

# L'apport de la modélisation multi-agent dans la prédiction de la consommation d'énergie des bâtiments résidentiels

Quentin Reynaud\*<sup>1</sup>, Jérémy Albouys<sup>2,3,4</sup>, Yvon Haradji<sup>3</sup>, Christian Inard<sup>4</sup>, Nicolas Sabouret<sup>2</sup>, Mathieu Schumann<sup>3</sup>, François Sempé<sup>5</sup>

<sup>1</sup> QRCI, Clermont-Ferrand

\*[quentin.reynaud.pro@gmail.com](mailto:quentin.reynaud.pro@gmail.com)

<sup>2</sup> LIMSI-CNRS, rue John von Neumann, 91405 Orsay

<sup>3</sup> EDF Lab, Boulevard Gaspard Monge, 91120 Palaiseau

<sup>4</sup> LaSIE, Pôle Sciences et Technologie, Avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle

<sup>5</sup> FSCI, Paris

---

*RESUME.* Afin de simuler de manière plus fidèle la diversité de la consommation d'énergie résidentielle, les approches visant à intégrer les activités humaines (principalement grâce aux enquêtes emploi du temps) au sein de la simulation de consommation d'énergie des bâtiments se multiplient. Les approches les plus aptes à simuler des comportements humains d'une grande fidélité avec un pas de temps court sont les approches stochastiques centrées sur les individus. Mais aucune des approches existantes ne permet d'obtenir une variabilité satisfaisante des comportements, ni de simuler des individus capables de réagir, de s'adapter, et de s'organiser à plusieurs. Nous montrons dans cet article que la plateforme SMACH (Simulation de l'Activité et des Consommation dans l'Habitat), basée sur une approche multi-agent, permet de dépasser ces limites en simulant les dynamiques de vie au sein des foyers, tout en offrant un cadre commun aux différents aspects du comportement (présence dans le logement, aération des pièces, réglage des thermostats, etc.).

*MOTS-CLÉS :* Simulation multi-agent, consommation d'énergie résidentielle, modélisation de l'activité humaine.

---

*ABSTRACT.* Because of the crucial impact of human activity on energy consumption, many building and urban energy models integrate human activity modeling. For this purpose, Time-Use Surveys are especially useful and more and more widely used. The stochastic person-based approaches are particularly promising for high fidelity and short time-steps simulations, especially those able to simulate a high diversity in human activities. Since none of the existing approaches are able to reach a satisfying level of diversity in human activities simulation, nor to model emerging, reactive, adaptive, and collective behaviors, we present the SMACH platform and explain how it tackles these limits thanks to a multi-agent approach. As opposed to classical models that tend to consider each human behavioral aspect independently (e.g. "presence at home", "thermostats adjustment", or "housing ventilation"), our model allows to deal with every aspect within the same decisional process and simulate collective dynamics of daily household life.

*KEYWORDS:* Multi-agent simulation, Human activity modeling, simulation of household's energy consumption

---

## 1. INTRODUCTION

En 2019, le secteur résidentiel représentait 36 % de la consommation finale d'électricité en France (Source RTE – bilan électrique 2019). La compréhension et la maîtrise de la consommation électrique résidentielle est donc un enjeu fort pour la sobriété énergétique. Plusieurs générations d'outils de simulation énergétique se sont succédé pour modéliser et simuler la consommation d'énergie des bâtiments, des quartiers et des villes. De nombreux auteurs (Janda 2011; Yan et Hong 2018; Wagner et

O'Brien 2019) ont souligné l'importance de la prise en compte du comportement humain dans ces simulations, jugé en partie responsable des écarts entre les performances énergétiques observées et simulées (Brøgger et Wittchen 2018). La modélisation du comportement humain a donc été au cœur de nombreuses recherches en simulation énergétique ces dernières années. En nous basant sur l'état de l'art de ces travaux par (Happle et al. 2018), l'approche qui nous semble la plus à même de s'attaquer aux verrous actuels de la simulation énergétique est l'approche « stochastique centrée sur les individus ».

Dans la prochaine section nous présenterons un état de l'art des modèles de simulation du comportement humain dans le monde de la simulation énergétique. Après avoir discuté des limites des approches existantes, nous présenterons (section 3) la plateforme multi-agent SMACH (Simulation de l'Activité humaine et des Consommations dans l'Habitat), dont les dernières évolutions permettent selon nous de dépasser certaines de ces limites. Dans la section 4, nous nous intéresserons aux questions liées à la validation d'une telle plateforme. Nous concluons sur les apports de la simulation multi-agent dans le monde de la simulation énergétique des bâtiments, ainsi que sur les perspectives de notre travail.

## 2. ETAT DE L'ART

(Happle et al. 2018) s'intéressent aux causes des écarts entre les performances énergétiques théoriques et simulées des bâtiments, et souligne l'importance cruciale de la prise en compte des comportements humains, notamment au niveau de leur variabilité entre individus, ainsi que de leur impact sur les consommations au cours du temps. Les auteurs proposent une classification des modèles de comportement humain selon deux axes : le type de modélisation (déterministe ou stochastique), et le niveau de granularité (modélisation centrée sur l'environnement ou sur les individus). Ils montrent que les modèles déterministes ne permettent aucune variabilité de par l'utilisation d'emplois du temps statiques (« scénarios type ») ou de règles déterministes. Ils expliquent également que les approches centrées sur l'environnement ne modélisent pas les comportements humains individuellement, mais seulement les impacts de comportements agrégés à l'échelle du ménage sur une unité spatiale définie (une pièce ou une zone thermique), ce qui fait disparaître toute la variabilité individuelle des comportements. Les modèles qui nous intéressent sont ceux qui limitent le moins la variabilité, c'est pourquoi nous nous focalisons dans cet article sur les modèles stochastiques centrés sur les individus.

Les modèles stochastiques visent à reproduire des distributions statistiques, ainsi que des probabilités d'apparition de certaines situations. Les modèles les plus classiques utilisent des chaînes de Markov dont les matrices de transition sont basées sur des données provenant d'enquêtes statistiques (Richardson et al. 2010). Dans ce cadre, les enquêtes de type « emploi du temps » (« *Time Use Survey* »), des enquêtes portant sur les activités individuelles, sont particulièrement utiles et utilisées (Chenu et Lesnard 2006). Les approches centrées sur les individus modélisent dans le détail chaque individu : ses périodes de présence dans le logement, ses activités et ses actions. D'après (Happle et al. 2018), parmi les modèles stochastiques centrés sur les individus, seuls deux produisent de la variabilité entre individus : (An et al. 2017; Baetens et Saelens 2016). Cette variabilité est permise par la création de « types d'individus », un niveau intermédiaire entre les données statistiques et les individus simulés, qui permet de regrouper des données statistiques pour faire émerger le comportement typique d'une catégorie de personnes.

Toujours d'après Happle et al., tous les travaux de la littérature utilisent des modèles ad-hoc indépendants les uns des autres, dans lesquels les différents aspects du comportement sont traités séparément (par exemple la présence dans le logement, l'aération des pièces, le réglage des thermostats,

etc.). Or, plus on augmente le nombre d'aspects comportemental pris en compte en parallèle, plus l'hypothèse d'indépendance entre eux devient problématique, puisqu'ils vont avoir tendance à influencer les uns sur les autres, rentrer en compétition, ou se compléter. De même, les individus d'un même ménage sont considérés comme indépendants les uns des autres. Ainsi (Baetens et Saelens 2016) font l'hypothèse que « les ménages et les individus d'un même ménage se comportent de manière indépendante les uns des autres, et indépendamment du bâtiment dans lequel ils se trouvent, ainsi que de l'état du système énergétique ». Ils reconnaissent cependant que « l'indépendance des comportements est une hypothèse faite dans la majorité des recherches sur le comportement, bien que l'existence de corrélations entre comportements puisse être suspectée ». De telles hypothèses ont plusieurs défauts qui limitent le réalisme et la variabilité des comportements : l'auto-organisation collective au sein des ménages disparaît (la préparation des repas, l'utilisation partagée de la salle de bain, l'accompagnement des enfants à l'école, etc.), et l'environnement n'impacte pas les comportements .

Depuis de nombreuses années, les approches multi-agents se sont largement développées, notamment dans le domaine de la simulation sociale (Davidsson 2002; Sun 2006). Il s'agit de modèles dans lesquels les règles locales à chaque individu déterminent le comportement du système de manière émergente (le comportement global étant construit par l'interaction entre les différents aspects locaux). Les systèmes multi-agents permettent aussi de simuler et d'étudier des phénomènes collaboratifs (puisque les comportements des individus d'un même ménage sont interdépendants), réactifs et adaptatifs (puisque chaque individu est un agent intelligent, doté d'un processus décisionnel propre). La plateforme SMACH que nous présentons dans la section suivante utilise une telle approche pour proposer un modèle stochastique, centré sur les individus avec une forte variabilité inter-individuelle.

### 3. PRESENTATION DE L'ARCHITECTURE DE LA PLATEFORME SMACH

#### 3.1. PRESENTATION GENERALE DE L'ARCHITECTURE

SMACH est une plateforme de simulation multi-agent de l'activité humaine au sein de l'habitat permettant de simuler la consommation électrique des ménages. Développée depuis 10 ans en collaboration entre EDF R&D et plusieurs laboratoires de recherche académique, SMACH modélise la complexité du comportement humain (dynamiques collectives de vie quotidienne, confort thermique des habitants, prise en compte du prix de l'énergie, etc.) et ses impacts sur la consommation électrique. L'architecture permet de générer une population virtuelle (section 3.2) représentative d'une population cible (un ménage, une ville, etc.). Les foyers individuels de cette population sont ensuite simulés via le moteur multi-agent. Au cours d'une simulation, le comportement de chaque individu est construit grâce à un processus décisionnel personnel (section 3.3), prenant en compte les préférences de l'individu, ses buts, et l'état de l'environnement. Une présentation générale du modèle peut être trouvée dans (Amouroux et al. 2013). En articulant l'activité humaine avec des modèles et signatures d'appareils électriques, un modèle thermique du bâtiment et le prix de l'électricité, la courbe de charge du logement est ainsi calculée de manière *bottom-up*, au fil de l'utilisation ou de la programmation des équipements par les occupants (section 3.4).

#### 3.2. GENERATION DE LA POPULATION ET DONNEES UTILISEES

Dans (Baetens et Saelens 2016), chaque ménage généré est une copie d'un ménage présent dans l'enquête emploi du temps utilisée, ce qui peut être source de biais de représentativité dès que la taille de la population générée dépasse celui de l'enquête. Nous préférons utiliser une méthodologie basée sur

la génération de population virtuelle (« *population synthesis* »). On peut se référer à (Müller et Axhausen 2011) pour un état de l'art très complet de ces méthodes. Le processus de génération de population utilisé dans SMACH est basé sur les travaux de (Auld et Mohammadian 2010). Comme pour la plupart des modèles stochastiques existants, les données comportementales utilisées dans SMACH proviennent d'une enquête emploi du temps (« enquête emploi du temps 2009-2010 », INSEE). Nous utilisons également d'autres enquêtes de l'INSEE plus spécifiques à la génération de la population « recensement de population 2014 », « enquête logement 2013 », « enquête équipement des ménages 2015 ».

Nos populations virtuelles générées sont statistiquement représentatives des caractéristiques de la population cible, telles que : type de ménages (couples, familles, etc.), âge, sexe, CSP, situation professionnelle des individus, type, surface et performance thermique du logement (réglementation thermique de sa date de construction ou de rénovation), météo (températures et flux solaires moyens sur 20 ans ou réels), type de chauffage et d'ECS, contrat d'électricité, emplacement géographique (département, zone urbaine, etc.). Selon les données disponibles, nous essayons également de respecter les probabilités de présence et le nombre des appareils électriques présents dans chaque logement, ainsi que leurs caractéristiques techniques principales (puissance et classe énergétique des réfrigérateurs ; puissance, température, capacité et efficacité des ballons ECS, type de cycle des lave-linges, etc.).

En ce qui concerne le comportement des individus générés, à l'instar des méthodes stochastiques centrées sur les individus classiques, nous utilisons des types d'individus, permettant de regrouper les données comportementales statistiques typiques d'une catégorie précise de personnes. Ces données sont utilisées pour générer un emploi du temps prévisionnel de la semaine de chaque individu, chaque activité ayant une durée estimée et une période préférentielle pour la réaliser (Reynaud et al. 2016).

### 3.3. PRESENTATION DU MODELE AGENT

Chaque individu est modélisé sous forme d'un agent intelligent avec des buts (l'emploi du temps), des connaissances (les activités des autres agents, le prix de l'énergie, etc.), et des préférences : température de confort (basée sur des enquêtes quantitatives), attitude plutôt orientée économie ou confort (basée sur des enquêtes qualitatives), etc. Le niveau de confort thermique des individus est calculé à partir d'une évolution du modèle de Fanger, en comparant leur température de confort avec la température d'air calculée par le modèle thermique de bâtiment, tout en prenant en compte l'activité courante de l'individu et son niveau de vêtue. Chaque activité possède un « degré de collectivité » indiquant comment les individus s'organisent pour la réaliser (exclusivement seul, plutôt à plusieurs, etc.), si leur emploi du temps le permet. Certaines activités (« emmener les enfants à l'école ») se déroulent exclusivement à plusieurs et impliquent une coordination forte. Les individus modifient donc leur comportement en fonction du comportement des autres agents (« j'ai prévu de prendre ma douche puis de déjeuner, mais la douche est occupée donc je prends mon petit-déjeuner d'abord »), en fonction du prix de l'énergie (« j'ai prévu de lancer la machine à laver ce matin, mais ce soir le prix sera plus faible, je vais donc attendre »), ou en fonction d'événements (« un ami sonne à la porte, j'étais en train de regarder la tv, mais je lui ouvre et lui prépare un café »). Ce modèle permet à nos agents d'exhiber des comportements émergents, collaboratifs, réactifs et adaptatifs. Pour chaque individu, un unique processus décisionnel met en concurrence l'ensemble des aspects du comportement. La sélection de l'action se fait grâce à un niveau de priorité qui varie dynamiquement pour chaque action, en fonction des connaissances de l'agent, de ses préférences et du contexte. Plus de détails peuvent être trouvés dans (Reynaud et al. 2018).

### 3.4. CALCUL DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE BASE SUR L'ACTIVITE

La consommation d'énergie du foyer est calculée en la considérant comme une conséquence de l'interaction des individus avec leur environnement, au pas de temps de la minute. SMACH simule trois catégories d'appareils : pilotés (tels que le chauffage ou l'ECS), associés à une activité (par exemple une TV pour l'activité « regarder la TV »), et programmés (par exemple un lave-vaisselle programmé pour un déclenchement à une heure précise) ; plusieurs appareils pouvant être associés à chaque activité. La puissance appelée par chaque appareil peut être constante, sous forme d'un cycle, ou bien un modèle thermique dynamique. Lorsqu'un appareil est directement lié à une activité, il se déclenche au moment où l'activité est effectuée (par exemple une TV pour l'activité « regarder la TV »). L'ECS se déclenche en fonction de la quantité d'eau chaude consommée par les individus du ménage et de l'asservissement du ballon ECS à un tarif donné. La consommation de chauffage est calculée à partir de la température de consigne choisie par les individus pour chaque pièce en fonction de leurs critères de confort, et de la température intérieure calculée par un modèle thermique de bâtiment multi-zone développé avec la bibliothèque Modelica BuildSysPro. Ce modèle thermique de bâtiment est co-simulé avec SMACH par le biais du standard d'interopérabilité FMI, tel que décrit dans la figure 1 et (Plessis et al. 2014). La température d'air impacte également les modèles d'ECS ou le réfrigérateur (déperditions). Chaque ménage de la population est simulé individuellement, les calculs pouvant donc être distribués. Les sorties de la plateforme incluent la courbe de charge du foyer par appareil et agrégée, ainsi que les diagrammes de présence et d'activité des individus, ou encore les plages d'utilisation de chaque appareil.

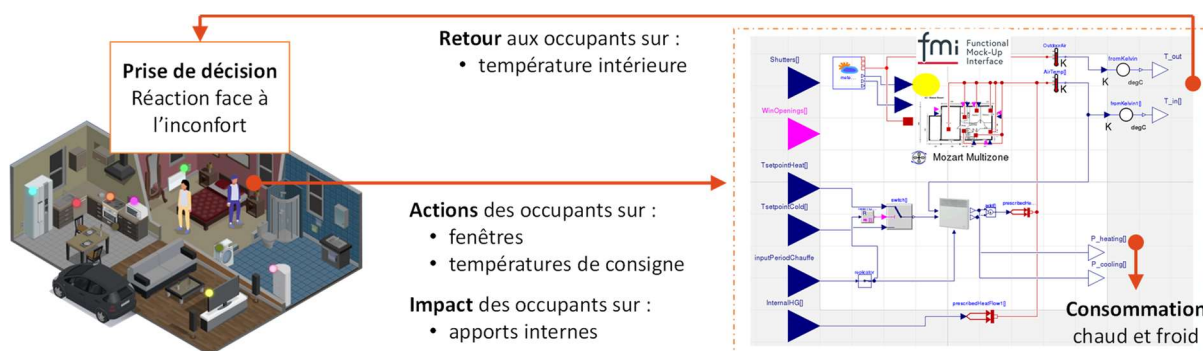


Figure 1 : variables échangées lors de la co-simulation activité / thermique du bâtiment

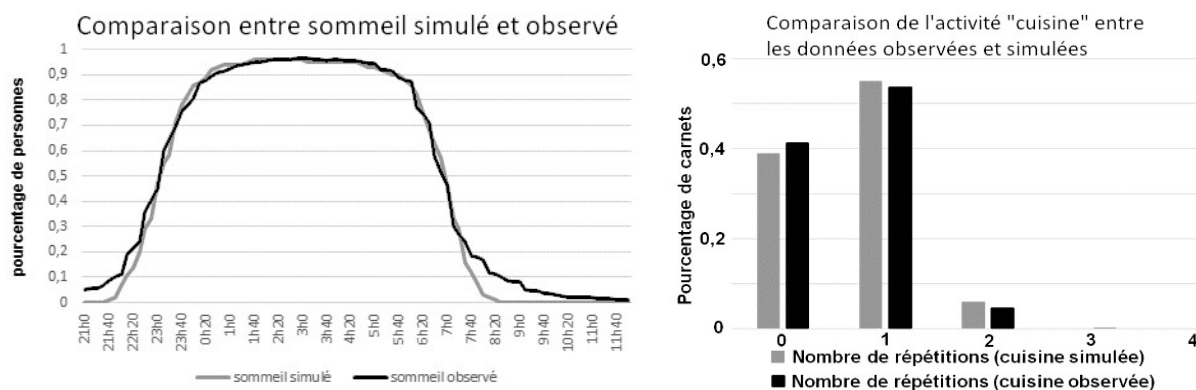
## 4. PROCESSUS DE VALIDATION D'UN SIMULATEUR CENTRE ACTIVITE HUMAINE

Afin de garantir d'une part que le caractère émergent des comportements individuels simulés permet bien une forte variabilité comportementale, et d'autre part qu'il n'enlève rien au réalisme des comportements agrégés (respect des données statistiques), une double validation individuelle et agrégée, comme explicité dans (Reynaud et al. 2016), est réactualisée régulièrement en fonction des données disponibles. Par ailleurs, le travail de validation porte à la fois sur les comportements et sur les consommations d'énergie afin de vérifier la cohérence de leur couplage. Ces deux axes de validation (individuel/agrégé et comportement/consommation) nécessitent des démarches de validation distinctes.

### 4.1. VALIDATION DE L'ACTIVITE HUMAINE SIMULEE

Nous avons commencé par vérifier que le système reproduit des indicateurs pertinents à l'échelle agrégée (par exemple le temps moyen de réalisation de chaque activité par jour, l'enchaînement des activités, etc.). Ainsi, les figures 2 et 3 montrent la comparaison entre 100 journées simulées par SMACH et les statistiques issues de la dernière enquête emploi du temps de l'INSEE. Au niveau

individuel, la validation de l'activité est passée par la mise en place d'une « simulation participative », pendant laquelle il a été demandé à des individus de plusieurs ménages de juger eux-mêmes du réalisme de la simulation de leur propre activité. Cette expérimentation, réalisée auprès de familles participant au démonstrateur « OpCo » en Bretagne, a permis de prouver la capacité de notre modèle à reproduire fidèlement l'activité humaine à l'échelle d'un ménage, sa complexité et ses logiques internes (Haradji et Poizat 2017). Ces travaux de validation ont permis de prouver l'existence des capacités réactive, adaptative et collaborative des individus simulés (Reynaud et al. 2016).



Figures 2 et 3 : deux exemples de validation d'indicateurs de haut niveau

#### 4.2. VALIDATION DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE PREDITE

Une double validation à l'échelle agrégée et individuelle a été réalisée. Nous avons d'abord généré une population de 1000 ménages représentatifs de la population de France métropolitaine (voir 3.2). Les consommations agrégées de ces 1000 ménages SMACH ont été confrontées aux profils annuels et hebdomadaires définis pour le processus de reconstitution des flux d'injection et de soutirage sur le réseau public de distribution (open data Enedis). L'objectif était ici de s'assurer de la convergence des données et résultats sur les principales caractéristiques de la consommation résidentielle (figure 4).

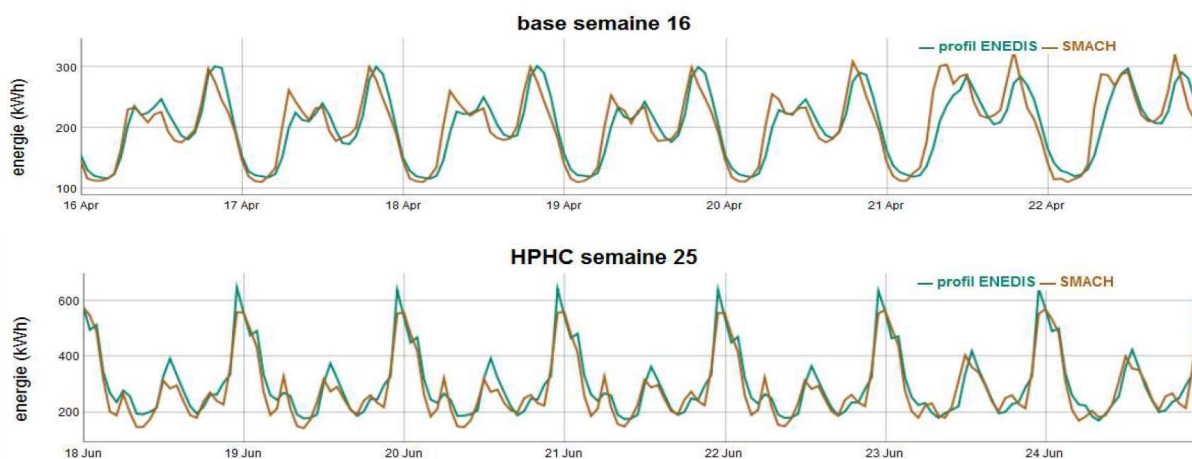


Figure 4 : Comparaison de profils hebdomadaires en tarif Base et Heures Pleines Heures Creuses

À chaque foyer de la population de 1000 ménages est associé une localisation et donc une météo. Les énergies hebdomadaires ont été comparées pour deux météos distinctes : moyenne sur 20 ans (construction type Meteonorm), et météo réelle de l'année 2012 (incluant une période de grand froid) (Figure 5). Les écarts constatés se déclinent différemment selon l'option tarifaire et ont permis

d'identifier un besoin de modélisation plus précise du fonctionnement des systèmes énergétiques (PAC et climatisation en particulier).

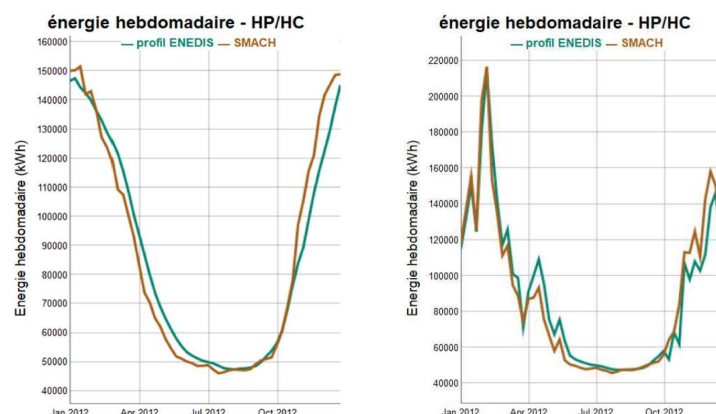


Figure 5 : Comparaison des énergies hebdomadaires en tarif Heures Pleines Heures Creuses (gauche : météo moyennes, droite : année 2012)

Une deuxième démarche complémentaire a été réalisée en se focalisant sur un échantillon plus restreint, sur la base des consommations réelles mesurées et agrégées de 8 foyers ayant participé à une expérimentation smart grid aval compteur à Lyon. La comparaison des courbes de puissance journalière avec les résultats SMACH montre des évolutions et dynamiques similaires, à l'exception de quelques jours atypiques. Certaines variations des données mesurées pourraient être un effet des options tarifaires proposées à certains foyers lors de l'expérimentation. Les puissances mesurées au pas de 30 minutes présentent une dispersion plus importante que les courbes simulées, et ces écarts ont permis d'identifier des évolutions liées à la distribution des volumes de ballons d'eau chaude dans la population générée.

## 5. CONCLUSION

En nous basant sur un état de l'art réalisé par (Happle et al. 2018), nous avons montré le besoin de disposer d'un modèle stochastique, centré sur les individus, doté d'une grande variabilité dans les comportements simulés et modélisant des individus capables d'interagir les uns avec les autres, de s'adapter à des modifications de l'environnement, et de mettre en concurrence l'ensemble des aspects de leur comportement afin de faire émerger leur activité. Nous avons présenté l'architecture SMACH qui s'appuie sur un modèle multi-agent du comportement humain. C'est une plateforme opérationnelle et utilisable tant à petite échelle (simulation d'un ménage, d'un immeuble, ou d'un quartier) qu'à grande échelle (simulation à l'échelle d'une ville ou d'une population représentative d'un pays entier).

Notre modèle est utilisé pour répondre à des problématiques venant de différents domaines : impact du foisonnement de la consommation résidentielle sur la recharge de véhicule électrique ou le dimensionnement de réseaux électriques, études visant à prédire l'impact de nouveaux équipements ou usages, etc. Dans cette optique, de nouveaux modèles sont intégrés à l'architecture, illustrant sa capacité à agréger des modèles hétérogènes. Pour l'autoconsommation collective, nous avons introduit la possibilité de réaliser de manière synchrone les simulations afin de mettre en œuvre l'interdépendance des foyers dans le cas, par exemple, du partage d'une production locale, associé à des processus de décision spécifiques. D'autres problématiques sont également explorées, telles que l'évolution des foyers au cours du temps (nouvelles activités ou équipements, composition de la famille...), l'usage de la simulation pour découvrir des populations exhibant des caractéristiques de consommation données

(méthode inverse), ou l'implémentation de modèles réalistes de réactions des individus simulés face à des signaux ou incitations au décalage d'usages, associées aux problématiques d'effacement.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

- Amouroux, Edouard, Thomas Huraux, François Sempé, Nicolas Sabouret, and Yvon Haradji. 2013. "Simulating Human Activities to Investigate Household Energy Consumption." In *Proceedings of the 5th International Conference on Agents and Artificial Intelligence*, 2:71–80.
- An, J, D Yan, and T Hong. 2017. "A Novel Stochastic Modeling Method to Simulate Cooling Loads in Residential Districts." *Applied Energy* 206: 134--149.
- Auld, Joshua, and Abolfazl Mohammadian. 2010. "Efficient Methodology for Generating Synthetic Populations with Multiple Control Levels." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2175 (December): 138–47.
- Baetens, Ruben, and Dirk Saelens. 2016. "Modelling Uncertainty in District Energy Simulations by Stochastic Residential Occupant Behaviour." *Journal of Building Performance Simulation* 9 (4): 431–47
- Brøgger, Morten, and Kim Bjarne Wittchen. 2018. "Estimating the Energy-Saving Potential in National Building Stocks – A Methodology Review." In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82:1489–96. Elsevier Ltd.
- Chenu, Alain, and Laurent Lesnard. 2006. "Time Use Surveys: A Review of Their Aims, Methods, and Results." *Archives Européennes de Sociologie/European Journal of Sociology* 47(3):335–59.
- Davidsson, Paul. 2002. "Agent Based Social Simulation: A Computer Science View." *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 5 (1).
- Happle, Gabriel, Jimeno A. Fonseca, and Arno Schlueter. 2018. "A Review on Occupant Behavior in Urban Building Energy Models." In *Energy and Buildings*, 174:276–92. Elsevier Ltd.
- Haradji, Yvon, and Germain Poizat. 2017. "Simuler l'activité Humaine." In *Encyclopédie d'analyse Des Activités*, 255–81. PUF.
- Janda, Kathryn B. 2011. "Buildings Don't Use Energy: People Do." *Architectural Science Review* 54 (1): 15–22.
- Müller, Kirill, and Kay W Axhausen. 2011. "Population Synthesis for Microsimulation: State of the Art." In *Transportation Research Board Annual Conference*.
- Plessis, Gilles, Edouard Amouroux, and Yvon Haradji. 2014. "Coupling Occupant Behaviour with a Building Energy Model - A FMI Application." In *10th International Modelica Conference*, 96:321–26. Lund, Sweden: Linköping University Electronic Press.
- Reynaud, Quentin, Nicolas Sabouret, Yvon Haradji, and François Sempé. 2018. "Simulation de l'activité Humaine. Une Étude Sur Le Réalisme Multi-Niveau." *Revue d'Intelligence Artificielle* 32 (2): 197–221.
- Richardson, I, M Thomson, D Infield, and C Clifford. 2010. "Domestic Electricity Use: A High-Resolution Energy Demand Model." *Energy and Buildings* 42 (10): 1878–1887.
- Sun, Ron. 2006. *Cognition and Multi-Agent Interaction: From Cognitive Modeling to Social Simulation*. Edited by Cambridge University Press.
- Wagner, Andreas, and Liam O'Brien. 2019. "Occupant-Centric Building Design and Operation (EBC ANNEX 79)."
- Yan, Da, and Tianzhen Hong. 2018. "Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings (EBC Annex 66)."