



**HAL**  
open science

## Simulation multi-agent de l'autoconsommation collective en relation avec l'activité des foyers

J. Albouys-Perrois, Nicolas Sabouret, Y. Haradji, M. Schumann, C. Inard

### ► To cite this version:

J. Albouys-Perrois, Nicolas Sabouret, Y. Haradji, M. Schumann, C. Inard. Simulation multi-agent de l'autoconsommation collective en relation avec l'activité des foyers. 27th Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA), 2019, Toulouse, France. hal-03195508

**HAL Id: hal-03195508**

**<https://hal.science/hal-03195508v1>**

Submitted on 11 Apr 2021

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

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

# Simulation multi-agent de l'autoconsommation collective en relation avec l'activité des foyers

J. Albouys-Perrois<sup>a,b,c</sup>  
albouys@limsi.fr

N. Sabouret<sup>b</sup>  
nicolas.sabouret@limsi.fr

Y. Haradji<sup>c</sup>  
yvon.haradji@edf.fr

M. Schumann<sup>c</sup>  
mathieu.schumann@edf.fr

C. Inard<sup>a</sup>  
christian.inard@univ-lr.fr

<sup>a</sup>Laboratoire des sciences de l'ingénieur pour l'environnement,  
Université de La Rochelle, France

<sup>b</sup>Laboratoire d'informatique pour la mécanique et les sciences de l'ingénieur CNRS,  
Université Paris Sud, France

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

## Résumé

Cet article présente un modèle de simulation multi-agent de l'autoconsommation collective de l'énergie. Le modèle associe une simulation multi-agents de l'activité humaine, une simulation thermique du bâtiment et de l'eau chaude sanitaire (ÉCS), et une simulation de production locale d'énergie électrique photovoltaïque. Nous étudions différentes situations de consommation collective de l'énergie et nous montrons comment l'utilisation de cette énergie peut être optimisée à l'échelle du quartier en prenant en compte l'activité des occupants et les échanges d'énergie entre les foyers.

Cette article est une traduction et une réécriture d'un article soumis à la conférence Building Simulation 2019.

**Mots-clés :** Simulation Multi-Agent, Consommation énergétique, Simulation de l'activité humaine

## Abstract

We present a framework and a model for the simulation of collective energy self-consumption strongly coupled to occupant activity in households. The model combines multi-agent simulation of human activity, a dynamic model of building energy including Domestic Hot Water (DHW) and all electrical appliances, and local generation of photovoltaic energy. A cooperative energy exchange policy between households was defined in order to maximise the use of locally generated PV electricity at the neighbourhood scale. In this first implementation, three households A, B and C were simulated, one being the PV energy producer. The DHW model was modified to benefit from PV electricity. Thanks to the energy exchange policy, a total of 83% of the energy generated by household A is used locally

in the neighbourhood (compared to 38% when there are no energy exchanges with household B and C). The next step of this study is to add a model of energy storage in several self-consumption configurations.

**Keywords:** Agent-Based Simulation, Energy Consumption, Human Activity Simulation

## 1 Introduction

L'autoconsommation d'énergie peut être définie comme l'association d'une production locale d'énergie à l'aide de panneaux photovoltaïques ou d'une éolienne par exemple, et la consommation de tout ou partie de cette énergie [10, 11]. En pratique, seule une faible part de cette énergie est consommée par le producteur à savoir entre 25 et 40% d'après [10]. Différents phénomènes expliquent ces chiffres modestes d'autoconsommation. Pour commencer, une part importante de la consommation énergétique provient du bâtiment lui-même plus que de l'utilisation d'appareils électroménagers. Ainsi, selon [4] et [22], 57% de la consommation finale d'énergie des foyers en Europe est utilisée pour le chauffage. Mais ces périodes de consommation d'énergie pour le bâtiment ne coïncident pas nécessairement avec les périodes de production locale. Par exemple, en hiver, le chauffage doit fonctionner en permanence, même lorsque la production d'énergie par les panneaux photovoltaïques (PV) est nulle en journée. Il en va de même pour la consommation liée à l'activité des habitants qui sont plus souvent chez eux le matin ou le soir, c'est à dire lorsque la production des panneaux PV est plus faible ou nulle.

Dans ce contexte, plusieurs auteurs proposent de mettre en place des échanges d'énergie entre

des bâtiments auto consommateurs pour optimiser l'utilisation de l'énergie produite localement [18, 20]. Pour réaliser de tels échanges, il faut pouvoir anticiper les activités des foyers et les besoins de consommation associés. Prédire les activités humaines et les courbes de charge des foyers est donc d'une importance cruciale pour créer des solutions pratiques pour le contrôle de l'énergie dans le contexte de l'autoconsommation collective (ACC).

Dans cet article, nous proposons d'utiliser la simulation multi-agents des activités humaines couplée à un modèle d'énergétique du bâtiment pour étudier l'autoconsommation énergétique et les échanges d'énergie entre trois foyers. Le modèle que nous proposons est une simulation multi-niveau où chaque foyer, représenté par un SMA, aura des interactions avec ses voisins. Chaque SMA sera en plus co-simulé avec des moteurs thermiques. Ce couplage de simulation permet l'étude de différentes solutions techniques comme les échanges d'énergie [18], le stockage d'énergie [3] ou la gestion de la charge [19]. Le but général de notre travail est d'étudier l'efficacité de politiques et de solutions techniques pour l'échange d'énergie à l'échelle du quartier.

L'article présente une première implémentation d'une politique spécifique d'échange d'énergie et est organisé comme suit : dans la section 2, nous discutons des travaux antérieurs portant sur l'autoconsommation d'énergie, les échanges d'énergie et l'activité humaine. La section 3 est dédiée à la présentation du simulateur SMACH (Simulation Multi-Agents de l'Activité Humaine) utilisé pour la simulation dynamique de la consommation énergétique dans les bâtiments. La section 4 décrit le modèle d'autoconsommation collective. Enfin, la section 5 présente le cas d'étude et les premiers résultats obtenus.

## 2 État de l'art

### 2.1 Simulation multi-agents de l'activité et des consommations énergétiques

La simulation du comportement humain lié à la prédiction de la consommation électrique a été un centre d'intérêt grandissant ces dernières années [7, 9, 2]. C'est pourquoi beaucoup d'études basées sur les systèmes multi-agents (SMA) proposent des modèles pour étudier le lien entre l'activité humaine et la consommation électrique.

Par exemple, les auteurs de [7] ont utilisé une méthode basée sur un modèle psychologique qui représente les habitudes des habitants d'un foyer. Cela a permis la production de courbes de charge à partir de l'utilisation des appareils électriques. Cependant, le comportement thermique du bâtiment n'est pas simulé alors que c'est la source principale de consommation d'énergie.

A contrario, les auteurs de [9] proposent une co-simulation entre le bâtiment et l'activité humaine. Le comportement humain est simulé grâce à la plateforme Brahms [17] qui permet une description fine des comportements humains et des appareils électriques. Cependant, ce modèle n'inclut pas l'autoconsommation énergétique et la possibilité de simuler des échanges entre les foyers.

L'approche proposée par le projet SMACH [2] est basée sur trois composantes principales. Premièrement, le simulateur SMACH permet la génération d'une population qui sera simulée. Cette population peut être construite à partir de critères spécifiques ou à partir de données statistiques de population. Le second composant de la plateforme SMACH est un SMA. Ce dernier simule l'activité humaine à l'aide de données issues d'études statistiques comportementales [14]. Le dernier composant est le modèle thermique multizone du bâtiment qui simule les températures intérieures et la consommation d'énergie. Le bâtiment est modélisé en utilisant la librairie BuildSysPro et le langage Modelica. Le SMA et le modèle d'énergie sont co-simulés au sein de SMACH en utilisant le standard d'interopérabilité FMI [13]. Cependant l'autoconsommation énergétique et les échanges d'énergie entre bâtiments n'étaient jusqu'à lors pas implémentés dans ce modèle.

La littérature ne propose donc pas aujourd'hui de modèle qui traite à la fois l'activité humaine, la production de courbes de charge et l'ACC.

### 2.2 Simulation de l'autoconsommation d'énergie

Les différentes recherches conduites sur l'ACC ont été centrées sur l'amélioration du taux d'autoconsommation des foyers. Ce taux est défini comme le ratio de l'énergie générée localement sur l'énergie consommée par le producteur sur une période donnée. Dans leur état de l'art, les auteurs de [10] ont étudié différentes méthodes pour améliorer l'autoconsommation de l'électricité produite par les panneaux photovoltaïques.

Ils proposent de mettre en œuvre deux solutions : la gestion de la demande et le stockage.

Les travaux de [3] ont traité l'impact de l'utilisation d'une batterie sur le taux d'autoconsommation. Les auteurs ont montré que la quantité d'énergie locale consommée peut atteindre jusqu'à 82% de la production pour un foyer individuel. Les auteurs ont également simulé la génération d'énergie avec un modèle de panneaux PV construit à l'aide de données réelles. Cependant, ils n'ont pas utilisé la simulation pour obtenir les données de la consommation d'énergie, mais se sont servi de profils moyens de consommation.

De même, dans [12], les auteurs utilisent des simulations pour montrer que l'utilisation de véhicules électriques comme moyen de stockage de l'électricité permet une amélioration du taux d'autoconsommation de 37%. Les auteurs ont utilisé un modèle stochastique basé sur les chaînes de Markov pour simuler l'activité humaine. Pour ces deux références ([3] et [12]), le modèle d'activité humaine n'est pas suffisamment précis pour rendre compte de la diversité des comportements humains.

D'autres travaux, comme [19], se sont intéressés à la gestion de la demande énergétique pour améliorer l'autoconsommation. Il s'agit de déplacer des activités pour qu'elles correspondent aux périodes de production d'énergie locale. En théorie, les résultats présentés sont excellents mais ils sont difficiles voire impossibles à mettre en œuvre en pratique. En effet, les individus ne peuvent pas toujours déplacer dans le temps certaines activités comme proposé par l'algorithme d'optimisation.

Les systèmes de stockage d'énergie et de gestion de la demande ne sont pas les seuls moyens d'améliorer le taux d'autoconsommation. Avec de l'énergie produite localement, il devient possible pour un foyer de partager sa production d'énergie locale avec son voisinage. La technologie Smart Grid, ou réseau intelligent, peut se définir comme un réseau avec des flux bidirectionnels d'informations et d'électricité entre les foyers et les fournisseurs[5]. Les recherches actuelles sur les échanges d'énergie se concentrent sur l'étude des algorithmes d'échanges. Ainsi les auteurs de [18] présentent des algorithmes basés sur la théorie des jeux pour réguler les échanges d'énergie. Dans [21], les auteurs ont utilisé un algorithme de jeux non-coopératifs pour échanger de l'énergie entre différents foyers. Cependant, les différents modèles décrits ne s'intéressent pas aux liens entre l'ACC et l'activité humaine. La

plupart du temps, les modèles s'appuient principalement sur des données de la consommation d'énergie statique sans modèle d'activité humaine.

Concernant les échanges d'énergie lié à l'autoconsommation, l'étude de la littérature et nos premières enquêtes ont mis en avant un premier ensemble de politiques d'échanges entre les foyers :

- Politique de répartition : chaque foyer est autorisé à prendre un taux fixe d'énergie sur la production
- Politique coopérative : L'énergie produite est échangée entre les foyers selon des règles contractuelles
- Politique concurrentielle : L'énergie sera achetée et vendue sur un marché de l'énergie où les vendeurs et acheteurs interagissent.

Cette article se concentre sur une seule des politiques identifiées. Il s'agit d'une première implémentation pour étudier l'interaction entre l'autoconsommation collective et l'activité humaine. Dans ce cas d'étude les systèmes de stockage ne seront pas étudiés. Mais ils seront ajoutés dans les travaux futurs car comme cela a déjà été démontré, ils ont un impact important sur l'autoconsommation et les échanges d'énergie.

### 3 Simulation de l'activité humaine

Dans notre travail, la simulation de l'activité humaine liée à la consommation énergétique est réalisée en utilisant la plateforme SMACH dont les développements successifs ont déjà été présentés aux JFSMA [1, 16, 15]. Dans cette plateforme, les agents représentent les habitants d'un foyer. Chaque agent va sélectionner des tâches quotidiennes à réaliser. La séquence des actions, choisies par un agent à chaque minute, produit un diagramme d'activité. De plus, les diverses activités sont associées à des appareils qui consomment de l'électricité. Le simulateur est donc capable de générer une courbe de charge associée à un diagramme d'activité (Figure 1).

Dans les sections suivantes, nous présentons succinctement les deux dimensions principales de la simulation : le modèle d'activité humaine et le modèle d'agent.

#### 3.1 Le modèle d'activité

La problématique de la plateforme SMACH est de produire des diagrammes d'activités, représentatifs des activités humaines au cours d'une

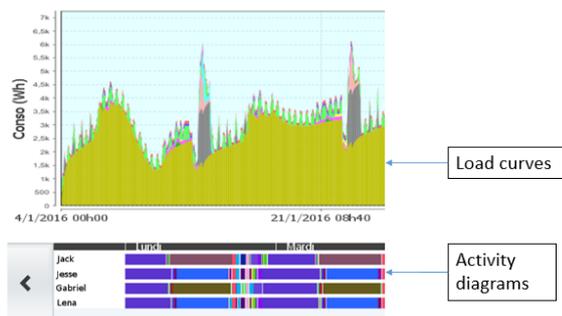


FIGURE 1 – Exemple de courbe de charge et de diagramme d'activité générés par le simulateur SMACH

journée, et cohérents avec les différents foyers. SMACH doit également générer de la variabilité dans les activités des occupants d'un jour à l'autre [6], afin de pouvoir simuler une année réaliste.

Pour atteindre ce but, la plateforme SMACH utilise une approche orientée données basée sur les résultats de l'Enquête Emplois du Temps de l'INSEE (TUS - Time Use Surveys) [14]. Cette enquête est composée de plusieurs dizaines de milliers de carnets où chaque participant a noté son activité courante toutes les 10 minutes sur une journée complète. Ces carnets ont été transformés en une base de données de profils (âge, emploi, catégorie socio-professionnelle...) liés aux activités décrites.

Le simulateur SMACH génère tout d'abord des foyers réalistes issus des bases de données statistiques nationales de la population. Chaque foyer est composé d'un ou plusieurs agents décrits par leur profil. Le bâtiment dans lequel ils vivent est caractérisé par la réglementation thermique selon son année de construction, et par les équipements du foyer (appareils électriques). Pour chaque profil d'individu et pour chaque tâche possible qu'un individu peut choisir d'effectuer, le simulateur SMACH extrait les informations statistiques suivantes de l'Enquête Emploi du Temps :

- Le nombre moyen de répétitions de l'activité par jour ou par semaine (rythme) ;
- Les périodes préférentielles de réalisation de la tâche au cours de la journée ou de la semaine ;
- La durée de la tâche.

Par exemple, le simulateur SMACH peut extraire de l'Enquête Emplois du Temps qu'un individu de classe moyenne, actif, entre 20 et 40 ans vivant

dans une maison individuelle en ville fera ses courses une fois par semaine, aux alentours de 20h00, avec un écart type d'une heure et une durée de 30 minutes avec un écart type de 15 minutes.

Cet ensemble de tâches possibles extrait par le simulateur SMACH donne une description statique de la vie quotidienne d'un foyer.

### 3.2 Le modèle d'agent

La seconde partie du simulateur SMACH consiste en la transformation de cette description statique en une simulation dynamique.

Pour chaque pas de temps, les agents sélectionnent une tâche à réaliser. Cette sélection est faite grâce à un mécanisme basé sur un niveau de priorité dynamique. Ce niveau est modifié par des paramètres qui influencent le choix de l'activité. Par exemple, l'heure courante et le nombre de réalisations d'une activité, dépendant des périodes préférentielles et du rythme, impactent la sélection de la tâche. Le mécanisme de sélection prend aussi en compte l'activité courante pour éviter les phénomènes d'oscillations entre des tâches similaires, et considère aussi les tâches réalisées par les autres membres du foyer pour satisfaire des contraintes de dépendance entre les tâches et la réalisation des activités à plusieurs. Un autre paramètre important dans la sélection des tâches est le prix courant de l'électricité. Cela peut amener les agents à choisir des activités moins consommatrices durant les périodes où le prix est élevé, en fonction de la politique énergétique du foyer.

### 3.3 Évaluation

Les résultats des simulations ont été validés en suivant une approche de simulation participative par la comparaison des diagrammes d'activité et des consommations énergétiques des familles simulées avec des familles réelles [8]. Les participants pouvaient contrôler les différents agents du foyer en sélectionnant leurs activités manuellement pour ensuite valider le modèle d'agent en comparant le diagramme d'activité obtenu avec leur propre expérience. La courbe de charge générée par le simulateur a également été comparée aux courbes de charge réelles du foyer simulé.

Dans [14], les auteurs ont proposé une validation du modèle d'activité à un plus haut niveau. Ils ont généré une grande quantité de diagrammes d'activité grâce au simulateur SMACH et ont

comparé les résultats avec les carnets des TUS. Les auteurs ont montré que les diagrammes d'activité simulés sont similaires aux carnets d'un point de vue statistique avec quelques variabilités au niveau individuel. L'agrégation des courbes de charge produite par le simulateur SMACH a également été comparée à l'agrégation des données de courbes de charge obtenues sur le réseau démontrant une concordance statistique des résultats de la plateforme.

## 4 Modèle pour l'autoconsommation collective

Notre contribution vise à intégrer l'autoconsommation énergétique et les échanges d'énergie dans la plateforme SMACH. La figure 2 illustre le fonctionnement général du nouveau simulateur.

L'ajout de l'ACC est fait grâce à trois composants. Tout d'abord, nous avons implémenté un simulateur de panneaux PV. Deuxièmement, nous définissons des règles d'autoconsommation d'électricité pour les différents appareils. Enfin, nous définissons une politique d'échange d'énergie entre les foyers.

### 4.1 Ajout de panneaux photovoltaïques pour simuler l'autoconsommation

Le modèle thermique de bâtiment couplé avec le modèle d'activité du simulateur SMACH a initialement été développé dans le langage Modelica et la librairie BuildSysPro [13]. Pour l'implémentation du modèle de panneaux PV, nous avons décidé d'utiliser la même librairie pour sa simplicité à définir des interfaces physico-thermiques.

Le modèle simule des panneaux photovoltaïques de type silicium cristallin. Il prend en entrée un fichier météorologique et calcule la puissance électrique produite (en kW) en fonction de différents paramètres :

- La surface ;
- L'inclinaison ;
- L'azimut ;

Nous avons donc ici une co-simulation entre trois éléments : un modèle de panneaux PV, un modèle de thermique du bâtiment et un système multi-agent relatif à l'activité des habitants. Le modèle de panneaux PV est stocké (tout comme celui du bâtiment) dans un composant exécutable FMU ("Fonctionnal Mock-Up Unit") qui permet des échanges d'informations entre les différents

composants du simulateur. Cependant, bâtiment et panneaux PV sont stockés dans deux FMU différents. Cela permet de modifier les deux modèles de façon complètement indépendante et même de pré-calculer la génération de l'énergie des panneaux PV si nécessaire (pour faciliter le passage à l'échelle).

### 4.2 Évolution du modèle de consommation d'énergie

Nous avons modifié la façon dont les appareils électriques du foyer consomment l'énergie pour prendre en compte la production locale d'électricité.

Dans le modèle initial, le dispositif de production de l'Eau Chaude Sanitaire (ECS) dispose de deux modes de fonctionnement. Lorsque l'appareil est asservi aux heures creuses, il ne sera mis en fonctionnement que durant ces plages horaires où le coût de l'électricité est avantageux. S'il n'est pas asservi aux heures creuses, la production d'ECS obéit au respect de la température de consigne de l'eau. Dans notre nouveau modèle, nous avons ajouté une nouvelle règle sur la production d'ECS. Dès que les panneaux PV produiront une quantité suffisante d'électricité, la production d'ECS est autorisée. Asservir la production d'ECS aux heures creuses permettra de lancer cette production à différents moments : Lors des heures creuses (électricité moins chère) où lorsque la production d'électricité des PV est suffisante.

Le déclenchement de la production de l'ECS en fonction de la puissance produite par les panneaux PV n'est autorisée que si l'électricité produite est supérieure à un seuil. Nous avons fixé ce seuil à une valeur égale à la moitié de la puissance installée pour la production d'ECS.

Pour les autres appareils du foyer, premièrement, nous évaluons les besoins en électricité de l'ensemble des appareils hors ECS. Puis, nous déduisons de la puissance produite par les panneaux PV la consommation pour produire l'ECS. Si le solde d'électricité est supérieur à la puissance nécessaire pour alimenter tous les appareils nous utilisons la puissance produite par les panneaux PV et le surplus d'énergie pourra être redistribué vers autres foyers. Si ce solde est inférieur à la demande des autres appareils, le système achète au fournisseur d'énergie la différence entre la production et la consommation demandée.

Avec ce mode de fonctionnement, nous garantissons que la production d'ECS est toujours assu-

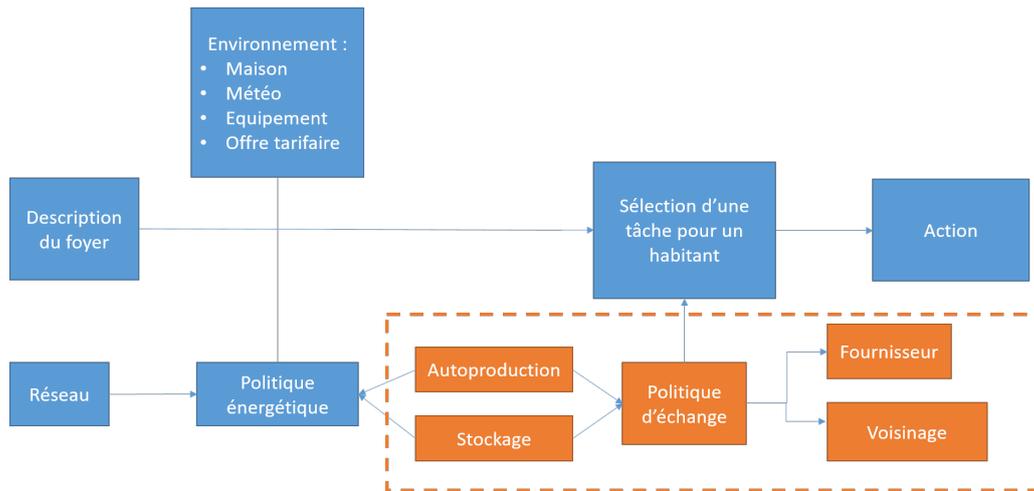


FIGURE 2 – Modèle SMACH avec l'ajout de l'autoconsommation collective

rée.

Dans la section suivante, nous nous concentrons seulement à l'impact de l'ACC sur la consommation d'énergie due à la production d'ECS, bien que l'ensemble des appareils soient pris en compte dans le modèle.

### 4.3 Modélisation des échanges entre les bâtiments

Dans le cadre de l'autoconsommation collective trois types de foyers peuvent être mis en avant en fonction de leurs équipements de production et de leur politique vis à vis des échanges :

- Des foyers producteurs d'énergie, qui peuvent fournir de l'énergie aux autres foyers ;
- Des foyers consommateurs d'énergie, qui peuvent seulement utiliser l'énergie des producteurs mais n'en produisent pas eux-même ;
- Des foyers à la fois producteurs et consommateurs d'énergie.

Ces trois types de foyers pourront également acheter de l'électricité à leur fournisseur d'énergie. Cinq états dans le processus de l'ACC ont donc été définis :

1. Le foyer consomme sa propre production ;
2. Le foyer consomme l'excès de production de ses voisins ;
3. Le foyer envoie l'excès d'énergie de sa propre production à ses voisins ;
4. Le foyer consomme de l'énergie du fournisseur institutionnel (qu'on appelle ici « réseau ») ;

### 5. Le foyer vend de l'énergie sur le réseau.

La décision d'échanger ou non de l'énergie dépend de la politique d'échange de chaque foyer. Cette politique peut aussi affecter la quantité et le prix de l'énergie échangée. En première hypothèse, nous avons adopté une politique d'échange coopérative dans laquelle le producteur donnera tout son excès d'énergie à ses voisins sans contrepartie. En plus, les voisins chercheront à consommer le maximum d'énergie pour répondre à leur besoin.

Dans cette première implémentation, nous nous concentrons sur les interactions entre un producteur et plusieurs consommateurs, en considérant les état 1, 2 et 4 énoncés plus haut.

Le modèle comporte deux parties. Premièrement, nous simulons un pas de temps avec uniquement le foyer producteur d'énergie. Il générera de l'énergie grâce à ces panneaux PV et consommera cette énergie en fonction de ses besoins. Puis, il enverra un message aux autres consommateurs indiquant la quantité d'énergie restante qu'il peut échanger. Dans un second temps, on simule le même pas de temps pour tous les foyers consommateurs. Ces derniers utilisent l'information transmise par le foyer producteur d'énergie pour leur propre consommation énergétique. Enfin, ils notifient au producteur la quantité d'énergie consommée. Tous les foyers utilisent le même modèle de consommation pour l'énergie échangée : d'abord l'ECS puis les autres appareils.

Nous avons donc une approche multi-niveau de l'ACC. Chaque foyer pris individuellement est un système multi-agent qui va simuler l'activité des

individus ainsi que leur consommation d'énergie. Cependant, en regardant à l'échelle d'un quartier, chaque foyer est aussi un agent qui va échanger son surplus d'énergie avec les autres foyers.

## 5 Cas d'étude et résultats

### 5.1 Contexte de simulation

Nous considérons 3 foyers individuels A, B et C dans le même quartier de la ville de Nice en France. Les trois foyers sont décrits dans le Tableau 1 et les familles dans le Tableau 2. Deux familles de personnes actives (foyers A et C) et un foyer de retraités (Foyer B) sont simulés. Les foyers ont été générés grâce aux enquêtes emplois du temps [16].

	Foyer A	Foyer B	Foyer C
Surface	102m <sup>2</sup>	110mm <sup>2</sup>	102mm <sup>2</sup>
Réglementation Thermique	1974	1982	1974
Chauffage électrique	Non	Non	Non
Heures creuses	23h-07h	22h30-6h30	23h-07h
Panneaux PV	Oui	Non	Non
Ville	Nice	Nice	Nice
Nb. habit.	3	2	3

TABLE 1 – Paramètres des trois maisons

	Situation	Genre
Foyer A	Actif	Femme
	Actif	Homme
	Actif	Homme
Foyer B	Retraité	Femme
	Retraité	Homme
Foyer C	Actif	Femme
	Actif	Homme
	Actif	Homme

TABLE 2 – Paramètres des trois familles

Les diagrammes d'activité de chaque famille sont tous différents. Cependant, pour les foyers A et C, il y aura des activités similaires, comme le fait que les membres de ces foyers partent au travail durant la journée (Figure 3). La famille du foyer A est majoritairement à l'extérieur pendant la journée. C'est à dire là où est produite la plus grande partie de l'énergie alors que la famille B est chez elle sur cette période.

Le foyer A sera producteur d'énergie grâce à ses panneaux PV tandis que B et C ne seront que consommateurs d'énergie. Pour le producteur d'énergie, les panneaux PV possèdent les caractéristiques suivantes :

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

La puissance électrique des panneaux PV est égale à 2,5kWc (kilowatt crête). Nous avons dimensionné les panneaux PV afin que leur production d'électricité locale soit suffisante pour supporter, en plus de la consommation d'électricité du foyer A, une part de l'énergie consommée par le foyer B.

En utilisant ces modèles, nous évaluons l'impact de l'ACC sur la consommation d'énergie des trois familles.

### 5.2 Impact de l'autoconsommation

La Figure 4 montre la consommation d'électricité pour la production d'ECS et des autres appareils du foyer A pendant une journée et sans production d'énergie par les panneaux PV. La production d'ECS n'est autorisée que pendant les heures creuses du foyer A. La consommation d'électricité totale est égale à **165kWh** pour un mois complet.

L'ajout de l'autoconsommation (Figure 5) vise à diminuer la consommation d'électricité en provenance du réseau pour la production de l'ECS et à déplacer sa consommation d'électricité sur les périodes durant lesquelles les panneaux PV produisent de l'électricité. Ainsi, une part de la consommation électrique pour la production de l'ECS a été déplacée pendant la journée.

La production d'ECS consommera donc moins d'énergie en provenance du réseau. Cependant, si l'on regarde la consommation totale d'énergie, elle est égale à **180 kWh** pour un mois. Cette différence peut provenir de deux phénomènes :

- Tout d'abord, chaque simulation multi-agent d'un foyer produit un diagramme d'activité différent : c'est le principe de la plate-forme SMACH. Les consommations seront donc nécessairement différentes, à la marge ;
- Les panneaux PV peuvent conduire à une surconsommation du foyer car la production de l'ECS est sollicitée plus souvent sur les périodes de production d'électricité avec les panneaux PV.

La consommation d'électricité provenant du réseau pour la production de l'ECS a été diminuée pour atteindre la valeur de **104,9 kWh**. Cependant, le foyer A n'a consommé que 40% de l'énergie produite par les panneaux PV. Le reste de la production d'électricité a été rendue au réseau. Le principe de l'ACC pour le simulateur

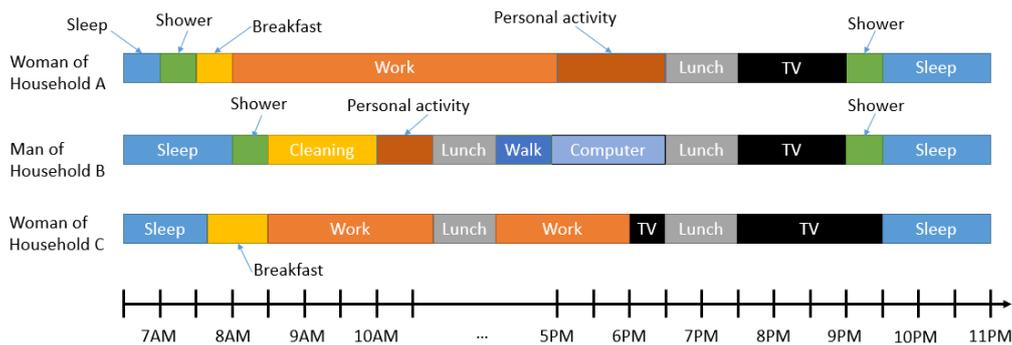


FIGURE 3 – Exemple de diagrammes d’activités pour un membre de chaque foyer

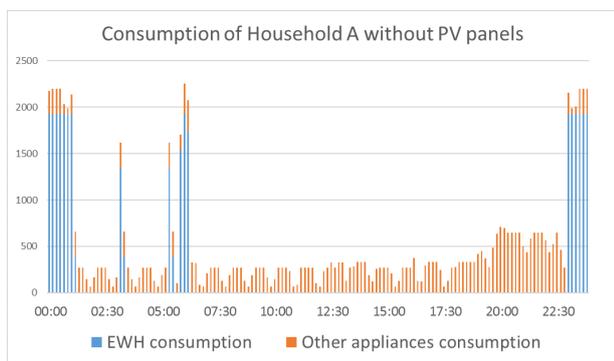


FIGURE 4 – Consommation électrique totale pour le foyer A et sans panneaux PV

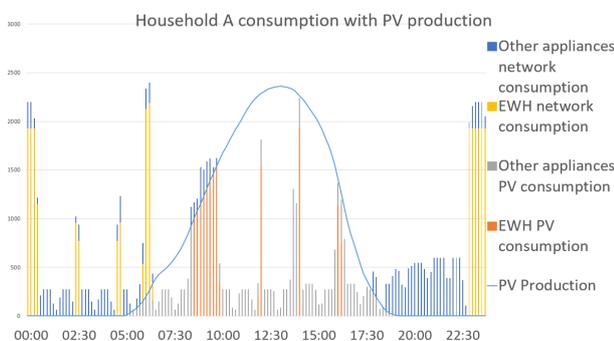


FIGURE 5 – Consommation totale d’électricité pour le foyer A avec production d’électricité par les panneaux PV

SMACH est de permettre d’utiliser cette énergie grâce aux échanges avec d’autres foyers.

La consommation d’électricité pour la production d’ECS reste élevée même en ajoutant l’électricité produite par les panneaux PV. En effet, 38% de l’électricité provient toujours du réseau car cette électricité est consommée majoritairement pendant la nuit.

### 5.3 Impact de l’autoconsommation collective

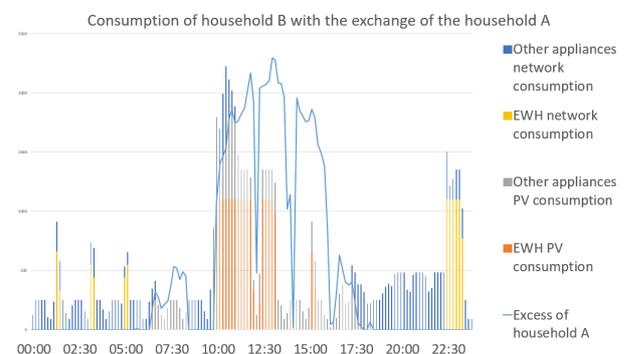


FIGURE 6 – Consommation d’électricité du foyer B avec des échanges

La Figure 6 montre la consommation d’électricité du foyer B lorsque le foyer A lui donne son surplus d’énergie. La consommation d’énergie du foyer B intervient majoritairement entre 10h00 et 17h00. La consommation d’électricité pour la production de l’ECS est la plus élevée. Enfin, la consommation d’électricité en soirée est essentiellement due à des activités telles que la cuisine et la vaisselle qui utilisent de l’ECS.

Les échanges d’électricité permettent de couvrir 38% de la consommation du foyer B. De plus cela permet au groupement de foyers A+B d’utiliser 68% de l’énergie produite par les panneaux PV de A. Donc, la production d’électricité du foyer A est suffisante pour couvrir une large partie de la consommation d’électricité du foyer B et ceci grâce aux échanges.

Cependant, encore 32% de la production d’électricité du foyer A reste inutilisée. C’est pourquoi nous avons décidé d’ajouter un autre foyer aux échanges à savoir le foyer C. Ce foyer consommera l’excès d’énergie du foyer B et plus préci-

sément 38% de la production électrique du foyer A.

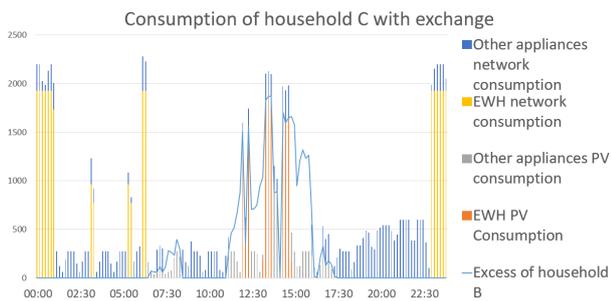


FIGURE 7 – Consommation d’électricité du foyer C avec des échanges

La Figure 7 montre la consommation du foyer C durant une journée. Le profil de la courbe de charge de ce foyer est similaire à celui du foyer A. Mais en regardant plus attentivement, seulement 24% de la consommation électrique totale de C provient des échanges effectués avec le foyer B. Cela s’explique par le fait que les foyers A et B consomment une large partie de la production d’électricité avant de la diriger vers le foyer C. De plus, il y a un toujours un excédent d’électricité que l’implémentation des échanges n’a pas permis de consommer. Ajouter plus de foyers consommateurs ne serait pas réaliste car cela ne ferait que diminuer la quantité d’énergie échangée entre chaque foyer. Il faut également noter que le gain du foyer C est faible. Cela est dû au fait que les membres de la famille sont absents durant la journée. Cet exemple montre que l’intégration de l’ACC est indissociable de la prise en compte de l’activité des habitants.

Avec l’intégration des échanges, seulement 17% de l’électricité générée par le foyer A est inutilisée (contre 62% sans les échanges). Cette énergie pourrait être utilisée pour alimenter d’autres appareils au sein des trois foyers à condition que les habitants intègrent la production d’électricité des panneaux PV dans le choix de leurs activités.

## 6 Conclusion

Dans cette étude, nous avons présenté une extension du modèle de simulation multi-agent SMACH pour prendre en compte l’autoconsommation collective. Ce modèle se décompose en deux niveaux : un ensemble de SMA simulant l’activité et la consommation d’électricité de chaque foyer, et un modèle de coordination entre les foyers permettant l’échange d’énergie. Nous avons illustré les possibilités sur un

exemple simple d’ACC. Les résultats montrent que l’étude de l’autoconsommation d’électricité ne peut pas se faire sans intégrer l’activité humaine et qu’une part importante de l’énergie peut être partagée dans certaines configurations de foyers, par exemple une famille d’actifs et un couple de retraités.

Le modèle actuel ne prend en compte qu’une seule politique d’échange (coopérative). Nous travaillons actuellement sur une extension permettant d’intégrer différents types d’échanges. Nous devons aussi encore valider ce modèle dans des configurations plus riches intégrant plusieurs producteurs et des échanges avec le réseau (fournisseur d’énergie institutionnel).

Pour ce qui est des résultats de l’étude que nous avons présentée ici, l’autoconsommation de l’électricité pourrait être améliorée par différents moyens. Une première solution serait d’autoriser les habitants à déplacer certaines activités durant les périodes de production d’électricité par les panneaux PV en modifiant le modèle de décision du simulateur SMACH. Mais, certaines consommations d’électricité sont difficiles voir impossible à déplacer comme celle du réfrigérateur ou de l’éclairage. De plus, les activités déplaçables dans le temps représentent une faible part de la consommation totale d’électricité des foyers. Ainsi, le gain énergétique serait relativement faible.

Une deuxième solution serait d’introduire des systèmes de stockage d’électricité qu’ils soient collectifs ou individuels mais cela amènera une modification de la politique d’échange d’électricité entre les foyers.

## Références

- [1] Edouard Amouroux, Thomas Huraux, François Sempé, and Nicolas Sabouret. SMACH : Simuler l’activité humaine pour limiter les pics de consommation électrique. *Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA)*, 2013.
- [2] Édouard Amouroux, Thomas Huraux, François Sempé, Nicolas Sabouret, and Yvon Haradji. Simulating human activities to investigate household energy consumption. In *Proceedings of the 5th International Conference on Agents and Artificial Intelligence*, volume 2, pages 71–80, 2013.
- [3] Martin Braun, Kathrin Büdenbender, Dirk Magnor, and Andreas Jossen. Photovoltaic self consumption in Germany using

- Li-ion storage to increase self-consumed PV energy. *Fraunhofer IWES*, (34), 2009.
- [4] Dorota Chwieduk. Towards sustainable-energy buildings. *Applied Energy*, 76(1-3) :211–217, sep 2003.
- [5] Hassan Farhangi. The path of the smart grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, 8(1) :18–28, jan 2010.
- [6] Martha S. Feldman and Brian T. Pentland. Reconceptualizing Organizational Routines as a Source of Flexibility and Change. *Administrative Science Quarterly*, 48(1) :94, mar 2003.
- [7] Eric Ferreri, Jean-Marc Salotti, and Pierre-Alexandre Favier. Prediction of electrical consumption using a bio-inspired behavioral model. *BauSIM2014*, 2017.
- [8] Thomas Huraux, Nicolas Sabouret, Yvon Haradji, and François Sempé. Simulations multi-agents de l'activité humaine : application dans le contexte énergétique résidentiel français. *Applications Pratiques de l'Intelligence Artificielle*, 2015.
- [9] Ayesha Kashif, Stéphane Ploix, Julie Dugdale, and Xuan Hoa Binh Le. Simulating the dynamics of occupant behaviour for power management in residential buildings. *Energy and Buildings*, 56 :85–93, jan 2013.
- [10] Rasmus Luthander, Joakim Widén, Daniel Nilsson, and Jenny Palm. Photovoltaic self-consumption in buildings : A review. *Applied Energy*, 142 :80–94, 2015.
- [11] Eduardo Matallanas and Felix Monasterio. Analysis of the Self-consumption Possibilities in Small Grid-connected Photovoltaic Systems in Spain. *26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, (1) :4619–4624, 2011.
- [12] Joakim Munkhammar, Pia Grahn, and Joakim Widén. Quantifying self-consumption of on-site photovoltaic power generation in households with electric vehicle home charging. *Solar Energy*, 97 :208–216, 2013.
- [13] Gilles Plessis, Aurélie Kaemmerlen, and Amy Lindsay. BuildSysPro : a Modelica library for modelling buildings and energy systems. *Proceedings of the 10th International Modelica Conference*, 2014.
- [14] Quentin Reynaud, Yvon Haradji, François Sempé, and Nicolas Sabouret. Using Time-Use Surveys in Multi Agent Based Simulations of Human Activity. *Proceedings of the 9th International Conference on Agents and Artificial Intelligence - Volume 1 : ICAART*, (Icaart) :67–77, 2017.
- [15] Quentin Reynaud, Nicolas Sabouret, Yvon Haradji, and François Sempé. Simulation de l'activité humaine. Une étude sur le réalisme multi-niveau. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 32(2) :197–221, 2018.
- [16] Quentin Reynaud, François Sempé, Yvon Haradji, and Nicolas 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)*, jul 2017.
- [17] Maarten Sierhuis, William J. Clancey, and Ron J.J. Van Hoof. Brahms : a multi-agent modelling environment for simulating work processes and practices. *International Journal of Simulation and Process Modelling*, 3(3) :134, 2007.
- [18] Wayes Tushar, Chau Yuen, Hamed Mohsenian-Rad, Tapan Saha, H. Vincent Poor, and Kristin L. Wood. Transforming energy networks via peer-to-peer energy trading : The potential of game-theoretic approaches. *IEEE Signal Processing Magazine*, 35(4) :90–111, 2018.
- [19] Joakim Widén. Improved photovoltaic self-consumption with appliance scheduling in 200 single-family buildings. *Applied Energy*, 126 :199–212, 2014.
- [20] Yuan Wu, Xiaoqi Tan, Liping Qian, and Danny H K Tsang. Optimal management of local energy trading in future smart microgrid via pricing. *Proceedings - IEEE IN-FOCOM*, 2015-Augus(1) :570–575, 2015.
- [21] Naouar Yaagoubi and Hussein T. Mouftah. Energy trading in the smart grid : A distributed game-theoretic approach. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 40(2) :57–65, 2017.
- [22] Jean-Paul Zimmermann, Jonathan Griggs, Nicola King, Les Harding, Roberts Penelope, and Chris Evans. Household electricity survey a study of domestic electrical product usage. Report, RAND Corporation, 2012.