



**HAL**  
open science

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

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

### ► To cite this version:

J Albouys Perrois, Nicolas Sabouret, Y Haradji, M Schumann, B. Charrier, et al.. Étude de différentes configurations d'autoconsommation collective de l'énergie à l'échelle du quartier à l'aide de la simulation multi-agent. *Revue Ouverte d'Intelligence Artificielle*, 2022, 3 (5-6), pp.477-499. 10.5802/roia.40 . hal-03195521

**HAL Id: hal-03195521**

**<https://hal.science/hal-03195521>**

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.

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

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

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

Y. Haradji<sup>c</sup>  
yvon.haradji@gmail.com

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

B. Charrier<sup>c, d</sup>  
benoit.charrier@edf.fr

C. Inard,<sup>d a, d</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> 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

## Résumé

*Cet article présente un modèle de simulation multi-agent à deux niveaux 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 montrons leur fort impact sur la répartition de l'énergie lorsque la production est faible face à la consommation.*

**Mots-clés :** Simulation multi-agent, Simulation, Consommation énergétique, Autoconsommation collective

## 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, Energetic consumption, Collective self-consumption

## 1 Introduction

L'autoconsommation collective (ACC) d'énergie associe une production d'énergie électrique locale, par exemple avec des panneaux photovoltaïques (PV) ou une éolienne, avec la consommation de toute ou d'une partie de cette énergie par un ensemble de foyers situés à proximité des moyens de production [7, 8]. 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. Complémentaire avec les expérimentations sur site, la simulation numérique est un outil permettant d'étudier la pertinence technico-économique des nombreuses configurations d'ACC possibles et l'évolution des usages de l'énergie dans ces situations. [8].

Dans nos précédents travaux [1, 2] nous avons déjà mis en avant la nécessité de prendre en compte la diversité de l'activité des habitants des foyers dans les problématiques de l'ACC, en mettant en évidence l'impact positif sur le taux d'autoconsommation collective, c'est-à-dire la part de la production électrique locale qui est consommée immédiatement sur place par les foyers. Cependant, les premiers résultats obtenus étaient basés sur une seule configuration d'ACC simplifiée : dans notre étude, les foyers s'échangeaient l'énergie produite localement de manière séquentielle i.e. un foyer B recevait l'énergie que le foyer A ne consommait pas. Il existe toutefois de nombreuses configurations possibles d'autoconsommation 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 étude précédente n'avait pas encore mis en avant.

Dans cet article, nous proposons un modèle de simulation multi-agent à deux niveaux, afin de rendre compte de la diversité des configurations d'ACC et d'étudier leur impact sur le taux d'autoconsommation. Comme nous l'avons montré dans nos travaux précédents [3], la prise en compte de l'activité humaine est importante pour étudier avec justesse la dynamique des consommations dans le secteur résidentiel. C'est pourquoi nous utiliserons, dans un premier niveau, la plateforme SMACH pour simuler les foyers et, par co-simulation, le modèle énergétique du bâtiment. Dans cet article nous présentons le second niveau de notre modèle qui est aussi un système multi-agent (SMA) et dont le rôle est de simuler le fonctionnement de la configuration d'ACC étudiée. L'objectif de ce

niveau est de permettre de simuler un grand nombre configuration d'ACC différentes. Ceci permettra de fournir un outil aux experts de l'énergie afin d'étudier et d'anticiper les futures situations et problématiques liées à l'ACC, comme le dimensionnement des équipements liés à l'ACC.

Nous présentons la conception, la formalisation et l'implémentation actuelle de notre modèle. Dans la section 2, nous discutons des travaux antérieurs portant sur la simulation de regroupement d'agents et sur les problèmes d'allocation par des SMA. La section 3 est dédiée à la présentation de notre modèle d'ACC. La section 4 est dédiée aux modèles d'échange de l'énergie. Enfin, la section 5 présente un cas d'étude précis et ses résultats.

## 2 État de l'art

### 2.1 Agent, groupe et ACC

Une des caractéristiques de l'ACC est la possibilité pour des foyers de se regrouper afin d'échanger entre eux de l'énergie produite localement. En SMA, la formation de groupe d'agents et leur optimisation vis-à-vis d'un ou plusieurs objectifs sont des sujets largement étudiés, avec des notions comme les coalitions, les équipes ou encore les congrégations [6].

Cependant, dans nos travaux, les regroupements de foyers pratiquant l'ACC sont définis et fixés de manière contractuelle. Nous ne cherchons donc pas à optimiser ces regroupements pratiquant l'ACC, mais à fournir un outil visant à étudier l'impact de différents types de groupement (en termes de foyers, d'habitants, de moyens de production et d'échange d'énergie). Nous ne sommes ni dans un problème de formation de coalition ni d'optimisation de la consommation.

### 2.2 Échanges de ressources

L'énergie produite localement sera amenée à être échangée entre les différents acteurs

pratiquant l'ACC. L'échange (ou allocation) de ressources est un problème fréquemment étudié dans les 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 [4]. Cette répartition doit correspondre au mieux aux préférences des agents qui sont souvent en compétition.

Pour résoudre ces problèmes d'allocation, les auteurs de [4] proposent la mise en place d'un système multi-agent décentralisé basé sur les processus décisionnels de Markov (PDM). Dans ce modèle, les agents vont être capables de faire ou d'accepter des propositions d'échanges de ressources avec d'autres agents. L'objectif des PDM est de rechercher une optimisation et une planification des différents échanges de ressources. Or aujourd'hui, l'ACC impose une organisation contractuelle précise pour régir les échanges d'énergie entre les foyers. Dans nos travaux notre objectif est de voir comment différentes méthodes pour échanger de l'énergie impactent la consommation au sein d'un groupement sans chercher à les optimiser.

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 « Contract-Net Protocol » [11]. Ce protocole consiste en l'interaction d'un manager qui va propager une offre i.e. un ensemble de ressources à d'autres agents qui réaliseront une proposition (d'achat par exemple) au manager. Le manager sélectionne ensuite la meilleure proposition puis va attribuer les ressources. Le fonctionnement avec des agents en concurrence pour l'obtention de ressources est similaire au fonctionnement des enchères dites scellées. Cependant, une seule ressource ne sera attribuée qu'à un seul acheteur. Cela ne correspond pas forcément à la façon dont l'énergie électrique peut être répartie dans le cas d'enchères. D'autres algorithmes existent visant à reproduire des systèmes d'enchères pour allouer des ressources entre vendeurs

[12].

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, ainsi que les différentes organisations d'autoconsommation d'énergie associées à l'allocation de l'énergie produite localement entre les différents foyers. Ce modèle sera basé sur la simulation multi-agent à deux niveaux pour simuler l'ACC. Au centre de modèle, on retrouvera le **Groupement**. Un des apports de ce modèle est de permettre le test et la comparaison de différentes organisations d'ACC sur la consommation électrique des foyers et sur les flux financiers.

### 3 Le modèle de groupement

Dans cette section et dans la suivante, nous présentons notre modèle de configurations d'ACC. Nous présentons tout d'abord la notion de groupement et le modèle SMA à deux niveaux qui y est rattaché. La section 4 présentera l'organisation des échanges.

#### 3.1 Le groupement : un SMA à deux niveaux

Les acteurs sont des agents présents dans le groupement, ces derniers représenteront les foyers. Les foyers sont des systèmes multi-agents qui sont simulés par la plateforme SMACH dont les développements successifs ont déjà été abordés [2]. La plateforme permet d'obtenir la consommation électrique des foyers en simulant l'activité humaine grâce à un système multi-agent. Dans ce SMA, chaque agent représente un habitant du foyer qui va sélectionner des tâches quotidiennes à réaliser. Les activités sélectionnées sont associées à des appareils qui consomment de l'énergie électrique. Nous pouvons ainsi obtenir la consommation électrique de chaque foyer. Les foyers peuvent ainsi avoir un besoin en énergie qui peut être comblé en partie ou totalement par un moyen de production individuel (situé au niveau du foyer). Cela est évalué par une

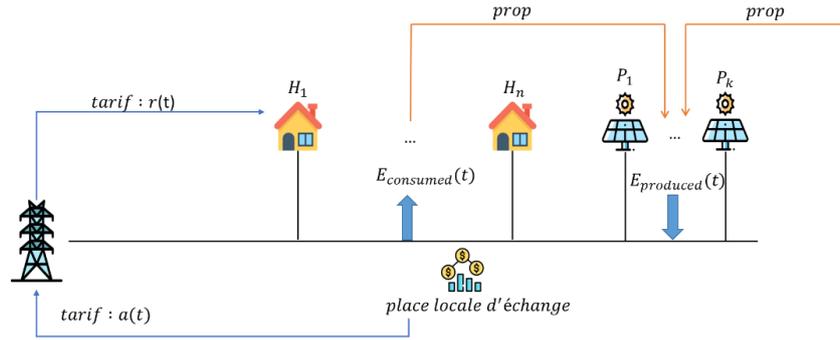


Figure 1 : Représentation schématique d'un groupement

nouvelle entité intégrée dans chacun des foyers pratiquant l'ACC : le **module d'autoconsommation**. Le rôle de ce module est de calculer le besoin ou le surplus en énergie du foyer et de le communiquer au groupement à un pas de temps défini. Les foyers peuvent également être copropriétaires d'un moyen de production d'énergie mutualisé, c'est-à-dire situé au niveau du groupement.

Un groupement est également composé d'équipements : moyens de production et de stockage. Les moyens de production à l'échelle du groupement sont dits mutualisés. Ces derniers sont à la disposition du groupement et l'ensemble de leur production d'énergie sera amenée à être répartie entre les foyers du groupement. Ces moyens de production sont modélisés grâce au langage Modelica et à la bibliothèque BuildSysPro comme présenté dans nos précédents travaux [9]. Pour ce faire, une co-simulation entre le groupement et les moyens de production mutualisés s'appuyant sur le standard d'interopérabilité logicielle FMI a été développée [1]. Ces moyens de production mutualisés peuvent appartenir à un ou plusieurs acteurs du groupement, c'est-à-dire que chacun a un taux de propriété qui sert à la répartition des bénéfices.

Enfin, la place locale d'échange (PLE) est un agent présent dans notre groupement, dont le rôle principal est de définir comment l'énergie produite au sein du groupement est répartie entre les différents foyers. Pour cela, elle calcule la répartition de cette énergie en fonction de règles contractuelles définies entre

les foyers. Cet ensemble de règles est appelé **organisation de l'autoconsommation** et pourra être différent d'un groupement à l'autre, mais toujours identique au sein d'un groupement. Une fois l'énergie produite localement répartie, la place locale d'échange calcule également la quantité d'énergie que chaque foyer a consommée auprès du réseau électrique.

### 3.2 Définition formelle du groupement

Soit  $H$  l'ensemble des foyers qui composent un groupement. Pour chacun de ces foyers, nous notons  $e_{consumed}(h, t)$  la quantité d'énergie en kWh appelée par un foyer  $h$  sur le précédent pas de temps de notre simulation. Dans notre groupement,  $Prod$  permet de représenter l'ensemble des moyens de production mutualisés du groupement. Nous notons  $e_{produced}(t): Prod \rightarrow R^+$  la quantité d'énergie en kWh produite par un moyen de production mutualisé du groupement sur le pas 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 permettra 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  $E_{produced}(t) = \sum_{j \in Prod} e_{produced}(j, t)$  la quantité totale d'énergie produite par l'ensemble des moyens de production du groupement sur le pas de temps précédent.

Dans notre groupement, nous notons  $r(t): H \rightarrow \mathbb{R}^+$  le prix de l'énergie provenant de l'extérieur du groupement pour un foyer au temps  $t$ . Nous notons également  $a(t) \in \mathbb{R}^+$  le prix auquel l'énergie produite pourra être vendue à l'extérieur du groupement. Actuellement, nous considérons que seul le réseau peut vendre ou acheter de l'énergie depuis l'extérieur du groupement.

Pour un groupement, nous notons  $pol = \{TauxFixe, TauxProportionnel, Concurrentielle\}$  l'organisation des échanges d'énergie mise en place dans le groupement, tel que défini dans la section 4.

Nous avons pour chaque foyer la fonction  $e_{local}(t): H \rightarrow \mathbb{R}^+$  qui représente la quantité d'énergie obtenue à l'aide des moyens de production mutualisés du groupement. Nous avons également la contrainte  $e_{consumed}(t) \geq e_{local}(t)$ , c'est-à-dire qu'un foyer ne peut pas recevoir plus d'énergie qu'il n'en consomme.

Le groupement (Figure 1) est donc une simulation à deux niveaux de l'ACC. Le premier niveau permet de simuler l'activité humaine et la consommation d'énergie à l'échelle des foyers. Le second permet la simulation des différentes configurations d'ACC.

## 4 Modélisation des échanges

### 4.1 Principe général

Dans cette section nous présentons la notion d'organisation des échanges d'énergie et comment ils sont implémentés. 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. En entrée, ces organisations prennent les quantités d'énergie produite et appelée dans le groupement. En sortie, une organisation doit fournir la répartition de l'énergie produite localement c'est-à-dire la quantité d'énergie que chaque foyer a reçu et, si cela s'applique, le prix payé par chacun des

foyers pour cette énergie. Dans le groupement, c'est la place locale d'échange qui est responsable de la mise en place de ces règles.

Nos premières enquêtes et études [2] nous ont permis d'identifier trois types d'organisation des échanges entre les foyers que nous allons formaliser :

- 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 en fonction de sa consommation
- Concurrentielle : l'énergie est achetée ou vendue sur un marché où vendeurs et acheteurs interagissent entre eux.

### 4.2 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  $taux_{\text{energie}}$  une fonction telle que  $taux_{\text{energie}}: H \times Prod \rightarrow [0,1]$ , 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  $\forall j \in Prod, \sum_{h \in H} taux_{\text{energie}}(h, j) = 1$  la contrainte qui exprime le fait que pour un moyen de production donné, la somme de ses 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 : la

revente complète du surplus ou une nouvelle répartition avec un algorithme itératif comme présenté à la Figure 2. 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.

```

1 Soit  $n$  le nombre de foyer tel que  $besoin(h, c) > 0$ ;
2 Soit  $surplus_{fixe}(c) > 0$ ;
3 tant que  $surplus_{fixe}(c) \geq 0$  et  $n \geq 0$  faire
4    $residu = surplus_{fixe}(c)$ ;
5   pour chaque foyer  $h$  faire
6     si  $besoin(h, c) > \frac{surplus_{fixe}(c)}{n}$  alors
7        $besoin(h, c) = \frac{surplus_{fixe}(c)}{n}$ ;
8        $residu = \frac{surplus_{fixe}(c)}{n}$ ;
9        $e_{local}(h, c) = e_{local}(h, c) + \frac{surplus_{fixe}(c)}{n}$ ;
10    fin
11  sinon si  $besoin(h, c) \geq 0$  alors
12     $e_{local}(h, c) = e_{local}(h, c) + besoin(h, c)$ ;
13     $besoin(h, c) = 0$ ;
14     $residu = besoin(h, c)$ ;
15     $n = n - 1$ ;
16  fin
17 fin
18  $surplus_{fixe}(c) = residu$ 
19 fin

```

Figure 2: Algorithme de répartition itérative du surplus d'énergie pour une organisation à échanges à taux fixe

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  $besoin(h, t)$  son besoin en énergie. Deux cas sont alors identifiables :

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

### 4.3 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 utilisons  $E_{produced}(t)$  la quantité totale d'énergie produite au sein d'un groupement.

Nous utilisons 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 :

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

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

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

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

### 4.4 Concurrentielle

Dans une organisation concurrentielle, les différents foyers s'échangent de l'énergie à travers un marché et des processus d'achat et de vente. Nous considérons deux fonctionnements possibles dans nos travaux. 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  $offre_{vente}$  contenant chacune des offres de vente et d'achat d'énergie.

Positionnons-nous par exemple dans le cas où les acheteurs fixent les prix. Le tableau  $offres_{achat}$  sera composé d'ensembles :  $achat = \langle acheteur, quantité_{achat}, prix \rangle$

Le tableau  $offre_{vente}$  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

	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
Nh Habitants	1	1	2	1	2	2	2	2	1	2

Tableau 1: Paramètres des foyers

offres de vente avec les prix de vente les plus bas qui seront considérées en priorité.

Cette organisation pose également la question de la formation des prix pour les acheteurs et les vendeurs. Nous n'abordons pas cette problématique dans cet article, mais un mécanisme de formation 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, d'autres systèmes concurrentiels seront intégrés dans le futur comme des enchères à doubles carnets d'ordres [12] pour permettre l'étude de différentes organisations concurrentielles d'échanges.

## 5 Cas d'étude et résultats

### 5.1 Contexte de la simulation

Nous considérons un groupement composé de 10 foyers dans la ville de Nice. Dans le Tableau 1 nous donnons les principaux paramètres des foyers étudiés. En plus des caractéristiques du bâtiment, nous fournissons deux informations sur les familles à savoir le nombre d'habitants et s'il y a au moins un retraité ou une personne inactive, c'est-à-dire présente 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 [10].

Dans le groupement, les foyers A, B et C produisent de l'énergie locale 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 notre 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.

### 5.2 Impact de l'organisation des échanges sur l'autoconsommation d'énergie

Dans un premier temps nous allons analyser l'impact des différentes organisations des échanges à l'échelle du groupement. La Figure 3 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 **1935 kWh** et produit **1638 kWh** grâce aux panneaux PV.

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

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

	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>	42%	17%	20%	21%	54%	18%	30%	40%	61%	34%
<b>Proportionnel</b>	40%	16%	20%	23%	51%	19%	30%	37%	60%	37%
<b>Concurrentiel : au plus offrant</b>	37%	19%	21%	21%	49%	17%	28%	35%	58%	35%

Tableau 2 : Taux d'autoproduction d'électricité des foyers avec trois panneaux PV pour le mois de juillet 2019 à Nice

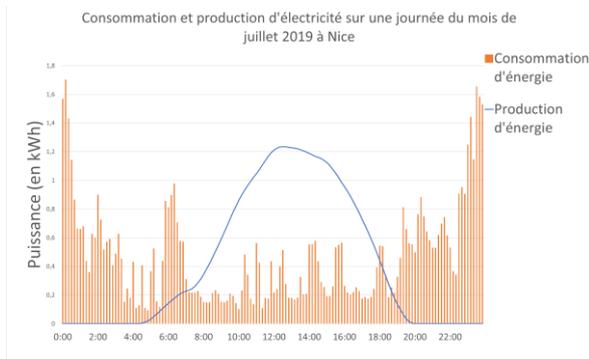


Figure 3 : Consommation et production d'électricité pour une journée de juillet 2019 à Nice

Les taux d'autoproduction du groupement (Tableau 3) sont relativement proches, 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, quelle que soit l'organisation mise en place.

Le Tableau 2 donne le taux d'autoproduction des foyers en fonction de la façon dont les échanges sont réalisés 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 dans notre 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.

Cela se confirme en analysant la consommation en 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 qui est de **1638 kWh**.

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

Tableau 3 : Impact des différentes organisations des échanges de l'énergie au sein du groupement

Cette simulation met 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 est alors relativement importante, dans ce cas **1033 kWh** sur la durée totale de la simulation. Cette énergie sera ensuite revendue à l'extérieur du groupement au fournisseur d'électricité.

Afin d'étudier la situation limitante où la quantité d'énergie produite dans le groupement est fortement inférieure à la consommation de ce dernier, nous avons simulé un second cas constitué de 10 foyers situés à Lille pour le mois de décembre 2019. Ici, seul le foyer A possède un moyen de production locale. La Figure 4 montre une journée de simulation dans cette nouvelle configuration, où la production d'énergie locale est très faible par rapport à la consommation totale du groupement.

Les taux d'autoproduction d'électricité des foyers donnés dans le Tableau 4 sont très faibles et on constate des différences entre les différentes stratégies d'échange de l'énergie.

	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%

Tableau 4 : Taux d'autoproduction d'électricité des foyers avec un seul panneau PV pour le mois de décembre 2019 à Lille

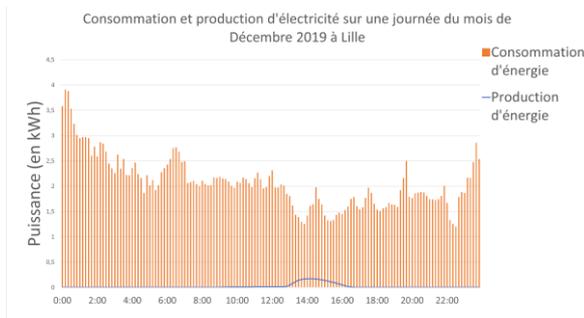


Figure 4 : Consommation et production d'électricité pour une journée de décembre 2019 à Lille

Par exemple, pour le foyer H une organisation à taux fixe basé sur les tantièmes i.e. la surface totale des foyers, permet de multiplier par 15 son taux d'autoproduction d'électricité par rapport à une organisation proportionnelle. La raison principale est que pour la première organisation (taux fixe), les foyers reçoivent l'énergie en fonction de leur surface alors que dans la seconde ils la reçoivent en fonction de leur consommation. Malgré sa surface importante, la consommation du foyer H reste faible car il ne possède pas de chauffage électrique. Ceci contribue fortement à la différence entre les deux politiques d'échange. Une autre différence importante entre les taux d'autoproduction se retrouve pour le foyer A. En effet, le taux d'autoproduction d'électricité pour une organisation concurrentielle augmente grandement par rapport aux deux autres organisations. Cela s'explique par le fait que le foyer A consomme l'énergie qu'il produit en priorité avant de mettre ce qu'il ne consomme pas en vente. D'autres critères pourraient être envisagés pour comparer les résultats entre les foyers en s'appuyant sur des métriques sociales du domaine[5].

Cette simulation a permis de montrer que, dans une situation où l'énergie produite localement

est faible par rapport à la consommation d'énergie du groupement, la façon dont les échanges sont organisés a un impact primordial sur l'énergie que chaque foyer recevra. Au-delà de la consommation d'énergie seule, ces différences impacteront également les flux financiers au sein du groupement, ce qui en fera un critère de choix de l'organisation optimale.

## 6 Conclusion

Dans cette étude, nous avons présenté une simulation à deux niveaux pour l'étude de configurations d'ACC collective de l'énergie : un ensemble de SMA basés sur la plateforme SMACH simulant l'activité humaine et la consommation électrique de chacun des foyers, et le groupement, un second système multi-agent dont le rôle est de permettre l'échange d'énergie. Nous présentons également différentes possibilités pour échanger de l'énergie. Les résultats semblent indiquer que ces différentes organisations d'échange de l'énergie ont un impact sur la consommation des foyers. L'impact est faible lorsque la production suffit à subvenir aux besoins. Au contraire, la modalité d'échange de l'énergie a un impact plus fort lorsque la production locale d'énergie est faible par rapport à la consommation totale d'énergie.

Les résultats de notre étude ont également mis en avant qu'une grande quantité d'énergie produite n'a pas pu être utilisée lorsque la production est importante. Pour augmenter le taux d'autoconsommation, une solution est d'introduire des systèmes de stockage collectifs ou individuels dans le groupement, afin de rendre disponible l'énergie de manière différée. 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 politiques de stockage est la suite directe de notre travail.

L'autoconsommation collective peut impacter la politique énergétique des foyers individuels, c'est-à-dire leur relation à la consommation d'énergie et les processus de décision associés à leur utilisation des appareils électriques. La modélisation de politiques d'échange et de consommation spécifiques à cette situation est donc également à envisager. Il pourra s'agir de politiques impactant le comportement des habitants, notamment en leur faisant déplacer certaines activités consommatrices d'énergie, ou leur rôle dans les échanges en choisissant par exemple de stocker leur surplus pour une utilisation individuelle future.

## Références

- [1] Albouys-Perrois, J. et al. 2019. A Co Simulation Of Photovoltaic Power Generation And Human Activity For Smart Building Energy Management And Energy Sharing. *Proceedings of the International Building Performance Simulation Association*. 16, (2019).
- [2] Albouys-Perrois, J. et al. 2019. Simulation multi-agent de l'autoconsommation collective en relation avec l'activité des foyers. *JFSMA 2019. Systèmes distribués, embarqués et diffus*. (2019).
- [3] Amouroux, E. et al. 2013. SMACH: Simuler l'activité humaine pour limiter les pics de consommation électrique. *Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA)*. (2013).
- [4] Beynier, A. and Estivie, S. 2013. Optimizing distributed resource exchanges in multiagent systems under uncertainty. *Distributed and Multi-Agent Planning*. (2013), 8.
- [5] Brams, S.J. and King, D.L. 2005. Efficient Fair Division: Help the Worst off or Avoid Envy? *Rationality and Society*. 17, 4 (Nov. 2005), 387–421. DOI:<https://doi.org/10.1177/1043463105058317>.
- [6] Horling, B. and Lesser, V. 2005. A Survey of Multi-Agent Organizational Paradigms. *The Knowledge Engineering Review*. (2005), 281–316.
- [7] Luthander, R. et al. 2015. Photovoltaic self-consumption in buildings: A review. *Applied Energy*. 142, (2015), 80–94. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.028>.
- [8] Matallanas, E. et al. 2011. Analysis of the Self-Consumption Possibilities in Small Grid-Connected Photovoltaic Systems in Spain. *26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. (2011), 6.
- [9] Plessis, G. et al. 2014. BuildSysPro: a Modelica library for modelling buildings and energy systems. (2014). DOI:<https://doi.org/10.3384/ECP140961161>.
- [10] Reynaud, Q. et al. 2017. 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 (2017), 67–77. DOI:<https://doi.org/10.5220/0006189100670077>.
- [11] Smith, R.G. 1980. The contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver. *IEEE Transactions on computers*. 12 (1980), 1104–1113. DOI:<https://doi.org/10.1109/TC.1980.1675516>.
- [12] Vytelingum, P. et al. 2010. Trading agents for the smart electricity grid. *9th International Conference on AAMAS 2010*. (2010), 897–904.

*Ce travail a été financé par le Fonds européen de développement régional (FEDER)*