



JÉRÉMY ALBOUYS-PERROIS, NICOLAS SABOURET, YVON HARADJI,  
MATHIEU SCHUMANN, BENOIT CHARRIER, CHRISTIAN INARD

Étude de différentes configurations d'autoconsommation collective de l'énergie à  
l'échelle du quartier et à l'aide de la simulation multi-agent

Volume 3, n° 5-6 (2022), p. 477-499.

DOI not yet assigned

© Les auteurs, 2022.



Cet article est diffusé sous la licence  
CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION 4.0 INTERNATIONAL LICENSE.  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



*La Revue Ouverte d'Intelligence Artificielle est membre du  
Centre Mersenne pour l'édition scientifique ouverte*  
[www.centre-mersenne.org](http://www.centre-mersenne.org)  
e-ISSN : pending

# Étude de différentes configurations d'autoconsommation collective de l'énergie à l'échelle du quartier et à l'aide de la simulation multi-agent

Jérémy Albouys-Perrois<sup>a, b, c, d</sup>, Nicolas Sabouret<sup>b</sup>, Yvon Haradji<sup>c</sup>,  
Mathieu Schumann<sup>c, d</sup>, Benoit Charrier<sup>c, d</sup>, Christian Inard<sup>a, d</sup>

<sup>a</sup> LaSIE, CNRS, Université de La Rochelle, Avenue Michel Crépeau, La Rochelle, Cedex 1, 17042, France

<sup>b</sup> Université Paris-Saclay, CNRS, LIMSI, 91400, Orsay, France

<sup>c</sup> EDF R&D, France

<sup>d</sup> 4evLab, EDF R&D, CNRS, LaSIE, La Rochelle Université Avenue Michel Crépeau, La Rochelle Cedex 1, 17042, France

*E-mail* : jeremy.albouysperrois@gmail.com, nicolas.sabouret@universite-paris-saclay.fr, yvon.haradji@gmail.com, mathieu.schumann@edf.fr, benoit.charrier@edf.fr, christian.inard@univ-lr.fr.

---

**RÉSUMÉ.** — Cet article présente un modèle de simulation multi-agent multi-niveau d'autoconsommation collective de l'énergie. Le premier niveau de ce modèle est une simulation multi-agent de l'activité humaine couplée à une simulation thermique du bâtiment qui permet d'obtenir la consommation électrique d'un foyer. Le second niveau est une modélisation d'un groupement de foyers pratiquant l'autoconsommation collective d'énergie. Nous présentons une formalisation de cette notion de groupement ainsi que différentes organisations pour échanger de l'énergie. Nous étudions ensuite ces différentes organisations et nous montrons leur fort impact sur la répartition de l'énergie lorsque la production d'énergie est faible face à la consommation.

**MOTS-CLÉS.** — Simulation multi-agent, Bâtiment, Consommation énergétique, Autoconsommation collective.

---

## 1. INTRODUCTION

L'autoconsommation collective (ACC) d'énergie associe une production d'énergie électrique locale, par exemple à l'aide de panneaux photovoltaïques (PV) ou d'une éolienne, avec la consommation de toute ou partie de cette énergie par un ensemble de foyers situés à proximité des moyens de production [24, 25]. L'un des principaux intérêts est de maximiser la consommation d'énergie locale et renouvelable sans devoir

faire appel à des sources d'énergie centralisées. La compréhension des mécanismes de partage de l'énergie dans le cadre de l'autoconsommation collective passe par différents outils. L'expérimentation sur site [14] permet l'étude de situations spécifiques dans lesquelles l'ACC est appliquée. La simulation numérique [25] quant à elle permet d'étudier la pertinence technico-économique des nombreuses configurations d'ACC possibles et l'évolution des usages de l'énergie dans ces situations.

La simulation de l'autoconsommation individuelle (ACI) a déjà fait l'objet de nombreux travaux [28, 41]. Mais la simulation de l'ACC pose des problématiques de modélisation nouvelles. Ainsi, l'ACC est par exemple caractérisée par une grande diversité en terme d'équipement technique, comme les moyens de production ou de stockage qu'il faut prendre en considération. La littérature [23, 39, 43] souligne aussi l'existence de nombreuses manières d'échanger l'énergie dans le cadre de l'ACC : prendre en compte et étudier cette diversité dans un modèle informatique est une question difficile. Enfin, l'activité humaine au sein des foyers est également une composante importante à prendre en compte. En effet, comme l'ont montré [18, 19], une simulation réaliste de la consommation d'électricité au sein du secteur résidentiel passe par une compréhension et une anticipation de l'activité humaine au sein de l'habitat. Pour simuler des échanges d'énergie entre foyers, il est donc nécessaire de connaître la quantité consommée par chacun. Les besoins et excès en énergie de chaque foyer, qui sont des données primordiales afin de réaliser l'opération d'ACC, sont fortement dépendants de l'activité humaine et des caractéristiques du bâtiment dans lequel ils vivent. Leur étude passe donc par une simulation de l'activité et par la prise en compte du comportement thermique des bâtiments.

Dans nos précédents travaux [2, 3], nous avons présenté un modèle permettant la simulation de l'ACC tout en considérant l'activité humaine et les bâtiments pour simuler la consommation électrique des foyers, en nous appuyant sur la plateforme SMACH [33]. Cependant, les premiers résultats obtenus étaient basés sur une seule configuration d'ACC simplifiée à savoir que les foyers s'échangeaient l'énergie produite localement de manière séquentielle c'est-à-dire un foyer B recevait l'énergie que le foyer A ne consommait pas. Il existe toutefois d'autres configurations possibles d'autoconsommation d'énergie collective en termes d'acteurs, d'organisation des échanges d'énergie, de cadre contractuel, ou d'équipements de production ou de stockage d'énergie, que notre précédente étude n'avait pas considéré.

Dans cet article, nous proposons un modèle de simulation multi-niveaux dont certains niveaux reposent sur le paradigme multi-agent. Ce modèle permet de prendre en compte la diversité des configurations d'ACC. Le premier niveau (intra-agent) permet la simulation de l'activité d'un individu du foyer. Le second niveau consiste en une modélisation multi-agent pour simuler la dimension collective de l'activité humaine et la consommation énergétique au sein de chaque foyer (construit à partir de SMACH). Le troisième niveau du modèle est aussi un système multi-agent (SMA), dont le rôle est de simuler l'ACC et donc les échanges d'énergie entre les foyers. Ce niveau doit permettre l'étude d'une grande diversité de configurations d'ACC et leur impact sur le taux d'autoconsommation d'énergie. Un quatrième niveau permettant

de simuler l'ACC non plus entre des foyers mais entre des ensembles de foyers a été développé [1] mais n'est pas abordé dans cet article. Dans notre système il n'y a pas d'agrégation ou de désagrégation entre les différents niveaux, contrairement à ce qui se fait par exemple dans les travaux de [26]. Chaque agent du niveau foyer et groupe d'agent du niveau ACC est fixé par les données de la simulation.

L'originalité de notre modèle est double. Elle repose d'une part sur la prise en compte de l'activité humaine et les interactions entre les habitants pour simuler la consommation des foyers au sein du premier niveau. D'autre part, elle s'appuie sur différents pas de temps de simulation pour distinguer la simulation des opérations physiques (consommation et production d'énergie) de la couche contractuelle de l'ACC.

Dans la prochaine section, nous discutons des travaux antérieurs portant sur la simulation de regroupement d'agents et sur les problèmes d'allocation de ressources par des SMA. La section 3 présente la plateforme SMACH que nous utilisons pour simuler l'activité humaine et la consommation électrique des foyers. La section 4 est dédiée à la présentation du modèle d'ACC. La section 5 est dédiée aux modèles d'échange de l'énergie et la section 6 présente un cas d'étude et les résultats associés.

## 2. ÉTAT DE L'ART

### 2.1. SIMULATION DE L'ACTIVITÉ HUMAINE

Afin de prédire et de dimensionner les opérations d'ACC du secteur résidentiel, il est nécessaire d'avoir une connaissance précise de la consommation énergétique de chaque foyer. Cependant, une simulation réaliste de la consommation électrique d'un foyer doit prendre en compte l'activité de ses habitants [8, 15]. En effet, de nombreux auteurs ont montré qu'un niveau insuffisant de détails dans l'activité humaine simulée peut amener à de fortes différences entre la consommation électrique mesurée et celle simulée [10, 27, 29, 38].

Dans le cadre de la simulation de la consommation électrique au sein du secteur résidentiel, [18] ont montré que l'activité humaine peut être considéré comme un système complexe reposant sur quatre propriétés. Tout d'abord, l'activité humaine est caractérisée par une forte variabilité [21]. Elle va être différente d'un individu à un autre et va dépendre de ses caractéristiques mais aussi de son environnement [5]. C'est ce que l'on appelle *la variabilité inter-individuelle*. L'activité humaine va également être variable pour un même individu d'un jour à l'autre. Cette variabilité est dépendante de différents éléments comme son histoire, ses émotions ou l'évolution de son environnement. C'est ce que l'on nomme *la variabilité intra-individuelle*. Une telle variabilité amène les habitants des foyers à avoir des comportements réactifs et adaptatifs, c'est-à-dire des individus qui vont modifier leurs activités en fonction des changements survenant dans leur environnement (changement de tarif de l'électricité...). L'activité humaine est aussi caractérisée par l'apparition de phénomènes répétitifs. Selon [35] ces phénomènes, appelés *routines*, permettent à l'humain d'organiser ses activités au prix d'un moindre coût cognitif. Enfin l'activité humaine est caractérisée par sa dimension collective [16], qui permet aux individus de coopérer entre eux pour vivre ensemble.

Cette coopération est mise en place par l'échange d'informations et la communication entre les habitants d'un foyer.

Différentes approches existent aujourd'hui afin de simuler les consommations d'énergie associées à l'activité humaine. La plupart d'entre elles sont couplées à des modèles de thermique du bâtiment afin de calculer les besoins énergétiques liés par exemple au chauffage, à la climatisation, à la production d'eau chaude sanitaire (ECS), à l'éclairage artificiel ou à la ventilation [11, 44].

*Les modèles déterministes* permettent de simuler l'activité humaine à l'aide d'emplois du temps et des règles déterministes [15]. Dans de tels modèles les individus génèrent leur activité en sélectionnant une tâche dans leur emploi du temps. Mais ces modèles ne permettent pas les décisions des individus ne dépendent que de leur état et de celui de l'environnement, il n'y a pas de dépendance entre les avec l'activité des autres individus du foyers. Ainsi, l'utilisation d'emplois du temps fixes fait perdre les notions de variabilité intra et inter-individuelle [13]. Cela limite donc le réalisme de l'activité humaine simulé par ce type de modèle.

*Les modèles probabilistes* utilisent des modèles pour prédire l'apparition de certaines situations ou la réalisation de certaines actions par les occupants d'un foyer, cela permet de simuler des processus de décision dynamiques. Par exemple [42] utilisent des chaînes de Markov du premier ordre pour simuler l'activité humaine. Ces chaînes de Markov sont construites à partir des données des enquêtes emplois du temps (Time Use Surveys, TUS), qui fournissent plusieurs dizaines de milliers de carnets où chaque participant a noté toutes les 10 minutes leur activité courante pour un jour de semaine et un jour de week-end. La nature probabiliste des modèles stochastiques permet, à la différence des modèles déterministes, d'introduire de la variabilité intra et inter-individuelle dans l'activité simulée. Cependant, la nature probabiliste de ces modèles est également une limite car l'utilisation de probabilités tend à moyenniser les résultats obtenus lorsque de nombreuses simulations sont effectuées, et la variabilité de l'activité humaine sera donc réduite dans les simulations à grande échelle de la consommation d'électricité. De plus, ces modèles sont incapables de reproduire la réactivité et l'adaptabilité des individus aux changements de leur environnement, ou la dimension collective de l'activité humaine.

*Les modèles multi-agents* représentent chaque habitant d'un foyer par une entité autonome, un agent, qui va évoluer au sein d'un environnement. [33] ont mis en avant la capacité des SMA à simuler des individus réactifs et adaptatifs qui sont capables de collaborer entre eux pour réaliser différentes tâches. Les SMA sont donc considérés comme une approche permettant d'atteindre un meilleur niveau de réalisme dans la modélisation de l'activité humaine comparée aux modèles déterministes et stochastiques [4, 9, 12, 22]. [22] ont, par exemple, appliqué un SMA à la co-simulation entre un bâtiment et l'activité humaine. Leur modèle d'activité humaine est fondé sur la plateforme Brahms [36] qui repose sur une description fine de l'activité humaine et des appareils électriques. La plateforme SMACH, présentée en détail dans la Section 3, est un autre exemple d'approche simulant l'activité humaine grâce à la simulation multi-agent [4]. Pour la plateforme SMACH, l'activité humaine est co-simulée avec un

modèle de thermique du bâtiment. SMACH applique une approche holistique qui prend en compte les principaux aspects de l'activité humaine de manière globale et simule l'activité humaine ainsi que la prise de décision en tant que facteurs déterminants de la consommation d'énergie. Cependant, la production d'une énergie locale, les échanges d'énergie et donc l'ACC, ne sont pas encore implémentés au sein des différents modèle simulant l'activité humaine.

## 2.2. SIMULER LES ÉCHANGES D'ÉNERGIE COMME DES ÉCHANGES DE RESSOURCES

Une manière possible de décrire l'ACC est de considérer que l'énergie produite localement est une ressource divisible qu'il faut répartir entre les différents consommateurs participants à l'ACC. L'échange ou allocation de ressources est un problème fréquemment étudié à l'aide des systèmes multi-agents. Un problème d'allocation peut être défini comme un problème dans lequel un ensemble d'agents (coopératifs ou non) doit trouver une répartition de ses ressources [6]. Cette répartition doit correspondre au mieux aux préférences des agents qui sont souvent en compétition. Dans le modèle [6], l'algorithme d'allocation est un système multi-agent décentralisé basé sur les processus décisionnels de Markov (PDM) dans lequel les agents émettent ou acceptent des propositions d'échange de ressources avec d'autres agents. D'autres méthodes se sont intéressées à la mise en œuvre de systèmes centralisés afin de réaliser l'allocation de ressources. C'est le cas par exemple du protocole « Contract-Net Protocol » [37] dans lequel un manager propage une offre à d'autres agents qui répondent par une proposition (d'achat par exemple). Le manager sélectionne ensuite la meilleure proposition pour attribuer les ressources.

Mais l'énergie est une ressource de nature différente : elle ne se conserve pas, elle doit être utilisée immédiatement (en la consommant où en la stockant dans des batteries) et impose une gestion du réseau physique pour trouver un point d'équilibre entre production et consommation. C'est la raison pour laquelle l'ACC impose une organisation contractuelle précise pour régir les échanges d'énergie entre les foyers. Ainsi, en France, l'opérateur historique EDF doit garantir cet équilibre. Il n'est donc pas possible d'échanger de l'énergie n'importe comment avec n'importe qui. L'échange d'énergie est donc essentiellement une opération contractuelle entre les différents participants à l'ACC, qui consiste à déterminer ce qui doit être facturé à chacun.

Constatant le besoin d'un modèle capable de répondre aux contraintes de l'ACC réelle, cet article présente le modèle que nous utilisons pour simuler l'ACC entre un ensemble de foyers. Ces foyers sont rassemblés au sein de ce que nous appelons un *groupement*, implémenté dans notre modèle par un système multi-agent en charge de la simulation des échanges contractuels de l'énergie. Les foyers sont eux-mêmes des SMA dans lesquels les activités des individus définissent les besoins en énergie. Nous avons ainsi un modèle multi-agent multi-niveau pour la simulation des opérations contractuelles liées aux échanges énergie.

Dans ce modèle, nous ne cherchons pas à optimiser des regroupements pratiquant l'ACC, comme cela pourrait se faire dans les travaux sur la formation de coalition [17] ou dans les problèmes d'allocation de ressource [6]. Les regroupements de foyers

pratiquant l'ACC sont définis et fixés de manière contractuelle au sein des groupements. Notre objectif est d'étudier comment différentes configurations d'échanges peuvent impacter la consommation de ces groupements.

### **3. SIMULATION DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE DES FOYERS AVEC LA PLATEFORME SMACH**

Dans le modèle proposé, nous utilisons la plateforme SMACH pour simuler l'activité humaine et la consommation électrique des foyers pratiquant l'ACC. SMACH combine trois composants afin de simuler une consommation d'électricité réaliste.

Le premier composant de la plateforme SMACH est le générateur de population. En utilisant des données issues du recensement national de l'INSEE et des données reliées à l'énergie, la plateforme peut générer des populations statistiquement représentatives d'une zone géographique : une ville, une région, un pays... Chaque foyer est caractérisé par un profil de famille, l'âge, le sexe et la catégorie socio-professionnelle de chaque habitant, leur contrat d'électricité, le type de chauffage et de production d'Eau Chaude Sanitaire (ECS) électrique ou non électrique, un ensemble d'appareils électriques et le bâtiment lui-même caractérisé par sa surface et sa performance énergétique. De plus, le générateur construit pour chaque habitant ce que nous appelons un *emploi du temps prévisionnel* pour la journée et pour la semaine. Cet emploi du temps contient une liste de tâches qu'un individu peut effectuer au cours d'une journée, sans que les tâches soient encore positionnées précisément dans le temps. Chaque tâche dispose ainsi des caractéristiques suivantes : une durée minimale, une durée maximale, des périodes préférentielles de réalisation (intervalles de temps), un rythme quotidien ou hebdomadaire (nombre d'occurrences souhaitées) ainsi qu'un niveau de collectivité indiquant si une tâche est réalisable seule ou à plusieurs. Ces emplois du temps prévisionnels sont construits à partir des données issues des TUS réalisés en France entre 2009 et 2010 [33]. Les habitants, les bâtiments et les emplois du temps prévisionnels générés par SMACH forment une description statique de la vie quotidienne d'un foyer. L'emploi du temps prévisionnel seul ne suffit pas à connaître à l'avance les activités des différents individus simulés. Ces dernières seront la conséquence de la simulation des processus de décision de chaque individu lors de la simulation multi-agent.

Le second composant de la plateforme SMACH est le SMA de chaque foyer, ce qui correspond au second niveau de notre modèle. L'objectif de ce SMA est de transformer la description statique d'un foyer en une simulation dynamique de l'activité humaine. Chaque habitant est représenté par un agent dont l'activité est simulée par le SMA avec un pas de temps d'une minute. Cette simulation produit un diagramme d'activité décrivant pour chaque instant de la simulation l'activité réalisée par un habitant et sa localisation dans ou hors du foyer. Ce pas de temps d'une minute a été identifié par les concepteurs de la plateforme comme un pas de temps suffisant pour simuler une activité humaine réaliste, c'est à dire considérant les caractéristiques principales de l'activité humaine que nous avons présenté dans l'état de l'art (variabilité intra et inter-individuelle, collectivité, émergence de routines). Un pas de temps supérieur amène à un manque de précision tandis qu'un pas de temps inférieur ne permet pas d'améliorer

de manière significative le réalisme de l'activité humaine tout en conduisant à des temps de calcul plus longs. Au cours d'une simulation SMACH, les agents du second niveau de simulation de notre modèle sélectionnent une tâche à réaliser dans leur emploi du temps prévisionnel à chaque pas de temps. Ce processus de sélection est basé sur un niveau de priorité dynamique. La priorité d'une tâche change en fonction de paramètres qui lui sont associés comme sa durée, sa période préférentielle de réalisation ou son rythme. La disponibilité d'un appareil électrique, le prix de l'électricité ou encore les actions entreprises par les autres habitants du foyer peuvent aussi influencer le niveau de priorité d'une tâche. Chaque appareil électriques présent au sein du foyer est liée à une ou plusieurs tâches qui peuvent réalisés par les habitants, entraînant ainsi une consommation d'énergie à chaque pas de temps. Ainsi, la courbe de charge de la consommation électrique de chaque foyer simulé au sein de SMACH est la conséquence des activités réalisées par les habitants du foyer (figure 3.1).

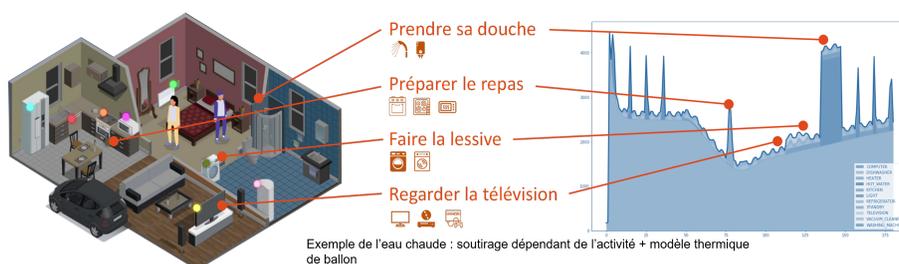


FIGURE 3.1. Représentation schématique du lien entre la Simulation Multi-Agent de l'activité dans SMACH et l'étude de la consommation énergétique. Dans le simulateur SMACH, les agents ne sont pas représentés graphiquement.

Le dernier composant de la plateforme SMACH est une co-simulation entre un modèle thermique multi-zone du bâtiment et le SMA simulant l'activité humaine. La co-simulation permet d'obtenir un calcul précis de la température de chaque pièce du bâtiment, impactée par différents paramètres et variables comme la température de l'air extérieur, l'isolation du bâtiment, la présence d'occupants dans chaque pièce (les agents du second niveau de notre modèle se déplacent de pièce en pièce pour la réalisation de leur activité) et la puissance des appareils de chauffage. Les bâtiments sont modélisés grâce au langage Modelica et la bibliothèque BuildSysPro [31]. La co-simulation entre le SMA et le modèle thermique du bâtiment est réalisée grâce au langage FMI (Fonctional Mock-up Interface). [30]. Le modèle thermique du bâtiment et la bibliothèque BuildSysPro ont été validés par intercomparaison grâce au BESTEST proposé dans une annexe de l'IEA [20] et des mesures effectuées en laboratoire [31].

Trois méthodes ont été utilisées afin de valider les résultats fournis par la plateforme SMACH. L'objectif était de vérifier le réalisme des diagrammes d'activités et des courbes de charge de la consommation électrique. Tout d'abord, la capacité du modèle à reproduire une activité humaine réaliste a été vérifiée en utilisant une

simulation participative ou des participants disposaient d’une interface dédiée leur permettant de contrôler leur propre avatar au cours d’une simulation de la plateforme SMACH [33]. Cette première expérience a permis de valider la capacité du modèle à reproduire une activité humaine la plus réaliste possible. Ensuite, une étude macroscopique a été réalisée sur 100 foyers simulés par SMACH pour vérifier que les simulations reproduisaient bien certains indicateurs agrégés quand ils étaient comparés aux résultats des TUS, *c’est-à-dire* durée moyenne des activités par jour, nombre de répétitions de chaque activité et séquence d’activité. Enfin, les courbes de charge agrégées de 1 000 foyers simulés et représentatifs de la France métropolitaine ont été comparées à des données hebdomadaires et annuelles de consommations d’électricité. Ce travail a permis de valider les valeurs et la dynamique des courbes de charge simulées, qui sont représentatives de la consommation énergétique au sein du secteur résidentiel [32].

De par ses capacités à simuler une activité humaine réaliste et à générer des populations statistiquement représentatives, SMACH est un outil très utile et performant pour étudier l’ACC. Nous proposons dans cet article de considérer l’ACC comme une construction multi-agent et multi-niveau basée sur des occupants de foyers qui participeront à des échanges d’énergie entre foyers. Nous utilisons pour simuler les deux premiers niveaux de notre modèle qui comprend la simulation individuelle de l’activité humaine et des activités collectives au sein du foyer sous la forme d’un système multi-agent la plateforme SMACH. Nous étendons la plateforme SMACH pour 1) prendre en compte l’autoconsommation individuelle d’énergie et 2) modéliser les échanges d’énergie entre des foyers participant aux opérations d’ACC. La figure 3.2 présente schématiquement les deux premiers niveaux qui forme la plateforme SMACH ainsi que le troisième niveau de notre modèle pour modéliser l’ACC.



FIGURE 3.2. Représentation schématique des trois niveaux de simulation du modèle

#### 4. LE MODÈLE DE GROUPEMENT

Dans cette section, nous présentons, notamment, un modèle de groupement utilisé pour simuler l’ACC au sein du secteur résidentiel. Au premier niveau, nous simulons l’activité individuelle des habitants grâce à la plateforme SMACH. Le second niveau est un SMA permettant de simuler les interactions entre les habitants et les appareils

électriques pour calculer la courbe de charge du foyer. Par ailleurs et dans le but de pouvoir simuler l'ACI, nous avons adapté ce second niveau de simulation en fournissant au foyer la possibilité de posséder un moyen de production afin que ces derniers puissent produire et consommer une énergie locale. Nous présentons ce modèle d'ACI dans la section 4.1. Le troisième niveau de notre modèle, qui est aussi un SMA, simule les échanges contractuels de l'énergie entre les foyers. Dans ce niveau une entité tierce est responsable de la réalisation des échanges d'énergie en suivant des règles précises pour une configuration d'ACC donnée. Ce niveau de simulation est présenté dans la section 4.2.

#### 4.1. SIMULATION DE L'AUTOCONSUMMATION INDIVIDUELLE D'ÉNERGIE

Pour simuler l'ACI, nous avons tout d'abord adapté la plateforme SMACH pour que le foyer concerné puisse produire sa propre énergie localement. Pour cela, les foyers sont équipés de moyens de production d'énergie. À l'heure actuelle, cette production est assurée par des panneaux photovoltaïques (PV). Ces moyens de production sont modélisés grâce au langage Modelica et à la bibliothèque BuildSysPro [31]. Tout comme le bâtiment, les panneaux PV sont co-simulés avec le SMA de l'activité humaine en utilisant le standard FMI. Les panneaux PV sont caractérisés par leur orientation, leur inclinaison et leur surface. Le modèle calcule la puissance produite par les panneaux PV à chaque pas de temps de la simulation en utilisant les données météorologiques associées au lieu simulé à savoir température extérieure, direction et vitesse du vent ainsi que les rayonnements solaires.

Ainsi, les foyers sont capables d'avoir à la fois une consommation d'énergie, résultant de l'activité humaine et de l'utilisation des appareils électriques ainsi qu'une quantité d'énergie produite si le foyer possède un moyen de production local. En fonction de ces quantités d'énergie produites et consommées, les foyers vont présenter un surplus ou un besoin d'énergie. Ceci est évalué par un nouvel agent présent dans le second niveau de notre simulation et qui est intégré dans chacun des foyers pratiquant l'ACC : **le module d'autoconsommation**. Le rôle de cet agent est de réaliser le bilan énergétique de l'ensemble des opérations liées à l'ACI. Plus concrètement, son rôle est de calculer le besoin ou le surplus en énergie du foyer. Dans le cadre de l'ACI, un besoin d'énergie implique toujours, pour un foyer, d'acheter de l'énergie à son fournisseur réseau tandis qu'un surplus d'énergie sera toujours revendu à un fournisseur réseau.

Formellement, pour un pas de temps de simulation  $t$ , on note  $e_{consumedHousehold}(h, t)$  la quantité d'énergie consommée par le foyer  $h$  et  $e_{producedHousehold}(h, t)$  la quantité d'énergie produite par les panneaux PV du foyer  $h$ . À partir de ces informations, le module d'autoconsommation peut calculer  $excess(h, t)$  et  $surplus(h, t)$ , les besoins et surplus en énergie du foyer  $h$  pour un pas de temps de simulation  $t$ . Dans le cadre de l'ACC, ces valeurs vont être utilisées pour réaliser les échanges d'énergie. La figure 4.1 présente schématiquement un foyer pratiquant l'ACI et les interactions entre les différents éléments du modèle.

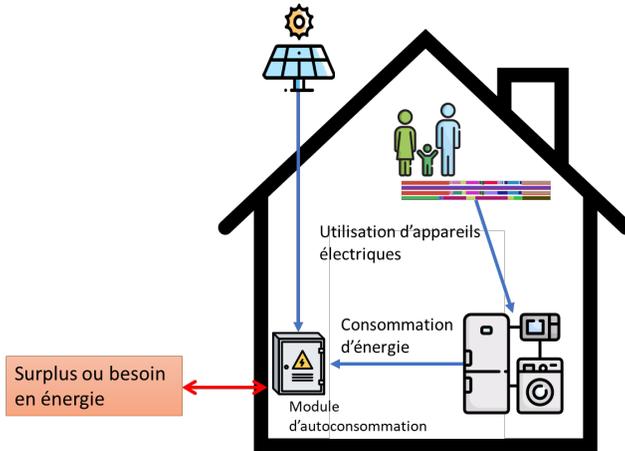


FIGURE 4.1. Représentation schématique d'un foyer pratiquant l'ACI

#### 4.2. SIMULATION DE L'AUTOCONSOMMATION COLLECTIVE D'ÉNERGIE

Nous nommons *groupement* le troisième niveau du modèle qui permet la simulation de l'ACC. Il est tout d'abord composé de foyers échangeant entre eux de l'énergie produite localement. Chaque SMA-foyer est donc vu comme un agent au niveau du groupement. Un groupement est également muni de moyens de production. Les moyens de production à l'échelle du groupement sont dits mutualisés ou collectifs. Ces derniers sont à la disposition du groupement et l'ensemble de leur production d'énergie sera répartie entre les foyers du groupement selon des règles contractuelles d'échange définies au sein de ce dernier. Pour ce faire, une co-simulation entre le groupement et les moyens de production d'énergie mutualisés s'appuyant sur le standard d'interopérabilité logicielle FMI a été développée [2]. Pour gérer cette répartition de l'énergie, chaque groupement est muni d'un agent appelé *place locale d'échange* (PLE), dont le rôle principal est de définir comment l'énergie produite au sein du groupement est répartie contractuellement entre les différents foyers. Pour cela, l'agent calcule la répartition de cette énergie en fonction de règles contractuelles définies entre les foyers en communiquant avec les agents « modules d'autoconsommation » des foyers situés au second niveau de notre modèle. L'ensemble des règles qui définissent la répartition de l'énergie, mises en œuvre par l'agent PLE, est appelé **organisation des échanges** et pourra être différente d'un groupement à un autre. Une fois l'énergie produite localement répartie, l'agent PLE calcule également la quantité d'énergie que chaque foyer a consommée auprès du réseau électrique.

La figure 4.2 illustre ce modèle. Le réseau n'est pas représenté sous la forme d'un agent : c'est la PLE qui détermine quelle part est vendue ou achetée par chaque foyer au réseau.

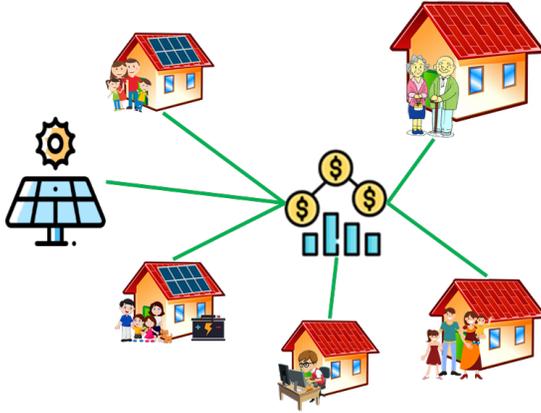


FIGURE 4.2. Un SMA-groupement pour la simulation de l'ACC. La place locale d'échange (au centre) coordonne les interactions entre les foyers pour la répartition de l'énergie.

#### 4.2.1. Formalisation

Nous présentons maintenant formellement cette notion de groupement qui permet la modélisation de l'ACC.

Soit  $H$  l'ensemble des foyers qui composent un groupement. Pour chacun de ces foyers, nous pouvons évaluer à chaque pas de temps de simulation  $need(h, t)$  et  $excess(h, t)$  le besoin et surplus en énergie d'un foyer pour le pas de temps précédent calculé par son module d'autoconsommation.

Pour le groupement,  $Prod$  permet de représenter l'ensemble des moyens de production mutualisés du groupement. Nous notons  $e_{produced}(t) : Prod \rightarrow \mathbb{R}^+$  la quantité d'énergie en kWh produite par un moyen de production mutualisé du groupement sur au de temps précédent. Nous notons également  $prop : H \times Prod \rightarrow [0, 1]$ , le taux de propriété d'un acteur du groupement envers un moyen de production. Ce taux de propriété permet de calculer la répartition des bénéfices. Par définition, les valeurs de  $prop$  doivent toujours satisfaire la contrainte suivante :  $\forall j \in Prod \sum_{i \in H} prop(i, j) = 1$ . Nous notons également  $E_{producedAsso}(t) = \sum_{j \in Prod} e_{produced}(j, t)$  la quantité totale d'énergie produite par l'ensemble des moyens de production du groupement au pas de temps précédent.

Pour le groupement,  $PLE$  correspond à la place locale d'échange qui est en charge de l'échange d'énergie entre les foyers. Pour ce faire, la place locale d'échange a pour entrées :

- $need(h, t)$  : besoin en énergie de chaque foyer ;
- $excess(h, t)$  : surplus en énergie de chaque foyer ;
- $E_{producedAsso}(t)$  : quantité d'énergie produite par les moyens de production collectifs.

Grâce à ces valeurs, la PLE échange d'abord l'énergie produite par les moyens de production collectifs et le surplus d'énergie des foyers, selon une organisation des échanges que nous notons  $pol = TauxFixe, TauxProportionnel, Concurrentielle$ . Ces organisations sont définies dans la section 5.

Ici, l'ACC est modélisée comme une opération contractuelle. Cela consiste alors à calculer l'allocation de l'énergie après que cette dernière ait été utilisée par les différents foyers et appareils électriques. La plateforme de simulation utilise donc deux pas de temps. Le pas de temps  $t$ , nommé pas de temps de simulation, déclenche le calcul des quantités d'énergie consommées et produites en fonction de l'activité humaine et de la production locale d'énergie. Cela correspond aux aspects physiques de la simulation effectuée par la plateforme SMACH à un pas de temps de 1 min. Le pas de temps de comptage  $c$  déclenche le calcul de l'allocation contractuelle d'énergie au niveau de la PLE en fonction des résultats agrégés de la période comptable précédente. Ce deuxième pas de temps a été fixée à 15 min, une valeur courante en Europe pour les compteurs intelligents.

Ainsi, en agrégeant les valeurs obtenues à chaque pas de simulation, la PLE va évaluer pour chaque foyer et à chaque pas de temps de comptage les fonctions  $e_{local}(c) : H \rightarrow \mathbb{R}^+$  qui représentent la quantité d'énergie obtenue à l'aide des moyens de production mutualisés du groupement et  $e_{network}(c) : H \rightarrow \mathbb{R}^+$  la quantité d'énergie consommée par le foyer et qui provient du fournisseur réseau. Il est à noter que  $need(h, c) = e_{local}(h, c) + e_{network}(h, c)$ , puisque l'énergie reçue par le foyer pour un pas de temps de comptage doit être égale à son besoin en énergie sur ce même pas de temps.

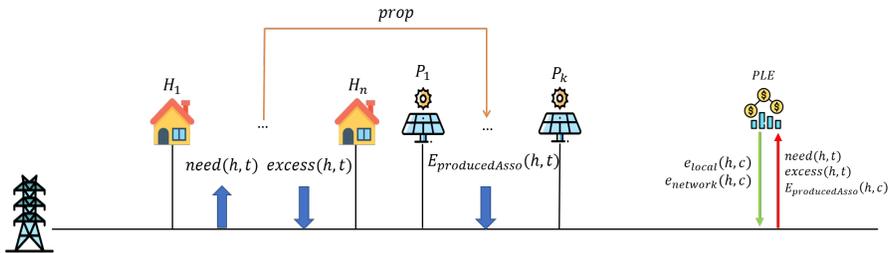


FIGURE 4.3. Représentation schématique du fonctionnement interne d'un groupement

Le groupement (Figure 4.3) est donc une simulation multi-niveau de l'ACC. Le premier niveau permet de simuler l'activité humaine individuelle. Le second permet de simuler la consommation d'énergie et l'ACI à l'échelle des foyers. Le troisième quant à lui permet la simulation des différentes configurations d'ACC.

## 5. MODÉLISATION DES ÉCHANGES

L'un des objectifs du modèle d'ACC est d'étudier comment différentes manières d'organiser les échanges d'énergie au sein d'un groupement peuvent impacter l'ACC.

Dans cette section, nous présentons trois familles de politiques d'échange. Nous présenterons les résultats dans la section suivante.

### 5.1. PRINCIPE GÉNÉRAL

Formellement, nous définissons *l'organisation des échanges d'énergie* comme l'ensemble des règles contractuelles qui vont permettre d'échanger l'énergie produite localement au sein d'un groupement. Ces organisations ont pour entrées les quantités d'énergie produite et appelée dans le groupement. En sortie, une organisation fournit la répartition de l'énergie produite localement c'est-à-dire la quantité d'énergie que chaque foyer a reçu et, le cas échéant, le prix payé par chaque foyer pour l'énergie reçue. Au sein du groupement, la place locale d'échange a en charge la mise en place de ces règles.

Des premières enquêtes et études [3] ont permis d'identifier trois types d'organisation des échanges entre les foyers :

- Taux fixe : chaque foyer reçoit une quantité d'énergie selon un taux fixe défini à l'avance ;
- Taux proportionnel : chaque foyer reçoit une quantité d'énergie proportionnellement à sa consommation ;
- Concurrentielle : l'énergie est achetée ou vendue sur un marché où vendeurs et acheteurs interagissent entre eux.

### 5.2. TAUX FIXE

Dans le cadre d'une organisation à taux fixe, les différents foyers qui composent un groupement reçoivent une part de l'énergie d'un ou plusieurs moyens de production.

Nous définissons *taux<sub>énergie</sub>* une fonction telle que  $taux_{\text{énergie}} : H \times Prod \rightarrow [0, 1]$ , correspondant au taux d'énergie qu'un foyer peut récupérer auprès d'un moyen de production, par rapport à sa production totale. Ce taux peut être contractuellement défini en fonction de différents paramètres, par exemple, proportionnellement à la surface des foyers (au tantième) ou en fonction du nombre de foyers dans le groupement. Nous notons  $\forall j \in Prod, \sum_{h \in H} taux_{\text{énergie}}(h, j) = 1$  la contrainte qui exprime le fait que pour un moyen de production donné, la somme des taux d'énergie doit être égale à 1. Cependant, avec ce type d'organisation, il peut arriver qu'un foyer reçoive plus d'énergie qu'il n'en a besoin. Ainsi, nous notons  $surplus_{\text{fixe}}(t)$  le surplus d'énergie qui apparaît lorsque des foyers ne peuvent pas consommer toute l'énergie que le groupement leur fournit. Il faut alors développer une stratégie pour gérer ce surplus d'énergie. Nous avons identifié deux stratégies possibles à savoir la revente complète du surplus ou une nouvelle répartition avec un algorithme itératif (algorithme 1). Cet algorithme calcule le surplus une fois les échanges au sein du groupement réalisés puis va répartir ce surplus entre les foyers ayant encore des besoins.

---

**Algorithm 1:** Algorithme de répartition itérative du surplus d'énergie pour une organisation à échanges à taux fixe

---

```

1 Soit  $n$  le nombre de foyer tel que  $besoin(h, c) > 0$ ;
2 Soit  $surplus_{fixe}(c) > 0$ ;
3 while  $surplus_{fixe}(c) \geq 0$  et  $n \geq 0$  do
4    $residu = surplus_{fixe}(c)$ ;
5   foreach foyer  $h$  do
6     if  $besoin(h, c) > \frac{surplus_{fixe}(c)}{n}$  then
7        $besoin(h, c) = \frac{surplus_{fixe}(c)}{n}$ ;
8        $residu = \frac{surplus_{fixe}(c)}{n}$ ;
9        $e_{localFoyer}(h, c) = e_{localFoyer}(h, c) + \frac{surplus_{fixe}(c)}{n}$ ;
10      end
11     else if  $besoin(h, c) \geq 0$  then
12        $e_{localFoyer}(h, c) = e_{localFoyer}(h, c) + besoin(h, c)$ ;
13        $besoin(h, c) = 0$ ;
14        $residu = besoin(h, c)$ ;
15        $n = n - 1$ ;
16     end
17   end
18    $surplus_{fixe}(c) = residu$ 
19 end

```

---

Pour chaque foyer, nous calculons  $avoir(h, t) = \sum_{j \in Prod[taux_{\text{energie}}(h, j) * e_{produced}(j, t)]}$  la quantité d'énergie produite localement et qu'un foyer peut recevoir et  $besoin(j, t)$  son besoin en énergie. Deux cas sont alors possibles :

- $avoir(j, t) \leq besoin(h, t)$ 
  - $e_{local}(h, t) = avoir(h, t)$
- $avoir(h, t) > besoin(h, t)$ 
  - $e_{local} = besoin(h, t)$
  - $surplus(h, t) = avoir(h, t) - besoin(h, t)$

### 5.3. TAUX PROPORTIONNEL

Au sein d'un groupement pratiquant une organisation à taux proportionnel, les différents foyers reçoivent une partie de l'énergie produite localement proportionnellement à leur besoin en énergie. Pour la mise en place de cette organisation nous définissons  $E_{produced}(t)$  la quantité totale d'énergie produite au sein d'un groupement. Nous définissons également  $E_{consumed}(t)$  la quantité totale d'énergie consommée par les foyers du groupement. Nous sommes alors confrontés à deux cas pour répartir l'énergie :

- $E_{consumed}(t) > E_{produced}(t)$ , dans ce cas pour chaque foyer nous avons :

$$e_{local}(h, t) = \frac{besoin(h, t)}{E_{consumed}(h, t)} * E_{produced}(t)$$

- $E_{consumed}(t) \leq E_{produced}(t)$ , dans ce cas pour chaque foyer nous avons :

$$e_{local}(h, t) = e_{consumed}(h, t)$$

Ce type d'organisation permet de répartir toute l'énergie entre les foyers sans leur attribuer plus que ce qu'ils ne demandent.

#### 5.4. CONCURRENTIELLE

Pour ce type d'organisation, les foyers s'échangent de l'énergie à travers un marché et des processus d'achat et de vente. Nous considérons deux fonctionnements possibles. Un premier dans lequel les prix sont fixés par les acheteurs et un second qui considère que les vendeurs fixent les prix. Dans les deux cas, nous considérons deux tableaux :  $offres_{achat}$  et  $offres_{vente}$  contenant chacune des offres de vente et d'achat d'énergie. Considérons, par exemple, le cas où les acheteurs fixent les prix. Le tableau  $offres_{achat}$  sera alors composé d'ensembles :

$$achat = \langle acheteur, quantité_{achat}, prix \rangle .$$

Le tableau  $offres_{vente}$  quant à lui sera composé d'ensembles :

$$vente = \langle vendeur, quantité_{vente} \rangle .$$

L'algorithme de calcul de cette organisation va faire correspondre les offres d'achat proposant le prix le plus élevé avec les différents acheteurs. Ce processus est répété jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'énergie à vendre ou que les offres des acheteurs soient satisfaites.

Le processus est identique dans le cas où les vendeurs fixent les prix, sauf que ce sont les offres de vente avec les prix de vente les plus bas qui seront considérées en priorité.

Cette organisation pose également la question de l'établissement des prix pour les acheteurs et les vendeurs. Nous n'abordons pas cette problématique dans cet article, mais un mécanisme d'établissement des prix sera intégré dans le futur. Par mesure de simplification, les prix sont pour le moment sélectionnés aléatoirement dans un ensemble donné.

L'organisation concurrentielle proposée ici est un modèle simple et d'autres systèmes concurrentiels seront intégrés dans le futur comme des enchères à doubles carnets d'ordres [40] pour permettre l'étude de différentes organisations concurrentielles d'échanges.

## 6. CAS D'ÉTUDE ET RÉSULTATS

Actuellement, l'étude et la compréhension des différents mécanismes de l'ACC sont des enjeux importants pour les principaux acteurs du monde de l'énergie. Le modèle de simulation de l'ACC présenté dans cet article a pour objectif de permettre aux experts de définir et simuler de nombreuses configurations d'ACC afin de valider des hypothèses où de répondre à des questionnements scientifiques, techniques ou économiques en lien avec l'ACC. Dans cette partie nous présentons donc un cas d'étude dans lequel nous étudions l'impact météorologique sur un groupement de foyer pratiquant l'ACC. Pour cela nous avons simulés le ensemble de foyers dans deux villes française différentes : Nice et Lille.

### 6.1. CONTEXTE DE LA SIMULATION

Soit un groupement composé de 10 foyers situés dans la ville de Nice. Le Tableau 6.1 donne les principaux paramètres des foyers étudiés. Ces foyers et leur paramètres sont générés, pour cette expérimentation, grâce au générateur de population de la plateforme SMACH et sont représentatifs de la population française. En plus des caractéristiques du bâtiment, il donne deux informations sur les foyers à savoir le nombre de personnes et s'il y a au moins un retraité ou une personne inactive pour renseigner la présence d'une personne dans le foyer pendant les jours ouvrés. Les activités des individus de ces foyers ont été générées en s'appuyant sur l'Enquête Emploi du Temps de l'INSEE [34].

TABLE 6.1. Paramètres des foyers

	Foyer A	Foyer B	Foyer C	Foyer D	Foyer E	Foyer F	Foyer G	Foyer H	Foyer I	Foyer J
Surface	115m <sup>2</sup>	68m <sup>2</sup>	72m <sup>2</sup>	50m <sup>2</sup>	257m <sup>2</sup>	95m <sup>2</sup>	55m <sup>2</sup>	206m <sup>2</sup>	59m <sup>2</sup>	77m <sup>2</sup>
Réglementation thermique	2020_H1H2	2012	1989	Avant 1974	2000_H1H2	1974	1974	BBC	1974	2000H1H2
Chauffage électrique	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Oui	Non	Non	Oui
ECS électrique	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Non	Non	Oui
Heures creuses	Base	22h30-6h30	23h00-7h00	23h30-7h30	Base	22h30-6h30	23h30-7h30	22h30-6h30	Base	2h00-7h00 / 14h00-17h00
Panneaux PV	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
Nb. Habitants	1	1	2	1	3	4	2	3	1	3
Présence en journée	oui	non	non	non	non	non	oui	oui	oui	oui

Dans le groupement, les foyers A, B et C produisent localement de l'énergie grâce à des panneaux PV. Ces trois foyers possèdent chacun une installation PV identique avec les caractéristiques suivantes :

- Surface : 20 m<sup>2</sup>
- Inclinaison : 30°
- Azimut : Sud

La puissance électrique de chacune de ces installations est de 2,5 kWc (kilowatt-crête). Ces foyers acceptent d'échanger le surplus d'énergie produite avec leurs voisins au sein du groupement. En utilisant ce cas d'étude et le modèle de groupement, nous évaluons l'impact des différentes organisations des échanges d'énergie sur la consommation d'énergie des foyers et du groupement, ainsi que sur le taux d'autoconsommation d'énergie.

## 6.2. IMPACT DE L'ORGANISATION DES ÉCHANGES SUR L'AUTOCONSUMMATION D'ÉNERGIE

Dans un premier temps nous analysons l'impact des différentes organisations des échanges à l'échelle du groupement. La Figure 6.1 montre la consommation d'électricité totale au sein du groupement ainsi que la production locale pour le mois de juillet 2019. Pour le mois simulé, le groupement a consommé un total de **1 935 kWh** et produit **1 638 kWh** grâce aux panneaux PV.

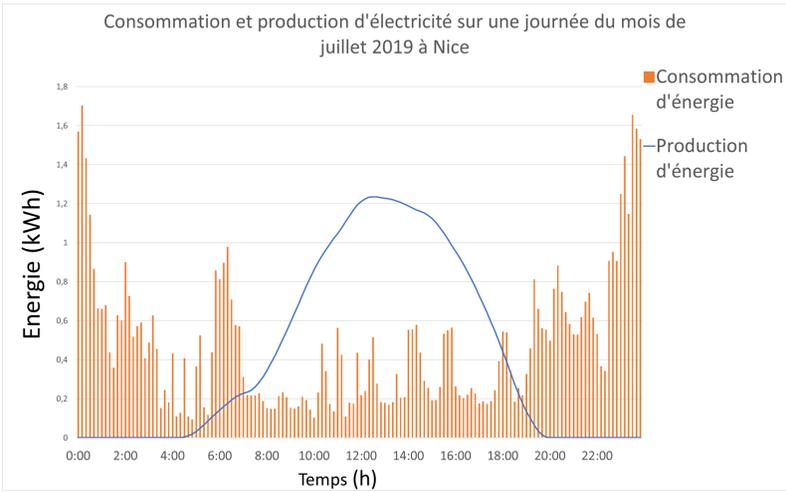


FIGURE 6.1. Consommation et production d'électricité pour une journée de juillet 2019 à Nice

Deux variables sont analysées afin d'évaluer l'impact des stratégies d'échanges d'énergie. Tout d'abord, **le taux d'autoconsommation d'électricité** qui permet de connaître la proportion de la production locale directement consommée par les foyers et calculés de la façon suivante :

$$\text{taux}_{\text{autoconsommation}} = \frac{\text{consommation}_{\text{locale}}}{\text{production}_{\text{locale}}}$$

Ensuite, **le taux d'auto-production** d'électricité calculé de la façon suivante :

$$\text{taux}_{\text{autoproduction}} = \frac{\text{consommation}_{\text{locale}}}{\text{consommation}_{\text{totale}}}$$

Les taux d'autoproduction du groupement (Tableau 6.2) sont relativement proches et ceci quelle que soit l'organisation des échanges d'énergie au sein du groupement. Ce résultat provient du fait que les échanges répartissent le maximum d'énergie possible entre les foyers pour toutes les organisations des échanges.

TABLE 6.2. Impact des différentes organisations des échanges de l'énergie au sein du groupement

	Taux d'autoproduction	Taux d'autoconsommation
Taux fixe : tantième	31%	36%
Proportionnelle	31%	36%
Concurrentielle : au plus offrant	30%	35%

Le Tableau 6.3 donne le taux d'autoproduction des foyers en fonction de l'organisation des échanges mis en oeuvre par la PLE. Ces taux sont relativement proches, quelle que soit la façon dont nous organisons les échanges. Cela s'explique principalement par le fait que pour ce cas d'étude, la quantité d'énergie produite par les trois installations PV est largement suffisante pour couvrir les besoins en énergie du groupement en journée.

TABLE 6.3. Taux d'autoproduction d'électricité des foyers avec trois panneaux PV pour le mois de juillet 2019 à Nice

	Foyer A	Foyer B	Foyer C	Foyer D	Foyer E	Foyer F	Foyer G	Foyer H	Foyer I	Foyer J
Taux fixe : tantième	42%	17%	20%	21%	54%	18%	30%	40%	61%	34%
Proportionnel	40%	16%	20%	23%	51%	19%	30%	37%	60%	37%
Concurrentiel : au plus offrant	37%	19%	21%	21%	49%	17%	28%	35%	58%	35%

Cela est confirmé en analysant la consommation d'énergie du groupement pendant la journée. Durant cette période, on constate que les foyers ont consommé au total **937 kWh** d'énergie, ce qui est bien inférieur à la production d'électricité du groupement égale à **1 638 kWh**.

Cette simulation a mis en avant le fait que lorsque la production d'énergie dans un groupement est supérieure à la consommation de celui-ci, l'organisation choisie pour les échanges n'a qu'un faible impact sur la quantité d'énergie reçue par chaque foyer. La quantité d'énergie locale non consommée peut alors être relativement importante. Pour ce cas, elle est égale à **1 033 kWh** sur la durée totale de la simulation soit quasiment égale à la consommation d'électricité des foyers. Cette énergie sera ensuite revendue à l'extérieur du groupement au fournisseur d'électricité.

Afin d'aborder une situation où la quantité d'énergie produite dans le groupement est fortement inférieure à la consommation de ce dernier, un second cas constitué de 10 foyers situés à Lille et pour le mois de décembre 2019 a été simulé. Ici, seul le foyer A possède un moyen de production locale d'énergie. La Figure 6.2 montre les consommations et la production d'électricité pour cette nouvelle configuration. Il est constaté que la production d'énergie locale est très faible par rapport à la consommation totale du groupement.

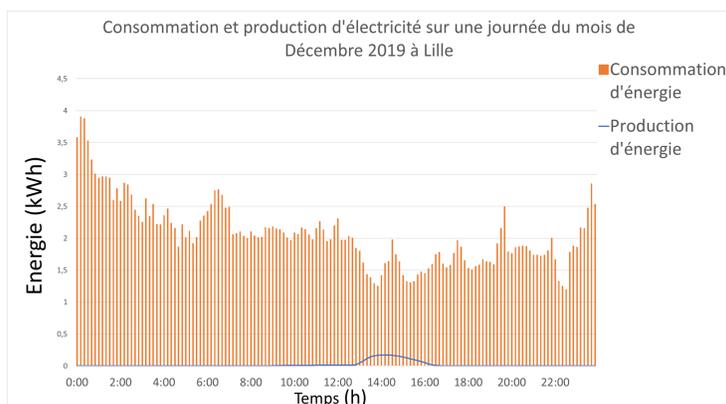


FIGURE 6.2. Consommation et production d'électricité pour une journée de décembre 2019 à Lille

Les valeurs des taux d'autoproduction d'électricité des foyers donnés dans le Tableau 6.4 sont très faibles. De plus, on constate des différences notables entre les différentes stratégies d'échange de l'énergie.

TABLE 6.4. Taux d'autoproduction d'électricité des foyers avec un seul panneau PV pour le mois de décembre 2019 à Lille

	Foyer A	Foyer B	Foyer C	Foyer D	Foyer E	Foyer F	Foyer G	Foyer H	Foyer I	Foyer J
<b>Taux fixe : tantième</b>	5,64%	0,70%	1,50%	5,25%	7,13%	8,66%	5,61%	15,41%	5,24%	7,30%
<b>Proportionnel</b>	0,80%	0,45%	0,31%	0,82%	0,83%	0,76%	0,81%	1,07%	1,43%	0,77%
<b>Concurrentiel : au plus offrant</b>	15,00%	0,35%	0,25%	0,65%	0,66%	0,60%	0,66%	0,85%	1,21%	0,62%

Par exemple, pour le foyer H, il existe un rapport de 1 à 15 entre l'organisation à taux fixe et celle proportionnelle. La raison principale est que pour la première organisation (taux fixe), les foyers reçoivent l'énergie en fonction de leur surface habitable alors que dans la seconde ils la reçoivent en fonction de leur consommation. Malgré une surface habitable importante (206 m<sup>2</sup>), la consommation d'électricité du foyer H reste faible car son système de chauffage n'est pas électrique. Ceci contribue fortement à la différence entre les deux politiques d'échange. De même, pour le foyer A, nous observons que le taux d'autoproduction d'électricité avec une organisation concurrentielle est 3 à 15 fois supérieur à celui obtenu avec une organisation à taux fixe puis proportionnelle respectivement. Cela s'explique par le fait que le foyer A consomme l'énergie qu'il produit en priorité avant de proposer à la vente ce qu'il ne consomme pas. D'autres critères pourraient être envisagés pour comparer les résultats entre les foyers en s'appuyant sur des métriques sociales du domaine comme la maximin de Borda [7].

Les résultats issus de ce cas d'étude ont permis de montrer que, dans une situation où l'énergie produite localement est faible par rapport à la consommation d'énergie du groupement, la politique d'échange a un impact primordial sur l'énergie que chaque foyer peut recevoir. Au-delà de la consommation d'énergie seule, ces différences impacteront également les flux financiers au sein du groupement, ce qui pourra en faire un critère de choix de l'organisation des échanges d'énergie au sein du groupement.

## 7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans cette étude, nous avons présenté une simulation multi-agent multi-niveau pour l'étude de configurations d'ACC collective de l'énergie. Il s'agit d'un ensemble de SMA implémentés dans la plateforme SMACH et qui modélisent l'activité humaine et la consommation électrique des foyers. Le groupement, un second système multi-agent a été développé comme support des échanges d'énergie entre les foyers le composant. Différentes politiques d'échange de l'énergie ont également été proposées. Les résultats obtenus pour deux cas d'étude indiquent que les différentes organisations d'échange de l'énergie ont potentiellement un impact sur la consommation d'électricité des foyers. Ainsi, il a été montré que l'impact est faible lorsque la production d'électricité suffit à subvenir aux besoins des foyers. Par contre, l'impact est notable lorsque la production locale d'énergie est faible par rapport à la consommation totale d'énergie du groupement.

Les résultats de cette étude ont également mis en avant qu'une grande quantité d'énergie produite n'a pas pu être utilisée lorsque la production est importante. Ainsi, pour augmenter le taux d'autoconsommation d'électricité, une solution serait d'installer des systèmes de stockage collectifs ou individuels dans le groupement, afin de rendre disponible l'énergie de manière différée dans le temps. L'ajout de tels systèmes s'accompagnerait de la mise en œuvre d'une politique spécifique de stockage, à savoir un ensemble de règles au sein du groupement et des foyers pour définir le contrôle des séquences de stockage et de déstockage. L'implémentation de systèmes et de politiques de gestion de l'énergie stockée est une des premières perspectives de ce travail.

Avec le modèle présenté dans cet article, nous nous sommes attachés à développer un outil permettant de simuler l'ACC au sein du secteur résidentiel tout en permettant la définition de nombreuses configurations possibles. Cependant, nos discussions avec les experts de l'énergie nous permettent d'identifier différentes perspectives. Par exemple, l'inclusion du secteur tertiaire comme acteur de l'ACC au côté du secteur résidentiel est un enjeu majeur pour les gestionnaires de réseaux de par sa consommation importante d'électricité (30 % de la consommation électrique française en 2017). L'intégration de nouveaux usages comme les véhicules électriques représente aussi une perspective importante d'un point de vue métier. En effet, ces derniers sont de nouveaux appareils consommateurs qui apparaissent au sein des foyers mais qui peuvent également être considérés comme des batteries. Enfin, l'ACC peut impacter la politique énergétique des foyers, c'est-à-dire leur relation à la consommation d'énergie et les processus de décision associés à l'utilisation des appareils électriques. La modélisation de politiques

d'échange et de consommation spécifiques à cette situation est donc également à envisager. Il peut s'agir de politiques impactant le comportement des habitants, notamment en leur faisant déplacer temporellement certaines activités consommatrices d'énergie, ou leur rôle dans les échanges en choisissant, par exemple, de stocker leur surplus d'énergie pour une utilisation future. Notre modèle multi-agent multi-niveau constitue une base solide pour l'étude de ces différents problèmes métiers.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. ALBOUYS-PERROIS, « Simulation multi-agent de l'autoconsommation collective de l'énergie à l'échelle du quartier en lien avec l'activité humaine et la consommation énergétique des bâtiments », Theses, Université de La Rochelle, 2021.
- [2] J. ALBOUYS-PERROIS, N. SABOURET, Y. HARADJI, M. SCHUMANN & C. INARD, « A Co Simulation Of Photovoltaic Power Generation And Human Activity For Smart Building Energy Management And Energy Sharing », in *Proceedings of the International Building Performance Simulation Association*, vol. 16, 2019.
- [3] ———, « Simulation multi-agent de l'autoconsommation collective en relation avec l'activité des foyers », in *JFSMA 2019. Systèmes distribués, embarqués et diffus*, 2019.
- [4] É. AMOUROUX, T. HURAU, F. SEMPÉ, N. SABOURET & Y. HARADJI, « Simulating human activities to investigate household energy consumption », in *Proceedings of the 5th International Conference on Agents and Artificial Intelligence*, vol. 2, 2013, p. 71-80.
- [5] S. BAKALOGLOU & D. CHARLIER, « Energy Consumption in the French Residential Sector: How Much do Individual Preferences Matter? », *The Energy Journal* **40** (2019), n° 3, p. 77-99.
- [6] A. BEYNIER & S. ESTIVIE, « Optimizing distributed resource exchanges in multiagent systems under uncertainty », in *Workshop on Distributed and Multi-Agent Planning (DMAP), ICAPS 2013* (Rome, Italy), 2013, p. 8-16.
- [7] S. J. BRAMS & D. L. KING, « Efficient Fair Division: Help the Worst off or Avoid Envy? », *Rationality and Society* **17** (2005), n° 4, p. 387-421.
- [8] S. CARLUCCI, M. DE SIMONE, S. K. FIRTH, M. B. KJÆRGAARD, R. MARKOVIC, M. S. RAHAMAN, M. K. ANNAQEEB, S. BIANDRATE, A. DAS, J. W. DZIEDZIC, G. FAJILLA, M. FAVERO, M. FERRANDO, J. HAHN, M. HAN, Y. PENG, F. SALIM, A. SCHLÜTER & C. VAN TREECK, « Modeling occupant behavior in buildings », *Building and Environment* **174** (2020), article no. 106768.
- [9] J. CHAPMAN, P.-O. SIEBERS & D. ROBINSON, « On the multi-agent stochastic simulation of occupants in buildings », *Journal of Building Performance Simulation* **11** (2018), n° 5, p. 604-621.
- [10] C. CLEVINGER & J. HAYMAKER, « The impact of the occupant on building energy simulations », in *Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering, Montreal, Canada, 2006*.
- [11] Z. FANG, N. LI, B. LI, G. LUO & Y. HUANG, « The effect of building envelope insulation on cooling energy consumption in summer », *Energy and Buildings* **77** (2014), p. 197-205.
- [12] E. FERRERI, « Modélisation et simulation des comportements en lien avec les consommations électriques dans le secteur résidentiel », Thèse, Université de Bordeaux, 2017.
- [13] I. GAETANI, P.-J. HOES & J. L. HENSEN, « Occupant behavior in building energy simulation: Towards a fit-for-purpose modeling strategy », *Energy and Buildings* **121** (2016), p. 188-204.
- [14] E. GHIANI, A. GIORDANO, A. NIEDDU, L. ROSETTI & F. PILO, « Planning of a Smart Local Energy Community: The Case of Berchidda Municipality (Italy) », *Energies* **12** (2019), n° 24, article no. 4629.
- [15] G. HAPPLE, J. A. FONSECA & A. SCHLUETER, « A review on occupant behavior in urban building energy models », *Energy and Buildings* **174** (2018), p. 276-292.
- [16] Y. HARADJI, J. GUIBOURDENCHE, Q. REYNAUD, G. POIZAT, N. SABOURET, F. SEMPÉ, T. HURAU & M. GALBAT, « De la modélisation de l'activité humaine à la modélisation pour la simulation sociale : entre réalisme et fécondité technologique », *Activités* **15** (2018), n° 15-1 (fr).
- [17] B. HORLING & V. LESSER, « A Survey of Multi-Agent Organizational Paradigms », *The Knowledge Engineering Review* (2005), p. 281-316.

- [18] T. HURAUX, « Simulation multi-agent d'un système complexe : combiner des domaines d'expertise par une approche multi-niveau. Le cas de la consommation électrique résidentielle », Theses, Université Pierre et Marie Curie – Paris VI, 2015.
- [19] K. B. JANDA, « Buildings don't use energy: people do », *Architectural science review* **54** (2011), n° 1, p. 15-22.
- [20] R. JUDKOFF & J. NEYMARK, *Home energy rating system: Building energy simulation test (HERS BESTEST)*, National Renewable Energy Laboratory, 1995.
- [21] H. KANG & D. M. SCOTT, « Exploring day-to-day variability in time use for household members », *Transportation Research Part A: Policy and Practice* **44** (2010), n° 8 (en), p. 609-619.
- [22] A. KASHIF, S. PLOIX, J. DUGDALE & X. H. B. LE, « Simulating the dynamics of occupant behaviour for power management in residential buildings », *Energy and Buildings* **56** (2013), p. 85-93.
- [23] KIM, S. REN, M. VAN DER SCHAAR & J. W. LEE, « Bidirectional energy trading for residential load scheduling and electric vehicles », *Proceedings - IEEE INFOCOM* **31** (2013), n° 7, p. 595-599.
- [24] R. LUTHANDER, J. WIDÉN, D. NILSSON & J. PALM, « Photovoltaic self-consumption in buildings: A review », *Applied Energy* **142** (2015), p. 80-94.
- [25] E. MATALLANAS, M. CASTILLO-CAGIGAL, E. CAAMAÑO-MARTÍN, D. MASA-BOTE, A. GUTIÉRREZ & F. MONASTERIO, « Analysis of the Self-Consumption Possibilities in Small Grid-Connected Photovoltaic Systems in Spain », in *26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2011, p. 4619-4624 (en).
- [26] P. MATHIEU, G. MORVAN & S. PICAULT, « Multi-level agent-based simulations: Four design patterns », *Simulation Modelling Practice and Theory* **83** (2018), p. 51-64.
- [27] A. C. K. DE MENEZES, A. CRIPPS, D. BOUCLAGHEM & R. BUSWELL, « Predicted vs. actual energy performance of non-domestic buildings: using post-occupancy evaluation data to reduce the performance gap », *Applied Energy* **97** (2012) (en), p. 355-364.
- [28] J. MUNKHAMMAR, P. GRAHN & J. WIDÉN, « Quantifying self-consumption of on-site photovoltaic power generation in households with electric vehicle home charging », *Solar Energy* **97** (2013) (en), p. 208-216.
- [29] L. K. NORFORD, R. H. SOCOLOW, E. S. HSIEH & G. V. SPADARO, « Two-to-one discrepancy between measured and predicted performance of a 'low-energy' office building: insights from a reconciliation based on the DOE-2 model », *Energy and buildings* **21** (1994), n° 2, p. 121-131.
- [30] G. PLESSIS, E. AMOUROUX & Y. HARADJI, « Coupling occupant behaviour with a building energy model - A FMI application », in *Modelica Conference 2014*, 2014, p. 321-326.
- [31] G. PLESSIS, A. KAEMMERLEN & A. LINDSAY, « BuildSysPro: a Modelica library for modelling buildings and energy systems », in *Proceedings of the 10th International Modelica Conference; March 10-12; 2014; Lund; Sweden*, 2014, p. 1161-1169 (en).
- [32] Q. REYNAUD, J. ALBOUYS-PERROIS, Y. HARADJI, C. INARD, N. SABOURET, M. SCHUMANN & F. SEMPÉ, « L'apport de la modélisation multi-agent dans la prédiction de la consommation d'énergie des bâtiments résidentiels », in *IBPSA 2020 France* (Reims), 2020.
- [33] Q. REYNAUD, Y. HARADJI, F. SEMPÉ & N. SABOURET, « Using Time-Use Surveys in Multi Agent Based Simulations of Human Activity », in *Proceedings of the 9th International Conference on Agents and Artificial Intelligence - Volume 1: ICAART*, n° Icaart, 2017, p. 67-77.
- [34] Q. REYNAUD, F. SEMPÉ, Y. HARADJI & N. SABOURET, « Simuler l'activité humaine en combinant un système multi-agent avec des approches statistiques basées sur les "enquêtes emploi du temps" », in *Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA 2017)*, 2017.
- [35] P. SALEMBIER, J. DUGDALE, M. FREJUS & Y. HARADJI, « A descriptive model of contextual activities for the design of domestic situations », *ECCE* (2009), article no. 13 (7 pages).
- [36] M. SIERHUIS, W. J. CLANCEY & R. J. V. HOOF, « Brahms: a multi-agent modelling environment for simulating work processes and practices », *International Journal of Simulation and Process Modelling* **3** (2007), n° 3, p. 134.
- [37] R. G. SMITH, « The contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver », *IEEE Transactions on computers* (1980), n° 12, p. 1104-1113.
- [38] V. I. SOEBARTO & T. J. WILLIAMSON, « Multi-criteria assessment of building performance: theory and implementation », *Building and Environment* **36** (2001), n° 6 (en), p. 681-690.

- [39] M. VINYALS, M. VELAY & M. SISINNI, « A multi-agent system for energy trading between prosumers », in *Distributed Computing and Artificial Intelligence, 14th International Conference* (Cham) (S. Omatu, S. Rodríguez, G. Villarrubia, P. Faria, P. Sitek & J. Prieto, eds.), Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer International Publishing, 2018, p. 79-86 (en).
- [40] P. VYTELINGUM, S. D. RAMCHURN, T. D. VOICE, A. ROGERS & N. R. JENNINGS, « Trading agents for the smart electricity grid », *9th International Conference on AAMAS 2010* (2010), p. 897-904.
- [41] J. WIDÉN, « Improved photovoltaic self-consumption with appliance scheduling in 200 single-family buildings », *Applied Energy* **126** (2014) (en), p. 199-212.
- [42] U. WILKE, F. HALDI, J.-L. SCARTEZZINI & D. ROBINSON, « A bottom-up stochastic model to predict building occupants' time-dependent activities », *Building and Environment* **60** (2013) (en), p. 254-264.
- [43] Y. WU, X. TAN, L. QIAN & D. H. K. TSANG, « Optimal management of local energy trading in future smart microgrid via pricing », *Proceedings - IEEE INFOCOM 2015-Augus* (2015), n° 1, p. 570-575.
- [44] L. YUAN, Y. KANG, S. WANG & K. ZHONG, « Effects of thermal insulation characteristics on energy consumption of buildings with intermittently operated air-conditioning systems under real time varying climate conditions », *Energy and Buildings* **155** (2017) (en), p. 559-570.

---

ABSTRACT. — We present a multi-level multi-agent simulation of collective energy self-consumption. The first level of this model is a multi-agent simulation of human activity coupled with an energy simulation of the building, calculating the household's energy consumption. The second level is a model of a group of households practising collective self-consumption of energy. We present a formalisation of this notion of grouping as well as different organizations to exchange energy. Last, we study these different organisations and show their strong impact on the distribution of energy when production is low compared to consumption.

KEYWORDS. — Multi-agent simulation, Building, Energetic consumption, Collective self-consumption.

---

*Manuscrit reçu le 15 juillet 2021, révisé le 31 janvier 2022, accepté le 1<sup>er</sup> mars 2022.*