ces modèles reposent sur des algorithmes dont certains coefficients sont estimés à partir d'analyses empiriques. Pour autant, cette démarche ne confère pas nécessairement un caractère inductif aux méthodes, dans la mesure où, avant de recourir aux résultats d'enquête, le choix de la variable à intégrer dans l'algorithme constitue en soi une hypothèse déductive du processus de consommation énergétique.

Les variables permettant de construire les modèles mathématiques ou statistiques sont donc assez proches. On y retrouve des caractéristiques du type d'immeuble, de logement, souvent des taux d'équipements estimés et leur catégorie selon leur consommation d'énergie, des indicateurs d'isolation des logements et des immeubles, mais aussi des caractéristiques socio-démographiques des occupants ou des paramètres comportementaux. Même si ces déterminants ne sont pas associés selon les mêmes logiques et si les modèles mathématiques accordent davantage d'attention aux matériaux constructifs, ils se rejoignent sur leurs modes d'entrées et leurs limites.

3. LES MODELES QUALITATIFS

La polarisation des approches autour des méthodes quantitatives souligne la domination des modèles déductifs, statistiques ou mathématiques, dans le champ de la consommation énergétique des bâtiments. Elle conduit probablement à réduire la place des comportements énergétiques dans la construction de ces modèles en renforçant leur caractère univoque. Pour autant, les travaux qualitatifs des sciences sociales montrent tout l'intérêt qu'il y aurait à intégrer la complexité des faits sociaux dans la connaissance globale de la consommation.

3.1. Des comportements multiformes

Ainsi Sovacool (2014), sur la base des travaux qualitatifs de son corpus, présente un schéma synthétique des facteurs agissant sur les consommations énergétiques des ménages (figure 1).

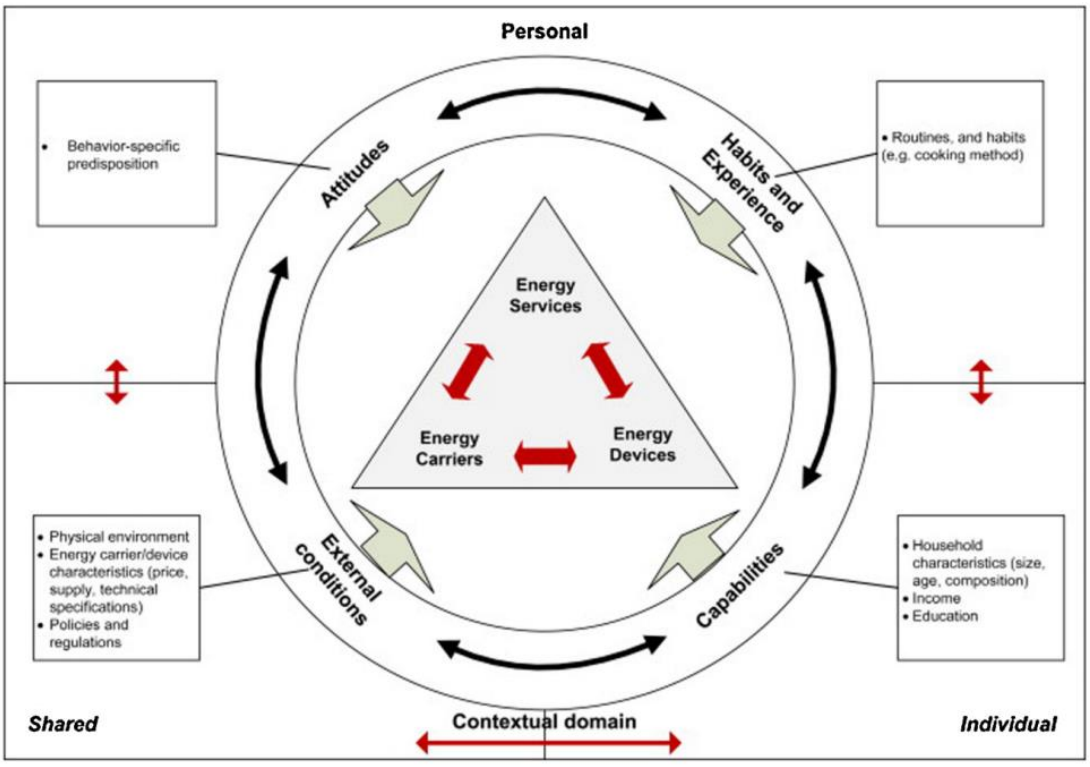


Fig. 10. Factors influencing household energy consumption.

Source : Sovacool, 2014, p. 12.

Figure 1. Les éléments de la consommation énergétique des ménages selon Sovacool (2014)

Ce schéma met en évidence les interactions entre les facteurs techniques, politiques, économiques et sociaux dans le processus de consommation énergétique des ménages. Les effets de contexte tout autant que les dimensions individuelles et collectives interagissent également. Du point de vue des individus et des groupes, le mécanisme de consommation

mobilise des facteurs personnels comme les prédispositions héritées des expériences, mais aussi des éléments plus structurels comme la taille ou les revenus des ménages.

Reste que nombre de travaux sur les comportements insistent sur le rapport au confort domestique des groupes et des individus. Parfois associé à la propreté (Shove, 2003) lorsqu'il s'agit de consommation d'eau, le confort concerne généralement l'occupation des pièces et les températures du logement pour lesquelles les ménages font preuve d'une adaptation au contexte domestique en développant «une intelligence énergétique» (Subremon, 2012). Plusieurs auteurs soulignent le paradoxe entre l'engagement écologique et le niveau de consommation des ménages, qui renvoie à des définitions du confort évolutives et propres à chacune des situations domestiques. Ainsi, pour les ménages le confort serait «au cœur d'un paradoxe idéologique entre l'intentionnalité de leurs pratiques présentées comme éco-responsables, mais parfois anecdotiques, et une propension importante à développer l'équipement des logements qui de fait deviennent de plus en plus énergivores» (Roudil et Flamand dans Lévy et *al*, 2014, p 52). En d'autres termes, la recherche du confort serait à l'origine de comportements domestiques divers selon les situations familiales et le type de logement occupé. Au-delà de la température et des occupations des pièces, elle induirait une capacité d'adaptation mobilisant des équipements sources de consommation. Il y aurait donc autant de comportements énergétiques que de capacités d'adaptation des ménages pour produire un univers domestique confortable, indépendamment du coût énergétique que cela représente.

3.2. Une pratique sociale

Dès lors, comment fournir une grille de lecture globale et cohérente de comportements aussi multiformes ? Pour dépasser cette hétérogénéité, Shove, Pantzar et Watson (2012) ont proposé de déplacer le paradigme du comportement vers celui de pratique sociale. Celle-ci impliquerait trois types d'éléments : matériels, significations et compétences.

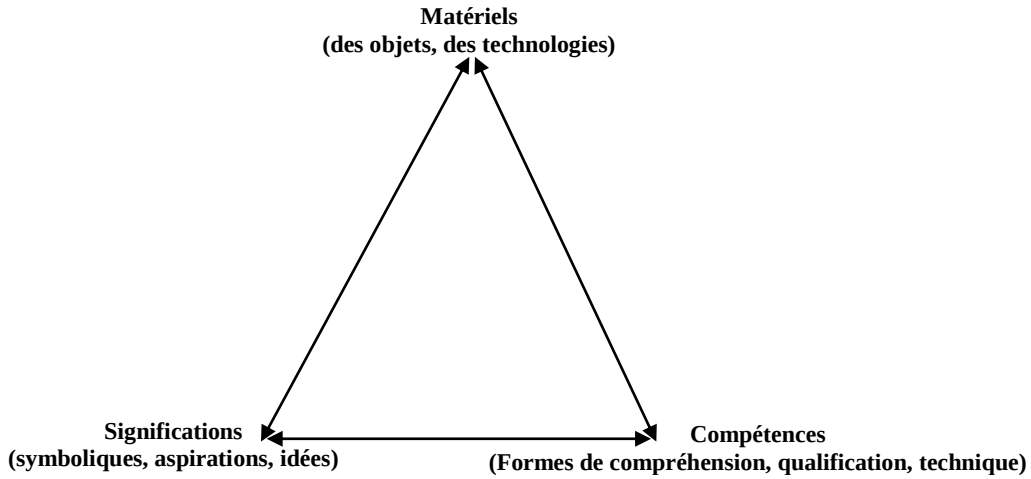


Figure 2. Les éléments des pratiques sociales selon Shove et *al.* (2012)

Dans cette configuration, les individus développeraient des pratiques en mobilisant des biens matériels auxquels ils attribueraient des significations symboliques selon leurs compétences à en faire usage. L'intérêt de cette proposition ne réside pas dans l'affirmation du rôle de ces trois pôles, mais dans leur relation et dans le fait que l'importance de chacun d'entre eux évoluerait en phase avec la pratique. Ainsi, les auteurs tentent de montrer qu'au fur et à mesure que l'objet matériel gagne en technicité, les compétences à en faire usage deviennent moins importantes dans la pratique. Dans le même temps, la dimension symbolique de l'objet devient quant à elle centrale. Ils appuient leur démonstration sur l'évolution de l'utilisation de l'automobile, mais l'on pourrait très bien élargir le modèle à l'usage d'autres objets matériels comme l'ordinateur par exemple.

Il est également intéressant d'appliquer le modèle à la consommation énergétique en la considérant comme une pratique sociale à part entière. Ce transfert prend d'autant plus de sens que l'énergie est un bien immatériel et abstrait nécessitant un vecteur matériel pour que son usager prenne conscience de sa valeur (Bonnin, 2016). Ce vecteur constitue généralement un équipement qui peut entre-autres aller du luminaire à l'électroménager. Chacun de ces équipements ne nécessite pas une compétence technique particulière pour son utilisation et, si l'on suit Shove et *al.*, son acquisition renvoie dès lors à sa valeur symbolique. Ce processus a par exemple été très bien décrit par Margot Pellegrino, à travers l'usage des climatiseurs à Calcutta, pour qui « les comportements énergétiques (…) sont déterminés par une aspiration sociale, qui vise à démontrer à travers la possession d'un objet (le climatiseur) et la modalité de son utilisation (indépendante d'une nécessité réelle et perçue) l'appartenance à un statut social précis et identifiable » (Pellegrino, 2013).

Les approches qualitatives mettent donc en évidence l'existence de processus de consommation relevant de logiques sociales complexes. Ils traduisent une diversité d'adaptations à l'espace domestique selon les expériences individuelles et collectives, les perceptions du confort, les sensibilités à la question environnementale ou les situations domestiques et familiales. Ces adaptations mobilisent des équipements matériels, vecteurs de consommation d'une source immatérielle mais qui, dès lors, acquièrent une valeur d'autant plus symbolique qu'ils sont d'un usage courant.

Les approches qualitatives mettent donc à jour les limites d'une représentation simplifiée des comportements énergétiques, qui ne peuvent se réduire à des caractéristiques de ménages discrétisées, à une intensité de consommation et à un coût d'énergie quantifiables. Cependant, se pose la question d'une construction de modèles généralisables reposant sur des corpus d'observation réduits. Et ceci d'autant plus que leur expérimentation – et en conséquence leur validation –, faute d'indicateurs, est rendue difficile.

4. TROIS EXEMPLES D'APPROCHE TRANSVERSALE

Ce qui précède montre que les modèles numériques présentent l'avantage de permettre des expérimentations des matériaux utilisés, des modes d'isolations, des orientations, en fait de tous les éléments techniques dont l'efficacité énergétique est mesurable. Parfois, des variables visant à intégrer les comportements énergétiques des ménages sont prises en compte dans les algorithmes, mais dans l'ensemble ces modèles restent très technocentrés et ne parviennent pas à restituer les enchaînements d'usage socialement et démographiquement différenciés. De leur côté, les modèles qualitatifs cherchent à restituer les comportements énergétiques des ménages comme des processus sociaux, mais ignorent les contraintes techniques des usages. Même s'ils parviennent à traduire la diversité et la complexité des rapports à l'énergie des individus et des groupes, les enchaînements de causalité mis en évidence ne sont pas réductibles à des indicateurs et sont difficilement modélisables numériquement. De ce fait, ils ne peuvent être vérifiés et expérimentés, et sont peu pris en compte dans les normes constructives.

Si les deux types de modèles apparaissent au premier abord difficilement conciliables, chacun d'entre eux nous livre cependant une partie de la grille de lecture des processus de consommation énergétique des bâtiments. Il est d'ailleurs révélateur que la plupart des états des lieux des travaux sur les consommations aboutissent à la conclusion d'une nécessaire transversalité dans les démarches : entre l'étude des comportements des individus et celle du cycle de vie des équipements (Polizzi di Sorrentino et *al*., 2016), entre les entrées par l'économique, l'environnement et l'urbain (Tu, 2018), voire par une association entre les aspects constructifs ou architecturaux des bâtiments, le contexte urbain ou géographique, la structure sociologique des habitants et la psychologie environnementale (Pellegrino et Musy, 2017). Pour autant, cette transversalité ne va pas de soi. Nous présentons ci-dessous à titre indicatif et sans volonté exhaustive, trois recherches (dont deux auxquelles nous avons participées) pour illustrer la diversité des méthodes de modélisation des consommations énergétiques des bâtiments, celles des usagers et la difficulté à les croiser dans une approche commune.

4.1. Modéliser les comportements pour mesurer les performances énergétiques des bâtiments

Un premier type de travaux concerne des tentatives de modélisation de l'impact des comportements sur les performances énergétiques des bâtiments à partir d'approches probabilistes. La thèse d'Éric Vorger (2014) en est un bon exemple. En prolongeant les approches de Page (2007) sur l'occupation des immeubles de bureaux, il propose d'appliquer une modélisation stochastique basée sur les chaînes de Markov inhomogènes dans les bureaux

et les logements. Ces calculs probabilistes reposent sur l'hypothèse que les changements de comportements des usagers ne sont pas constants. Vorger utilise les résultats de traitements statistiques de bases de données nationales (enquête emploi du temps, recensement, enquête logement) ou locales pour déterminer les probabilités de présences dans les logements et les bureaux, le nombre d'ouvertures et de fermetures de fenêtres, l'utilisation des appareils électriques, l'éclairage des pièces ou la régulation du chauffage. En outre, le modèle tient compte de la diversité des comportements selon les caractéristiques socio démographiques des usagers et les types de logements qu'ils occupent.

Cette modélisation probabiliste des performances énergétiques des bâtiments à partir des comportements des occupants est sans doute l'une des plus abouties. Elle comporte cependant plusieurs limites inhérentes aux approches quantitatives qui se situent à l'intersection des logiques inductives et déductives. Par exemple, la vocation du modèle à restituer la globalité des comportements oblige son auteur à s'appuyer sur des travaux très hétéroclites. Ainsi, pour étudier les ouvertures de fenêtres des occupants de bâtiments résidentiels, Vorger utilise le modèle de Haldi et Robinson (2009) élaboré sur des immeubles de bureaux situés en Suisse et validé en Autriche (Vorger, 2014 : 190). De ce point de vue la projection dans le logement de comportements effectués au sein des bureaux pose question ; de même qu'une application en France de modèles construits dans des conditions climatiques différentes. Par ailleurs, la nécessité de connaître l'occupation des logements pour déterminer les activités des résidents conduit à construire des probabilités hasardeuses à partir d'associations mécaniques entre la superficie des logements et la taille des ménages (:144). Enfin, le modèle a été utilisé pour simuler les consommations de chauffage et d'eau chaude sanitaire sur un immeuble résidentiel de 16 logements ayant subi une rénovation énergétique. Les résultats font apparaître des écarts significatifs entre le modèle et les situations observées sur le nombre d'occupants, les températures de chauffage, la consommation énergétique, notamment dans les estimations des gains attendus par la rénovation (: 404).

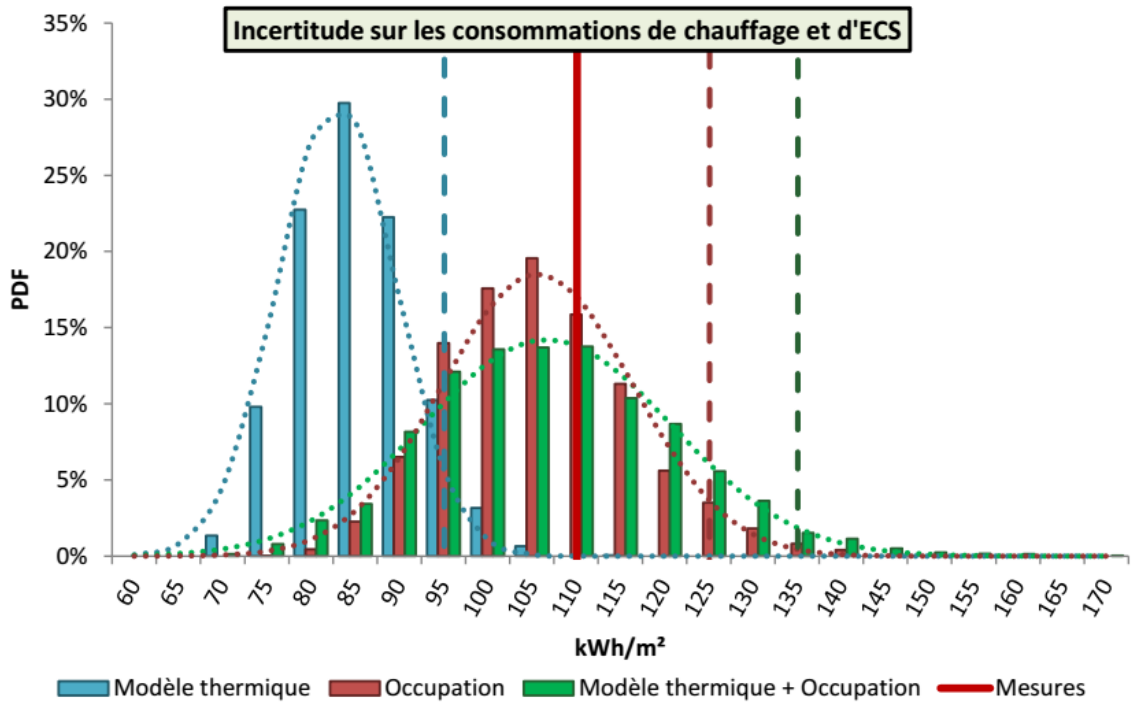


Figure 254 : Distributions des consommations de chauffage et d'ECS, liées aux facteurs incertains : du modèle thermique (bleu), des modèles d'occupation (rouge) et de l'ensemble des modèles (vert)

Source : Vorger, 2014, p 403.

Les lignes verticales en pointillés correspondent aux seuils garantis (risque de dépassement de 2,5 %). La consommation mesurée durant l'année suivant les travaux est représentée en ligne continue rouge (110 kWh/m²).

Figure 3. Ecarts entre les consommations estimées (ECS et chauffage) et les consommations réelles après travaux sur un immeuble de 16 logements situé à Feyzin(69) selon le modèle d'Éric Vorger

On voit là toute la difficulté à produire une modélisation déductive des comportements énergétiques à vocation globalisante. Les données nécessaires et souvent manquantes imposent le recours à des résultats d'enquêtes menées dans différents contextes et à différentes échelles pour calibrer les probabilités des comportements. Cette diversité des sources introduit des biais importants dans le modèle, qui ne peut être utilisé à des échelles fines et dans des situations spécifiques. L'utilisation d'approches inductives (via des enquêtes) pour construire des hypothèses probabilistes doit donc s'appuyer sur des protocoles contraignants qui réduisent les possibilités d'élaboration de modèles déductifs génériques valables à différentes échelles et dans différents contextes.

4.2. Cycle de vie des ménages et consommations énergétiques

Le deuxième type de travaux ne concerne pas des approches modélisatrices, mais des méthodes quantitatives inductives ayant vocation à décrire les logiques comportementales de consommations énergétiques. Ils s'appuient sur des enquêtes *ad hoc* ou des bases nationales indiquant les consommations des ménages. A titre d'exemple nous pouvons présenter les

travaux que nous avons menés sur les liens entre les séquences du cycle de vie des ménages et l'intensité des consommations domestiques (Lévy et Belaïd, 2018).

L'effet des structures familiales et de leurs évolutions ont été mis en évidence dès 1976 par une étude longitudinale dans l'aire métropolitaine de Lansing (Michigan) par Morrison et Gladhart. On relève de nombreuses études quantitatives associant le cycle de vie à la consommation énergétique durant les années 1980 (Fritzsche, 1981 ; Frey et LaBay, 1983), mais elles se sont appuyées sur des échantillons et des méthodes divers et n'ont pas abouti à des résultats convergents. Depuis, mises à part quelques recherches qualitatives (Garabuau-Moussaoui, 2009), les travaux sur les comportements énergétiques des ménages ont délaissé l'approche par le cycle de vie, au profit des caractéristiques démographiques des ménages, comme l'âge ou la taille, appréhendées comme des variables explicatives spécifiques dans des modèles de consommations statiques (O'Neill et Chen, 2002 ; Brounen et *al.*, 2012 ; Valenzuela et *al.*, 2014). Mais il n'existait pas de recherches mettant en évidence les liens entre la combinaison des énergies domestiques utilisées, les caractéristiques démographiques des usagers, leurs localisations et le type d'habitat occupé.

Notre étude mobilise les Enquêtes Nationales sur le Logement de l'INSEE (2002 et 2006). Dans une première étape nous avons effectué des analyses factorielles et des classifications hiérarchiques afin de construire dix types de consommateurs énergétiques (tableau 2) associant les modes et les intensités d'énergie utilisés (électricité, gaz, fuel, GPL, bois, chauffage urbain et charbon), les caractéristiques des ménages (situation familiale, âge, taille, catégorie socio-professionnelle et revenus), les caractéristiques du type de logement occupé (statut d'occupation, type de logement, nombre de pièces, surface, date de construction de l'immeuble) et le contexte résidentiel (urbain, péri-urbain, rural). Ces types montrent que les modes d'énergie domestiques sont des marqueurs des caractéristiques du logement et du profil des occupants.

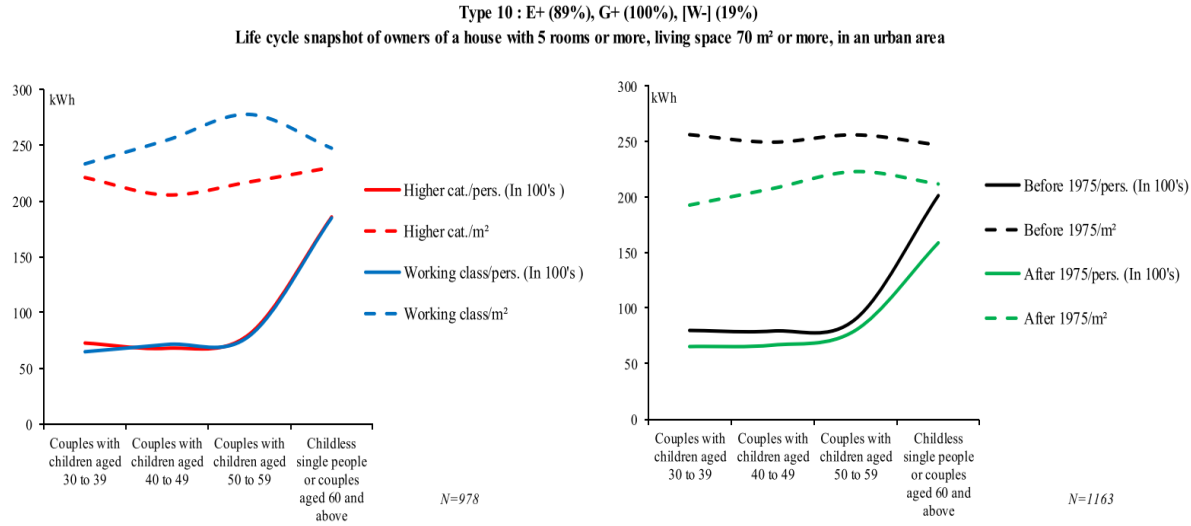
Dominant profiles of households and dwellings in the 10 types of French consumers in 2002.
Sources: secondary processing of the 2002 national housing survey (INSEE). Example of interpretation: the consumption modes not in brackets represent a minimum of 60% of the type. The consumption modes in brackets are in a minority and are represented at least 1.5 times more within the type than in the total population.

Types of consumers	%	Energy types	**Dominant profiles**
Type 1	4.6	E- F- P0 (DH/C+)	Childless couples or young or older single people belonging to the working classes with medium or low incomes; tenants of an apartment with less than forums and smaller than 100 m^2 in a building constructed between 1950 and 1974 in a rural or urban area
Type 2	8.5	E- F0 P0 (W0)	Childless couples or single retired people belonging to the working classes; owner-occupiers of a house larger than 100 m^2 built before 1975 in a rural or periurban area
Type 3	26.3	E+ P0 W0 (DH/C-)	Middle-income families aged 40–59; owner occupiers of a house larger than 70 m^2 built before 1948 or after 1975 in a rural or periurban area
Type 4	1.5	E+ F+ P0 W0	Families aged over 40, upper or middle management levels (including retired); owner occupiers of an old house larger than 100 m^2 in a rural or periurban area
Type 5	13.2	E- G- (DH/C+)	Young working-class middle-income or low income childless couples or single people (sometimes precarious); tenants in social or private housing with 4 rooms or less built between 1949 and 1974 in an urban area
Type 6	1.1	E- G- F-	Childless couples or single retired people, management or working class category; tenants in social or private housing with 4 rooms or more built between 1949 and 1974 in an urban area
Type 7	22.2	E+	Childless young couples or single people; tenants in social or private housing with one or two rooms, smaller than 70 m^2, built after 1975 in an urban area
Type 8	7.2	E- P0 (DH/C0 F+)	Low income, working class childless couples or retired single people; tenants in a house with 4 rooms or more and smaller than 70 m^2, built before 1975 in a rural or periurban area
Type 9	9.7	E- G+	Management level or working class childless couples or retired single people; tenants in social or private housing with 3 or 4 rooms, between 70 and 100 m^2 built between 1949 and 1974 in an urban area
Type 10	5.5	E+ G+ (W-)	High income upper or middle management families aged 40–59 ans; owner occupiers of a house larger than 100 m^2 built before 1975 in an urban area

Source : Lévy, Belaïd, 2018, p. 2107

Tableau 2.Profils dominants des ménages et des logements des 10 types de consommateurs énergétiques français en 2002 (source ENL, 2002).

Dans un second temps, nous avons vérifié la stabilité temporelle de ces relations entre 2002 et 2006. Nos analyses montrent des divergences entre les facteurs intervenant sur les consommations globales, par m² et par personnes selon les différentes typologies de consommateurs construites. Enfin, dans un troisième temps nous avons tenté d'identifier les causes des évolutions des consommations propres à chacun des types, en raisonnant par groupe de consommateurs homogènes, c'est-à-dire en neutralisant les effets du type de logement occupé, de sa localisation et des modes d'énergie utilisés. Cette méthode a permis d'explorer pleinement le concept d'efficacité et d'identifier les ménages susceptibles de réguler leurs consommations en fonction de leurs caractéristiques sociales et démographiques.



Source : Lévy, Belaïd, 2018, p. 2110

Figure 4. Consommations annuelles moyennes par m² et par personne selon le cycle de vie du moment pour les propriétaires d'une maison de 5 pièces et plus, de 70 m² et plus située en zone urbaine en France (source ENL 2006)

Les résultats montrent qu'à modes d'énergie, type de logement et contexte urbain identiques, les intensités de consommation par personne varient selon les positions dans le cycle de vie des ménages, tandis que les consommations par m² n'évoluent pas ou peu. Ce qui signifie que les comportements énergétiques des ménages stables dans leur logement ne s'adaptent pas à l'évolution de la taille de la famille au cours du cycle de vie.

Au final, cette recherche a mis en évidence la nécessité d'associer les mesures de consommations par m² (très dépendantes des surfaces du logement) à celles des consommations par personnes (très dépendantes des évolutions des structures familiales) ; alors que les politiques incitatives de réductions des consommations énergétiques domestiques ne s'appuient généralement que sur la première mesure. En montrant que la consommation énergétique est une pratique sociale évolutive, cette approche dynamique entre en phase avec la plupart des modèles qualitatifs. Ce point est important, car les estimations des consommations des bâtiments prenant en compte les caractéristiques d'occupation n'anticipent pas les impacts du vieillissement des ménages stables, mais aussi le changement dans le peuplement des immeubles au fur et à mesure du renouvellement des résidents. Ces résultats interrogent par là

même la robustesse des modèles inductifs qui, à l'exception des approches par l'ACV, abordent la consommation énergétique comme un fait statique.

D'un autre côté, si ces résultats ouvrent des perspectives de numérisation, ils ne constituent pas un modèle susceptible d'être mobilisé par des opérateurs. De plus, ils gomment en grande partie l'impact des aspects constructifs des immeubles et n'abordent pas les pratiques énergétiques dans toutes leur dimension, comme a pu le développer Éric Vorger par exemple. Ils incitent néanmoins à construire des modèles complexes croisant l'impact des aspects constructifs avec les consommations par m² et par personne. Ils invitent également à intégrer, dans des modèles de consommations énergétiques des bâtiments dynamiques, l'évolution des pratiques énergétiques au cours du cycle de vie des ménages selon leur stabilité ou leur mobilité résidentielle.

4.3. Une cartographie des comportements énergétiques

Les troisièmes types de travaux contournent la difficulté à modéliser les usages à partir des consommations, en s'appuyant sur une approche synthétique des comportements énergétiques domestiques. Nous présentons ici une recherche à laquelle nous avons participé (Bourgeois et *al.*, 2017) dont l'objectif était de produire un modèle numérique des usages agissant sur le niveau de consommation, en d'autres termes de modéliser un comportement social généralement abordé par des études qualitatives.

Dans une première étape nous avons construit trois indicateurs synthétiques de comportements énergétiques (régulation des consommations, taux d'équipement, intensité d'usage des gros équipements) élaborés à partir d'une enquête menée auprès de 1950 ménages franciliens. Dans une deuxième étape, ces indicateurs ont été modélisés statistiquement (régression logistique ou multiple) en utilisant les données de l'enquête, mais en prenant soin de mobiliser uniquement des variables présentes dans le recensement de la population (combustibles, ménages, logements). Cette précaution visait à permettre une utilisation du modèle à des échelles vastes sur lesquelles nous ne disposons pas de données précises sur les comportements énergétiques des ménages.

Table 5
Model for the ownership of large household appliances (EQ indicator).

Variable	Level	Coefficient	Odds_ratio
(Intercept)		−1.22	0.30
type of housing	individual		
	collective	−0.73	0.48
surface		0.55	1.72
number of persons	1		
	2	0.23	1.26
	3 or more	0.57	1.78
couple	yes		
	no	−0.52	0.60
occupancy	owner		
	others	−0.40	0.67

Source : Bourgeois et al, 2017, p. 185

Tableau 3. Modèle de fort taux de possession de gros équipements électroménagers

Les trois modèles montrent que les modes de vie énergétiques sont contraints pour l'essentiel par le mode de chauffage et les combustibles utilisés. Mais ils dépendent également de caractéristiques propres aux ménages comme l'âge de la personne de référence ou la taille de la famille. A l'instar des modèles qualitatifs d'usages, cette approche quantitative confirme l'existence d'une flexibilité temporelle dans les comportements énergétiques.

La troisième étape a consisté à mobiliser les modèles pour cartographier ces comportements à l'échelle des IRIS en utilisant le recensement de 2011. Il devient alors possible d'avoir une vision des comportements énergétiques dans l'ensemble des IRIS nationaux.

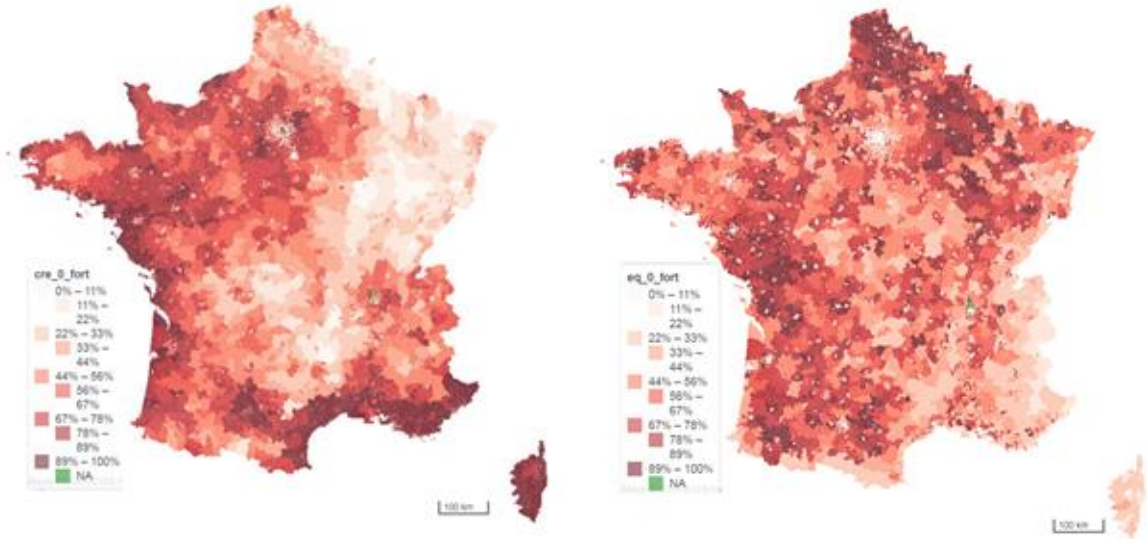


Figure 5. Cartes de fortes régulations énergétiques (gauche) et de forts taux d'équipements électroménagers (droite) en France (échelle Iris RGP 2011)

Sous réserve d'analyses plus approfondies, la carte des forts comportements de régulations énergétiques (carte de gauche) fait logiquement apparaître le rôle du climat, notamment au Nord et au Nord-Est du territoire français et dans les zones montagneuses, sur les faibles régulations des ménages. A l'inverse, les ménages régulent davantage au Sud de la France et sur les littoraux. Les taux de gros équipements électroménagers sont quant à eux dépendants des

structures familiales et des caractéristiques du logement. Ici, nous constatons logiquement une forte opposition entre les secteurs urbains et ruraux d'un côté, mais également entre les villes centres et le périurbain.

Le fait de travailler à l'échelle des Iris présente également l'avantage de pouvoir délimiter des secteurs géographiques pour effectuer des analyses plus fines, comme par exemple la région Île de France.

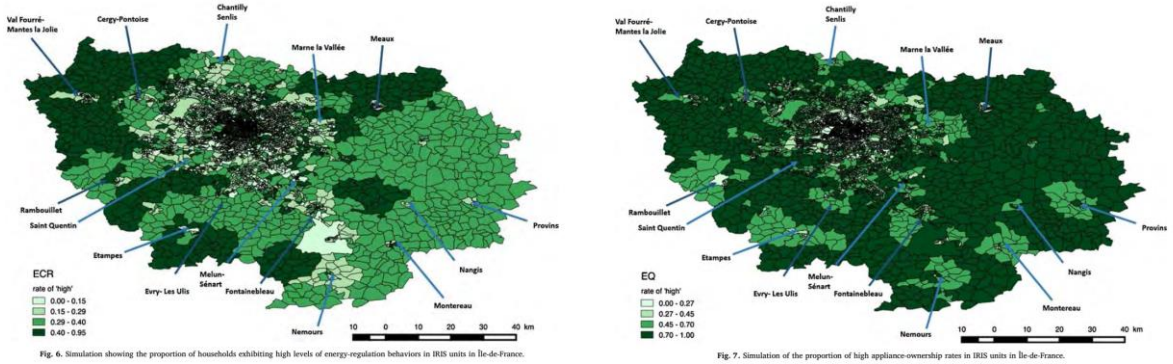


Fig. 6. Simulation showing the proportion of households exhibiting high levels of energy-regulation behaviors in IRIS units in Île-de-France.

Fig. 7. Simulation of the proportion of high appliance-ownership rates in IRIS units in Île-de-France.

Source : Bourgeois et al, 2017, pp. 189-190

Figure 6. Cartes de fortes régulations énergétiques (gauche) et de forts taux d'équipements électroménagers (droite) en Île de France (échelle Iris RGP 2011)

A cette échelle, les cartographies montrent dans leurs grandes lignes les effets cumulés du processus d'urbanisation de la région (type de logement et périurbanisation) et de la distribution démographique de la population sur la répartition des comportements énergétiques dans l'espace.

Au final, cette approche comporte une triple portée heuristique : meilleure connaissance des facteurs déterminants des usages ; anticipation des consommations énergétiques domestiques ; production d'un modèle dynamique permettant de simuler les variations des comportements dans le temps et dans l'espace. Dans le contexte de la transition énergétique, elle ouvre ainsi des perspectives aux politiques d'aménagement ayant pour objectif de suivre ou d'anticiper les consommations énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre, en testant à partir du modèle les effets d'une variation du peuplement, de la construction de logements ou de types d'immeubles à une échelle fine.

Mais, là encore, les variables sur la performance des bâtiments sont beaucoup moins précises que celles utilisées dans les modèles d'ingénierie, contrairement aux variables synthétiques du comportement qui englobent plusieurs dizaines de formes d'usages. La démarche pose la question d'une modélisation de comportements complexes à partir de variables simples et accessibles présentes dans les grandes bases de données nationales. Ce modèle a été utilisé dans le cadre d'une recherche visant à améliorer le modèle TEB d'îlots de chaleurs urbains de Météo-France (Shoetter, 2017). Mais il est symptomatique que les indicateurs synthétiques ont été retenus du seul point de vue de variables mesurables comme la

température de chauffage du logement par exemple, sans tenir compte du caractère globalisant et dynamique des comportements.

Chacun de ces trois types de travaux comporte des limites. Mais, nous pouvons aussi considérer que chacun d'entre eux permet de répondre en partie aux limites des deux autres. En cela, ils apparaissent complémentaires. Leur association pourrait ouvrir des pistes intéressantes pour produire de nouveaux concepts, mais aussi modéliser les consommations énergétiques des bâtiments d'un point de vue dynamique dans la diversité de leur conception et de leurs usages, en tenant compte des effets d'échelle et de contexte.

5. PERSPECTIVES

A l'heure de la transition énergétique, la modélisation des consommations des bâtiments constitue un médiateur d'expertise important auprès des acteurs opérationnels. Elle est un élément incontournable de la mise en place des politiques de construction et de réhabilitation permettant d'atteindre le facteur 4. Cette consommation relève à la fois des constituants constructifs des bâtiments et des comportements sociaux des occupants des immeubles. Cependant, la modélisation numérique de la consommation des bâtiments et celle des comportements énergétiques ne relèvent pas des mêmes approches.

D'un côté, faute de pouvoir numériser des processus de comportements multiformes, les modèles quantitatifs réduisent les usages énergétiques domestiques en quelques indicateurs discrétisés qui ne traduisent pas la logique d'ensemble des pratiques sociales. Il en résulte un écart non négligeable entre l'estimation des consommations par les modèles énergétiques et les performances réelles des bâtiments. D'un autre côté, si les travaux qualitatifs des comportements énergétiques des ménages parviennent à décrire les processus dans leur complexité et leur globalité, ils sont difficilement modélisables numériquement. Lorsqu'ils s'appuient sur des indicateurs quantitatifs synthétiques, les modèles de comportements peinent à introduire les effets des composantes constructives des bâtiments.

Cependant, pour anticiper ou estimer la consommation énergétique d'un projet, les opérateurs doivent intégrer l'efficacité énergétique de la construction ou de la réhabilitation, son équilibre économique, mais aussi le comportement des usagers et leurs attentes. En cela, pour constituer une véritable aide à la décision, les modèles de consommation énergétique des bâtiments doivent pouvoir répondre à cette triple exigence. Mais, le chaînage d'approches inductives et déductives, de modèles déterministes et stochastiques, mathématiques et statistiques, voire toutes ces approches entre elles, ne va pas de soi dès lors qu'elles mobilisent les sciences sociales et économiques, l'écologie urbaine et le génie urbain au sens large. Pour autant, dans le champ de la consommation énergétique, il n'y a pas de cloisonnement réellement

hermétique entre les modèles mathématiques, les modèles statistiques et les modèles qualitatifs, le recours aux données empiriques étant souvent utile pour calibrer ou estimer quantitativement les hypothèses des approches déductives ; tandis que la production d'indicateurs numériques et dynamiques introduisant le cycle de vie, la globalité et la spatialité des processus sociaux n'est pas une dimension insurmontable des approches qualitatives des comportements énergétiques. Reste à trouver les méthodes permettant de croiser les dimensions techniques, économiques et sociales pour parvenir à des modèles de consommations des bâtiments plus robustes et plus proches de la complexité du « monde réel ». La co-construction de nouveaux concepts et de nouvelles méthodes intégrant la causalité dans la modélisation numérique, pour théoriser, simplifier et expérimenter des modèles de consommation énergétique des bâtiments est un champ plus que jamais nécessaire, mais encore largement ouvert.

Pour sortir des méthodes d'approches discrétisées des comportements énergétiques et des consommations des bâtiments, les trois types de travaux que nous avons présentés pourraient servir d'appui pour envisager une co-construction de la modélisation des processus. Le type de modèle stochastique proposé par Eric Vorger, parce qu'il intègre des changements d'états dans les usages, semble le plus élaboré pour reconstituer numériquement les attitudes réelles des occupants des logements et des bureaux. Mais sa complexité ne permet pas de disposer de l'ensemble des variables permettant d'optimiser les simulations aux différentes échelles de consommation des bâtiments. Cette contrainte rend le modèle plus adapté aux anticipations des consommations d'un projet qu'à une vision macro des comportements énergétiques et des consommations des bâtiments. Il apparaît également très statique dans la mesure où les enchaînements des comportements sont estimés sur une courte période, sans prendre la mesure du renouvellement des occupants des immeubles et de l'évolution des usages au cours du cycle de vie des ménages stables dans leur logement. De son côté, l'analyse par séquence du cycle de vie montre qu'il est possible de mettre en évidence la continuité temporelle des usages sur un temps long à partir de variables simples et accessibles dans les grandes bases de données. Mais il reste à les intégrer dans des modèles plus complexes. Enfin, la modélisation des comportements à partir de données présentes dans le recensement montre tout l'intérêt d'une cartographie permettant les emboîtements d'échelles. Reste posée la question de savoir s'il est envisageable de reproduire la méthode en intégrant les caractéristiques constructives des immeubles et les consommations énergétiques pour rendre le modèle plus utile dans l'aide à la conception.

Dans cette perspective, dans le champ de la consommation énergétique des bâtiments résidentiels, l'horizon à atteindre nous semble être celui d'une association entre ces trois directions méthodologiques. L'objectif est de parvenir à une modélisation qui tienne compte de la flexibilité des usages, du renouvellement et de la stabilité des occupants, des caractéristiques et du vieillissement des bâtiments, des emboîtements d'échelles allant du global au projet. Ce

cadre méthodologique ambitieux doit être co-construit entre plusieurs disciplines et nécessite de lever plusieurs verrous.

Le premier verrou est celui des données disponibles. Nous ne disposons pas à l'heure actuelle de bases de données qualitatives et quantitatives portant conjointement sur les caractéristiques constructives et les comportements énergétiques. Sa constitution est un impératif si l'on veut disposer d'un corpus de données qualitatif et quantitatif homogène et représentatif de l'échelle nationale. Cette base doit informer sur les variables relatives à l'occupation des logements et des immeubles, les caractéristiques techniques des bâtiments, les enchaînements des comportements et les consommations énergétiques. Il est cependant illusoire d'imaginer pouvoir réaliser une enquête aussi complète représentative à la fois au niveau national et à tous les échelons locaux. Elle devra donc être construite en prenant soin d'être compatible avec de grandes bases de données nationales, tel le recensement, plus limitées dans le champ énergétique, mais plus représentatives compte tenu de l'exhaustivité du corpus. L'idée est de traduire la complexité des processus de consommation des immeubles en quelques indicateurs synthétiques des comportements et des caractéristiques constructives, modélisables avec un nombre limité de variables disponibles dans ces grandes bases. Certes, ces modèles ne traduiront qu'une partie de la réalité des processus, mais celle-ci pourra être cartographiée au niveau global comme au niveau local.

Le deuxième verrou à lever est celui des approches statiques. Il s'agit de comprendre et d'intégrer dans les modèles l'impact du cycle de vie des ménages et de l'usure des bâtiments sur les consommations. Cette connaissance est nécessaire si l'on veut saisir l'adaptation des comportements énergétiques aux situations familiales et aux espaces domestiques. Comment évoluent les comportements de familles durablement installées dans leur logement ? Ces comportements changent-ils lors d'un déménagement ? Existent-ils des formes d'usages imposées par l'environnement résidentiel ? Enfin, quel est l'impact du vieillissement du bâtiment sur les consommations énergétiques ? En un mot, comment saisir à la fois les effets conjoints du cycle de vie des occupants et de l'obsolescence des immeubles? Du cadre domestique et des caractéristiques des ménages ? Il s'agit donc de revenir à des enquêtes longitudinales, telles que celles que l'on a connues dans les années 1970, tout en les perfectionnant afin de suivre les comportements des ménages stables et mobiles et les consommations des immeubles dans la durée. Ce suivi nous semble indispensable si l'on veut parvenir à construire des modèles dynamiques des consommations des bâtiments permettant d'effectuer des simulations expérimentales dans une profondeur temporelle.

Le troisième verrou est le cloisonnement entre les modélisations heuristiques et celles ciblées sur l'aide à la conception. Si les premiers types de modèles ont vocation à reproduire des processus aux échelles globales, les seconds sont construits de façon *ad hoc* pour anticiper

les consommations des bâtiments lors de projets de réhabilitation ou de construction. Ce verrou recouvre en fait la question sensible de la production de modèles génériques globaux dont on sait qu'ils sont inadaptés à la diversité des situations locales. Là encore, la solution pourrait venir de la production des données alimentant les modèles. Plus précisément il s'agirait de concevoir des grilles d'enquêtes globales susceptibles d'être reproduites localement, entièrement ou partiellement, afin d'être utilisées pour construire des modèles d'aide à la décision de projets. Les modèles globaux pourraient être ainsi affinés par des données complémentaires au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'échelle du projet et de sa complexité.

Lever ces trois verrous demande de l'investissement et du temps dans un contexte d'une transition énergétique qui s'impose à court ou moyen terme. Les cadres de la méthode de production de modèles dynamiques de consommation des bâtiments s'inscrivent dans un croisement entre des modèles complets du type de celui produit par Eric Vorger, et des modèles simplifiés du type de ceux que nous avons produits pour cartographier les comportements énergétiques. Il est donc nécessaire de hiérarchiser les priorités de recherches entre le court et le long terme.

Une première priorité serait de prolonger l'efficience du modèle de comportements énergétiques, pour affiner les algorithmes de simulations de l'impact des variations du peuplement et de la morphologie des immeubles sur les usages et les consommations énergétiques des bâtiments. Dans ce cadre, il est nécessaire de prolonger les recherches sur les liens entre comportements et consommations d'une part, et sur la prise en compte des caractéristiques des immeubles d'autre part. Enfin, l'ergonomie du modèle de cartographie nécessite d'être amélioré pour réduire le temps de restitution graphique des calculs et faciliter son utilisation. L'objectif étant de produire à court terme un modèle *open source* permettant des simulations sur des périmètres restreints à l'échelle d'un ou de plusieurs Iris. Ce modèle pourrait avoir une forte portée heuristique et être utile pour d'autres recherches, mais aussi pratique car mobilisable pour anticiper, à l'échelle du quartier, les retombées énergétiques de la stabilité ou du renouvellement de la population, celui de l'obsolescence des immeubles ou d'un projet urbain.

Une seconde priorité serait de s'appuyer sur les travaux d'Eric Vorger pour produire un modèle stochastique de consommations énergétiques des immeubles plus dynamique. Au-delà de l'impact énergétique des changements d'états des comportements au cours de la journée ou de la semaine, il s'agirait de simuler, cette fois-ci à l'échelle de l'immeuble, les changements d'états dans le temps plus long, en fonction d'hypothèses sur le renouvellement de l'occupation ou de son vieillissement dans le cas d'une stabilité résidentielle. Les hypothèses pourraient également concerner l'impact de l'obsolescence d'un projet.

Les cadres de la méthode étant ainsi posés, à moyen terme une troisième priorité serait de travailler sur l'enchaînement des deux approches. Celui-ci permettrait d'envisager un modèle dynamique simplifié global et cartographiable, qui s'affinerait en tenant compte des changements d'états complexes dès lors que l'on s'approcherait de l'échelle du projet et de son devenir énergétique. La robustesse des simulations s'améliorant dès lors qu'à plus long terme, des bases de données homogènes dans le temps et l'espace seraient mises à disposition pour l'alimenter et ajuster les algorithmes à la réalité des processus. Voire en les complétant par l'ACV des bâtiments permettant de se situer en amont du projet.

RÉFÉRENCES

Abrahamse W., Steg L., Vlek C., & Rothengatter T. (2007) "The effect of tailored information, goal setting, and tailored feedback on household energy use, energy-related behaviors, and behavioral antecedents", *Journal of environmental psychology*, *27*(4), 265-276.

Belaïd F. (2016) "Understanding the Spectrum of Domestic Energy Consumption: Empirical Evidence from France", *Energy Policy*, 92, 220-233.

Binswanger M. (2001) "Technological progress and sustainable development: what about the rebound effect?", *Ecological Economics*, 36(1), 119–132.

Bonnin M. (2016) *Habitable et confortable : modèles culturels, pratiques de l'habitat et pratiques de consommation d'énergie en logement social et copropriétés*, Thèse de Doctorat en Architecture, Université Paris-Nanterre.

Bourgeois A., Pellegrino M. and Lévy J.-P. (2017) "Modeling and mapping domestic energy behavior : Insights from a consumer survey in France", *Energy Research & Social Science*, 32, 180-192.

Brookes L. (1990) "The greenhouse effect: the fallacies in the energy efficiency solution", *Energy Policy*, 18(2), 199–201.

Brounen D. and Kok N. (2011) "On the economics of energy labels in the housing market", *Journal of Environmental Economics and Management*, 62 (2), 166-79.

Brounen D., Kok N., Quigley J. M. (2012) "Residential Energy Use and Conservation: Economics and Demographics", *European Economic Review*, 56, 931–945.

Brounen D., Kok N. and Quigley J. M. (2013) "Energy literacy, awareness, and conservation behavior of residential households", *Energy Economics*, 38 (0), 42-50.

Buildings Performance Institute Europe (BPIE) (2013) *Stimuler la rénovation des bâtiments : un aperçu des bonnes pratiques*, Bruxelles, BPIE.

http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/150_EX_Stimuler_la_renovation_des_batiments_bonnes_pratiques_BPIE_2013.pdf

Cayla J.-M. (2011) *Les ménages sous la contrainte carbone*. Thèse de doctorat, Ecole des Mines.

Cayla J.-M., Maizi N., and Marchand C. (2011) "The role of income in energy consumption behaviour: Evidence from French households data", *Energy Policy*, 39 (12), 7874-83.

Charlier D. (2015) "Energy efficiency investments in the context of split incentives among French households", *Energy Policy*, *87*, 465-479.

Dubin J. A. and McFadden D. L. (1984) "An econometric analysis of residential electric appliance holdings and consumption", *Econometrica*, 52 (2), 345-62.

Estiri H. (2015) "The indirect role of households in shaping US residential energy demand patterns", *Energy Policy*, 86, 585-94.

Frey C. J., LaBay D.G. (1983) "A Comparative Study of Energy Consumption and Conservation ACRoss Family Life Cycle", in Bagozzi R.P., Tybout A.N., Abor A., (eds), *Advances in Consumer Research*, 10, 641-646.

Fritzsche D. J. (1981) "An Analysis of Energy Consumption Patterns by Stage of Family Life Cycle", *Journal of Marketing Research*,18 (2), 227–232.

Garabuau-Moussaoui I. (2009) "Behaviours, Transmissions, Generations: Why is Energy Efficiency not Enough?", *ECEEE Summer Study Proceedings*, 33-43.

Haldi F. and Robinson D. (2009) "Interactions with Window Openings by Office Occupants", *Building and Environment*, 44, 2378–95.

Halvorsen B. and Larsen B. M. (2001) "The flexibility of household electricity demand over time", *Resource and Energy Economics,* 23 (1), 1-18.

Huang Y. J. and Brodrick J. (2000) *A Bottom-up Engineering Estimate of the Aggregate Heating Andcooling Loads of the Entire U.S. Building Stock*. LBNL--46303. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA (US).

Issa R. R. A., Flood I. and Asmus M. (2001) "Development of a Neural Network to Predict Residential Energy Consumption", In *Proceedings of the Sixth International Conference on Application of Artificial Intelligence to Civil & Structural Engineering*, ICAAICSE' 01. Stirling, Scotland: Civil-Comp Press, 65-66.

Jones R.V., Fuertes A. and Lomas K.J. (2015) "The socio-economic, dwelling and appliance related factors affecting electricity consumption in domestic buildings", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 901-17.

Kadian R., Dahiya R. P and Garg H.P. (2007) "Energy-Related Emissions and Mitigation Opportunities from the Household Sector in Delhi", *Energy Policy*, 35 (12), 6195–6211. doi:10.1016/j.enpol.2007.07.014.

Kaza N. (2010) "Understanding the spectrum of residential energy consumption: A quantile regression approach", *Energy Policy*, 38 (11), 6574-85.

Labandeira X., Labeaga J.-M. & Rodríguez M. (2006) "A residential energy demand system for Spain", *The Energy Journal*, 87-111.

Larsen B.M. and Nesbakken R. (2004) "Household electricity end-use consumption: results from econometric and engineering models", *Energy Economics,* 26 (2), 179-200.

Leahy E. and Lyons S. (2010) "Energy use and appliance ownership in Ireland", *Energy Policy*, 38 (8), 4265-79.

Lévy J.-P., Roudil N., Flamand A., Belaïd F (2014) "Les déterminants de la consommation énergétique domestique", *Flux*, 96, juin, 40-54.

Lévy J.-P. and Belaïd F. (2018) "The determinants of domestic energy consumption in France: Energy modes, habitat, households and lifes cycles ", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2104-2114.

Lopes M. A. R., Antunes C. H. and Martins N. (2012) "Energy behaviours as promoters of energy efficiency: A 21st century review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 16 (6), 4095-104.

McLoughlin F., Duffy A. and Conlon M. (2012) "Characterising domestic electricity consumption patterns by dwelling and occupant socio-economic variables: An Irish case study", *Energy and Buildings,* 48, 240-48.

Majcen D., Itard L. C. M. & Visscher H. (2013) "Theoretical vs. actual energy consumption of labelled dwellings in the Netherlands: Discrepancies and policy implications", *Energy policy*, 54, 125-136.

MEEM (2016) *Chiffres clés de l'énergie*, Paris, Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS) Édition 2016

MEEM (2017) *Indicateurs et indices. Chiffres clés de l'environnement. Partie 2 Gestion et utilisation des ressources naturelles*.
http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/indicateurs-indices/li/partie-2-gestion-utilisation-ressources-naturelles.html

Morgan M. et Morrison M. (1999) "Models as mediating instruments" dans Morgan M. et Morrison M. (dir.) *Models as mediators: perspectives on natural and social science, Ideas in context* (52), Cambridge University Press, Cambridge pp 10-37.

Morrison B.M., Gladhart P.M. (1976) "Energy and Families: The Crisis and the Response", *Journal of Home Economics*, 68, 15-18.

Nesbakken R. (1999) "Price sensitivity of residential energy consumption in Norway", *Energy Economics*, 21(6), 493-515.

O'Neill B. C., Chen B. S. (2002) "Demographic Determinants of Household Energy Use in the United States", *Population and Development Review*, 28, 53–88.

Orea L., Llorca M. & Filippini M. (2015) "A new approach to measuring the rebound effect associated to energy efficiency improvements: An application to the US residential energy demand", *Energy Economics*, 49, 599-609

Ouyang J. & Hokao K. (2009) "Energy-saving potential by improving occupants behavior in urban residential sector in Hangzhou City, China", *Energy and Buildings*, *41*(7), 711-720.

Page J. (2007) *Simulating occupant presence and behaviour in buildings*, Thèse de doctorat de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Pellegrino M. (2013) "La consommation énergétique à Calcutta (Inde) : du confort thermique aux statuts sociaux", *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Volume 13, N°1 | avril,URL : http://vertigo.revues.org/13395 ; DOI : 10.4000/vertigo.13395

Pellegrino M., Musy M. (2017) "Seven questions around interdisciplinarity in energy research", *Energy Research & Social Science*, 32, 1-12.

Peuportier B., Thiers S., Guiavarch A. (2013) "Eco-design of Buildings Using Thermal Simulation and Life Cycle Assessment", *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, 39, 73-78

Polizzi di Sorrentino E., Woelbert E. & Sala S. (2016) " Consumers and their behavior: state of the art in behavioral science supporting use phase modeling in LCA and ecodesign", *Int J Life Cycle Assess*, 21, 237–251, DOI 10.1007/s11367-015-1016-2

Risch A. and Salmon C. (2017) "What matters in residential energy consumption: evidence from France", *International Journal of Global Energy Issues*, 40 (1-2), 79-115.

Santamouris M., Kapsis K., Korres D., Livada I., Pavlou C., Assimakopoulos M.N. (2007) "On the relation between the energy and social characteristics of the residential sector", *Energy and Buildings*, 39 (8), 893-905.

Sergi F. (2014) *Quelle méthodologie pour une étude des modèles DSGE ? Suggestions à partir d'un état des lieux des recherches sur la modélisation*, Documents de travail du Centre d'Economie de la Sorbonne, 67.

Schipper L. & Grubb M. (2000) "On the rebound? Feedback between energy intensities and energy uses in IEA countries", *Energy policy*, 28(6), 367-388.

Schoetter R., Masson V., Bourgeois A., Pellegrino M. and Lévy J.-P. (2017) " Parametrisation of the variety of human behavior related to building energy consumption in the Town Energy Balance (SURFEX-TEB v.8.2)", *Geoscientific Model Development*, n°10, https://doi.org/10.5194/gmd-10-2801-2017

Shove E. (2003) "Converging conventions of comfort, cleanliness and convenience", *Journal of Consumer Policy*, 26 (4), 395–418.

Shove E., Pantzar M., Watson M. (2012) *The Dynamics of Social Practice. Everyday Life and how it Changes*, London, Sage.

Sovacool B. K. (2014) "What are we doing here? Analyzing fifteen years of energy scholarship and proposing a social science research agenda", *Energy Research & Social Science*, 1, 1–29.

Subremon H. (2012) "Pour une intelligence énergétique : ou comment se libérer de l'emprise de la technique sur les usages du logement", *Métropolitiques*, 7 novembre. URL : https://www.metropolitiques.eu/Pour-une-intelligence-energetique.html

Swan L. G. & Ugursal V. I. (2009) "Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques", *Renewable and sustainable energy reviews*, *13*(8), 1819-1835.

Tonn B.E., White D.L. (1988) "Residential electricity use, wood use, and indoor temperature; An econometric model", *Energy Systems and Policy*, Volume 12 (3), 151-165.

Tu Y. (2018) "Urban debates for climate change after the Kyoto Protocol", *Urban Studies*, Vol. 55(1), 3–18.

Vaage K. (2000) "Heating technology and energy use: a discrete/continuous choice approach to Norwegian household", *Energy Economics*, 22 (6), 649-669.

Valenzuela C., Valencia A., White S., Jordan J.A., Cano S., Keating J., Nagorski J., Potter L.B. (2014) "An analysis of monthly household energy consumption among single-family residences in Texas, 2010", *Energy Policy* 69, 263–272.

Varenne F. (2010) *Les simulations computationnelles dans les sciences sociales. Nouvelles perspectives en sciences sociale*s (En ligne), Prise de parole (Ontario, Canada), Numéro spécial sur le thème de la simulation, 5 (2), 17-49.
<http://www.erudit.org/revue/npss/2010/v5/n2/index.html>. <10.7202/044073ar>.

Vorger E. (2014) *Étude de l'influence du comportement des habitants sur la performance énergétique du bâtiment*, Thèse de doctorat en Energétique et Procédés, Paris, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Wirl F. (1997) "Economic analysis of energy conservation." In Wirl F. *The Economics of Conservation Programs.*, Boston, MA, Springer, 13-59.

Yohanis Y. G. (2012) "Domestic energy use and householders energy behaviour", *Energy Policy*, 41, 654-65.