



**HAL**  
open science

# 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

Jérémy Albouys-Perrois

## ► To cite this version:

Jérémy 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. Informatique [cs]. Université de La Rochelle, 2021. Français. NNT: . tel-03271756

**HAL Id: tel-03271756**

**<https://hal.science/tel-03271756v1>**

Submitted on 27 Jun 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.



# UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE

## ÉCOLE DOCTORALE *EUCLIDE*

Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement

### THÈSE

présentée par :

Jérémy ALBOUYS-PERROIS

soutenue le 23 mars 2021

pour l'obtention du grade de Docteur de La Rochelle Université

Discipline : Informatique et Applications

**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.**

---

#### JURY :

Marjorie MUSY	Directeur de recherche CEREMA, Examinatrice
Stéphane PLOIX	Professeur, Grenoble INP, Rapporteur
Vincent CHEVRIER	Professeur, Université de Lorraine, Rapporteur
Valérie CAMPS	Maître de conférences-HDR, Université Paul Sabatier, Examinatrice
Frédéric WURTZ	Directeur de recherche CNRS, Grenoble INP, Examineur
Christian INARD	Professeur, Université de La Rochelle, Directeur de thèse
Nicolas SABOURET	Professeur, Université Paris-Saclay, Co-directeur de thèse
Yvon HARADJI	Chercheur sénior, EDF R&D, EDF R&D, Examineur

#### INVITÉS :

Mathieu SCHUMAN	Ingénieur Chercheur, EDF R&D, Invité
Benoît CHARRIER	Ingénieur Chercheur, EDF R&D, Invité



*Le doute est une force.  
Une vraie et belle force.  
Veille simplement à ce qu'elle te  
pousse toujours en avant.*

- Pierre Bottero



## Résumé

Nous abordons dans cette thèse la modélisation de l'AutoConsommation Collective d'énergie (ACC) au sein du secteur résidentiel. Alors que l'ACC est vue aujourd'hui comme une nouvelle manière de consommer l'énergie produite localement, nous proposons une approche multi-agent et multi-niveau pour permettre la simulation et l'étude de l'ACC. Notre modèle est basé sur l'utilisation de la plateforme SMACH, une plateforme de simulation multi-agent des activités humaines couplée à un modèle d'énergétique du bâtiment qui permet de simuler la consommation électrique de foyers. En effet, afin d'obtenir une simulation précise de la consommation électrique des foyers, la littérature a montré l'importance de considérer l'activité humaine et le comportement thermique du bâtiment. Néanmoins, cette considération n'est pas prise en compte par les recherches actuelles portant sur la simulation de l'ACC. De plus, ces travaux ne font pas de différences entre les opérations physiques sur l'énergie (consommation, production, stockage...) et les échanges d'énergie entre les foyers qui sont, en réalité, des opérations contractuelles de comptage. Dans nos travaux, nous établissons une distinction claire entre ces deux univers (physique et contractuel) et nous nous concentrons sur la modélisation des échanges contractuels de l'énergie entre les foyers de telle sorte que notre modèle puisse être adapté à n'importe quelle manière de produire, de consommer ou de stocker l'énergie.

Ainsi, nous proposons un modèle de groupement qui permet de simuler l'ACC et les échanges d'énergie entre les foyers. Ce modèle repose sur la mise en place d'une organisation collective des échanges d'énergie où une entité centralisée est responsable de l'allocation de l'énergie entre les foyers. Il permet également de modéliser des solutions techniques liées à l'autoconsommation d'énergie comme le stockage ou encore des prises de décision d'habitants à la suite de l'ajout de l'ACC. Celui-ci simule un grand nombre de configurations d'ACC d'énergie que ce soit en termes de population, d'équipement ou encore d'organisation des échanges de l'énergie. Afin d'illustrer ces possibilités, nous présentons les résultats de différents cas d'étude qui répondent à chaque fois à une question importante, en lien avec l'autoconsommation collective, pour des experts du domaine de l'énergie. Nous montrons pour chaque cas d'étude l'impact de l'organisation des échanges ou de différentes solutions techniques, comme le stockage, sur les échanges et la consommation d'énergie, mais aussi sur les factures d'électricité et les gains financiers au sein d'un groupement de foyers pratiquant l'ACC.



## **Abstract**

In this thesis we deal with energy Collective Self-Consumption (CSC) modelling in the residential sector. While CSC is today seen as a new way to consume locally produced energy, we propose a multi-agent and multi-level approach to simulate and study CSC. Our model is based on the use of the SMACH platform. This is a multi-agent simulation of the human activity combined with an energetic building model which enables to simulate the electricity consumption of households. Indeed, in order to obtain a precise simulation of the electricity consumption, the literature has already shown the necessity to consider the human activity of the inhabitants and the thermal behaviour of the building. However, this consideration is not taken into account by the current research on the CSC simulation. Moreover, these studies do not distinguish the physical operation on the electricity (consumption, production, storage...) and the energy exchanges between the households which are, in reality, contractual and counting operations. In our work, we clearly distinguish between these two domains (physical and contractual) and we focus on the modelling of the contractual energy exchanges between the households so that our model can be adapted to any way of producing, consuming or storing energy.

Therefore, we propose the association model which makes it possible to simulate the CSC and energy exchanges between households. Our model is based on the establishment of a collective organisation of energy exchanges in which a centralised entity is responsible for the allocation of energy between households. Our model also enables to model technical solutions related to energy self-consumption such as storage systems or decision-making by inhabitants following the addition of CSC. Thus, our model enables the simulation of a large number of CSC configurations, either in terms of population, equipment or energy exchange policies. In order to illustrate these possibilities, we expose the results of different case studies which answer important and related collective self-consumption questions for energy experts. For each case study, we illustrate the impact of the exchange policies or of different technical solutions, such as storage, on the exchanges and consumption of energy, but also on energy bills and financial gains within a group of households practising CSC.



## Publication

J. Albouys-Perrois, N. Sabouret, Y. Haradji, M. Schumann, C. Inard. [SMACH : Multi-Agent Simulation of Human Activity in Households](#), Demo Paper in Proc. 17th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems (PAAMS), Springer-Verlag, 2019.

J. Albouys-Perrois, N. Sabouret, Y. Haradji, M. Schumann, C. Inard. [Simulation multi-agent de l'autoconsommation collective en relation avec l'activité des foyers](#), In Proc. 27th Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA), 2019.

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 Proc. Building Simulation Conference (BS), 2019.

J. Albouys-Perrois, N. Sabouret, Y. Haradji, M. Schumann, B. Charrier, C. Inard. [Étude de différentes configurations d'autoconsommation collective de l'énergie à l'échelle du quartier à l'aide de la simulation multi-agent](#), In Proc. 28th Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA), 2020.



## Remerciements

Je tiens à adresser mes remerciements à l'ensemble des personnes qui m'ont accompagné et soutenu tout au long de ces trois années de travail. Sans elles, je n'aurais pu mener de telles recherches et aboutir à cette thèse.

Tout d'abord, je tiens à remercier sincèrement mes deux directeurs de thèse, Nicolas Sabouret et Christian Inard qui, pendant ces trois années, ont su me guider et m'orienter. Merci à Nicolas pour sa disponibilité sans faille, ses conseils ainsi que ses encouragements m'ont été d'un immense soutien tout au long de ma thèse. Merci à Christian qui m'a transmis de nombreuses connaissances dans des domaines que je ne maîtrisais pas et qui a su me donner des conseils toujours avisés pour pousser mes réflexions et ma recherche encore plus loin. Ces trois années de travail sous leur direction ont été une expérience enrichissante.

Je remercie également mes différents encadrants qui ont travaillé ou qui travaillent encore au département R&D d'EDF, Yvon Haradji, Mathieu Schumann et Benoit Charrier. Ils ont su tout au long de ma thèse m'apporter de nouvelles idées. Merci en particulier à Yvon pour sa bienveillance et toutes les longues discussions (souvent quotidiennes) que nous avons eues et qui m'ont permis d'orienter cette thèse dans la bonne direction. Merci également d'avoir continué ton encadrement après ton départ en retraite.

Je souhaite témoigner toute ma gratitude ainsi que mon amitié à ces cinq personnes qui ont encadré ma thèse.

Je tiens également à remercier Jean-Claude Martin de m'avoir accueilli au sein de l'équipe CPU du LIMS. Merci à tous les doctorants et permanents, Delphine, Brian, David, Antoine et tant d'autres, que j'ai eu la chance de croiser et avec qui les échanges ont toujours été enrichissants et constructifs. Merci à Phillippe Fattersack pour son accueil au sein de l'équipe E76 à EDF R&D. Merci aussi à la grande famille des agents EDF que j'ai côtoyé pendant toute ma thèse. Merci à Mélodie, Zoé et Ming-Ming avec qui j'ai partagé le même bureau et les mêmes fous rires pendant trois ans, votre présence a été d'un grand soutien.

J'aimerais également remercier chaleureusement ma famille d'avoir été présente pour moi dans les moments de réussite comme dans les moments de doute et de m'avoir toujours encouragé. Merci à mes parents de ne jamais avoir cessé de croire en moi, merci à eux pour leur soutien inconditionnel. Merci aussi à tous mes frères et sœurs qui m'ont soutenu pendant cette période.

Enfin, je tiens à remercier tous mes amis, en particulier le JoyeuxBowdel et Everypony. Merci pour tous les moments de joie que l'on a passés, que l'on passe et, j'en suis sûr, que l'on passera encore ensemble. Merci pour votre soutien inestimable et votre amitié.



# Table des matières

Introduction .....	33
Contexte et motivation .....	33
Organisation du document .....	35
Chapitre 1 État de l'art : consommation électrique et activité humaine .....	37
1.1.    Activité humaine et consommation électrique .....	37
1.1.1.    L'activité humaine, un système complexe.....	38
1.1.2.    Impact de l'activité humaine sur la consommation électrique .....	39
1.1.3.    Variabilité de la consommation électrique au sein du secteur résidentiel .....	39
1.1.4.    Synthèse.....	41
1.2.    Simulation de l'activité humaine .....	42
1.2.1.    Modèles déterministes .....	42
1.2.2.    Modèles stochastiques .....	43
1.2.3.    Modèles multi-agents .....	45
1.2.4.    Synthèse.....	50
1.3.    La plateforme SMACH.....	51
1.3.1.    Génération de populations.....	52
1.3.2.    Le modèle d'agent .....	53
1.3.3.    Modèle thermique et co-simulation.....	55
1.3.4.    Validation du modèle.....	57
1.4.    Synthèse.....	59
Chapitre 2 État de l'art : autoconsommation collective et simulation.....	61
2.1.    Le défi de l'autoconsommation .....	62
2.1.1.    Produire et consommer son énergie .....	62
2.1.2.    Les limites de l'autoconsommation naturelle d'énergie dans le secteur résidentiel .....	63
2.2.    Des solutions techniques au service de l'autoconsommation d'énergie .....	63
2.2.1.    Systèmes de stockage et autoconsommation d'énergie.....	64
2.2.2.    Gestion de la demande et autoconsommation d'énergie.....	66
2.3.    Modélisation des solutions techniques .....	67

2.3.1.	Modélisation des systèmes de stockage .....	67
2.3.2.	Modélisation de la gestion de la demande.....	69
2.4.	Autoconsommation collective d'énergie : le défi de l'échange d'énergie .....	69
2.4.1.	Les simulations des échanges d'énergie.....	70
2.4.2.	Vers une distinction claire entre la couche physique et la couche contractuelle.....	73
2.5.	Simulation multi-agent et autoconsommation collective .....	74
2.5.1.	Allocation de ressources en simulation multi-agent .....	74
2.5.2.	Organisation dans les systèmes multi-agents .....	77
2.5.3.	Simulation multi-agent et multi-niveau : différentes échelles de représentation .....	83
2.6.	Synthèse.....	85
Chapitre 3 Modèle multi-niveau pour l'autoconsommation collective .....		87
3.1.	Principe général .....	87
3.2.	Grandeurs physiques et temporelles.....	91
3.2.1.	Puissance et énergie .....	91
3.2.2.	Les pas de temps de la simulation .....	92
3.3.	Formalisation du modèle .....	94
3.3.1.	Activités humaines et consommations électriques.....	94
3.3.2.	Modélisation thermique du bâtiment et consommation du chauffage.....	98
3.3.3.	Systèmes de production .....	100
3.3.4.	Systèmes de stockage .....	103
3.3.5.	Le foyer : unité de base du groupement .....	110
3.3.6.	Le groupement.....	117
3.4.	Échanges inter-groupements.....	124
3.4.1.	Principe général .....	124
3.4.2.	Formalisation des échanges inter-groupements.....	125
3.5.	Synthèse.....	127
Chapitre 4 Organisation des échanges au sein d'un groupement.....		129
4.1.	Principe général .....	130

4.1.1.	Définition d'une organisation des échanges .....	130
4.1.2.	Proposition d'organisations .....	130
4.2.	Organisation proportionnelle des échanges .....	132
4.2.1.	Principe général .....	132
4.2.2.	Algorithme de calcul .....	133
4.2.3.	Exemple.....	134
4.3.	Organisation des échanges à taux fixe .....	135
4.3.1.	Principe général .....	135
4.3.2.	Algorithme de calcul .....	137
4.3.3.	Exemple.....	138
4.3.4.	Gestion du surplus par revente .....	139
4.3.5.	Gestion du surplus par itération .....	140
4.4.	Organisation concurrentielle des échanges .....	142
4.4.1.	Vente au plus offrant .....	142
4.4.2.	Achat au moins-disant .....	147
4.4.3.	Définition des prix.....	151
4.5.	Gestion du stockage collectif .....	153
4.5.1.	Principe général .....	154
4.5.2.	Algorithme de calcul .....	154
4.5.3.	Exemple.....	155
4.6.	Synthèse.....	156
Chapitre 5 Prise de décision individuelle et collective dans le contexte de l'ACC .....		159
5.1.	Modélisation de la prise de décision .....	160
5.1.1.	Prise de décision et ACC.....	160
5.1.2.	Simuler une prise de décision dans le cadre de l'ACC .....	161
5.1.3.	Mise en œuvre d'une prise de décision.....	162
5.2.	Politique de décision pour l'autoconsommation individuelle.....	164
5.2.1.	Principe général .....	164
5.2.2.	Exemple de politique de décision pour l'autoconsommation individuelle.	

5.3.	Politique de décision liée au stockage de l'énergie .....	168
5.3.1.	Principe général .....	168
5.3.2.	Exemple de politique de décision liée au stockage individuel .....	171
5.3.3.	Exemple de politique de décision liée au stockage collectif .....	174
5.4.	Politique de décision sur le pilotage des équipements électriques .....	177
5.4.1.	Principe général .....	177
5.4.2.	Exemple de politiques de décision sur le pilotage des équipements.....	179
5.5.	Synthèse.....	182
Chapitre 6 Implémentation et cas d'étude.....		185
6.1.	Implémentation du modèle d'ACC .....	187
6.1.1.	Articulation des pas de temps de simulation et de comptage .....	187
6.1.2.	Classes du modèle de groupement .....	187
6.2.	Etude de l'ACC grâce à la simulation multi-agent.....	193
6.2.1.	ACC et axes d'étude .....	193
6.2.2.	Indicateurs de l'ACC.....	197
6.2.3.	Situation de référence .....	203
6.2.4.	Représentativité des résultats des simulations .....	206
6.3.	ACC dans les groupements : impact sur la consommation d'énergie et le budget d'une population représentative .....	217
6.3.1.	Impact de l'ACI et de l'ACC en fonction de l'organisation des échanges du groupement .....	217
6.3.2.	Impact sur les taux d'autoproduction des foyers du groupement.....	218
6.3.3.	Impact sur les taux d'autoconsommation des foyers du groupement .....	223
6.3.4.	Impact sur les factures d'énergie des foyers du groupement.....	225
6.3.5.	Impact sur les gains financiers des foyers du groupement .....	230
6.3.6.	Synthèse.....	232
6.4.	ACC dans les groupements : impact d'un stockage d'énergie individuel pour une population représentative .....	234
6.4.1.	Impact du stockage individuel à l'échelle du groupement.....	234
6.4.2.	Impact sur les taux d'autoproduction des foyers du groupement.....	235

6.4.3.	Impact sur les taux d’autoconsommation des foyers du groupement .....	238
6.4.4.	Impact sur les factures d’énergie des foyers du groupement.....	239
6.4.5.	Impact sur les gains financiers des foyers du groupement .....	242
6.4.6.	Synthèse.....	244
6.5.	ACC dans les groupements : impact d’un stockage d’énergie centralisé pour une population représentative .....	245
6.5.1.	Impact du stockage collectif à l’échelle du groupement.....	245
6.5.2.	Impact sur les taux d’autoproduction des foyers du groupement.....	246
6.5.3.	Impact sur les taux d’autoconsommation des foyers du groupement .....	248
6.5.4.	Impact sur les factures d’énergie des foyers du groupement.....	248
6.5.5.	Impact sur les gains financiers des foyers du groupement .....	251
6.5.6.	Synthèse.....	253
6.6.	Quartier performant et PV collectif.....	254
6.6.1.	Impact d’un quartier performant et d’un PV collectif à l’échelle du groupement .....	254
6.6.2.	Impact sur les taux d’autoproduction des foyers du groupement.....	255
6.6.3.	Impact sur les factures d’énergie des foyers du groupement.....	258
6.6.4.	Synthèse.....	260
6.7.	ACC et prise de décision.....	261
6.7.1.	Politique de décision sur le pilotage des équipements électriques .....	261
6.7.2.	Résultats des simulations.....	262
6.8.	Inter-groupement .....	265
6.8.1.	Configuration des groupements .....	265
6.8.2.	Résultats des simulations.....	267
6.9.	Synthèse.....	269
Conclusion et perspectives .....		272
7.1.	Conclusion.....	272
7.2.	Etude de l’ACC incluant le secteur tertiaire.....	273
7.3.	Intégration des véhicules électriques .....	276
7.4.	Validation du modèle d’ACC .....	277

7.5. Développement d'un nouveau modèle d'activité humaine .....	278
Références .....	281

## Listes des figures

Figure 1: Représentation d'un système multi-agent (Ferber, 1999) .....	46
Figure 2: Approche QQQQCP associée à la plateforme Brahms (Kashif et al., 2011) .....	47
Figure 3 : Carte de chaleur représentant l'utilisation du lave-vaisselle (abscisse : durée d'utilisation en heures ordonnée : durée en heures entre deux utilisations consécutives, (Ferreri, 2017)).....	49
Figure 4 : Vue de l'interface de la plateforme SMACH .....	51
Figure 5 : Modèle multi-niveau de l'activité humaine au sein de la plateforme SMACH (Huraux, 2015) .....	52
Figure 6 : Diagramme d'activité pour trois occupants d'un foyer implémenté dans SMACH .....	54
Figure 7 : Fonctionnement général de la plateforme SMACH.....	55
Figure 8 : Modèle thermique multi-zone d'un foyer dans l'environnement Modelica.....	56
Figure 9 : Exemple d'indicateurs utilisés pour valider le réalisme de l'activité humaine au sein de SMACH (Reynaud et al., 2017) .....	58
Figure 10 : Interface de la plateforme de simulation participative.....	58
Figure 11 : Comparaison des consommations d'énergie hebdomadaires (gauche : relevés météorologiques moyens, droite : météorologie de l'année 2012) (Reynaud et al., 2020) .....	59
Figure 12 : Évolution du parc photovoltaïque en France (RTE, 2019).....	62
Figure 13 : Part des énergies renouvelables incluant l'hydraulique dans la consommation d'électricité en Europe (Eurostat 2018).....	62
Figure 14 : Utilisation d'une batterie pour décaler l'utilisation de l'énergie produite par des panneaux PV (Braun et al., 2009) .....	65
Figure 15 : Technologies existantes pour stocker de l'électricité (Denholm et al., 2010) .....	66
Figure 16 : Fonctionnement d'un processus d'allocation centralisée de ressources (Nongaillard, 2009) .....	76
Figure 17 : Organisation au sein des systèmes multi-agents (Horling & Lesser, 2005).....	78
Figure 18 : Organisation d'agents sous la forme de fédérations et d'une hiérarchie (Horling & Lesser, 2005) .....	82
Figure 19 : Schéma du modèle multi-agent multi-niveau développé pour l'allocation de la ressource.....	91
Figure 20 : Relation entre la puissance et l'énergie pour la simulation SMACH .....	92
Figure 21 : Articulation entre pas de temps de simulation et pas de temps de comptage .....	93
Figure 22 : Plans de la maison individuelle Mozart (à gauche) et de l'appartement Matisse (à droite) .....	98

Figure 23 : Schéma-bloc du modèle de bâtiment.....	99
Figure 24 : Schéma-bloc du modèle de panneaux PV .....	101
Figure 25 : Schéma-bloc du modèle de batterie.....	110
Figure 26 : Organisation d'un foyer autour de l'énergie .....	112
Figure 27 : Exemple de fonctionnement du module d'autoconsommation d'énergie d'un foyer .....	115
Figure 28 : Modèle d'un foyer autoconsommateur d'énergie .....	116
Figure 29 : Schéma général du modèle d'un foyer autoconsommateur d'énergie .....	117
Figure 30 : Organisation d'un groupement avec ses entités .....	119
Figure 31 : Modèle du groupement.....	123
Figure 32 : Schéma général du modèle de groupement .....	124
Figure 33 : Exemple d'une organisation pour réaliser des échanges d'énergie inter-groupements.....	125
Figure 34 : Exemple d'une organisation sur trois niveaux de simulation pour échanger de l'énergie .....	127
Figure 35 : Schéma-bloc d'une organisation proportionnelle des échanges .....	133
Figure 36 : Exemple de groupement avec une répartition proportionnelle des échanges et équipé de deux moyens de production d'énergie.....	134
Figure 37 : Schéma-bloc d'une organisation des échanges à taux fixe .....	137
Figure 38 : Exemple de groupement avec une organisation des échanges à taux fixe et deux moyens de production mutualisés.....	138
Figure 39 : Schéma-bloc d'une organisation concurrentielle des échanges avec vente au plus offrant.....	143
Figure 40 : Exemple de groupement avec une organisation concurrentielle des échanges d'énergie et vente aux plus offrants.....	145
Figure 41 : Schéma-bloc d'une organisation concurrentielle des échanges avec achat au moins-disant .....	148
Figure 42 : Exemple de groupement avec une organisation concurrentielle des échanges et achat au moins-disant .....	149
Figure 43 : Schéma-bloc d'une organisation proportionnelle du stockage collectif .....	154
Figure 44 : Exemple d'une répartition proportionnelle de l'énergie avec un système de stockage collectif.....	155
Figure 45 : Schéma-bloc d'une politique de décision .....	162
Figure 46 : Schéma-bloc présentant l'articulation entre la politique de décision pour l'autoconsommation individuelle et le module d'autoconsommation d'un foyer .....	164
Figure 47 : Schéma-bloc de la politique de décision pour l'autoconsommation individuelle .....	165

Figure 48 : Exemple de groupement avec un foyer pratiquant une politique de décision pour l'autoconsommation individuelle d'énergie avec un taux fixé par les foyers .....	167
Figure 49 : Schéma-bloc de la politique de décision liée au stockage .....	170
Figure 50 : Exemple de groupement avec un foyer pratiquant une politique de décision liée au stockage individuel en réponse au prix du marché. ....	174
Figure 51 : Exemple de deux groupements pratiquant une politique de décision liée au stockage collectif basée sur le besoin en énergie des foyers.....	176
Figure 52 : Schéma-bloc de la politique de décision sur le pilotage des équipements...	178
Figure 53 : Exemple d'un groupement avec un foyer pratiquant une politique de décision pour le pilotage du ballon d'ECS asservie aux heures creuses. ....	180
Figure 54 : Exemple d'un groupement avec des foyers pratiquant une politique de décision sur le pilotage des équipements en réponse à une offre de prix.....	181
Figure 55 : Diagramme de classe simplifié de l'implémentation du modèle de groupement .....	188
Figure 56 : Présentation de quatre axes d'étude métiers liés à l'ACC .....	195
Figure 57 : Schéma des flux d'énergie pour un foyer pratiquant l'ACC avec un système de stockage individuel .....	199
Figure 58 : Représentation d'une boîte à moustaches.....	202
Figure 59 : Présentation des différents indicateurs .....	203
Figure 60 : Fréquence cumulée de la température extérieure pour la ville de La Rochelle .....	204
Figure 61 : Fréquence cumulée du flux solaire global sur une surface horizontale pour la ville de La Rochelle.....	205
Figure 62 : Rose des vents pour la ville de La Rochelle .....	205
Figure 63 : Valeur hebdomadaire des taux d'autoconsommation et d'autoproduction d'énergie pour la population A.....	208
Figure 64 : Valeur hebdomadaire des taux d'autoconsommation et d'autoproduction d'énergie pour la population B .....	209
Figure 65 : Valeur intégrée et moyenne annuelle des taux d'autoproduction et d'autoconsommation d'énergie pour la population A .....	211
Figure 66 Valeur intégrée et moyenne annuelle des taux d'autoproduction et d'autoconsommation d'énergie pour la population B .....	212
Figure 67 : Valeur des taux d'autoconsommation et d'autoproduction d'énergie pour la population C.....	214
Figure 68 : Distribution des taux d'autoproduction annuels des foyers sans panneaux PV pour les trois organisations d'échange.....	218
Figure 69 : Distribution des taux d'autoproduction hebdomadaires des foyers pour une organisation proportionnelle des échanges .....	219

Figure 70 : Distribution des taux d'autoproduction hebdomadaires des foyers pour une organisation des échanges à taux fixe .....	220
Figure 71 : Distribution des taux d'autoproduction hebdomadaires des foyers pour une organisation concurrentielle des échanges .....	220
Figure 72 : Comparaison entre les taux d'autoproduction hebdomadaires pour les organisations proportionnelle et à taux fixe des échanges.....	221
Figure 73 : Comparaison entre les taux d'autoproduction hebdomadaires pour les organisations proportionnelle et concurrentielle des échanges.....	222
Figure 74 : Comparaison entre les taux d'autoproduction hebdomadaires pour les organisations concurrentielle et à taux fixe des échanges.....	222
Figure 75 : Distribution des taux d'autoconsommation annuels des foyers avec panneaux PV pour les trois organisations des échanges.....	223
Figure 76 Distribution des taux d'autoconsommation hebdomadaires des foyers pour une organisation proportionnelle des échanges .....	224
Figure 77 : Distribution des factures annuelles d'électricité des foyers sans pratique de l'ACC et pour les trois organisations des échanges .....	225
Figure 78 : Prix moyen annuel d'achat de l'énergie pour une organisation concurrentielle et pour les foyers avec et sans production d'énergie .....	226
Figure 79 : Distribution des factures hebdomadaires d'énergie des foyers sans ACC ....	226
Figure 80 : Distribution des factures hebdomadaires d'énergie des foyers pour une organisation proportionnelle des échanges .....	227
Figure 81 : Comparaison entre les factures hebdomadaires d'énergie sans ACC et avec une organisation des échanges à taux fixe .....	228
Figure 82 : Comparaison entre les factures hebdomadaires d'énergie sans ACC et avec une organisation proportionnelle des échanges .....	228
Figure 83 : Comparaison entre les factures hebdomadaires d'énergie sans ACC et avec une organisation concurrentielle des échanges .....	229
Figure 84 : Distribution des gains financiers annuels pour les foyers possédant des panneaux PV avec ACI et pour les trois organisations des échanges.....	230
Figure 85 : Distribution hebdomadaire des gains financiers des foyers du groupement sans ACC .....	231
Figure 86 : Distribution hebdomadaire des gains financiers des foyers du groupement pour une organisation proportionnelle des échanges .....	231
Figure 87 : Comparaison entre les gains financiers hebdomadaires sans ACC et avec une organisation proportionnelle des échanges .....	232
Figure 88 : Origine de l'électricité au niveau du groupement avec et sans batteries individuelles .....	235

Figure 89 : Distribution des taux d'autoproduction annuels des foyers sans panneaux PV pour chaque organisation des échanges et pour un groupement avec batteries individuelles .....	236
Figure 90 : Distribution des taux d'autoproduction annuels des foyers avec panneaux PV pour chaque organisation des échanges et pour un groupement avec batteries individuelles .....	236
Figure 91 : Distribution des taux d'autoproduction hebdomadaires des foyers pour une organisation des échanges proportionnelle avec des systèmes de stockage individuels .....	237
Figure 92 : Fréquence cumulée des taux d'autoproduction pour la semaine 26 et les foyers équipés d'un système de stockage individuel et avec une organisation proportionnelle des échanges .....	238
Figure 93 : Distribution des taux d'autoconsommation annuels des foyers équipés de panneaux PV avec et sans système de stockage individuel pour une organisation proportionnelle des échanges .....	239
Figure 94 : Distribution des factures annuelles d'électricité des foyers équipés et non-équipés de batteries individuelles et pour les trois organisations des échanges .....	240
Figure 95 : Distribution des factures hebdomadaires d'énergie des foyers pour une organisation proportionnelle des échanges et des foyers équipés d'un système de stockage individuel .....	241
Figure 96 : Distribution des gains financiers annuels pour les foyers possédant des panneaux PV avec ACI et pour les trois organisations des échanges avec des foyers équipés d'un système de stockage individuel .....	242
Figure 97 : Distribution des gains financiers hebdomadaires des foyers sans ACC et avec des foyers équipés d'un système de stockage individuel.....	243
Figure 98 : Distribution des gains financiers hebdomadaires des foyers pour une organisation proportionnelle des échanges et avec des foyers équipés d'un système de stockage individuel .....	243
Figure 99: Origine de l'électricité consommée par le groupement avec une batterie collective .....	246
Figure 100 : Distribution des taux d'autoproduction des foyers sans panneaux PV pour les trois organisations des échanges et un groupement avec une batterie collective.....	247
Figure 101 : Distribution des taux hebdomadaires d'autoproduction des foyers pour une organisation proportionnelle des échanges et un groupement avec un système de stockage collectif.....	247
Figure 102 : Distribution des factures d'électricité annuelles des foyers pour un groupement avec une batterie collective pour les trois organisations des échanges ....	249

Figure 103 : Distribution des factures hebdomadaires des foyers sans ACC et pour un groupement avec un système de stockage collectif.....	249
Figure 104 : Distribution des factures hebdomadaires des foyers avec une organisation proportionnelle des échanges et pour un groupement avec un système de stockage collectif.....	250
Figure 105 : Comparaison entre les factures hebdomadaires d'énergie sans ACC et avec une organisation proportionnelle des échanges pour un groupement avec un système de stockage collectif.....	251
Figure 106 : Distribution des gains financiers hebdomadaires des foyers sans ACC .....	252
Figure 107 : Distribution des gains financiers hebdomadaires des foyers pour une organisation proportionnelle des échanges et avec un système de stockage collectif ..	252
Figure 108 : Comparaison entre les gains financiers hebdomadaires sans ACC et avec une organisation proportionnelle des échanges pour un groupement avec un système de stockage collectif.....	253
Figure 109 : Distribution des taux d'autoproduction annuels des foyers pour un quartier performant équipé de panneaux PV collectifs .....	255
Figure 110 : Distribution des taux hebdomadaires d'autoproduction des foyers pour une organisation proportionnelle des échanges et pour un quartier performant équipé de panneaux PV collectifs .....	256
Figure 111 : Distribution des taux hebdomadaires d'autoproduction des foyers pour une organisation des échanges à taux fixe et pour un quartier performant équipé de panneaux PV collectifs.....	257
Figure 112 : Comparaison entre les taux hebdomadaires d'autoproduction pour des organisations proportionnelle et à taux fixe des échanges et pour un quartier performant équipé de panneaux PV collectifs.....	258
Figure 113 : Distribution des factures d'électricité annuelles des foyers pour un quartier performant équipé de panneaux PV collectifs .....	259
Figure 114 : Comparaison entre les factures hebdomadaires d'énergie sans ACC et avec une organisation proportionnelle des échanges à taux fixe pour un quartier performant équipé de panneaux PV collectifs.....	259
Figure 115 : Comparaison entre les factures hebdomadaires d'énergie sans ACC et avec une organisation des échanges à taux fixe pour un quartier performant équipé de panneaux PV collectifs .....	260
Figure 116 : Origine de l'énergie consommée par les cinq groupements.....	267
Figure 117 : Courbe de charge de la consommation électrique du supermarché du 30 juillet minuit au 06 août minuit .....	274
Figure 118 : Distribution des taux d'autoproduction pour une semaine de juillet des foyers dans un groupement sans et avec supermarché.....	275

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Valeur des variables booléennes et mode de fonctionnement des batteries .....	107
Tableau 2 : Valeur des taux d'autoproduction et d'autoconsommation pour l'année, l'hiver et l'été pour la population A .....	209
Tableau 3 : Valeur des taux d'autoproduction et d'autoconsommation pour l'année, l'hiver et l'été pour la population B .....	210
Tableau 4 : Valeur des taux d'autoproduction et d'autoconsommation d'énergie annuels et saisonniers pour la population C .....	215
<i>Tableau 5 : Valeur annuelle des taux d'autoproduction et d'autoconsommation d'énergie du groupement pour l'ACI et les trois organisations d'échange.....</i>	<i>217</i>
Tableau 6 : Différence des moyennes entre les taux d'autoconsommation annuels en fonction des organisations des échanges .....	223
Tableau 7 : Différence des moyennes entre les gains financiers hebdomadaires sans ACC et pour chaque organisation des échanges .....	232
Tableau 8 : Taux d'autoproduction et d'autoconsommation annuels du groupement avec et sans système de stockage individuel d'énergie.....	234
Tableau 9 : Différence des moyennes entre les taux hebdomadaires d'autoproduction en fonction des organisations des échanges et pour un groupement avec du stockage individuel.....	238
Tableau 10 : Différence des moyennes entre les factures hebdomadaires d'énergie sans ACC et pour chaque organisation des échanges avec des foyers équipés d'un système de stockage individuel .....	241
Tableau 11 : Différence des moyennes entre les gains financiers hebdomadaires sans ACC et pour chaque organisation des échanges avec des foyers équipés d'un système de stockage individuel .....	244
Tableau 12 : Taux d'autoproduction et d'autoconsommation annuels du groupement avec un stockage collectif .....	245
Tableau 13 : Différence des moyennes entre les taux hebdomadaires d'autoproduction en fonction des organisations des échanges et pour un groupement avec un système de stockage collectif.....	248
Tableau 14 : Différence des moyennes entre les factures hebdomadaires d'énergie sans ACC et pour chaque organisation des échanges pour un groupement avec un système de stockage collectif.....	251
Tableau 15 : Taux d'autoproduction et d'autoconsommation annuels pour un quartier performant équipé de panneaux PV collectifs .....	255

Tableau 16 : Taux d'autoproduction et d'autoconsommation annuels du groupement avec une politique de décision sur le pilotage des équipements électriques pour une organisation des échanges proportionnelle .....	262
Tableau 17 : Différence des moyennes entre les indicateurs pour un groupement sans politique de décision sur le pilotage des appareils électriques et un groupement avec une politique de décision sur le pilotage des appareils électriques.....	263
Tableau 18 : Valeur moyenne annuelle des indicateurs pour les configurations étudiées avec une organisation proportionnelle des échanges de l'énergie.....	270

## Liste des algorithmes

Algorithme 1 : Algorithme de fonctionnement du module d'autoconsommation .....	114
Algorithme 2 : Algorithme de répartition du surplus d'énergie par itération.....	141
Algorithme 3 : Algorithme de calcul du prix d'achat de l'énergie lors d'une vente au plus offrant .....	153
Algorithme 4 : Algorithme d'une politique de décision pour l'autoconsommation individuelle d'énergie avec un taux fixé par les habitants du foyer.....	166
Algorithme 5 : Algorithme d'une politique de décision liée au stockage individuel asservie aux heures creuses.....	172
Algorithme 6 : Algorithme d'une politique de décision liée au stockage individuel en réponse au prix du marché .....	173
Algorithme 7 : Algorithme pour une politique de décision liée au stockage collectif en fonction des besoins du groupement.....	175
Algorithme 8 : Algorithme pour une politique de décision pour le pilotage du ballon d'ECS en fonction de la production PV individuelle .....	179
Algorithme 9 : Implémentation de la méthode <i>Charged</i> de la classe <i>storage</i> .....	190

## Acronymes

**AC** AutoConsommation d'énergie

**ACC** AutoConsommation Collective d'énergie

**ACI** AutoConsommation Individuelle d'énergie

**BRAHMS** Business Redesign Agent-based Holistic Modeling System

**ECS** Eau Chaude Sanitaire

**EDF** Electricité De France

**GAD** Gestion Active de la Demande

**GD** Gestion de la Demande

**PV** PhotoVoltaïque

**SMA** Système Multi-Agent

**SMACH** Simulation de l'Activité et des Consommations dans l'Habitat



## Nomenclature

$A$	Ensemble des acteurs externes d'un groupement (-)
$a(t)$	Prix de vente de l'énergie non consommée par un groupement durant un pas de temps de simulation $t$ (€)
<i>Azimut</i>	Orientation du panneau PV (°)
$batterie_{foyer}(h)$	Batterie individuelle d'un foyer $h$ (-)
$batterie_{group}$	Batterie collective d'un groupement (-)
$besoin_{foyer}(h, t)$	Besoin d'énergie d'un foyer $h$ pour un pas de simulation $t$ (kWh)
$Besoin_{foyerComptage}(c)$	Besoin en énergie d'un foyer durant un pas de temps de comptage $c$ (kWh)
$Besoin_{group}(g, c)$	Besoin en énergie d'un groupement $g$ durant un pas de temps de comptage $c$ (kWh)
$bilan(h \text{ ou } a, c)$	Bilan financier pour un foyer $h$ ou un acteur externe $a$ durant un pas de temps de comptage $c$ (€)
$canCharged$	Paramètre indiquant si une batterie est en mode de charge souple (0 ou 1)
$canDischarged$	Paramètre indiquant si une batterie est en mode de décharge souple (0 ou 1)
$canForcedCharged$	Paramètre indiquant si une batterie est en mode de charge forcée (0 ou 1)
$canForcedDischarged$	Paramètre indiquant si une batterie est en mode de décharge forcée (0 ou 1)
$capacity$	Capacité énergétique d'une batterie (kWh)
$dépense(h \text{ ou } a, c)$	Déficit pour un acteur externe $a$ ou un foyer $h$ durant un pas de temps de comptage $c$ (€)
$duréePasComptage$	Durée du pas de temps de comptage (mn)
$E_{chargedGroup}(c)$	Energie stockée par un système de stockage collectif d'un groupement durant un pas de temps de comptage $c$ (kWh)
$e_{consumedFoyer}(h, t)$	Energie consommée par un foyer $h$ durant un pas de temps de simulation $t$ (kWh)
$E_{consumedGroup}(c)$	Energie consommée par un groupement durant un pas de temps de comptage $c$ (kWh)

$E_{dischargedGroup}(c)$	Energie déstockée par un système de stockage collectif d'un groupement durant un pas de temps de comptage $c$ (kWh)
$e_{echangesExtGroup}(g, c)$	Energie provenant d'autres groupements et reçue par un groupement $g$ durant un pas de temps de comptage $c$ (kWh)
$e_{echangesExtFoyer}(h, c)$	Energie provenant d'autres groupements et reçue par un foyer $h$ durant un pas de temps de comptage $c$ (kWh)
$e_{localFoyer}(h, c)$	Energie provenant d'un groupement et reçue par un foyer $h$ durant un pas de temps de comptage $c$ (kWh)
$e_{networkFoyer}(h, c)$	Energie provenant du réseau et consommée par un foyer $h$ durant un pas de temps de comptage $c$ (kWh)
$e_{produced}(j, t)$	Energie produite par un panneau PV $j$ durant un pas de temps de simulation $t$ (kWh)
$e_{producedFoyer}(h, t)$	Energie produite par un panneau PV individuel d'un foyer $h$ durant un pas de temps de simulation $t$ (kWh)
$e_{producedGroup}(sp, t)$	Energie produite par un moyen de production collectif $sp$ d'un groupement durant un pas de simulation $t$ (kWh)
$E_{producedGroup}(c)$	Energie produite par un groupement durant un pas de temps de comptage $c$ (kWh)
$e_{productionIndividuelle}(h, t)$	Energie autoconsommée par un foyer $h$ durant un pas de temps de simulation $t$ (kWh)
$e_{realStorage}(t)$	Energie stockée ou déstockée par une batterie durant un pas de temps de simulation $t$ (kWh)
$e_{storage}(t)$	Energie potentiellement stockable ou déstockable par une batterie durant un pas de temps de simulation $t$ (kWh)
$e_{storageFoyer}(h, t)$	Energie chargée ou déchargée par une batterie individuelle d'un foyer $h$ durant un pas de simulation $t$ (kWh)
$e_{storageConsumptionGroup}(h, c)$	Energie provenant d'un système de stockage collectif et consommée par un foyer $h$ durant un pas de temps de comptage $c$ (kWh)
$e_{storageGroup}(t)$	Energie chargée ou déchargée par une batterie collective d'un groupement durant un pas de temps de simulation $t$ (kWh)
$H$	Ensemble des foyers d'un groupement (-)

<i>inclinaison</i>	Inclinaison du panneau PV (°)
<i>MAC(h)</i>	Module d'autoconsommation d'un foyer h (-)
<i>maxEnergy</i>	Energie maximale d'une batterie (kWh)
<i>maxEnergyCharged(c)</i>	Energie maximale qu'une batterie peut stocker durant un pas de temps de comptage <i>c</i> (kWh)
<i>maxEnergyDischarged(c)</i>	Energie maximale qu'une batterie peut déstocker durant un pas de temps de comptage <i>c</i> (kWh)
<i>maxPower</i>	Puissance maximale d'une batterie (kW)
<i>météo</i>	Fichier météorologique
<i>PLE</i>	Place Locale d'Echange d'un groupement (-)
<i>pol</i>	Règles pour les échanges d'énergie au sein d'un groupement
<i>PROD</i>	Ensemble des moyens de production collectifs d'un groupement (-)
<i>prop(i, j)</i>	Taux de propriété d'un moyen de production d'un acteur externe ou d'un foyer (%)
<i>r(t, h)</i>	Prix d'achat de l'énergie du réseau durant un pas de temps de simulation <i>t</i> et d'un foyer <i>h</i> (€)
<i>recette(h ou a, c)</i>	Recette pour un acteur externe <i>a</i> ou un foyer <i>h</i> durant un pas de temps de comptage <i>c</i> (€)
<i>SoC(t)</i>	Pourcentage de charge d'une batterie pour un pas de simulation <i>t</i> (%)
<i>SoC<sub>min</sub></i>	Pourcentage de charge minimal d'une batterie (%)
<i>SoC<sub>max</sub></i>	Pourcentage de charge maximal d'une batterie (%)
<i>solarPanel<sub>foyer</sub>(h)</i>	Panneau PV individuel d'un foyer h (-)
<i>surface</i>	Surface du panneau PV (m <sup>2</sup> )
<i>surplus<sub>foyer</sub>(h, t)</i>	Surplus d'énergie d'un foyer <i>h</i> pour un pas de simulation <i>t</i> (kWh)
<i>Surplus<sub>group</sub>(g, c)</i>	Besoin en énergie d'un groupement <i>g</i> durant un pas de temps de comptage <i>c</i>
<i>taux<sub>productionIndividuelle</sub>(h, c)</i>	Energie produite localement et consommée par un foyer <i>h</i> durant un pas de temps de comptage <i>c</i> (kWh)



# Introduction

## Contexte et motivation

Aujourd'hui et depuis de nombreuses années, la consommation d'énergie électrique dans le monde ne cesse de croître. En 1990, la consommation d'électricité mondiale était de 11 térawatts-heures (TWh). En 2017, plus de 23 TWh étaient consommés autour du globe<sup>1</sup> soit le double. Afin de produire cette énergie, l'utilisation d'énergies fossiles a été la méthode privilégiée par de nombreux acteurs. Or, ces ressources sont caractérisées par leur disponibilité limitée, mais également par un impact négatif sur l'environnement. En effet, l'utilisation de telles ressources pour produire de l'énergie est responsable d'un fort dégagement de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et donc d'une aggravation de l'effet de serre et du réchauffement climatique. En 2014, en France, les experts du GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat) publiaient un rapport annonçant une augmentation de 3,7°C à 4,8°C de la température du globe à horizon 2100 (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat et al., 2014). C'est dans ce contexte qu'une prise de conscience à la fois des institutions et de la population s'est développée pour modifier la manière dont l'énergie est consommée. Ainsi, en janvier 2020, les objectifs énergétiques fixés par l'Union européenne<sup>2</sup> visent à réduire fortement cette dépendance aux énergies fossiles en demandant à l'ensemble des pays membres de réduire de 55% leurs émissions de Gaz à Effet de Serre par rapport à 1990, et ceci à l'horizon 2030. Pour atteindre ces objectifs, on assiste à un développement des énergies renouvelables (EnR). Par exemple, en France, les installations de production d'énergie hydraulique, éolienne et solaire assuraient en 2019 21,5% de la production d'électricité contre 70,6% pour le nucléaire, 1,8% pour les centrales à biomasse et 7,9% pour les énergies thermiques fossiles. En 2017, les énergies renouvelables ne représentaient que 16,3% de la consommation totale d'électricité.

Au sein du secteur résidentiel, le recours aux énergies renouvelables se traduit par la mise en place de l'autoconsommation d'énergie. L'autoconsommation d'énergie peut être définie comme la consommation d'une énergie directement par son producteur. Cependant, les études sur l'autoconsommation d'énergie au sein du secteur résidentiel ont montré qu'une part importante de l'énergie produite ne pouvait être consommée par le producteur lui-même et était revendue à un fournisseur d'électricité (Luthander et al., 2015). Les récents travaux de recherche liés à cette problématique incitent à la mise en

---

<sup>1</sup>

<https://www.iea.org/data-and-statistics/?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=Electricity%20consumption>

<sup>2</sup> [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2020-0005\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2020-0005_EN.pdf)

place d'une nouvelle solution pour optimiser l'autoconsommation d'énergie : **les échanges d'énergie** entre foyers. Cette nouvelle méthode de consommation d'énergie qui consiste à produire une énergie verte locale et à l'échanger avec des voisins se nomme l'autoconsommation collective d'énergie (ACC).

Nos travaux portent sur la mise en place d'une simulation informatique de l'ACC au sein du secteur résidentiel. Le développement d'un tel outil est un enjeu majeur, car il va permettre aux acteurs de l'énergie, comme Électricité de France (EDF), d'établir puis d'étudier de nombreuses hypothèses autour de l'ACC. Cependant, simuler l'ACC est problématique. En effet, l'ACC va dépendre de nombreux paramètres qu'il convient de modéliser. Tout d'abord, pour réaliser la mise en place des échanges d'énergie, il est nécessaire d'anticiper la consommation d'électricité des foyers. Or, comme montré par (Huraux, 2015), cela passe par la compréhension et l'anticipation de ce système complexe qu'est l'activité humaine au sein de l'habitat, mais aussi par la prise en compte du comportement thermique du bâtiment. L'ACC est également caractérisée par une grande diversité dans les équipements techniques, comme les moyens de production ou encore les systèmes de stockage qu'il faut prendre en considération. Enfin, comme le montre la littérature (Kim et al., 2013; Vinyals et al., 2018; Wu et al., 2015), il existe de nombreux moyens pour échanger de l'énergie entre producteurs et consommateurs. L'outil développé doit donc permettre de modéliser et de créer de nouvelles modalités d'échanges d'énergie. Il doit aussi être capable de rendre compte de cette diversité dans les configurations possibles au sein desquelles se pratiquera l'ACC. Dans cette situation, nous proposons d'utiliser la simulation multi-agent afin de modéliser l'ACC.

L'enjeu de nos travaux est de modéliser un système multi-agent (SMA) pour étudier l'ACC avec pour objectifs :

- Simuler l'activité humaine et le comportement thermique des bâtiments afin d'anticiper la consommation d'énergie des foyers participant à l'ACC ;
- Modéliser une communauté au sein de laquelle se pratiquera l'ACC tout en permettant une grande diversité dans les configurations étudiées en termes de population, bâtiment, équipements de production et équipements de stockage ;
- Modéliser une architecture permettant de mettre en place de nombreuses modalités d'échanges d'énergie entre producteurs et consommateurs.

Dans nos travaux, nous ne nous intéressons pas à des problématiques de formation de communautés ou de recherche de l'optimisation de la consommation électrique au travers de l'ACC. De plus, dans cette thèse nous ne posons pas la question de la consommation à l'échelle d'un territoire, mais au sein d'une communauté ou entre plusieurs communautés. Ainsi l'articulation et l'équilibre entre production/

consommation d'énergie locale et production/consommation d'énergie au niveau national ne sont pas abordés.

Dans ce travail, nous proposons un modèle multi-niveau permettant de simuler l'ACC et la grande multitude de configurations techniques que l'on peut imaginer. Ce modèle s'appuie sur la notion de **groupement** de plusieurs foyers qui pratiquent l'ACC en échangeant de l'énergie provenant de différents moyens de production ou de stockage. L'activité humaine, le comportement thermique des bâtiments et la consommation électrique qui en découle sont simulés par la plateforme SMACH. Il s'agit d'une plateforme de co-simulation entre un système multi-agent de l'activité humaine et un modèle de thermique du bâtiment.

Dans ce travail nous nous appuyerons sur le processus de validation mis en place pour la plateforme SMACH qui a permis de valider le réalisme de l'activité humaine et la consommation électrique simulée (Huraux et al., 2015; Reynaud et al., 2017). Nous présentons les résultats de ces validations à la fin du chapitre 1. Cependant, la partie spécifique concernant l'ACC n'a pas pu être validée formellement en confrontant la simulation de l'ACC à des données réelles. En effet, l'ACC est une notion récente et peu de démonstrateurs réels existent. Ce travail de validation sera réalisé ultérieurement dès que des données réelles d'ACC seront disponibles.

Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'une collaboration entre le Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE) de La Rochelle Université (LRU), le Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur (LIMSI), EDF R&D - Département Innovation Commerciale, Analyse des Marchés et de leur Environnement (ICAME) et EDF R&D – Département Technologies et Recherches pour l'Efficacité Énergétique (TREE). Elle a été financée dans le cadre du CPER-FEDER 2015-2020 de La Rochelle Université.

## Organisation du document

Ce manuscrit de thèse est divisé en 6 chapitres :

Les chapitres 1 et 2 concernent l'état de l'art. Le chapitre 1 présente le lien existant entre activité humaine et consommation électrique au sein du secteur résidentiel. Ce chapitre met dans un premier temps en avant l'impact que peut avoir l'activité humaine sur la consommation électrique du secteur. Il fournit également une revue de la littérature des différentes voies de simulation de l'activité humaine dans le cadre de la consommation d'électricité avant de présenter plus en détail la plateforme de simulation SMACH que nous utilisons. Ce chapitre a deux objectifs à savoir souligner la nécessité de modéliser une activité humaine réaliste lorsque l'on souhaite simuler la consommation électrique

du secteur résidentiel et présenter en détail la plateforme de simulation de l'activité humaine que nous utilisons dans nos travaux.

Le chapitre 2 quant à lui présente les nouvelles manières de consommer de l'énergie que sont l'autoconsommation individuelle (ACI) et l'autoconsommation collective (ACC) ainsi que les différentes approches qui fournissent des outils pour modéliser l'autoconsommation qu'elle soit ACI ou ACC. Nous faisons un état de l'art sur l'autoconsommation d'énergie et les technologies qui y sont associées. Nous présentons également l'autoconsommation collective d'énergie et la manière dont les systèmes multi-agents peuvent permettre de modéliser et de simuler ce nouveau mode de consommation d'énergie. L'objectif de ce chapitre est de présenter les nouvelles alternatives pour consommer de l'énergie qui se développe aujourd'hui ainsi que les technologies qui nous permettent de les simuler et de les étudier.

Le chapitre 3 présente le modèle de **groupement** qui permet de simuler l'ACC au sein du secteur résidentiel. Nous décrivons et formalisons les différents éléments de notre modèle qui permettent d'évaluer une production locale d'énergie ainsi que la consommation, le stockage et les échanges de cette énergie produite localement.

Le chapitre 4 aborde la notion d'organisation des échanges d'énergie que nous avons mises en place et les réflexions qui nous ont amenées à implémenter ces dernières. Cette notion d'organisation des échanges d'énergie permet de modéliser des ensembles de règles qui vont régir les échanges d'énergie au sein du groupement.

Le chapitre 5 décrit la notion de politique de décision développée au sein du modèle de groupement. Cette notion permet de simuler l'impact d'une décision humaine ou d'un système automatisé sur différents composants du modèle de groupement.

Le chapitre 6 présente, dans un premier temps, l'implémentation des principaux composants du modèle proposé. Puis, nous mettons en avant la capacité de ce modèle à simuler de nombreuses configurations d'ACC et à répondre à des questions importantes pour EDF en lien avec l'ACC. Nous modélisons et simulons un certain nombre de ces questions à travers différents cas d'étude.

Enfin, nous présentons le bilan ainsi que les perspectives envisagées pour nos travaux.

# Chapitre 1 État de l'art : consommation électrique et activité humaine

1.1.	Activité humaine et consommation électrique .....	37
1.1.1.	L'activité humaine, un système complexe.....	38
1.1.2.	Impact de l'activité humaine sur la consommation électrique .....	39
1.1.3.	Variabilité de la consommation électrique au sein du secteur résidentiel .	39
1.1.4.	Synthèse.....	41
1.2.	Simulation de l'activité humaine .....	42
1.2.1.	Modèles déterministes .....	42
1.2.2.	Modèles stochastiques .....	43
1.2.3.	Modèles multi-agents .....	45
	Définition .....	45
	La plateforme BRAHMS.....	47
	Reproduction de processus psychologiques.....	48
	MASS .....	49
1.2.4.	Synthèse.....	50
1.3.	La plateforme SMACH.....	51
1.3.1.	Génération de populations .....	52
1.3.2.	Le modèle d'agent .....	53
1.3.3.	Modèle thermique et co-simulation.....	55
1.3.4.	Validation du modèle.....	57
1.4.	Synthèse.....	59

## 1.1. Activité humaine et consommation électrique

L'impact de l'activité humaine sur la consommation électrique au sein des bâtiments a très souvent été sous-évalué par les différentes études visant à prédire la consommation d'énergie (Norford et al., 1994). En effet, l'ensemble des activités que l'humain entreprend que ce soit individuellement, collectivement ou envers son environnement a pendant longtemps été considéré comme un facteur n'impactant que faiblement la

consommation électrique. Aujourd'hui, même si l'activité humaine reste un système complexe à étudier et à modéliser, il devient nécessaire de le prendre en compte pour obtenir une prévision la plus réaliste (i.e. sa proximité avec ce qui peut être observé sur le terrain) possible de la consommation d'énergie: « *Les bâtiments ne consomment pas d'énergie : les gens oui* » (Janda, 2011).

### 1.1.1. L'activité humaine, un système complexe

(Huraux, 2015) a défini l'activité humaine comme un système complexe c'est-à-dire « un ensemble constitué de nombreuses entités dont les interactions produisent un comportement global difficilement prévisible »<sup>3</sup>. Plusieurs éléments caractérisent le système complexe qu'est l'activité humaine. Tout d'abord sa variabilité. En effet, l'activité humaine va être différente d'un individu à l'autre et va dépendre des caractéristiques de l'individu, de son environnement, de sa manière d'interagir avec, mais aussi des individus qu'il côtoie (Huraux, 2015). C'est ce que l'on appelle la variabilité inter-individuelle. Cependant, l'activité va également changer pour une même personne en fonction de nombreux éléments comme son histoire, ses émotions ou l'évolution de son environnement. Cela va amener à une variabilité intra-individuelle, mais aussi à des individus réactifs et adaptatifs, c'est-à-dire des individus modifiant leur activité en fonction de l'évolution de leur environnement (événement, changement de tarif de l'électricité...).

Cependant, l'activité humaine au sein de l'habitat est aussi caractérisée par l'apparition de phénomènes répétitifs. (Salembier et al., 2009) parle alors de routines, une ressource qui permet d'organiser les activités d'un individu ou d'un collectif d'individus au prix d'un faible coût cognitif.

Outre la variabilité et les routines, l'activité humaine est également caractérisée par une dimension collective (Haradji et al., 2018). Les individus vont être au cours de leurs activités amenés à coopérer pour vivre ensemble. Cette coopération passe par l'échange d'information et la communication entre les individus. Par exemple, dans le cadre de l'activité humaine dans l'habitat, certaines tâches sont caractérisées par une forte tendance à être réalisées ensemble comme par exemple les repas.

L'activité humaine est donc un système complexe dans son fonctionnement, caractérisée par une forte variabilité, la présence d'habitudes, mais aussi une dimension collective. C'est l'articulation de tous ces éléments qui rend l'activité humaine difficilement prévisible.

---

<sup>3</sup> <https://www.cnrs.fr/occitanie-ouest/IMG/pdf/journalkiosquedessystemescomplexes.pdf>

### 1.1.2. Impact de l'activité humaine sur la consommation électrique

Certains modèles visant à simuler la consommation électrique dans les bâtiments présentent un écart important entre consommations mesurées et simulées (Clevenger & Haymaker, 2006; Soebarto & Williamson, 2001) .(Norford et al., 1994) ont cherché à identifier les causes expliquant un tel écart. Leurs travaux centrés sur des bureaux ont permis de montrer que l'activité professionnelle des occupants, mais aussi leurs choix vis-à-vis de l'utilisation de l'éclairage artificiel et des équipements dont ils disposent ont un impact important sur la consommation d'énergie du bâtiment. (de Menezes et al., 2012) ont identifié cet écart entre consommations prédite et mesurée. C'est ce qu'ils ont appelé le « *performance gap* ». Ils ont comparé des prédictions avec des consommations mesurées pendant 7 ans pour un ensemble de foyers et ont mis en avant un écart entre les deux. Les consommations d'énergie mesurées furent parfois deux fois plus importantes que les prédictions. Les auteurs sont arrivés à la conclusion que la prise en compte du comportement des habitants est un élément clé dans la modélisation de la consommation électrique si des résultats réalistes sont attendus.

(Socolow, 1978) a démontré que pour des foyers identiques en termes de bâtiments et d'appareils électriques, il pouvait y avoir des consommations d'énergie très différentes. Les mesures réalisées sur différents bâtiments ont permis de mettre en avant que certains foyers comparables présentaient une consommation de gaz pour le chauffage deux fois plus importante que leurs voisins. Une étude similaire a été réalisée par (Bahaj & James, 2007), mais en s'intéressant à la consommation d'électricité. Les auteurs ont montré une différence importante de consommation d'énergie. Ainsi, certains foyers consomment jusqu'à quatre fois plus d'électricité que des foyers très similaires.

L'activité humaine a donc un impact sur la consommation électrique au sein du foyer. L'anticipation de la consommation électrique ne peut donc pas se faire en prenant uniquement en compte le bâtiment et les caractéristiques thermiques de ce dernier. Cependant, afin de pouvoir intégrer l'activité humaine dans l'étude de la consommation, il faut avant tout identifier et comprendre les mécanismes de ce système complexe qui impactent la consommation d'énergie.

### 1.1.3. Variabilité de la consommation électrique au sein du secteur résidentiel

La consommation électrique au sein du secteur résidentiel est caractérisée par une grande irrégularité de ses niveaux. La quantité d'énergie consommée pourra être très différente au cours du temps pour un même foyer. Au contraire, la consommation des secteurs industriel et tertiaire est quant à elle caractérisée par une régularité dans leur

consommation d'énergie (Huraux, 2015). (Grandjean, 2013) a mis en avant deux facteurs visant à expliquer cette diversité dans les courbes de charge du secteur résidentiel.

Tout d'abord, on observe une influence quotidienne dans la consommation, directement liée à l'activité humaine au sein des foyers. Les raisons qui expliquent cette variabilité au quotidien sont diverses. Pour (Bakaloglou & Charlier, 2019), le prix de l'électricité, mais aussi les caractéristiques du foyer et de ses habitants (préférences individuelles, caractéristiques socio-économiques...) sont les principales causes de cette variabilité. Cependant, d'autres influences plus extérieures sont à prendre en compte. L'impact des normes sociales à savoir les ensembles des règles de conduite qu'il convient de suivre dans un groupe social peuvent être un facteur important dans l'apparition de variations dans les consommations d'énergie (Ouyang & Hokao, 2009; Van Raaij & Verhallen, 1983). On peut par exemple citer la prise de conscience des habitants d'un foyer de l'impact de leur consommation d'énergie sur l'environnement qui peut amener ces derniers à diminuer leur consommation. Cependant, un même foyer n'aura pas non plus une consommation électrique identique d'un jour à l'autre. (Feldman & Pentland, 2003) ont montré que même si les comportements humains avaient tendance à mettre en place des habitudes et des routines, ces dernières ne sont pas figées dans le temps et sont amenées à évoluer.

Le second facteur qui va expliquer l'irrégularité de la consommation du secteur résidentiel est l'influence saisonnière. Ce dernier va provenir des différents besoins en termes de chauffage, de climatisation ou encore d'eau chaude sanitaire (ECS) d'un foyer. Elles vont donc être fortement liées aux conditions météorologiques auxquelles le foyer va être soumis. Par exemple, en Europe, la consommation d'électricité liée à l'utilisation du chauffage électrique représente 57% de la consommation du secteur résidentiel en hiver (Zimmermann et al., 2012). La France est le premier marché Européen en termes de chauffage électrique avec 31% du parc de logement équipé de ce type de chauffage (De Larochelambert, 2020). Il y a entre trois et quatre fois plus de convecteurs électriques installés dans les foyers français par rapport aux autres pays européens. Cependant, la consommation du chauffage électrique pour un foyer dépend également des caractéristiques techniques du bâtiment considéré. En effet, la technologie utilisée pour isoler un bâtiment est l'élément le plus important pour le maintien d'une température de consigne au sein d'un foyer (Gölcü et al., 2006). En France, un système de réglementations thermiques existe. Il s'agit d'un ensemble de règles visant à définir précisément les nombreux paramètres thermiques d'un bâtiment neuf ou rénové comme son isolation, la performance des menuiseries, les systèmes... Ces normes ont pour objectif principal de réduire les déperditions d'énergie et ainsi diminuer la consommation électrique pour le chauffage ou la climatisation.

Dans ses travaux, (Huraux, 2015) a mis en avant trois méthodologies différentes afin d'étudier l'activité humaine en rapport avec la consommation d'énergie électrique :

- **Les études ergonomiques** permettent d'analyser finement le comportement humain en conditions réelles. Cependant, ces dernières sont souvent ponctuelles dans le temps. (Haradji et al., 2012b) ont mis en avant que la mise en place de telles études même répétées dans le temps amène à des zones d'ombre entre les moments où les analyses sont effectuées. Ce sont ces zones d'ombre qui rendent difficile d'étudier précisément l'impact de l'activité humaine, par exemple sur la consommation électrique ;
- **Les études statistiques** avec lesquelles il est possible d'obtenir des données à grande échelle et sur des périodes qui peuvent être longues. Cependant, le coût de mise en place de telles études est important que ce soit sur le plan temporel ou financier ;
- **La simulation** dont l'objectif est de modéliser numériquement des caractéristiques et des conséquences de l'activité humaine dans des situations variées, par exemple dans le contexte de la consommation électrique (Ferreri et al., 2017; Kashif et al., 2013). Cette approche permet de fournir de nouveaux outils afin de permettre l'étude de l'activité humaine en lien avec la consommation électrique. (Haradji et al., 2012a, 2018) ont mis en avant que « *les plateformes de simulation deviennent aujourd'hui l'équivalent de laboratoires virtuels* » où l'on peut faire varier de nombreux paramètres de l'activité humaine dans un environnement reproduisant le secteur résidentiel.

#### 1.1.4. Synthèse

Comme nous venons de le voir dans cette section, l'activité humaine est un système complexe qui va avoir un impact sur la consommation électrique du secteur résidentiel. Modéliser ou étudier l'activité humaine est un point primordial pour comprendre et anticiper la consommation électrique du secteur résidentiel. Cela permet, par exemple, aux acteurs du domaine de l'énergie de mettre en place des mesures comme différents tarifs de l'énergie, pour limiter les pics de consommation caractéristiques du secteur résidentiel.

Dans le cadre de nos travaux, nous avons décidé d'utiliser la simulation de l'activité humaine, c'est-à-dire l'ensemble des actions entreprises par l'humain qui peuvent avoir un impact sur la consommation électrique afin d'étudier son impact sur la consommation d'énergie. La simulation est un outil intéressant, car comme le mettent en avant (Haradji et al., 2012b), elle permet l'étude de nombreuses situations en faisant varier des paramètres et autorise ainsi de produire et de tester des hypothèses.

La simulation de l'activité humaine s'est fortement développée depuis plusieurs années, et plusieurs approches ont déjà été proposées. Cependant, comme nous venons de le voir, l'activité humaine est un système complexe qui impacte fortement la consommation électrique. La mise en place de modèles de l'activité humaine réalistes, c'est-à-dire tenant compte de ses caractéristiques (ses variabilités, sa dimension collective et ses routines), est donc un enjeu majeur pour obtenir une simulation de la consommation électrique représentative de ce que l'on peut retrouver au sein du secteur résidentiel. Dans les paragraphes suivants, nous abordons les différentes méthodes existantes permettant de simuler l'activité humaine. Nous présenterons ensuite la plateforme SMACH que nous utilisons dans nos travaux.

## 1.2. Simulation de l'activité humaine

En 2012, (Azar & Menassa, 2012) ont simulé la consommation électrique de bâtiments commerciaux tout en intégrant l'activité humaine. Les auteurs ont ainsi pu montrer l'importance de la prise en compte de cette activité grâce à une analyse de sensibilité. Cette dernière vise à comprendre la manière dont la variabilité des sorties d'un modèle (mathématique ou autre) peut être reliée au domaine de variation des entrées du modèle (Saltelli, 2002). L'utilisation de la simulation de l'activité humaine a ainsi permis de confirmer que l'existence du *performance gap* entre les consommations électriques mesurées et simulées était due à une incompréhension ou à une sous-estimation du rôle que jouent les occupants d'un bâtiment sur sa consommation électrique.

Afin d'éviter l'apparition de ce *performance gap* dans les simulations, la modélisation de l'activité humaine devient nécessaire lorsque l'on souhaite simuler la consommation électrique. Des modèles existent aujourd'hui pour simuler l'activité humaine en relation avec la consommation énergétique au sein du secteur résidentiel. Le plus souvent, ces modèles de l'activité humaine sont couplés à des modèles énergétiques des bâtiments visant à prendre également en compte les besoins énergétiques de ces derniers comme le chauffage, la climatisation, l'ECS, l'éclairage artificiel, la ventilation... (Fang et al., 2014; Kim & Moon, 2009; Yuan et al., 2017).

### 1.2.1. Modèles déterministes

(Happle et al., 2018) ont présenté les modèles déterministes comme des modèles incluant un ensemble d'emplois du temps fixes et des ensembles de règles déterministes visant à représenter l'activité humaine des occupants au sein des bâtiments. Par exemple, (Abushakra et al., 2004) ont détaillé différentes méthodes et algorithmes visant à obtenir des emplois du temps fixes pour des périodes de 24 heures sur des jours ouvrables ou de week-end. Ils peuvent être utilisés pour représenter la présence d'occupants dans

certaines pièces du bâtiment ou encore les périodes d'utilisation d'appareils électriques. Cependant, ces emplois du temps ne représentent pas une activité humaine réaliste. L'activité humaine est figée au cours du temps, définie pour un type d'individu. On perd alors les notions de variabilité intra et inter-individuelle pourtant importante pour modéliser une activité humaine réaliste.

Afin de modéliser une activité humaine plus proche de ce qui peut être observé dans la réalité, la mise en place de règles déterministes est une solution fréquemment utilisée. Plus précisément, il s'agira d'une action de la part d'un occupant en réponse à un stimulus extérieur. (Newsham, 1994) a utilisé ce type de règles afin de contrôler l'action des occupants du foyer sur les fenêtres et l'éclairage d'un bâtiment. Par exemple, dans le cas où, entre 8h00 et 13h00, la lumière naturelle est inférieure à 150 lux, l'éclairage artificiel est utilisé.

Cependant, bien qu'ils soient fréquemment implémentés dans des modélisations énergétiques du bâtiment (Happle et al., 2017), les modèles déterministes ont montré des limites évidentes dans la simulation de l'activité humaine. La plateforme CarbonBuzz<sup>4</sup> est une plateforme collaborative permettant de recenser les études sur la consommation électrique présentant de fortes différences entre les consommations mesurées et simulées (Darakdjian, 2017). Avec cette plateforme, certaines études présentaient une consommation réelle jusqu'à 3,5 fois supérieures à la consommation prédite. (Gaetani et al., 2016) ont mis en avant une autre limitation des modèles déterministes. En effet, du fait de leur nature, de tels modèles ne sont capables de produire que des données moyennes effaçant complètement la diversité du comportement humain. Les résultats obtenus sont alors toujours prévisibles et répétables. Ce type de modèles ne permet donc pas de modéliser une activité humaine réaliste puisque la diversité des comportements et les variabilités des activités humaines qui en découlent n'y sont pas représentées.

### 1.2.2. Modèles stochastiques

(Gaetani et al., 2016; Happle et al., 2018) ont présenté les modèles stochastiques pour simuler le comportement humain comme l'évolution naturelle des modèles déterministes. Il s'agit de distributions statistiques dont l'objectif est de prédire l'apparition de certaines situations ou encore la réalisation de certaines actions par les occupants du foyer. Pour ce type de modèle, chaque action qui pourra être effectuée ou chaque phénomène qui pourra avoir lieu sera soumis à une probabilité conditionnelle ou non. Grâce à cela, une plus grande variété dans le comportement humain peut être décrite.

---

<sup>4</sup> CarbonBuzz, <http://www.carbonbuzz.org/>, consulté le 22/04/2020

Les modèles stochastiques sont principalement basés sur l'utilisation de chaînes de Markov du premier ordre (Darakdjian, 2017). Une chaîne de Markov est un processus stochastique décrivant un ensemble d'évènements possibles dans lequel la probabilité qu'un évènement se réalise dépend uniquement de l'évènement courant. (Wilke et al., 2013) ont utilisé dans leurs travaux les chaînes de Markov du premier ordre pour simuler l'activité humaine, c'est-à-dire les différentes actions que réalisent les occupants d'un foyer au cours du temps. Pour arriver à construire ces chaînes de Markov, les auteurs ont utilisé des données issues de l'Enquête emploi du temps (Time Use Surveys – TUS). Cette enquête fournit plusieurs dizaines de milliers de carnets dans lesquels les participants ont noté toutes les 10 minutes leurs activités courantes durant une journée ouvrable et de week-end. Les données issues de cette enquête ont par la suite été traitées afin de permettre la construction des chaînes de Markov qui serviront ensuite à simuler l'activité des différents occupants au cours d'une journée. L'utilisation des enquêtes emploi du temps est également une approche proposée par (Grandjean, 2013) afin de construire son modèle stochastique pour simuler l'activité humaine. Dans ses travaux, l'auteur a relié les différentes actions issues des TUS à un ou plusieurs appareils électriques présents au sein du foyer. Il a ensuite proposé un algorithme stochastique basé sur l'utilisation de probabilités, qui en fonction des résultats des TUS génère un scénario d'usage des équipements domestiques présents dans le foyer. Ainsi, en reliant ce scénario à des modèles permettant de calculer la consommation électrique des équipements, il est possible d'obtenir la courbe de charge des foyers simulés.

Par son côté probabiliste, les modèles stochastiques sont capables d'introduire de la variabilité intra et inter-individuelle dans l'activité humaine simulée. Cela permet d'avoir un modèle d'activité plus proche de ce que l'on peut observer dans la réalité que ne peuvent proposer les modèles déterministes. Il est à noter, pour ce type de modèles, la nécessité d'avoir un grand nombre de données représentatives du phénomène que l'on souhaite étudier. Dans le cadre de l'activité, les TUS fournissent les données nécessaires pour mettre en place des modèles stochastiques simulant une activité humaine proche de ce qui peut être observé dans la réalité.

La faiblesse des modèles stochastiques repose sur leur nature probabiliste. En effet, l'utilisation de probabilités va avoir tendance à moyenniser les résultats obtenus lorsqu'un nombre important de simulations est réalisé. Or, comme nous l'avons déjà vu plus tôt, la variabilité est une part importante de l'activité humaine. Les modèles stochastiques ne sont donc pas adaptés lorsque des simulations à grandes échelles de la consommation électrique, par exemple avec un millier de foyers, doivent être réalisées. De plus, ce type de modèles ne permet pas d'intégrer l'environnement dans lequel les individus vont évoluer lors de la génération des statistiques liées au modèle d'activité humaine. Par

conséquent, les modèles stochastiques ne peuvent pas simuler les réactions des individus à leur adaptation face à un changement survenant au sein de leur environnement. De même, (Reynaud et al., 2017) ont mis en avant que les comportements collaboratifs ne peuvent être simulés de manière satisfaisante à l'aide de la modélisation stochastique de l'activité humaine. Ces différentes limites ont pour conséquence de diminuer le réalisme de l'activité humaine qui peut être atteint avec les modèles stochastiques.

### 1.2.3. Modèles multi-agents

Une des principales caractéristiques des systèmes multi-agents (SMA) est qu'ils sont composés d'entités autonomes interagissant entre elles au sein d'un environnement. Grâce à ces caractéristiques, (Reynaud et al., 2017) ont mis en exergue la possibilité des SMA pour simuler des individus réactifs et adaptatifs à leur environnement, mais aussi collaboratifs dans la réalisation des activités individuelles, et donc d'augmenter le réalisme de l'activité humaine simulée par rapport aux modèles déterministes et stochastiques.

#### *Définition*

Les SMA sont employés dans de nombreuses disciplines pour modéliser des systèmes dynamiques. Concrètement, un SMA peut être défini comme un ensemble de processus indépendants à savoir les agents qui cohabitent et partagent des ressources communes en communiquant les uns avec les autres.

D'après (Ferber, 1999), on peut précisément définir les agents d'un tel système comme une entité physique ou virtuelle :

- a) Capable d'agir dans un environnement ;
- b) Qui peut communiquer avec d'autres agents ;
- c) Qui est mû par un ensemble de tendances ;
- d) Qui possède des ressources ;
- e) Qui peut percevoir son environnement ;
- f) Qui dispose d'une représentation partielle de cet environnement ;
- g) Qui possède des compétences ou des services ;
- h) Qui peut se reproduire si cela est nécessaire ;
- i) Qui possède un comportement visant à reproduire des objectifs.

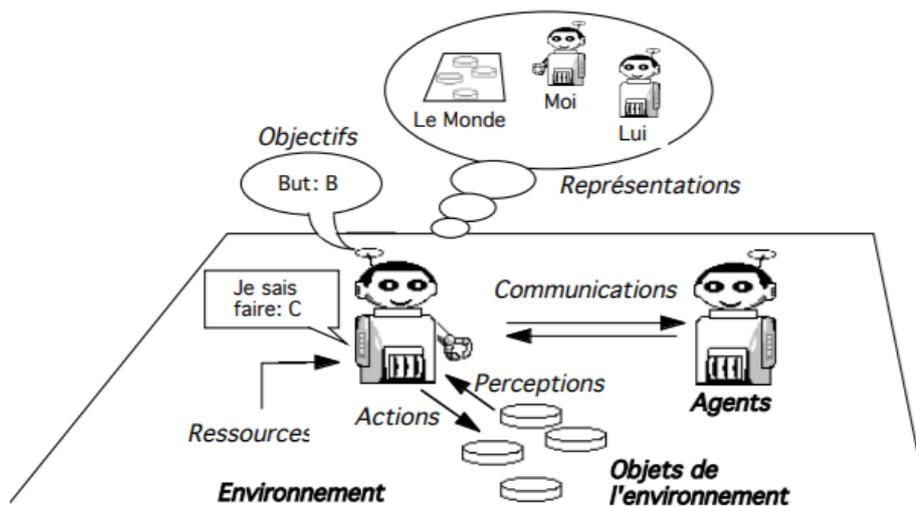


Figure 1: Représentation d'un système multi-agent  
(Ferber, 1999)

Une entité virtuelle possédant l'ensemble de ces caractéristiques peut être donc qualifiée d'agent. La Figure 1 représente de façon imagée un SMA composé de différents éléments :

- Un ensemble d'agents autonomes définis par des attributs ;
- Un environnement dans lequel les agents évoluent et avec lequel ils sont capables d'interagir ;
- Un ensemble d'objets situés dans l'environnement ;
- Un ensemble de règles permettant la communication et la coopération entre les agents.

Les SMA constituent donc un outil de choix pour modéliser et étudier le comportement humain (Tsvetovat & Carley, 2004). Lorsque des données réelles sont disponibles, il devient alors possible de les comparer aux résultats fournis par la simulation. Cela permet de mettre en place un processus de validation du modèle.

Aujourd'hui, de nombreuses simulations utilisent les SMA pour reproduire l'activité humaine dans l'habitat afin de simuler la consommation électrique (Amouroux et al., 2013; Ferreri et al., 2015; Kashif et al., 2011). (Kashif et al., 2011) ont utilisé une architecture multi-agent spécialisée nommée plateforme BRHAMS afin de modéliser l'activité humaine. (Ferreri et al., 2015) quant à eux ont tenté de reproduire des processus psychologiques et cognitifs liés à l'activité humaine. Un point commun à la majorité de ces travaux est la co-simulation avec des modèles énergétiques des bâtiments afin de fournir une bonne estimation des besoins en chaud et en froid. Dans les sous-sections suivantes sont décrits certains de ces modèles permettant de simuler l'activité humaine et la consommation électrique associée.

### La plateforme BRAHMS

La plateforme BRAHMS (Business Redesign Agent-based Holistic Modeling System) est un environnement de simulation multi-agent permettant de simuler le comportement humain avec la possibilité de modéliser les comportements sociaux pour reproduire une dynamique de groupe (Sierhuis et al., 2007). La plateforme Brahms est basée sur une architecture dite Belief, Desire, Intention (BDI). Les croyances des agents vont permettre de représenter la compréhension de l'environnement de leur point de vue tandis que les intentions vont représenter les différentes règles sur lesquelles ils vont raisonner. Les désirs quant à eux représentent l'objectif qu'un agent cherche à atteindre.

Dans leurs travaux, (Kashif et al., 2011) ont utilisé un SMA pour représenter un foyer ainsi que l'ensemble de ses occupants. Il est mis en avant le lien entre la structure de la plateforme Brahms et l'approche Qui, Quoi, Où, Quand, Comment et Pourquoi (QQOQCP) qui permet de représenter le comportement d'un humain (Figure 2).

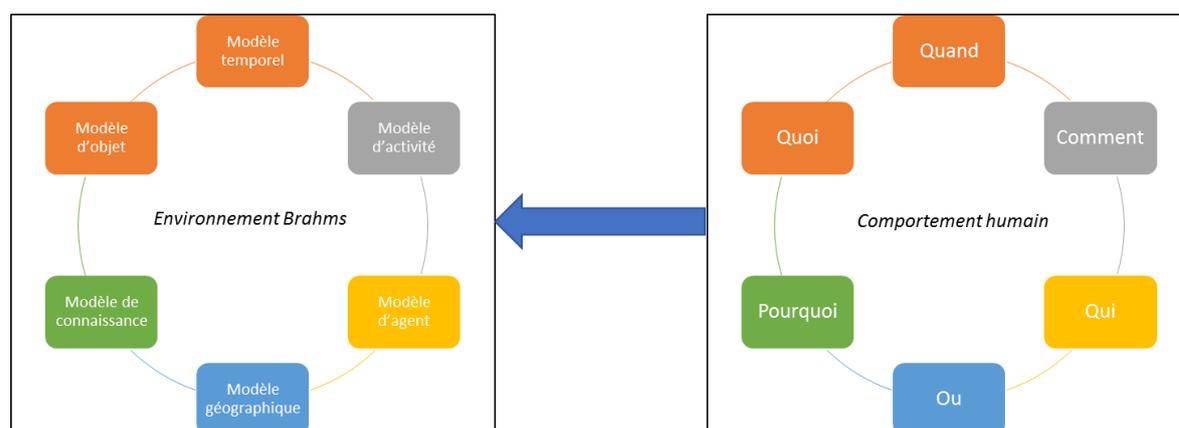


Figure 2: Approche QQOQCP associée à la plateforme Brahms (Kashif et al., 2011)

Avec cette approche, les auteurs ont mis en place un modèle de représentation dynamique de l'activité humaine. Les différents agents auront une perception de l'environnement qui est alors converti en croyance. Celle-ci déclenche des processus cognitifs pour construire un ou plusieurs désirs qui correspondent à des buts que cherchent à atteindre l'agent. En prenant en compte les contraintes sociales et de l'environnement, les désirs des agents les amènent à avoir des intentions. À partir de ces intentions, les agents seront capables de réaliser des actions à l'intérieur du foyer. Dans le contexte de la consommation résidentielle d'énergie, ce modèle permet d'obtenir des courbes de charge en reliant les actions effectuées par les habitants du foyer à l'utilisation d'un ou plusieurs appareils électriques qui consommeront de l'énergie. Dans leurs travaux, les auteurs ont réalisé une validation ciblée de leur modèle à partir de données réelles issues de la base de données IRISE qui contient des données de consommations

d'appareils électriques au sein de foyers. Leur validation a été centrée sur l'utilisation du réfrigérateur et la consommation électrique de ce dernier.

De plus, la simulation multi-agent est couplée au modèle thermique du bâtiment SIMBAD développé dans l'environnement Matlab. La co-simulation est réalisée grâce au langage JAVA. L'objectif de cette co-simulation est de prendre en compte les aspects physiques et thermiques liés au bâtiment.

Cependant (Tijani et al., 2014), qui ont repris les travaux de (Kashif et al., 2011), mettent en avant que la modélisation fine de l'activité humaine que permet la plateforme BRAHMS et qui prend en compte de très nombreux paramètres rend son utilisation par les experts énergéticiens difficile pour simuler la consommation énergétique des bâtiments ou celle de la qualité de l'air intérieur.

#### *Reproduction de processus psychologiques*

D'autres travaux de recherche visent à modéliser des processus de psychologie cognitive inhérents à l'être humain afin de simuler l'activité humaine avec des SMA. (Ferreri et al., 2015), par exemple, ont travaillé à modéliser la théorie en psychologie de (Fiske & Neuberg, 1989). Cette théorie segmente l'activité humaine entre les habitudes et les actions planifiées.

Le modèle proposé par (Ferreri, 2017) s'appuie sur l'utilisation d'une base de données réelles décrivant les usages d'appareils électriques d'un ménage à savoir la télévision, la chaîne hi-fi, le four, le lave-linge, le lave-vaisselle et la friteuse. À partir de ces bases de données, les auteurs ont pu créer des cartes de chaleur (Figure 3) indiquant si la réalisation d'une action utilisant un appareil relève d'une habitude ou d'une action planifiée.

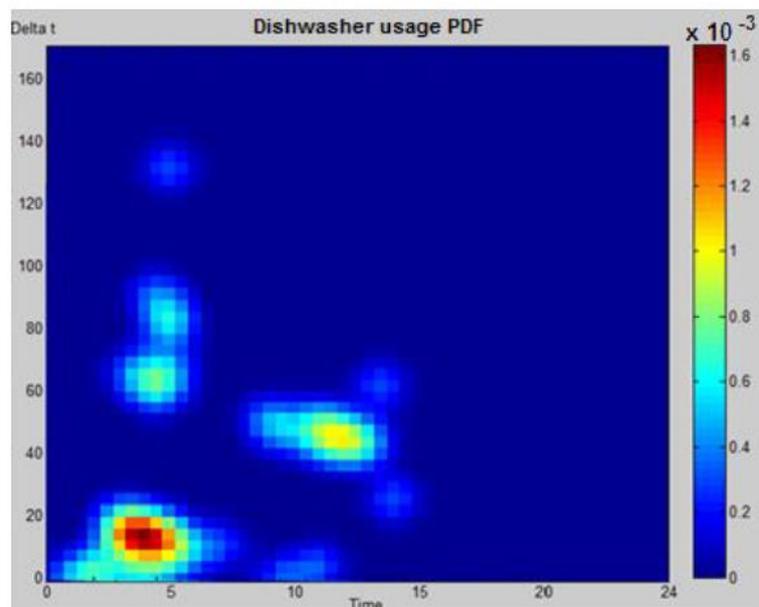


Figure 3 : Carte de chaleur représentant l'utilisation du lave-vaisselle  
 (abscisse : durée d'utilisation en heures  
 ordonnée : durée en heures entre deux utilisations consécutives, (Ferreri, 2017))

Sur la carte de chaleur de la Figure 3, les zones en rouge indiquent les périodes régulières d'utilisation du lave-vaisselle et donc des habitudes. D'après l'auteur, les zones tièdes en jaune représentent des réalisations possédant une certaine régularité, mais qui ne sont pas des habitudes et qui peuvent dépendre de différents facteurs pour être réalisées. Grâce à ces cartes de couleur et à la modélisation des théories de la psychologie cognitive de (Fiske & Neuberg, 1989), l'auteur a proposé un modèle de l'activité humaine basé sur deux niveaux. Un premier niveau qui incite les agents à débiter une action en fonction de leurs habitudes et un second niveau caractérisé par un processus de « planification » qui va programmer les activités à réaliser en fonction des liens entre elles.

Cependant, l'auteur a mis lui-même en avant deux limites à ses travaux. Premièrement, la base de données utilisée pour la génération des cartes de couleur est insuffisante en termes de représentativité de la variabilité des profils de consommation d'énergie. L'auteur a également critiqué la simplicité du modèle de psychologie cognitive utilisé pour représenter le comportement humain. De plus, on peut rajouter le fait que certains appareils électriques, pourtant consommateurs d'énergie, ne sont pas pris en compte. On peut citer par exemple les systèmes de chauffage ou la production d'ECS.

### MASS

La plateforme MASS (Multi-Agent Stochastic Simulation) est une plateforme dont l'objectif est d'utiliser à la fois la simulation multi-agent et les modèles stochastiques afin d'arriver à une modélisation fine de l'activité humaine (Chapman et al., 2018; Darakdjian, 2017).

Au début du développement de cette plateforme, l'activité humaine était modélisée à partir d'un unique modèle stochastique (Jacob, 2015). Ce modèle découpe l'activité humaine en un ensemble de 10 tâches réalisables par les occupants. En plus d'une modélisation de l'activité humaine, quatre modèles supplémentaires sont implémentés dans la plateforme c'est-à-dire un modèle gérant l'éclairage artificiel, un modèle gérant les fenêtres, un modèle gérant les volets et un modèle calculant la chaleur dégagée par les occupants dans une pièce. À l'origine, l'architecture agent proposée par la plateforme avait pour objectif de permettre l'articulation de l'ensemble de ses modèles au cours d'une simulation.

Récemment, (Chapman et al., 2018) ont étudié l'impact de l'ajout d'un modèle BDI au sein du modèle agent. L'ajout de ce modèle BDI va permettre d'impacter directement le modèle d'activité stochastique régissant l'activité humaine dans la simulation. En effet, les règles implémentées pourront modifier les différentes probabilités qu'un événement intervienne dans le modèle stochastique. Ainsi, pour deux occupants identiques la probabilité qu'ils réalisent une même action pourra être différente, ce qui n'est pas le cas dans une approche purement stochastique. L'architecture SMA va également permettre aux occupants simulés de pouvoir échanger des informations entre eux ou encore d'avoir une connaissance de l'environnement dans lequel ils évoluent.

Le modèle utilise une co-simulation avec le logiciel EnergyPlus grâce au standard FMI (Functional Mockup Interface). Tout comme l'approche basée sur la plateforme BRAHMS, cette co-simulation a pour but de simuler les aspects physiques et thermiques au sein du bâtiment.

Cependant, les auteurs de la plateforme mettent eux-mêmes en avant un manque de variabilité dans les résultats (Chapman et al., 2018). L'exclusion de l'impact des systèmes HVAC, de l'utilisation de l'ECS et des appareils électriques semble être l'un des principaux facteurs à ce manque de variabilité. L'absence de modélisation explicite d'une diversité dans les comportements humains est également en cause.

#### 1.2.4. Synthèse

La littérature sur la modélisation de l'activité humaine nous a permis d'identifier trois grandes familles. La première regroupe les modèles déterministes, qui n'offrent cependant pas une représentation réaliste de l'activité humaine. Les modèles stochastiques permettent d'arriver à un meilleur réalisme de l'activité humaine même si les modèles proposés ne permettent pas de reproduire certaines dynamiques de l'activité humaine comme les comportements collectifs. Enfin, les modèles multi-agents permettent de mettre en place une modélisation réaliste de l'activité humaine aussi bien

à l'échelle macroscopique, c'est-à-dire d'une population, qu'à l'échelle microscopique i.e. au niveau d'un individu. De plus, les SMA permettent la simulation d'individus adaptatifs et réactifs au changement de leur environnement tout en permettant la modélisation d'activités collectives.

Dans nos travaux, nous avons décidé d'utiliser la simulation multi-agent de l'activité humaine, car il s'agit de la méthode permettant d'obtenir une activité humaine simulée la plus réaliste possible. Dans la section suivante, nous décrivons la plateforme SMACH, qui est la plateforme de simulation de l'activité humaine au sein de foyers résidentiels que nous avons utilisée dans nos travaux.

### 1.3. La plateforme SMACH

Nos travaux s'inscrivent dans la continuité du développement de la plateforme SMACH qui permet de simuler l'activité humaine et la consommation électrique de foyers qui en résulte (Figure 4).

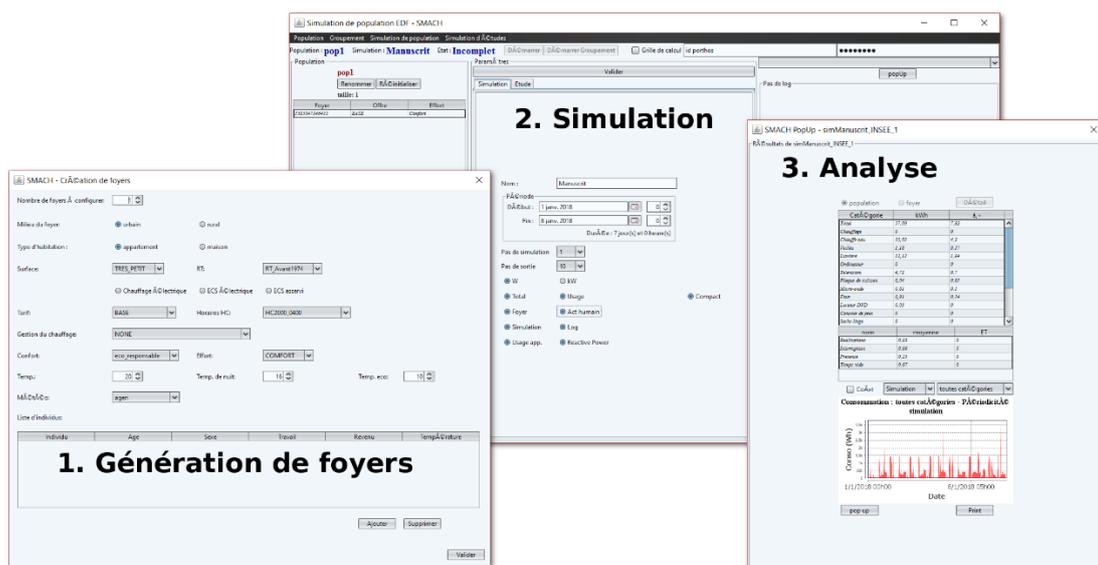


Figure 4 : Vue de l'interface de la plateforme SMACH

La plateforme SMACH permet de modéliser la complexité du comportement humain (confort thermique de chaque individu, vie collective au sein du foyer, prise en compte du prix de l'énergie...). À tous ces aspects du comportement humain est associée une modélisation de l'activité humaine. (Huraux et al., 2015) a présenté le modèle général de l'activité humaine utilisé dans la plateforme SMACH qui se décompose en trois niveaux (Figure 5) :

- L'activité individuelle de chacun des habitants du foyer qui va réaliser ses tâches de manière autonome. Cette activité individuelle va être influencée par différents

éléments propres à chaque individu (confort thermique, réaction au prix de l'énergie...). C'est de cette activité individuelle que vont émerger les habitudes caractéristiques de l'activité humaine ;

- L'activité collective qui va se construire à partir des interactions entre les individus et qui réaliseront des tâches avec tout ou une partie des habitants du foyer ;
- Un couplage entre l'environnement et les individus, qui tout en réalisant leurs activités (individuelles et collectives) seront amenés à interagir avec un ou plusieurs appareils électriques à l'intérieur de pièces qui composeront le logement. Ce logement sera lui-même dans un environnement caractérisé par les conditions météorologiques et l'offre tarifaire proposée par le fournisseur d'énergie.

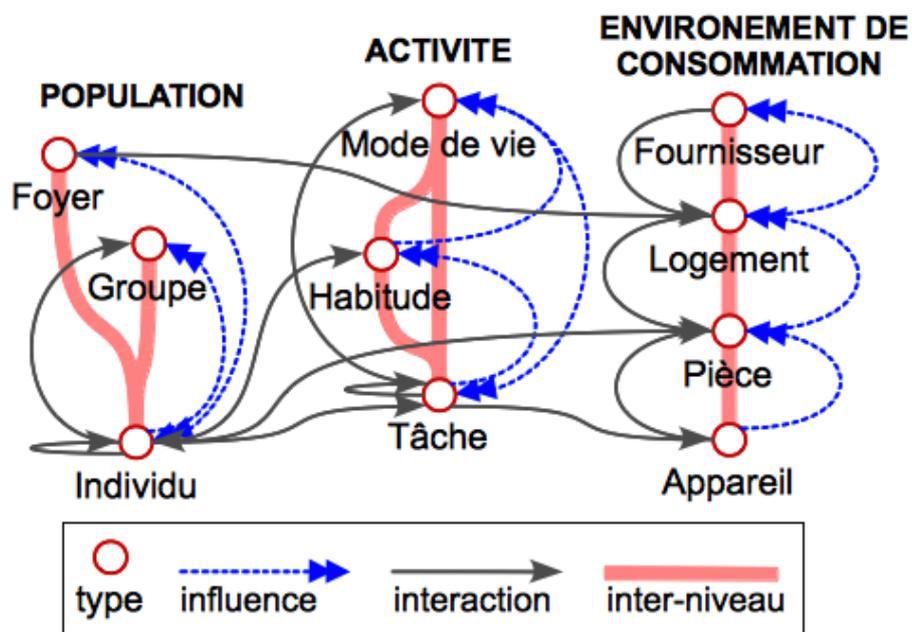


Figure 5 : Modèle multi-niveau de l'activité humaine au sein de la plateforme SMACH (Huraux, 2015)

C'est l'association de ce modèle d'activité humaine multi-niveau à des modèles d'appareils électriques, à la modélisation du bâtiment et au prix de l'énergie qui permet la construction d'une courbe de charge de la consommation électrique du foyer simulé.

### 1.3.1. Génération de populations

Le premier objectif du simulateur SMACH est de générer des populations virtuelles représentatives des caractéristiques de la population étudiée. Pour cela, les auteurs ont utilisé différentes études provenant de l'INSEE afin de définir les caractéristiques de la population qu'ils ont souhaité étudier : la répartition des ménages (famille, couples sans enfant...), l'âge, le sexe, la catégorie socio professionnelle, le contrat d'électricité, le type

de production d'ECS (électrique ou non), le type de chauffage (électrique ou non), la surface du logement et sa performance thermique réglementaire. SMACH va également, à partir des données dont il dispose, générer les équipements présents au sein des différents foyers de la population.

La plateforme SMACH peut produire pour chacun des individus de sa population, un emploi du temps prévisionnel de la semaine. Pour cela, SMACH utilise les données issues des TUS réalisées en France entre 2009 et 2010 (Reynaud et al., 2017). Cela représente un total d'environ 27 000 carnets qui ont été remplis au cours de toute l'enquête. Les résultats de ses carnets ont ensuite été traités pour réaliser une base de données où les profils des individus basés sur différents critères (âge, sexe, catégorie socio-économique...) sont liés aux activités décrites dans les carnets.

Ainsi, SMACH est capable de construire, en fonction du profil de chaque habitant du foyer, un emploi du temps prévisionnel. Dans cet emploi du temps, les tâches sont caractérisées par :

- Une **durée minimale** et une **durée maximale** ;
- Un **rythme** qui permet de représenter un nombre de répétitions quotidiennes ou hebdomadaires d'une tâche ;
- Un ensemble de **périodes préférentielles** qui permet d'indiquer les moments de la journée à favoriser pour l'exécution d'une tâche ;
- Un **niveau de collectivité** qui indique si une tâche est réalisable seule ou en groupe.

Les trois premières caractéristiques sont directement issues des résultats des enquêtes emploi du temps. Le niveau de collectivité quant à lui a été défini par les développeurs de la plateforme pour chacune des tâches réalisables. Par exemple, la tâche « *dîner* » a un niveau de collectivité qui indique que cette dernière peut être réalisée à plusieurs.

L'ensemble de ces éléments, à savoir le bâtiment, les habitants et leur emploi du temps prévisionnel forment une description statique de la vie quotidienne d'un foyer. De plus, les individus vont être caractérisés par différentes préférences en matière de confort thermique, de comportement vis-à-vis du prix de l'électricité... qui impacteront leur processus de décision sur l'activité à réaliser à un instant donné dans la simulation. Ainsi, l'emploi du temps prévisionnel seul ne suffit pas pour connaître à l'avance les activités de chacun des individus simulés, ces dernières émergeront lors de la simulation multi-agent.

### 1.3.2. Le modèle d'agent

L'objectif de la simulation multi-agent dans SMACH est de transformer la description statique du foyer en une simulation dynamique de l'activité humaine. Le résultat de cette

simulation sera un diagramme d'activités représentant à chaque instant de la simulation ce que fait un habitant du foyer (Figure 6). Ce diagramme d'activité est construit pour un pas de temps égal à 1 mn, c'est-à-dire que pour chaque minute de simulation l'activité humaine est simulée. Ce pas de temps a été identifié par les concepteurs de la plateforme comme un pas de temps suffisant pour simuler une activité humaine réaliste. Un pas de temps supérieur à 1 mn pouvait amener à un manque de précision dans la simulation de l'activité humaine tandis qu'un pas de temps inférieur à 1 mn n'améliore pas de façon significative le réalisme de l'activité en plus d'amener à des durées de simulation élevées.

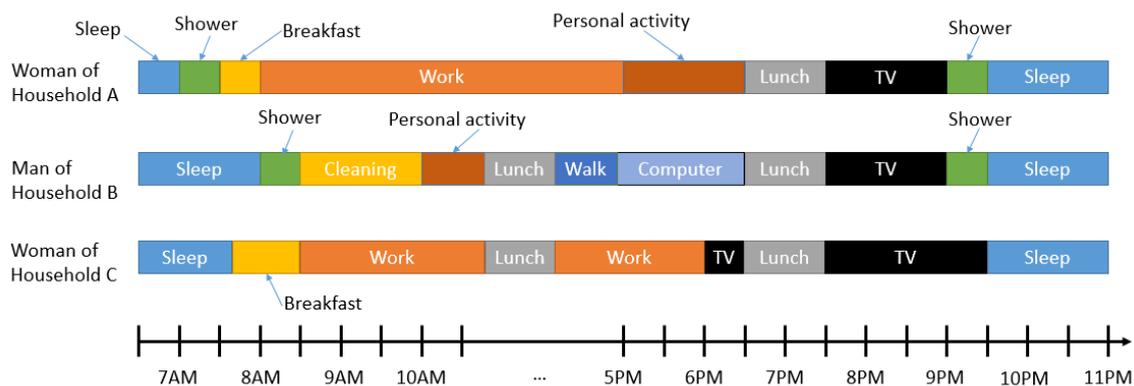


Figure 6 : Diagramme d'activité pour trois occupants d'un foyer implémenté dans SMACH

Au sein de la plateforme SMACH, les agents sont modélisés avec des actions possibles à savoir leur emploi du temps prévisionnel, des connaissances sur leur environnement (comme le prix de l'énergie, l'activité courante des autres agents...) et des préférences telles que la température de confort, l'attitude vis-à-vis du prix de l'énergie... Pour construire un diagramme d'activité, les agents sélectionnent une tâche à réaliser dans leur emploi du temps prévisionnel à chaque pas de temps de la simulation. Cette sélection de la tâche est basée sur un niveau dynamique de priorité. Chaque tâche disposera de son propre niveau qui évoluera au cours de la simulation en fonction de différents paramètres. Par exemple, les caractéristiques d'une tâche comme sa durée, ses périodes préférentielles et son rythme influenceront ce niveau. Cependant, d'autres facteurs comme le prix de l'énergie, la disponibilité d'un appareil électrique ou encore les actions entreprises par les autres occupants du foyer sont pris en compte. Une tâche ainsi sélectionnée et effectuée par un agent devient alors une activité qui apparaîtra dans le diagramme.

L'utilisation d'un niveau de priorité peut amener à des va-et-vient entre différentes activités lorsque ces dernières ont un niveau de priorité proche. SMACH dispose d'un mécanisme pour éviter ces changements. Ainsi, lorsqu'une activité démarre, elle ne peut être interrompue tant qu'elle n'a pas été effectuée sur une durée minimale.

Chaque activité entreprise par un occupant du foyer peut être reliée à l'utilisation d'un ou plusieurs appareils électriques, entraînant ainsi une consommation d'énergie comptabilisée par SMACH à chaque pas de temps. La construction de la courbe de charge de la consommation électrique du foyer est donc réalisée à partir du diagramme d'activité.

### 1.3.3. Modèle thermique et co-simulation

SMACH permet également de co-simuler un modèle de thermique du bâtiment avec la simulation multi-agent de l'activité humaine. La

Figure 7 présente le fonctionnement général de la plateforme SMACH et l'interaction entre la simulation multi-agent et le modèle de thermique du bâtiment.

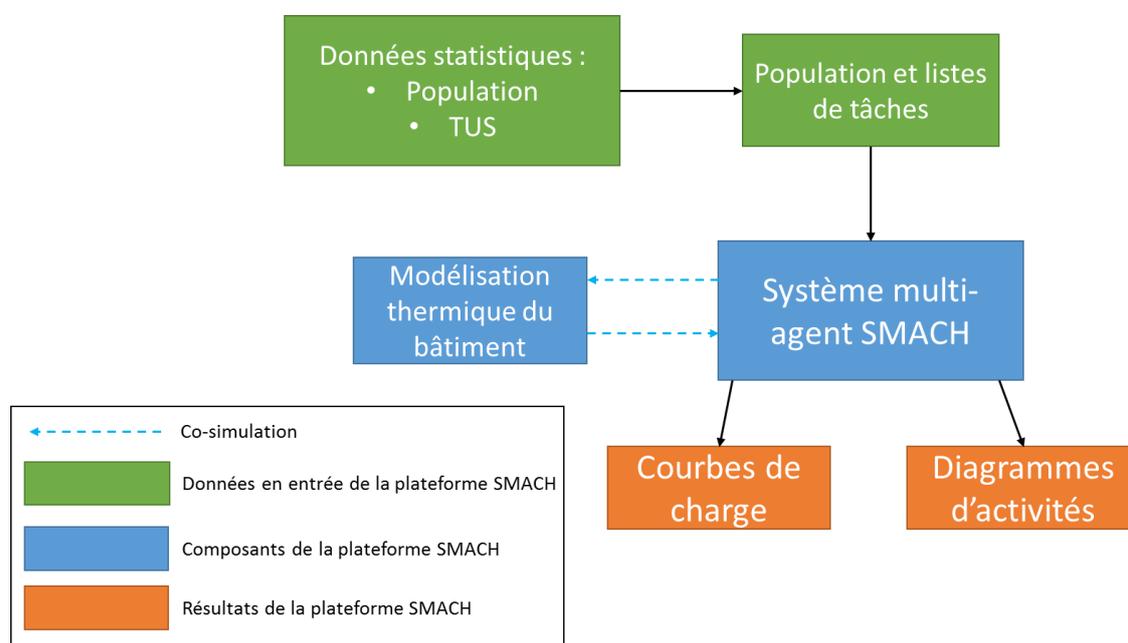


Figure 7 : Fonctionnement général de la plateforme SMACH

La sortie principale de ce modèle est la température intérieure de chaque zone du foyer en fonction de différents paramètres tels que la température extérieure, l'isolation du bâtiment, les personnes présentes dans une pièce ou la puissance de chauffage. Concernant le chauffage électrique, c'est également la co-simulation qui va calculer sa consommation en fonction de son fonctionnement. La prise en compte de ces nombreux paramètres permet d'obtenir une courbe de charge.

Les bâtiments sont modélisés grâce au langage Modelica et plus précisément la bibliothèque BuildSysPro développée par EDF<sup>5</sup> (Plessis et al., 2014). Cette bibliothèque permet de simuler des modèles thermiques multizones du bâtiment c'est-à-dire que chaque pièce est représentée dans la modélisation (Figure 8). La co-simulation entre le

<sup>5</sup> <https://github.com/EDF-TREE/BuildSysPro> consulté le 29/05/2020

SMA et le modèle de thermique du bâtiment est réalisée grâce au standard FMI (Plessis et al., 2014). Dans ce modèle, le bâtiment est décrit avec de nombreux paramètres comme l'agencement des différentes pièces entre elles, l'isolation thermique ou encore les modèles de chauffage électrique de chaque pièce.

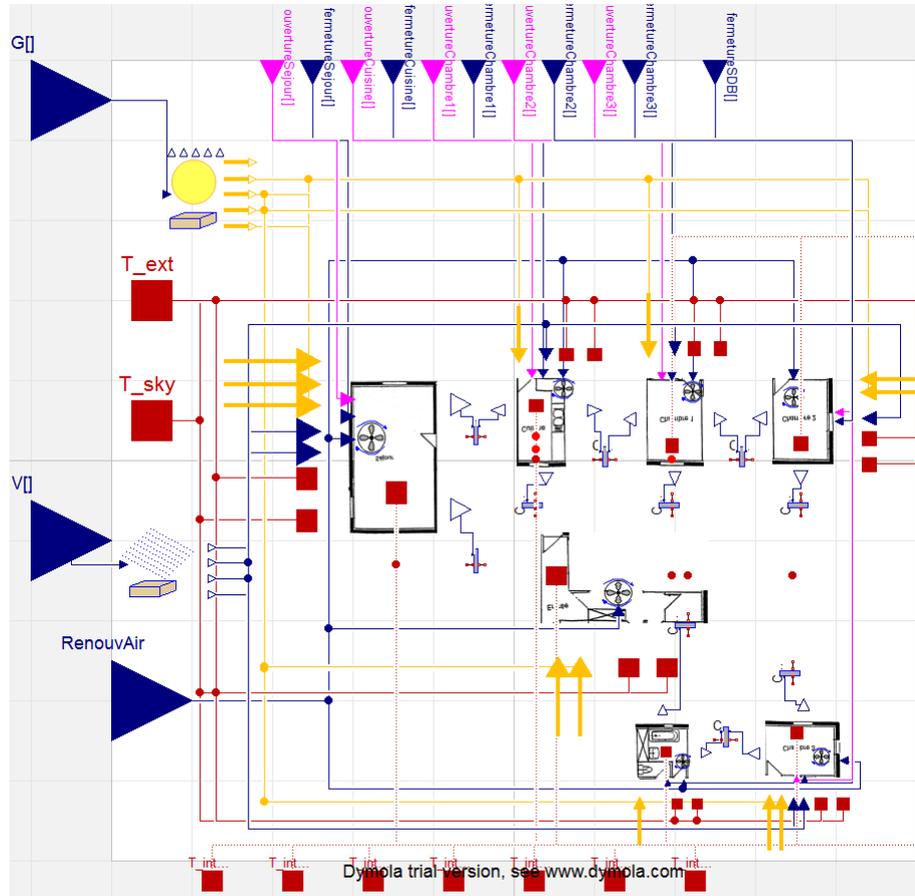


Figure 8 : Modèle thermique multi-zone d'un foyer dans l'environnement Modelica

Le modèle thermique de bâtiment utilisé par la plateforme SMACH ainsi que la bibliothèque BuildSysPro ont été vérifiés et validés par intercomparaison avec l'IEA BESTEST ainsi que des données de mesure en laboratoire (Plessis, Kaemmerlen, et al., 2014).

L'IEA BESTEST (International Energy Agency Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method) est une méthode d'intercomparaison des outils de simulation énergétique des bâtiments, dans laquelle les résultats du modèle étudié sont comparés à des résultats fournis par un ensemble d'outils de simulation similaires, sur des cas de références. Cette procédure a été utilisée pour vérifier la validité du modèle d'enveloppe de la bibliothèque BuildSysPro. Les résultats obtenus ont permis de valider l'approche de la librairie BuildSysPro ainsi que son implémentation en Modelica.

Les résultats fournis par le modèle ont également été comparés à des résultats mesurés sur le terrain. Les résultats mesurés ont été obtenus grâce à la plateforme expérimentale BESTLab, située sur le site d'EDF Lab Les Renardières. Les cellules expérimentales du laboratoire et les conditions météorologiques locales ont été reproduites numériquement et simulées grâce à la bibliothèque BuildSysPro. La comparaison des données mesurées et simulées a permis d'apporter une seconde validation aux résultats fournis par BuildSysPro. Ces travaux ont en partie été conduits dans le cadre du projet collaboratif ANR-10-HABI-0004 FIABILITE.

#### 1.3.4. Validation du modèle

Les résultats fournis par la plateforme SMACH ont été validés grâce à trois méthodes différentes. L'objectif de ces validations était de vérifier le réalisme des diagrammes d'activité fournis par l'application et celui des courbes de charge dépendantes de ces diagrammes d'activité.

Pour la première méthode de validation, une approche de simulation multi-agent participative a été mise en œuvre. Une simulation multi-agent participative est pour (Tisseau, 2001), une simulation multi-agent au sein de laquelle un utilisateur, représenté par un *agent-avatar* au sein de la simulation, peut intervenir à tout moment afin de modifier les décisions prises par un agent avant de prendre le contrôle à ce dernier. L'objectif de cette approche était de valider le modèle d'activité humaine présent au sein de SMACH en comparant les activités observées à des activités simulées (Huraux et al., 2015). La Figure 9 présente deux exemples d'indicateurs utilisés au cours de cette validation. Les participants à l'expérience disposaient d'une interface dédiée leur permettant de contrôler leur propre avatar au cours de la simulation (Figure 10) en changeant, par exemple, l'activité courante que l'agent était en train d'effectuer. Cette expérience a permis de valider la capacité du modèle à reproduire une activité humaine la plus réaliste possible tout en prenant en compte sa complexité et les différentes logiques qui la composent à savoir les variabilités, la collectivité et les routines.

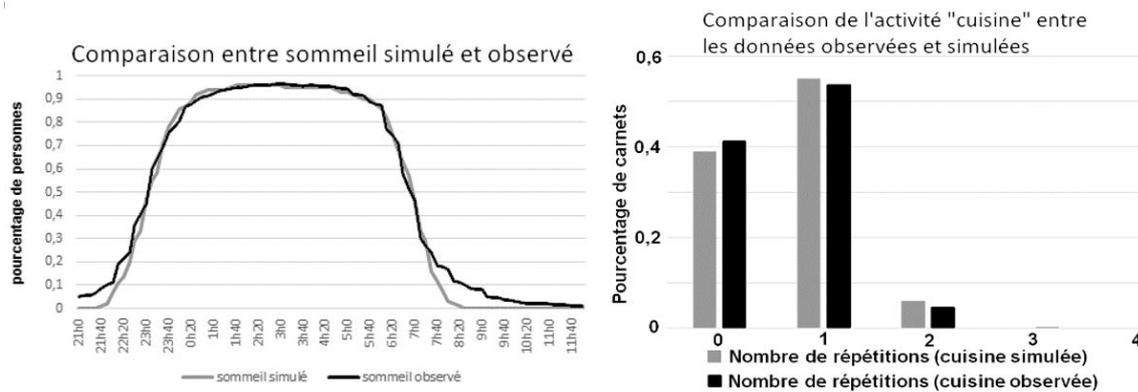


Figure 9 : Exemple d'indicateurs utilisés pour valider le réalisme de l'activité humaine au sein de SMACH (Reynaud et al., 2017)



Figure 10 : Interface de la plateforme de simulation participative

Une seconde approche pour valider le modèle d'activité à un plus haut niveau a été proposée par (Reynaud et al., 2017). Pour cela, les auteurs ont généré 100 emplois du temps prévisionnels pour un type d'individu et un jour donné. Ces emplois du temps prévisionnels ont ensuite été simulés avec la plateforme SMACH pour construire les diagrammes d'activité correspondants et pouvoir les comparer aux données issues des TUS. Grâce à cette étude, les auteurs ont montré que d'un point de vue statistique, les diagrammes d'activité simulés étaient proches des diagrammes d'activité provenant des TUS. Les auteurs ont également montré la présence de variabilité au niveau individuel, c'est-à-dire que pour des personnes possédant des caractéristiques identiques, les

diagrammes d'activité obtenus avec la simulation n'étaient pas totalement identiques, mais possédaient des différences liées à la variabilité de l'activité humaine.

La dernière étude avait pour objectif de comparer des courbes de charge simulées avec la plateforme SMACH à des courbes de charge réelles du secteur résidentiel. Pour cela, des courbes de charge agrégées de 1000 foyers simulés avec SMACH ont été comparées à des données mesurées sur le réseau électrique. Les consommations d'énergie hebdomadaires réelles et simulées ont pu ainsi être comparées en prenant en compte deux météorologies distinctes : relevés météorologiques moyens et météorologie réelle de l'année 2012 (Figure 11).

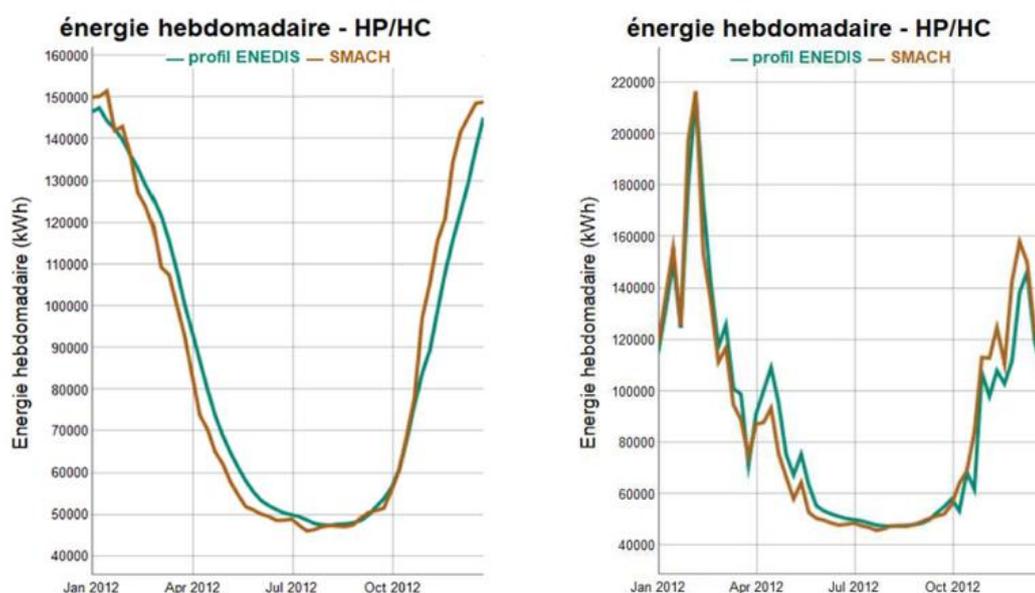


Figure 11 : Comparaison des consommations d'énergie hebdomadaires (gauche : relevés météorologiques moyens, droite : météorologie de l'année 2012)  
(Reynaud et al., 2020)

Cette dernière étude a permis de montrer que les courbes simulées avec la plateforme SMACH sont proches de celles qui peuvent être mesurées en termes de consommations électriques au sein du secteur résidentiel. Les quelques écarts entre les consommations mesurées et celles simulées observés lors de cette étude ont mis en lumière le besoin de simuler plus précisément le fonctionnement de certains systèmes énergétiques comme la production d'ECS.

## 1.4. Synthèse

La consommation électrique du secteur résidentiel est caractérisée par une grande variabilité dans la courbe de charge que ce soit entre différents foyers ou pour un même foyer. Cette variabilité est une conséquence de l'activité humaine des occupants du foyer.

Ce sont les différents aspects de l'activité humaine que sont les variabilités intra-individuelles et inter-individuelles, l'émergence d'habitudes et la collectivité dans la réalisation des actions qui font que l'activité humaine est un système complexe impactant fortement la consommation électrique. La conception d'une plateforme visant à simuler la consommation électrique du secteur résidentiel doit donc intégrer une modélisation réaliste de l'activité humaine.

Plusieurs méthodes existent aujourd'hui pour simuler l'activité humaine avec plus ou moins de précision dans le réalisme de l'activité simulée. Parmi l'ensemble de ces méthodes, nous utilisons la simulation multi-agent de l'activité humaine à travers la plateforme SMACH. Cette dernière permet de simuler une activité humaine réaliste avec une grande variabilité dans les comportements qui sont modélisés tout en reproduisant des individus capables d'interagir les uns avec les autres et de s'adapter à des changements au sein de leur environnement. La plateforme SMACH permet de dépasser les différents verrous nécessaires à la simulation d'une activité humaine réaliste comme le manque de variabilité de l'activité humaine simulée ou encore l'impossibilité pour les individus d'interagir les uns avec les autres. Ces verrous sont présents dans les méthodes déterministes et stochastiques. La co-simulation mise en place entre la simulation de l'activité humaine et un modèle de thermique du bâtiment permet d'être plus précis dans la simulation de la consommation électrique en prenant en compte les différents aspects thermiques du bâtiment.

Cependant, on assiste aujourd'hui à des changements à deux niveaux sur la manière de consommer l'électricité. Le premier changement porte sur le développement d'une consommation d'énergie locale. En France, la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte donne comme objectif de diversifier les sources d'énergie, mais aussi d'impliquer différents acteurs comme les citoyens, les entreprises ou encore l'État dans les questions liées à la consommation d'énergie (Légifrance 2015). Le deuxième changement dans notre manière de consommer l'énergie se trouve au niveau technologique avec le développement de la notion de smart grid. Un réseau smart grid peut se définir comme un réseau au sein duquel on retrouve deux flux bidirectionnels d'informations et d'énergie électrique. Ces changements amènent à un nouveau mode de fonctionnement pour répondre aux différents enjeux qu'implique la consommation d'une énergie produite localement appelée l'autoconsommation d'énergie (AC). L'objet de cette thèse est de mettre en place une plateforme permettant d'étudier ces nouveaux moyens de consommer localement de l'énergie tout en prenant en compte l'effet de l'activité humaine et du bâtiment sur la consommation électrique des foyers.

## Chapitre 2 État de l'art : autoconsommation collective et simulation

2.1.	Le défi de l'autoconsommation .....	62
2.1.1.	Produire et consommer son énergie .....	62
2.1.2.	Les limites de l'autoconsommation naturelle d'énergie dans le secteur résidentiel .....	63
2.2.	Des solutions techniques au service de l'autoconsommation d'énergie .....	63
2.2.1.	Systèmes de stockage et autoconsommation d'énergie.....	64
2.2.2.	Gestion de la demande et autoconsommation d'énergie.....	66
2.3.	Modélisation des solutions techniques .....	67
2.3.1.	Modélisation des systèmes de stockage .....	67
2.3.2.	Modélisation de la gestion de la demande.....	69
2.4.	Autoconsommation collective d'énergie : le défi de l'échange d'énergie .....	69
2.4.1.	Les simulations des échanges d'énergie.....	70
2.4.2.	Vers une distinction claire entre la couche physique et la couche contractuelle .....	73
2.5.	Simulation multi-agent et autoconsommation collective .....	74
2.5.1.	Allocation de ressources en simulation multi-agent .....	74
	Définition .....	74
	Problème d'allocation centralisée .....	75
	Problème d'allocation distribuée .....	76
2.5.2.	Organisation dans les systèmes multi-agents .....	77
2.5.3.	Simulation multi-agent et multi-niveau : différentes échelles de représentation .....	83
2.6.	Synthèse.....	85

## 2.1. Le défi de l'autoconsommation

### 2.1.1. Produire et consommer son énergie

L'autoconsommation d'énergie électrique peut être vue comme la consommation d'une électricité produite localement directement par le producteur. Cette électricité va être produite par des moyens de production locaux comme des panneaux solaires ou des éoliennes. Comme nous l'avons vu dans l'introduction, le mix énergétique français est très majoritairement tourné vers l'utilisation de l'énergie nucléaire. Cependant, depuis quelques années, des moyens pour produire une énergie « verte » à l'échelle locale se développent. En France, l'énergie hydraulique existe depuis de nombreuses années et les panneaux photovoltaïques (PV) et les parcs éoliens se développent rapidement. En France, entre 2012 et 2018, l'installation de panneaux PV a augmenté de 400% montrant le fort attrait pour ce moyen de production (Figure 12). En Europe, la même tendance est observée dans les perspectives de développement des énergies renouvelables (EnR) (Figure 13).

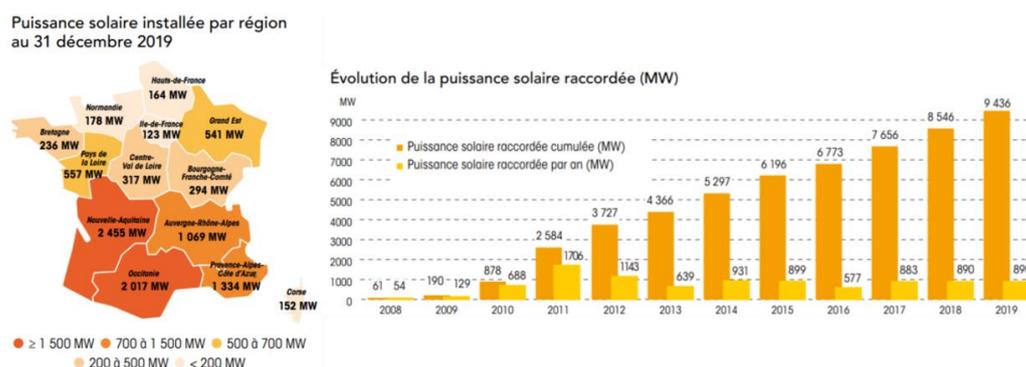


Figure 12 : Évolution du parc photovoltaïque en France (RTE, 2019)

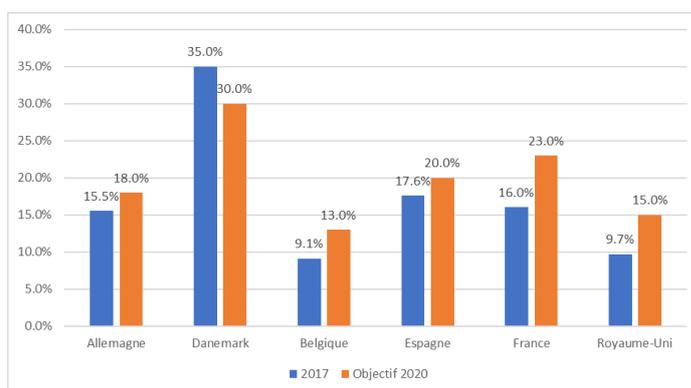


Figure 13 : Part des énergies renouvelables incluant l'hydraulique dans la consommation d'électricité en Europe (Eurostat 2018<sup>6</sup>)

<sup>6</sup> <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/10335446/8-23012020-AP-FR.pdf/6742e9c8-d6b9-d4a5-e2d6-d3e5fc96e32b> consulté le 30/07/2020

### 2.1.2. Les limites de l'autoconsommation naturelle d'énergie dans le secteur résidentiel

L'autoconsommation naturelle d'énergie est définie comme le fait pour un producteur de consommer l'énergie qu'il produit localement sans avoir recours à d'autres solutions techniques pour consommer cette énergie comme par l'exemple des systèmes de stockage ou de pilotage d'appareils électriques.

Aujourd'hui, cette autoconsommation naturelle d'énergie électrique à l'échelle individuelle c'est-à-dire pour un seul foyer ne permet pas d'arriver à une indépendance énergétique vis-à-vis du réseau et des fournisseurs d'électricité. En effet, la quantité d'énergie produite localement qui est effectivement consommée par le producteur est faible. Cela s'explique par une inadéquation entre les périodes de production d'énergie renouvelable et les périodes où un foyer va effectivement consommer de l'énergie. En effet, les panneaux PV vont produire de l'énergie durant la journée, alors que la majorité des personnes sont absentes et ne consomment donc pas d'énergie. La même problématique peut être observée au cours des saisons. En hiver, la production d'énergie par les panneaux photovoltaïques est faible alors que la demande en énergie est forte (Chwieduk, 2003; Zimmermann et al., 2012).

Ainsi, pour des panneaux PV, seulement entre 30% et 40% de la production d'électricité est consommée (Luthander et al., 2015) dans le cadre de l'autoconsommation d'énergie individuelle. Toute l'énergie qui est non consommée est alors dans la majorité des cas rachetée, en France, par EDF Obligation d'Achat<sup>7</sup> qui doit alors intégrer cette énergie intermittente dans l'équilibre global entre production d'énergie et consommation.

## 2.2. Des solutions techniques au service de l'autoconsommation d'énergie

Pour pallier les limites de l'autoconsommation individuelle de l'énergie, des solutions technologiques ont été développées dans l'objectif d'améliorer les différents indicateurs qui permettent d'analyser l'AC.

Le premier indicateur est le taux d'autoconsommation qui représente la quantité d'énergie produite localement et qui est effectivement consommée par le producteur. Ce taux est calculé par :

---

<sup>7</sup> <https://www.edf-oa.fr> consulté le 29/05/2020

$$taux_{autoconsommation} = \frac{Energie_{localeConsommée}}{Energie_{localeProduite}} \quad (1)$$

Dans cette équation,  $Energie_{localeConsommée}$  est la quantité d'énergie autoconsommée par le producteur et  $Energie_{localeProduite}$  est la quantité d'énergie totale produite localement par le foyer.

Le second indicateur est le taux d'autoproduction. Ce dernier permet de connaître la part d'énergie autoconsommée par un foyer. Il est calculé de la manière suivante :

$$taux_{autoproduction} = \frac{Energie_{localeConsommée}}{Energie_{totaleConsommée}} \quad (2)$$

Dans cette équation  $Energie_{totaleConsommée}$  est la consommation totale d'énergie par le producteur.

Utilisés ensemble, ces deux indicateurs permettent d'avoir une analyse globale de l'état d'une installation d'ACI au niveau d'un foyer. Le taux d'autoconsommation permet de voir si un surplus important d'énergie existe. En effet, un taux d'autoconsommation faible indique qu'un surplus important d'énergie n'est pas consommé. Le taux d'autoproduction quant à lui permet de voir d'où provient l'énergie consommée par le foyer entre sa production locale et son fournisseur d'énergie.

Parmi les solutions technologiques qui existe aujourd'hui et qui sont présentes sur le marché, nous présentons ci-après les systèmes de stockage et les systèmes de gestion de la demande.

### 2.2.1. Systèmes de stockage et autoconsommation d'énergie

La possibilité de stocker de l'énergie ouvre de nouvelles solutions pour l'AC. En effet, les systèmes de stockage d'énergie permettent d'emmagasiner tout ou partie de l'énergie non consommée par les producteurs pour la rendre disponible plus tard comme le montre la Figure 14.

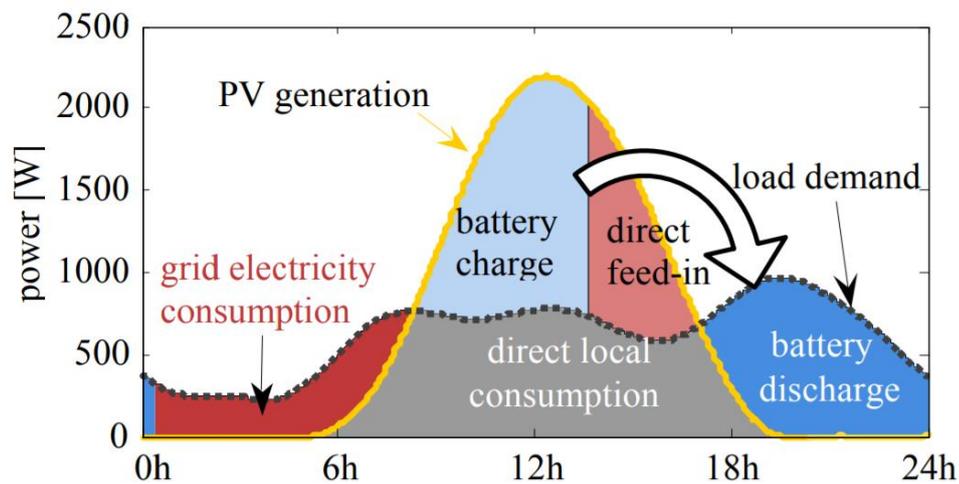


Figure 14 : Utilisation d'une batterie pour décaler l'utilisation de l'énergie produite par des panneaux PV (Braun et al., 2009)

Différents travaux ont déjà montré l'impact de tels systèmes. Par exemple, (Braun et al., 2009) ont démontré que l'utilisation de batteries permettait d'augmenter de 82% la quantité d'énergie qui était effectivement consommée localement. (Munkhammar et al., 2013) ont étudié l'impact des véhicules électriques utilisés en tant que batterie sur la consommation de foyers et sur l'autoconsommation. Les auteurs ont identifié un gain de 37% sur l'énergie effectivement consommée par le foyer soit une valeur plus faible qu'en utilisant une batterie fixe présente en permanence au niveau du foyer. Cela s'explique par le fait que dans les simulations, les véhicules sont absents du foyer en journée et donc ne peuvent absorber l'excédent d'énergie produite. De plus, si les batteries des véhicules sont utilisées pour fournir de l'énergie au foyer, la quantité dont elles se déchargent reste faible, car la batterie doit rester chargée un minimum pour permettre l'utilisation du véhicule à tout moment.

Afin de stocker de l'énergie, de nombreuses solutions techniques ont été développées au cours du temps. La Figure 15 présente les différentes technologies de stockage d'électricité existantes. Dans le cadre du stockage de l'énergie électrique produite localement, les systèmes de stockage utilisés sont majoritairement des systèmes de stockage électrochimique.

La batterie présente donc une solution technique importante dans le cadre de l'AC, car elle va permettre au producteur d'augmenter la quantité d'énergie produite et consommée localement. C'est pour cela que dans nos travaux nous avons intégré la possibilité de simuler les systèmes de stockage que sont les batteries.

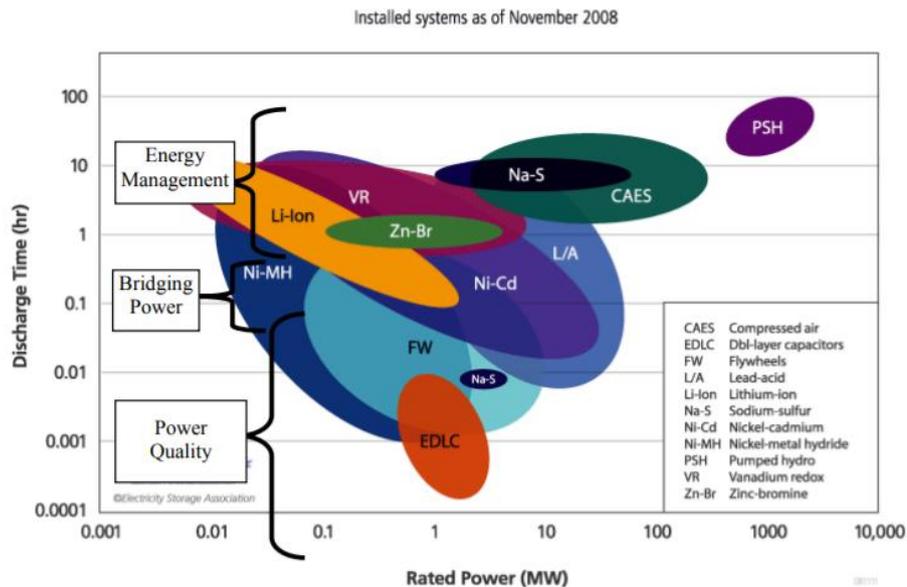


Figure 15 : Technologies existantes pour stocker de l'électricité (Denholm et al., 2010)

### 2.2.2. Gestion de la demande et autoconsommation d'énergie

La Gestion de la demande (GD) ou *Demand Response* en anglais est une notion qui peut avoir différentes significations en fonction du domaine dans laquelle elle est employée. L'objectif des différentes méthodes de GD est d'arriver à une modification de la demande en énergie du côté du consommateur (Palensky & Dietrich, 2011) pour arriver par exemple à diminuer ou à lisser sa consommation en énergie. Le lissage va permettre de réduire l'amplitude des pics de consommation qui peuvent apparaître sur la courbe de charge.

En France par exemple, un système de GD est mis en place sur l'ensemble du territoire, il s'agit du système d'heures pleines et d'heures creuses. Un tel système est basé sur un contrat avec un fournisseur d'électricité proposant des périodes de la journée où l'énergie est à un prix plus élevé que le prix des contrats de type Base (heures pleines) et des périodes de la journée où l'énergie est à un prix plus réduit (heures creuses). Ces périodes de temps sont fixées pour chaque commune par le gestionnaire du réseau de distribution Enedis. L'objectif est ainsi d'inciter les consommateurs à utiliser certains appareils électriques sur les périodes d'heures creuses et d'éviter l'apparition de pics de consommation.

Appliquée à l'AC, la GD pourrait donc permettre de déplacer l'utilisation d'appareils électriques sur des périodes de production locale d'énergie. Dans ses travaux (Widén, 2014) a simulé la consommation de 200 foyers à partir de données mesurées sur le terrain et ont ensuite appliqué un algorithme cherchant à vérifier l'impact de la GD liée à l'AC. L'auteur a montré que l'utilisation de la GD ne permet d'augmenter qu'entre 2 et 3% la

quantité d'énergie produite localement qui est effectivement consommée. Cependant, d'autres auteurs ont également utilisé la GD et ont pu mettre en avant de meilleures performances de cette solution. (Femia et al., 2013) ont montré qu'utiliser la GD permet aux foyers étudiés de consommer environ 15% d'énergie produite localement en plus. La différence entre ces travaux peut s'expliquer par la combinaison de différents facteurs comme les conditions climatiques à savoir la Suède pour les travaux de (Widén, 2014) et l'Italie pour les travaux de (Femia et al., 2013) ce qui impacte la production des panneaux PV, la consommation d'électricité globale des foyers étudiés ou encore la liste des appareils considérés comme délestables par la GD.

Les systèmes de GD sont donc également un outil intéressant pour améliorer l'autoconsommation. En effet, en déplaçant les consommations d'énergie sur des périodes de production les foyers pratiquant l'AC seront capables de consommer une plus grande partie de l'énergie qu'ils produisent localement.

## 2.3. Modélisation des solutions techniques

Les solutions techniques développées autour de l'autoconsommation individuelle d'énergie sont donc nombreuses et vont avoir un impact sur la quantité d'énergie autoconsommée par le producteur. C'est pour cela que dans nos travaux nous avons décidé de mettre en place une modélisation des systèmes de stockage que sont les batteries et la possibilité de réaliser de la GD au niveau des foyers pratiquant l'AC.

### 2.3.1. Modélisation des systèmes de stockage

Il existe de nombreux modèles ayant pour objectif de simuler le comportement des systèmes de stockage d'énergie électrique. (Hinz, 2019) a présenté et détaillé différents types de modèles permettant de simuler des batteries électrochimiques, plus particulièrement des batteries à technologie lithium-ion. En effet, ces dernières font preuve de meilleures performances pour une même durée d'utilisation que d'autres technologies de stockage comme les batteries au plomb ou encore les batteries sodium-chlorure de nickel. De plus, il s'agit de la technologie la plus répandue lorsque les batteries sont utilisées comme systèmes de stockage dans le cadre de l'ACI. Les modèles de batteries lithium-ion peuvent être sommairement classés en deux catégories :

**Modèles mathématiques basés sur les phénomènes électrochimiques et thermiques** : Ces modèles permettent de représenter très finement les différents mécanismes de fonctionnement de ce type de batterie. Cependant, ces modèles sont décrits par un grand nombre de paramètres et utilisent des méthodes numériques dont la résolution est caractérisée par un temps de calcul souvent long.

Pour ce type de modèle, les temps de calcul sont souvent de l'ordre de plusieurs minutes pour calculer précisément l'état de charge d'une batterie (Ramadesigan et al., 2012). De tels temps de calcul deviennent donc importants lorsque l'on souhaite réaliser des simulations avec un grand nombre de batteries par exemple pour une population de 1000 foyers possédant chacun une batterie ;

**Modèles basés sur l'analogie électrique :** Les modèles dits électriques de batterie sont d'après (Hinz, 2019) plus simples à utiliser, car ils nécessitent moins de paramètres. De plus, les auteurs mettent en avant le fait que les paramètres nécessaires à ces modèles peuvent être issus directement des fiches techniques des batteries que l'on souhaite modéliser. Cependant, de tels modèles ne permettent pas de représenter précisément les phénomènes physiques qui ont lieu dans une batterie et cela conduit à l'obtention de résultat moins précis que dans le cadre de l'utilisation de modèles thermiques ou électrochimiques. Cependant, (Hinz, 2019) a mis en avant que ses résultats sont suffisamment précis pour être utilisés dans de nombreuses applications, comme l'étude de l'impact des systèmes de stockage dans le cadre de l'ACI. Par exemple, le modèle utilisé par (Braun et al., 2009) dans leurs travaux est un modèle électrique. Plus précisément, c'est un modèle de Thévenin qui est utilisé. Ce type de modèle représente les batteries par une série de transistors et un bloc composé d'une résistance et d'un condensateur. D'autres modèles de batteries basés sur l'analogie électrique existent, comme par exemple le modèle électrique Rint qui modélise la batterie par une source de courant et une résistance interne au sein d'un circuit ouvert.

Comme nous l'avons vu dans la section 2.2.1, la batterie est un élément qui impacte fortement l'AC et que nous souhaitons modéliser. Cependant, dans le cadre d'une simulation, le choix du modèle pour représenter de tels systèmes est important et doit être effectué en fonction de l'objectif visé par rapport à la précision, la simplicité ou le temps de calcul du modèle. Dans nos travaux, nous ne souhaitons pas représenter l'ensemble des phénomènes physiques qui interviennent lors du fonctionnement d'une batterie. En effet, notre objectif principal reste la simulation de l'activité humaine en lien avec la consommation énergétique au sein des bâtiments. C'est pour cela que nous avons fait le choix de mettre en place un modèle simplifié pour représenter la batterie. Notre modèle permettra de calculer l'état de charge d'une batterie sans prendre en compte certains paramètres comme par exemple l'âge de la batterie ou la température ambiante. En effet, ces paramètres ne sont pas pris en compte dans la majorité des modèles basés sur l'analogie électrique.

### 2.3.2. Modélisation de la gestion de la demande

Aujourd'hui, la modélisation de la GD est principalement centrée sur la mise en place de systèmes de Gestion Active de la Demande (GAD). C'est-à-dire des systèmes automatisés où la production d'énergie locale est prise en compte afin de déplacer le fonctionnement de certains appareils électriques. L'objectif derrière ce type de systèmes est de faire en sorte de minimiser au maximum l'investissement de l'humain dans le déplacement des activités consommatrices d'énergie. (Castillo-Cagigal et al., 2011) ont développé et testé un tel système en conditions réelles. Leur système permet aux habitants de définir des tâches déplaçables et non déplaçables. Les tâches déplaçables vont être caractérisées par une période durant laquelle l'appareil électrique qui y est rattaché peut-être mis en service et une heure maximale à laquelle la tâche doit être terminée. Les tâches non déplaçables ne seront pas impactées par le système de GAD actif. À partir de ces informations, le système sera donc capable de mettre en route ou d'arrêter des appareils électriques tout en respectant des contraintes liées à la production d'énergie, mais aussi liées aux occupants du foyer. Les auteurs ont montré une augmentation d'environ 30% de la consommation de l'énergie produite localement. Le défi actuel derrière ce type de modélisation est le développement d'algorithmes efficaces visant à réaliser une GAD impliquant au minimum les occupants du foyer.

Modéliser des processus liés à la GD ou encore à la GAD est un point qui se retrouvera dans nos travaux que ce soit par la prise de décision humaine ayant pour objectif de modifier leur activité pour s'adapter à la production d'énergie ou de systèmes qui déclencheront automatiquement le démarrage ou l'arrêt d'appareils électriques. De plus, le couplage entre les systèmes de stockage et de GD a également été étudié (Femia et al., 2013) et les différentes simulations réalisées ont permis de montrer que l'utilisation simultanée de ces deux technologies permet d'améliorer grandement les différents indicateurs liés à l'AC.

## 2.4. Autoconsommation collective d'énergie : le défi de l'échange d'énergie

Une autre stratégie, plus récente, peut être mise en place pour tenter d'améliorer la performance globale de l'AC, il s'agit de l'autoconsommation collective d'énergie (ACC). L'ACC est une nouvelle manière de consommer l'énergie produite localement en permettant à cette dernière d'être échangée entre des producteurs et des consommateurs. Les échanges d'énergie peuvent prendre différentes formes. Il peut s'agir par exemple d'une répartition de l'énergie à partir de moyens de production collectifs. C'est le cas, par exemple, dans le cadre de l'écoquartier Logis Cévenol (Curtil et

al., 2020) où une installation PV de 100 mégawatts crête (MWc) produit de l'énergie localement pour les 100 foyers du quartier. Il peut également s'agir d'échange d'énergie directement entre producteurs et consommateurs. C'est ce qui passe par exemple dans le quartier de Brooklyn à New York (Mengelkamp et al., 2018). Des foyers possédant des installations PV individuelles vont vendre de l'énergie aux foyers du quartier qui en font la demande au sein d'un marché de l'énergie. On assiste à des échanges d'énergie où le prix de cette dernière va impacter vente et achat d'énergie.

Dans le contexte de l'ACC, le réseau actuel n'est donc plus le seul distributeur d'électricité pour les foyers. En France, les lois ont évolué afin de permettre une mise en place facilitée de l'ACC. C'est le cas par exemple de la loi PACTE de 2019 dans son article 126 qui modifie les réglementations des échanges d'énergie pour la production locale. Dans ce cas précis, la loi se base sur une distance maximale pour autoriser les échanges et, en novembre 2019, un arrêté ministériel fixe la distance maximum entre producteur et consommateur pour réaliser l'ACC à 2 kilomètres<sup>8</sup>. L'arrêté précise également que la puissance des installations connectés doit être inférieure à 3 MWc en métropole contre 0,5 MWc dans les zones non interconnectées. Les échanges d'énergie sont donc le pivot de l'ACC et la manière dont les échanges d'énergie se dérouleront entre les participants impactera leur consommation d'énergie tout comme leur facture d'électricité.

Deux dimensions doivent nécessairement être distinguées pour l'énergie : la couche physique permet la distribution physique de l'énergie et la couche contractuelle correspond à l'opération de comptage des flux financiers et de l'énergie. Cette distinction est clairement présente dans la littérature des expérimentations de terrain ayant pour objectifs d'étudier l'ACC. Dans leurs travaux visant à mettre en place l'ACC dans un quartier de Brooklyn à New York, (Mengelkamp et al., 2018) s'appuient sur cette distinction. Dans ce quartier, la couche physique échange l'énergie de manière distribuée entre les foyers à travers un réseau physique construit en parallèle du réseau de distribution déjà existant. La couche contractuelle de son côté est centralisée et va prendre la forme d'un marché de l'énergie, similaire à celui proposé par (Vytelingum et al., 2010).

#### 2.4.1. Les simulations des échanges d'énergie

La littérature relative à la simulation des échanges d'énergie ne reprend pas explicitement cette distinction entre couche physique et couche contractuelle présente dans les études de terrain. Deux catégories d'échange sont généralement distinguées pour les simulations : les échanges d'énergie distribués et les échanges d'énergie centralisés.

---

<sup>8</sup> <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2019/11/21/TRER1932009A/jo/texte>

Dans le cadre **des échanges d'énergie distribués**, les opérations des échanges d'énergie ont lieu directement entre les producteurs et les consommateurs sans passer par une entité tierce. C'est pourquoi ces approches sont parfois appelées *Peer-To-Peer*<sup>9</sup>(P2P). Dans ce type de simulation, les foyers vont directement se transmettre les informations nécessaires à l'échange d'énergie. La théorie des jeux est un outil mathématique qui permet de modéliser ces interactions multiples entre les foyers. Elle permet de modéliser et d'analyser les décisions entre les différents acteurs (« *les joueurs* ») qui peuvent être en conflit ou posséder des objectifs communs. Un jeu est une situation dans laquelle le coût ou le bénéfice obtenu par chaque joueur dépend non seulement de sa décision, mais aussi de la décision des autres joueurs (Bacci et al., 2016). (Tushar et al., 2018) ont directement étudié la façon dont la théorie des jeux permet de mettre en place des échanges directs d'énergie entre producteurs et consommateurs. L'utilisation de la théorie des jeux permet de modéliser les différents processus de décision qui mènent les acteurs de l'ACC à échanger de l'énergie avec leurs voisins, mais aussi les interactions qu'il en résulte. Deux grandes familles d'algorithmes ont été identifiées :

- **Les jeux non coopératifs** : Les participants analysent les décisions des autres joueurs aux tours précédents afin de mettre en place une stratégie maximisant leurs gains personnels ;
- **Les jeux coopératifs** : Ce type de jeu fonctionne de manière similaire aux jeux non coopératifs si ce n'est que l'objectif des joueurs est de prendre des décisions visant à maximiser les gains de tous les joueurs et non plus uniquement leurs gains personnels.

Les jeux non coopératifs vont donc mettre en concurrence les participants à l'ACC. Par exemple (Yaagoubi & Mouftah, 2017) ont proposé un algorithme mettant en place un jeu non coopératif où l'objectif de chacun des participants est de minimiser sa facture d'électricité. L'algorithme propose une vision où les processus de décision de réaliser ou non un échange se situent au niveau des acheteurs de l'énergie. À chaque tour du jeu, ils décident d'une quantité d'énergie à acheter à chaque producteur. Les producteurs répondront ensuite à ces demandes en prenant en considération la quantité maximale d'énergie qu'ils peuvent fournir. La décision des acheteurs est basée sur l'ensemble des choix faits au tour précédent. En effet, lorsqu'un producteur échange de l'énergie, il indique les acheteurs et la quantité d'énergie achetée à tous les participants. Ce type d'algorithme permet donc de représenter des comportements égoïstes dans la prise de décision des participants. Ces derniers chercheront à minimiser leur propre facture d'électricité en achetant ou en vendant de l'énergie sans se soucier de l'impact que cela

---

<sup>9</sup> Pairs à Pairs

peut avoir sur les factures d'électricité de leurs voisins. Des algorithmes proposant des échanges d'énergie avec une théorie des jeux coopérative existent (Lee et al., 2014), mais sont plus rarement mis en place. Les joueurs vont alors travailler ensemble pour tenter, par exemple, de trouver une solution pour minimiser les factures de l'ensemble des participants. Pour cela, les joueurs vont, tout comme pour les jeux non coopératifs, prendre des décisions en fonction des autres joueurs, mais avec comme objectif de maximiser autant que possible les gains de tous les joueurs. Ce type de modèle va tendre vers un échange optimal de l'énergie produite localement afin à la fois de maximiser le profit des producteurs et de minimiser la facture des acheteurs.

D'autres simulations vont de leur côté porter sur les **échanges centralisés de l'énergie** lorsqu'une partie des décisions liées à ces échanges est prise de façon centralisée par une entité tierce. Cette entité aura pour objectif de répartir l'énergie entre les différents participants à l'ACC en fonction de règles précises. (Wu et al., 2015) ont proposé la mise en place d'un marché de l'énergie appelé le Local Trading Market (LTM), dont les échanges sont impactés par le prix de l'énergie. Le LTM a deux objectifs qui sont de calculer les prix d'achat et de vente de l'énergie optimaux au sein du marché à partir des prix du fournisseur d'électricité et ensuite de répartir l'énergie entre les différents acteurs. L'algorithme n'est cependant pas complètement centralisé, les producteurs décident toujours de la quantité qu'ils vendront au sein du marché et les acheteurs de la quantité qu'ils souhaitent acheter. Seuls l'établissement des prix et la répartition de l'énergie entre les acheteurs sont centralisés. Cet algorithme permet de modéliser des échanges d'énergie, mais a généralement la particularité de n'avoir qu'un prix unique de l'énergie échangée entre les participants à l'ACC. Cependant, cela n'est pas forcément le cas. Par exemple, (Vytelingum et al., 2010) ont proposé la mise en place d'un marché de l'énergie basé sur la notion d'enchère à doubles carnets d'ordres. Dans ce type de marché, acheteurs et vendeurs proposeront simultanément des offres d'achat et de vente. L'objectif du marché sera alors de fournir une répartition de l'énergie satisfaisant au maximum les offres présentes au sein du marché.

Comme nous venons de le montrer, la littérature propose des algorithmes d'enchère pour organiser des échanges d'énergie. Mais, d'autres types de règles peuvent organiser les échanges d'énergie. C'est le cas, par exemple, avec la clé de répartition qui est un outil permettant d'indiquer la part d'énergie que chaque foyer recevra (Curtil et al., 2020). Cette clé peut être calculée en fonction de la consommation d'un foyer sur une période de temps fixe ou par rapport à sa surface. C'est ce qui est utilisé dans le cas de l'écoquartier LOGIS CÉVENOL pour lequel la clé de répartition est établie en fonction de la surface du logement de chaque foyer. Plus la surface d'un foyer est importante, plus la part d'énergie qu'il reçoit des moyens de production locaux est importante.

## 2.4.2. Vers une distinction claire entre la couche physique et la couche contractuelle

Les simulations proposées dans la littérature pour échanger de l'énergie, qu'elles soient distribuées ou centralisées, ne font pas de distinction claire entre la couche physique et la couche contractuelle. Dans le cas des approches distribuées, la distinction ne semble pas faite et il est difficile d'identifier sur quoi porte la théorie des jeux, la dimension physique ou la dimension contractuelle de l'échange d'énergie. De leur côté, les approches sur les échanges d'énergie centralisés ont tendance à ne considérer que les échanges purement contractuels de l'énergie sans mentionner que cela ne porte pas sur la dimension physique de l'échange d'énergie.

Toute simulation peut évidemment confondre les couches physique et contractuelle, c'est informatiquement possible. Pour autant, nous situons nos travaux dans un environnement réaliste dans lequel les besoins et les contraintes du réseau physique ne peuvent pas être confondus avec les contraintes et les besoins des dimensions contractuelles de l'échange d'énergie. Tenant compte de cette distinction nos simulations vont porter sur la gestion des dimensions contractuelles qui pourra s'appliquer à tout type de couche physique.

Ainsi, dans le cadre de la simulation de la couche contractuelle, qui est le cœur de nos travaux, nous parlerons d'organisation **collective des échanges** lorsqu'une entité centrale (une place de marché par exemple) est responsable de la réalisation du bilan contractuel des échanges d'énergie. À l'inverse, nous parlons **d'organisation individualisée des échanges** d'énergie lorsque les foyers réalisent directement des échanges d'énergie avec d'autres foyers sans passer par une vision contractuelle, i.e. sans entité centrale pour réaliser un bilan contractuel. Aujourd'hui, les premières expériences réelles d'ACC s'orientent vers la mise en place d'une organisation collective des échanges (Curtill et al., 2020; Mengelkamp et al., 2018).

Pour cela, nous souhaitons mettre en place une plateforme permettant l'étude de différentes manières d'organiser la couche contractuelle des échanges au sein d'un groupement pratiquant l'ACC. Nous nous concentrons dans cette thèse sur l'organisation collective des échanges, avec une entité responsable du comptage pour la couche contractuelle. Comme indiqué précédemment, cette organisation semble être aujourd'hui la plus probable. Inversement, nous ne nous focaliserons pas sur l'organisation individuelle des échanges d'énergie, de pair à pair, sans interlocuteur central, car cela ouvre très rapidement sur une explosion combinatoire qui résulte des échanges entre de multiples foyers d'un même quartier.

## 2.5. Simulation multi-agent et autoconsommation collective

Comme nous l'avons précisé dans la section précédente, l'ACC est basé sur deux grands principes : le fait d'avoir une production locale d'énergie et que cette dernière puisse être échangée entre producteurs et acheteurs toujours à l'échelle locale. Aujourd'hui, les modèles qui permettent de simuler l'ACC souffrent d'un manque de flexibilité. En effet, ces derniers n'implémentent qu'une seule configuration précise pour échanger de l'énergie avant de la simuler. Comme nous l'avons expliqué dans la section précédente, nos travaux s'intéressent à la modélisation de la couche contractuelle des échanges d'énergie et plus particulièrement à la mise en place d'une organisation collective des échanges. Dans cette section, nous montrons que la simulation multi-agent fournit des outils permettant de simuler cette couche contractuelle et plus particulièrement l'organisation collective des échanges d'énergie.

### 2.5.1. Allocation de ressources en simulation multi-agent

#### *Définition*

L'échange (ou allocation) de ressources est une problématique fréquemment étudiée grâce aux SMA. Un problème d'allocation peut être défini comme un problème dans lequel un ensemble d'agents (coopératifs ou en concurrence) vont chercher une répartition optimale des ressources qu'ils ont à leur disposition (Beynier & Estivie, 2013). Les préférences des différents agents sont prises en compte lors de la mise en place de la répartition des ressources. Plus formellement, un problème d'allocation peut être défini de la façon suivante :

**Définition :** *Un problème d'allocation est un tuple  $\langle R, P, U \rangle$ , où  $R$  est un ensemble de  $m$  ressources disponibles, où  $P$  est un ensemble fini de  $n$  entités, et où  $U$  est un vecteur de préférences des entités sur l'ensemble de ressources. L'objectif est d'identifier une distribution des ressources  $R$  dans  $P$  satisfaisant un objectif, tout en prenant en compte les préférences des entités  $U$ . (Nongaillard, 2009)*

Les caractéristiques des ressources sont des paramètres essentiels pour un problème d'allocation. (Chevaleyre et al., 2006) ont identifié 6 caractéristiques pour définir les ressources d'un problème d'allocation :

- **Continue ou discrète** : Une ressource peut être continue ou discrète. Il s'agit d'une caractéristique physique de la ressource qui impactera la façon dont elle sera allouée ;
- **Divisible ou non** : Une ressource peut être considérée comme divisible ou indivisible en fonction des mécanismes d'allocation des ressources ;

- **Partageable ou non** : Une ressource partageable pourra être utilisée par plusieurs agents à un même instant ;
- **Consommable ou non** : Une ressource peut être consommée lorsqu'un agent utilise cette dernière. Cela veut dire qu'elle ne pourra pas être allouée une nouvelle fois par la suite ;
- **Ressources différenciées ou non** : Il est possible de représenter une ressource comme un tout avec un nom unique pour la désigner, mais il est également possible de donner un identifiant à chacun des objets composant la ressource afin de les rendre identifiables ;
- **Ressources ou tâches** : L'allocation de tâches est proche de la problématique d'allocation de ressources. Les tâches peuvent être vues comme une ressource possédant un coût pour les agents qui doit être pris en compte dans le processus d'allocation.

L'identification précise des caractéristiques de la ressource est importante dans le cadre d'un problème d'allocation, car elles influenceront grandement les mécanismes qui géreront l'allocation entre les agents.

Pour rappel, dans le cadre de l'ACC, l'objectif de la couche contractuelle est de réaliser une opération de comptage sur la manière dont l'énergie a été échangée entre les foyers. Pour effectuer cette opération, la couche contractuelle va se servir des résultats des opérations de consommation, production, stockage ou déstockage d'énergie qui ont eu lieu au niveau de la couche physique. C'est cette opération de comptage au sein de la couche contractuelle que nous assimilons à une opération d'allocation de ressource. Au sein de la couche contractuelle, l'énergie va être vue comme une ressource continue et divisible. En effet, elle peut être divisée à l'infinie et répartie entre plusieurs foyers.

Pour répondre aux problématiques d'allocation de ressources, deux grandes familles d'approches sont identifiées : les approches centralisées et les approches distribuées. Nous allons voir comment ces approches peuvent nous permettre de modéliser la couche contractuelle de l'ACC et plus particulièrement une organisation collective des échanges d'énergies.

#### *Problème d'allocation centralisée*

Les approches centralisées pour échanger des ressources dans le cadre de SMA sont basées sur l'intervention d'une entité centrale. (Nongaillard, 2009) a proposé de diviser un tel processus en trois étapes distinctes comme le montre la Figure 16. Tout d'abord, les agents indiquent à l'entité centrale l'ensemble des ressources dont ils disposent ainsi que leur préférence. L'entité centrale détermine ensuite une allocation des ressources

entre ces populations d'agents satisfaisant au maximum leurs préférences. Enfin, l'entité centrale notifie à l'ensemble des agents les ressources qui leur sont allouées.

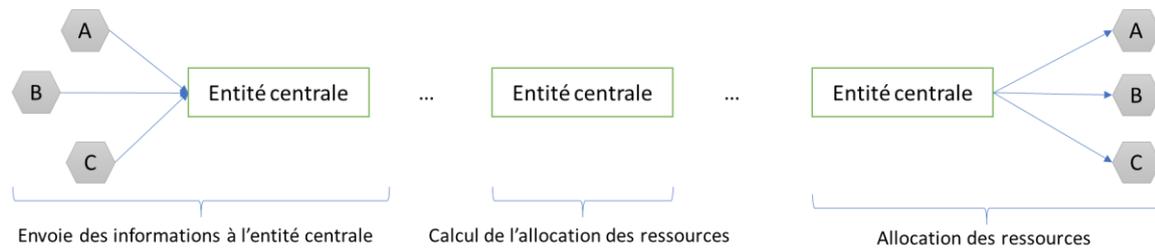


Figure 16 : Fonctionnement d'un processus d'allocation centralisée de ressources (Nongaillard, 2009)

Une des approches les plus usitées pour représenter des processus d'allocations centralisées est de les représenter sous forme d'enchère. Les approches centralisées permettent de représenter fidèlement les enchères : les agents sont les participants souhaitant vendre ou acheter une ressource. Le commissaire-priseur correspond à l'entité centrale qui cherchera à maximiser les préférences des acheteurs en cherchant une solution d'allocation optimale. Il existe un grand nombre de types d'enchère (Bellosta et al., 2006; de Vries & Vohra, 2003; Nisan, 2000; Sandholm, 2002; Vytelingum et al., 2010) et des modèles ont été mis en œuvre pour optimiser et résoudre ces différents types d'enchère.

L'organisation collective des échanges d'énergie de la couche contractuelle, que nous avons présentée dans la section 2.4.2, se rapproche des problèmes d'allocation centralisée de ressources. En effet, dans les deux cas, une entité centrale applique un ensemble de règles précises pour réaliser la répartition d'une ressource entre différents producteurs et acheteurs. Représenter une organisation collective des échanges d'énergie par un problème centralisé d'allocation de ressources permet d'avoir un agent responsable de l'allocation pouvant suivre un grand nombre de règles différentes pour allouer l'énergie.

#### *Problème d'allocation distribuée*

La seconde famille de protocoles qui vise à résoudre des problèmes d'allocation de ressources est basée sur une architecture distribuée. Ces protocoles permettent aux agents d'interagir directement entre eux afin de s'échanger les ressources dont ils disposent. L'élément primordial de ce type de protocole est le modèle de négociation que vont utiliser les agents entre eux. L'allocation finale des ressources entre les agents sera la conséquence des différentes étapes de négociation qui auront eu lieu.

Par exemple, le protocole Contract-net (Smith, 1980) permet de résoudre des problématiques d'allocation de ressources avec un fonctionnement proche des enchères

scellées. Un manager va propager une offre à laquelle les différents agents vont pouvoir répondre. Il sélectionnera ensuite la meilleure offre puis attribuera les ressources. Ce protocole amène à l'allocation des ressources à un seul agent, les autres ne recevant rien. Ici, les différentes étapes de négociation auront lieu entre le manager et les différents agents souhaitant acquérir la ressource. Des variantes de ce protocole existent comme le système TRACONET mis en place par (Sandholm, 1993) ou le Concurrent Contract-Net mis en avant par (Aknine et al., 2004) qui permet la mise en concurrence de plusieurs managers pour l'allocation des ressources.

Une approche distribuée pour résoudre les problématiques d'allocation de ressources est caractérisée par la mise en place d'une architecture où les agents interagissent directement entre eux pour allouer la ressource. Cependant dans le cadre de nos travaux nous souhaitons modéliser la couche contractuelle de l'ACC à travers une organisation collective des échanges. La présence d'une entité centrale dans ce type d'organisation est primordiale. Un processus d'allocation distribuée est plus adapté à la représentation d'une organisation individualisée des échanges d'énergie que nous ne traitons pas dans le cadre de cette thèse.

### 2.5.2. Organisation dans les systèmes multi-agents

Afin de résoudre ces problématiques d'allocation de ressources en SMA, il n'est pas rare que les agents se regroupent au sein d'organisations pour optimiser l'allocation des ressources (Yeung & Poon, 1999). La littérature définit de nombreux modèles d'organisations d'agents (Horling & Lesser, 2005). Chacune de ces organisations possède des caractéristiques qui leur sont propres que ce soit en termes d'organisation interne, d'interaction avec l'extérieur ou encore sur la manière dont elles se forment.

Cette notion d'organisation d'agents fait écho à la notion de communauté que l'on retrouve fréquemment lors de l'étude de l'ACC (Garrido-Lucero et al., 2019; Schyns et al., 2018). Une communauté est un ensemble de foyers produisant de l'énergie localement et souhaitant échanger cette énergie entre les différents membres de la communauté. Dans cette section, nous étudions différentes organisations présentées dans la littérature en SMA et nous montrons comment elles peuvent s'appliquer à la notion de communauté utilisée dans l'organisation collective des échanges contractuels.

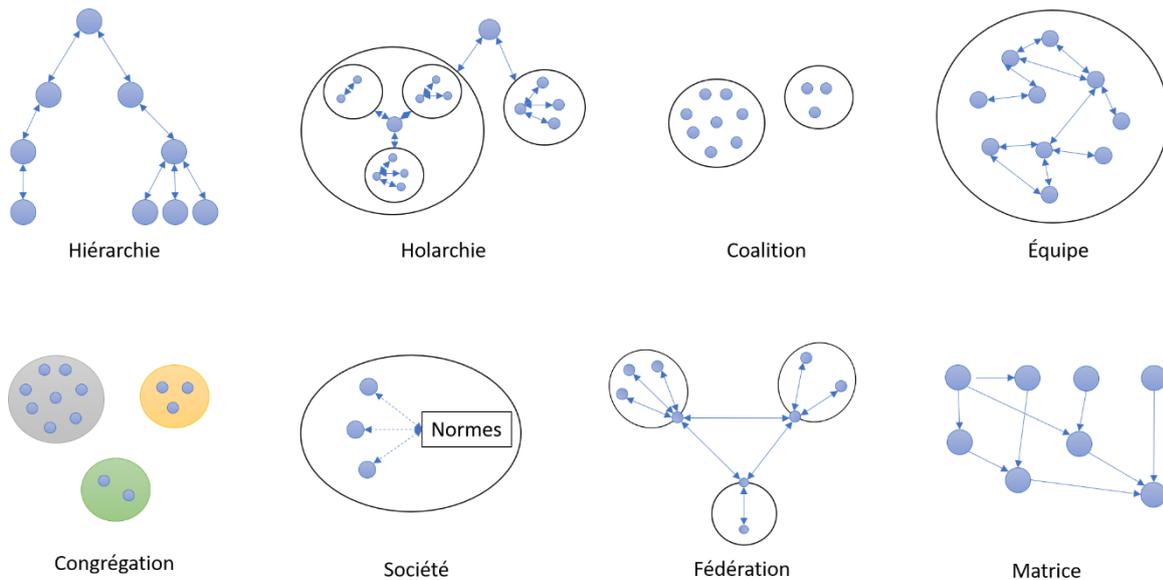


Figure 17 : Organisation au sein des systèmes multi-agents  
(Horling & Lesser, 2005)

Des auteurs ont identifié 8 familles d'organisations différentes (Figure 17) :

- Les hiérarchies** : Pour les hiérarchies, les agents sont organisés sous la forme d'un arbre. Les agents les plus hauts dans l'arbre possèdent une vue plus globale du système que les agents situés dans les niveaux inférieurs. Les interactions n'ont lieu qu'entre des agents de niveaux différents c'est-à-dire que les agents d'un même niveau n'interagissent pas entre eux. (Yadgar et al., 2003) ont proposé un modèle permettant de gérer, grâce à une architecture multi-agent, un système composé de plusieurs milliers de capteurs. Les auteurs ont proposé une architecture hiérarchique à savoir qu'un ensemble de capteurs va être rattaché à un leader auquel il envoie les informations dont il dispose. Le leader gère ensuite les informations reçues par tous les capteurs qu'il traite avant de les envoyer à son propre leader. L'utilisation d'une organisation hiérarchique permet ici aux différents leaders d'obtenir et de combiner les informations des agents qu'ils gèrent. Cette architecture est intéressante, car elle permet de limiter les flux d'informations qui peuvent circuler au sein d'un SMA en limitant le nombre d'interlocuteurs avec lequel un agent peut interagir. Dans le cadre de la simulation d'ACC on pourrait imaginer une hiérarchie dégénérée, c'est-à-dire avec une racine qui serait l'entité centrale et un nombre  $n$  de feuilles qui seraient les foyers. Cependant, d'autres organisations peuvent toutefois sembler plus appropriées ;
- Les holarchies** : Pour ce type de structure, les agents possédant des caractéristiques similaires sont rassemblés sous la forme de groupes appelés holons. Une particularité d'un holon est qu'il peut être vu comme une entité

faisant partie d'un autre holon. (Horling & Lesser, 2005) ont fourni un excellent exemple d'une organisation holarchique avec l'univers : « *A universe is comprised of a number of galaxies, which are comprised of a number of solar systems, and so on, all the way down to subatomic* ». Les interactions entre holons sont réalisées par un agent et non directement entre eux. (Fisher, 1999) a utilisé une telle organisation pour représenter des systèmes industriels. Dans leurs travaux, les auteurs ont proposé de modéliser l'ensemble des divisions de l'entreprise par des holons, le système industriel dans son ensemble étant lui-même un holon. Les holons permettent donc de représenter une architecture dans laquelle des entités vont pouvoir être encapsulées les unes dans les autres et dans laquelle les entités faisant partie d'un même holon possèdent des caractéristiques similaires. Cette approche permet donc de limiter les échanges d'informations au sein d'un système tout en permettant à chaque holon d'avoir une grande flexibilité dans son comportement pour atteindre son objectif. L'approche proposée avec la notion d'holon permet de représenter un groupe de foyers avec une organisation collective des échanges. De plus, ce type d'organisations permet de créer des situations où plusieurs holons pratiquent l'ACC entre eux avec une entité tierce responsable des échanges ;

- **Les coalitions** : Les coalitions d'agents sont des groupes d'agents se constituant dans l'objectif d'accomplir un but précis et sont généralement formées pour une durée limitée. Une particularité de ce type d'organisation est l'absence d'interaction entre des agents ne faisant pas partie de la même coalition. Ce type de structure est beaucoup utilisée pour la mise en place de problèmes basés sur la théorie des jeux dans lesquels les agents se regroupent pour atteindre un objectif tout en étant en concurrence ou en coopération au sein d'une coalition. (Yeung & Poon, 1999) ont étudié la manière dont la mise en place de coalitions au sein d'un SMA pouvait permettre de réaliser des échanges d'énergie entre plusieurs acteurs. La notion de coalition ne convient pas pour simuler l'ACC. En effet, les groupements pratiquant l'ACC seront fixés de manière contractuelle et ne seront pas formés pour une durée limitée comme le sont les coalitions ;
- **Les équipes** : Une équipe est un regroupement d'agents coopératif dont l'objectif est d'avancer vers un but commun. La particularité avec une équipe est que les membres cherchent à répondre au maximum à l'objectif de l'équipe plutôt qu'à leur objectif individuel. De plus, à la différence d'une coalition, les équipes sont caractérisées par d'importants échanges d'information entre leurs agents. L'objectif derrière ces échanges d'information est de favoriser des prises de décision très favorables à l'équipe. Par exemple, (Jennings, 1995) a mis en place ce type d'organisation coopérative que sont les équipes afin d'étudier un système

gérant le transport de l'énergie. Sans cette organisation sous forme d'équipes, les agents composant le système avaient tendance à avoir des prises de décision incohérentes et handicapantes pour les performances du système. L'intégration du travail d'équipe et d'une structure en équipes entre les agents ont permis une nette amélioration des performances du système. Les équipes cherchent donc à privilégier l'objectif commun au lieu de l'objectif individuel des agents qui la compose. C'est pour cela que la notion d'équipe ne convient pas à la simulation de l'ACC. En effet, un foyer peut décider de privilégier ses propres besoins en énergie avant ceux des autres ;

- **Les congrégations** : Les congrégations tout comme les coalitions et les équipes sont des regroupements d'agents cherchant à tirer des bénéfices de l'organisation dont ils font partie. À la différence des équipes et des coalitions, ce type de structure dispose d'un temps de vie plus long et n'est pas formé dans l'optique de réaliser un unique objectif a contrario des coalitions et des équipes. Les participants à une congrégation vont plutôt chercher à maintenir leur utilité au sein du groupe par leur prise de décision. Les congrégations ont été utilisées par (Brooks & Durfee, 2002) pour représenter des marchés économiques. Dans leur modèle, les acheteurs sont regroupés en différentes congrégations que les vendeurs peuvent rejoindre afin d'allouer les ressources dont ils disposent. L'objectif de ce modèle est de simplifier le problème de décision au niveau des vendeurs. Plutôt que de laisser la possibilité aux producteurs d'allouer leurs ressources à l'ensemble des agents du système, ces derniers ne pourront interagir qu'avec les agents de la congrégation qu'ils ont rejoints. Les auteurs ont ainsi montré que les congrégations sont une structure qui s'adapte bien aux préférences des agents, producteurs et consommateurs arrivant à créer des échanges satisfaisants pour les deux parties. La notion de congrégation dans sa définition ne convient pas parfaitement à l'ACC. En effet, bien que sa structure, un ensemble d'agents avec une durée de vie longue et avec différents objectifs, convienne à l'ACC ce n'est pas le cas du rôle des agents. Dans une congrégation, un agent va chercher à maintenir son utilité au sein du groupe, ce qui n'est pas forcément vrai dans le cadre de l'ACC ;
- **Les sociétés** : Une société est une organisation dans laquelle les agents peuvent aller et venir pour se rencontrer et interagir entre eux. L'objectif d'une société est de fournir un environnement dans lequel les agents sont capables d'échanger. Cependant, les sociétés sont aussi caractérisées par les règles qu'elles imposent aux agents pour faciliter leur coexistence au sein de la société. Par exemple, les règles peuvent définir un protocole de communication précis que les agents doivent utiliser pour échanger au sein de cette société. Ce type d'organisation

permet donc de représenter des structures sociales. (Dellarocas & Klein, 2000) ont produit une plateforme permettant la création de marchés virtuels dans lesquels des agents vont interagir. Les marchés sont représentés sous la forme de sociétés au sein desquelles les agents doivent suivre un ensemble de *normes* précises décrivant le rôle de chaque agent et le protocole d'interaction au sein du marché. L'ACC se focalise sur les échanges contractuels de l'énergie sans se préoccuper du respect des normes ou de la dimension sociale du groupe (création de relations, maintien des interactions...). C'est pour cela que les sociétés ne semblent pas forcément adaptées pour représenter l'ACC ;

- **Les fédérations** : Une fédération est un groupe d'agents qui a accepté de céder une partie de son autonomie à un autre agent délégué qui représentera la fédération à l'extérieur de cette dernière. Les agents d'une fédération n'interagiront qu'avec ce délégué et c'est aussi ce dernier qui sera responsable des interactions avec l'extérieur de la fédération. (Shen & Norrie, 1998) ont utilisé la notion de fédération pour représenter le fonctionnement d'entreprises de construction. Les auteurs ont modélisé les différentes étapes de la création d'un produit : design, planification, fabrication, marketing... Chaque étape est réalisée par une fédération d'agents qui sera représentée au sein de l'entreprise par un médiateur qui pourra interagir avec les autres services. Dans le cadre de l'ACC, les foyers ne délèguent pas d'autorité à une entité. C'est pour cela que la notion de fédération ne s'applique pas vraiment à notre problématique ;
- **Les matrices** : Une organisation matricielle est une organisation hiérarchique dans laquelle un même agent peut avoir plusieurs supérieurs. Cela forme un graphe orienté acyclique. Ce type de graphe a la propriété de se représenter aisément sous la forme d'une matrice d'où leur nom. (Decker et al., 1995) ont utilisé les matrices pour leur architecture organisationnelle MACRON dont l'objectif est de répondre à la requête d'un utilisateur grâce à une recherche d'information coopérative. Leur système est composé de trois types d'agents : un agent « *requête* » dont le rôle sera de générer des tâches en fonction de la requête de l'utilisateur. Ces tâches seront attribuées à plusieurs agents « *manager* » qui sélectionneront des agents « *réalisateur* » pour réaliser les tâches. Lorsqu'un agent termine une tâche, il le notifie à l'agent « *manager* » qui lui a été attribué, ainsi qu'à l'agent « *requête* ». Cette organisation matricielle de la recherche d'information permet une meilleure efficacité dans l'attribution des tâches en ayant recours à un nombre restreint d'agents pour effectuer la recherche. L'organisation collective des échanges contractuels ne correspond pas à une matrice : les agents ne discutent qu'avec une seule entité centrale. Une telle

représentation pourrait cependant être envisagée pour une organisation individualisée des échanges.

Il est également possible de retrouver des SMA dont les agents sont structurés selon plusieurs organisations. On parle alors d'organisations hybrides. (Yadgar et al., 2003) ont utilisé plusieurs types d'organisations pour mettre en place leurs réseaux de capteurs et plus exactement des fédérations et une hiérarchie. Les capteurs sont organisés en fédération en fonction de leur position géographique. Pour chaque fédération de capteurs, l'ensemble des informations brutes mesurées est envoyé au leader de la fédération. Ce dernier transfère ensuite l'ensemble de ces informations à un agent leader dont le rôle est d'interpréter les données. Le leader envoie son analyse des informations à un agent situé plus haut dans la hiérarchie qui interprète à son tour toutes les informations qu'il reçoit. Ce processus se répète jusqu'à atteindre l'agent situé le plus haut dans la hiérarchie qui possède alors une vue complète du système. La Figure 18 schématise ce type d'organisation.

(Lacomme, 2011) a mis en avant la manière dont ces notions d'organisations d'agents ont évolué. Nous sommes passés d'organisations figées et définies a posteriori à des organisations dynamiques disposant de modèles pour s'autoformer. L'objectif de ces processus d'autoformation est de chercher à optimiser les organisations dans le but d'atteindre un ou plusieurs objectifs. Par exemple, dans les travaux de (Yeung & Poon, 1999) les coalitions au sein desquelles se réalisent les échanges d'énergie entre les acteurs évoluent en permanence au cours de la simulation. Les agents sont capables de former, rejoindre ou quitter une coalition tout en cherchant à atteindre au mieux leur objectif d'achat ou de vente d'énergie.

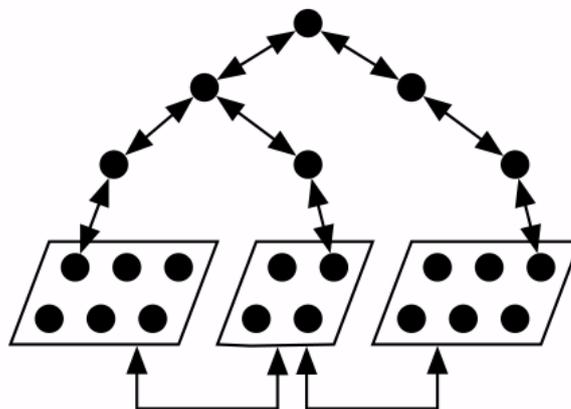


Figure 18 : Organisation d'agents sous la forme de fédérations et d'une hiérarchie (Horling & Lesser, 2005)

Or, comme précisé précédemment, l'ACC à l'échelle d'une communauté se fera dans un contexte contractuel fixe. Nous cherchons au travers de nos travaux à fournir un outil pour étudier la diversité dans la composition de différentes communautés pratiquant l'ACC et son impact sur la consommation électrique. Nous ne sommes pas dans une problématique de formation d'organisations ou de recherche de l'optimisation de la consommation électrique. Les travaux de (Horling et al., 2003) autorisent cependant à identifier une structure qui pourrait permettre la modélisation de l'ACC dans un SMA. En effet, en représentant un groupement de foyers sous la forme d'un holon il nous est possible de modéliser la couche contractuelle de l'ACC avec une organisation collective des échanges. Cette notion nous permet également d'imaginer la mise en place d'un niveau supplémentaire pour l'ACC au sein duquel ce sont des groupes de foyers qui s'échangeraient de l'énergie. Une telle structure prend alors la forme d'un holon composé de plusieurs groupes de foyers (qui seraient eux-mêmes des holons) et qui s'échangeraient de l'énergie à travers une entité tierce. Les autres structures présentées, bien qu'intéressantes, sont assez éloignées de notre problématique. Par exemple, les sociétés, les équipes et les coalitions sont caractérisées par une durée de vie courte ce qui n'est pas le cas d'une organisation pratiquant l'ACC.

### 2.5.3. Simulation multi-agent et multi-niveau : différentes échelles de représentation

Les SMA peuvent être construits et étudiés selon deux niveaux : un niveau microscopique où les agents sont considérés individuellement et un niveau macroscopique où le système est vu comme un ensemble. Les simulations basées agents multi-niveaux (MLABS) ont pour objectif de permettre la simulation et l'étude de ces différents niveaux de représentation tout en mettant en avant le lien entre eux. Cette problématique du multi-niveau dans les SMA est de plus en plus abordée dans la littérature depuis une dizaine d'années (Morvan et al., 2011).

De nombreux domaines utilisent aujourd'hui la simulation multi-niveau. (Tchappi et al., 2019) l'ont utilisé afin d'étudier le trafic routier. La modélisation proposée par les auteurs a permis d'étudier le trafic selon deux niveaux de représentation à savoir un niveau fin de simulation du trafic où beaucoup d'entités sont simulées et un niveau de représentation plus « grossier » regroupant des ensembles plus importants de véhicules. Dans ce modèle, c'est l'état du trafic qui définit le niveau de représentation c'est-à-dire qu'un trafic stationnaire sera représenté à un plus haut niveau qu'un trafic non stationnaire.

Pattern for Accurate Design of Agent Worlds in Agent Nests (PADAWAN) est un modèle proposé par (Picault & Mathieu, 2011) qui permet de réaliser des simulations multi-agents multi-niveaux à différentes échelles temporelles et spatiales. Le modèle est basé sur trois principes :

- Un agent est situé dans un environnement ;
- Un agent peut être un environnement ;
- Un environnement peut en contenir un autre.

De plus, les auteurs ont proposé de représenter l'ensemble des éléments présents dans la simulation par des agents pouvant changer de niveau et donc d'échelle.

La notion de multi-niveau est nécessaire dans nos travaux. En effet, notre système sera composé d'au moins quatre niveaux :

1. Un premier SMA simulant l'activité humaine individuelle de chacun des occupants d'un foyer ;
2. Un second niveau simulant la dynamique collective de l'activité humaine et donc le foyer et sa consommation électrique ;
3. Un troisième niveau représentant des communautés pratiquant l'ACC qui seront-elles aussi des SMA ;
4. Un quatrième niveau permettant de représenter des échanges d'énergie entre les différentes communautés.

Cependant, il est nécessaire de définir par quelle organisation SMA nous souhaitons représenter ces communautés (niveaux 3 et 4) pratiquant l'ACC.

La structure qui nous semble intéressante afin de modéliser une communauté pratiquant l'ACC est l'holarchie. En effet, une holarchie permet aisément de modéliser le troisième niveau de notre modèle, une communauté de foyer pratiquant l'ACC avec une entité centrale responsable des échanges. Dans notre situation, cette entité centrale serait également responsable des interactions avec l'extérieur de la communauté. De plus, les holons possèdent deux caractéristiques intéressantes pour nos travaux : le fait qu'ils puissent être composés d'autres holons et le fait que les interactions entre holons passent par une entité centrale. Ce sont ces deux caractéristiques qui permettent de modéliser le quatrième niveau de notre modèle. En effet, le quatrième niveau de simulation prend lui aussi la forme d'un holon composé d'autres holons (des groupes de foyers) qui pratiquent l'ACC et échangent de l'énergie à travers une entité tierce. Ce mécanisme qui consiste à créer un nouvel holon pour échanger de l'énergie entre des holons de niveaux inférieurs peut être, dans notre modèle, répété à l'infini pour échanger de l'énergie à de nombreux

niveaux. Ces niveaux vont représenter différentes échelles au sein desquelles l'énergie est échangée : un bâtiment collectif, un quartier, une ville, un ensemble de villes...

## 2.6. Synthèse

Depuis de nombreuses années, l'AC est une nouvelle façon de consommer une énergie produite localement et qui répond à des enjeux sociétaux cherchant à consommer des EnR produites localement. Des solutions techniques comme les batteries ou des systèmes de la demande ont été développées pour permettre une meilleure consommation de ces énergies en cherchant à augmenter la quantité d'énergie autoconsommée et à diminuer la dépendance au réseau électrique. Cependant, l'AC et les technologies associées présentent une limite importante, car une part de l'énergie produite est toujours réinjectée sur le réseau.

Toujours dans l'objectif de soutenir les opérations d'ACI, une nouvelle manière de consommer cette énergie produite localement apparaît sous la forme de l'ACC ou l'énergie produite localement va pouvoir être échangée entre producteurs et consommateurs à une échelle locale. Il faut comprendre que cette notion d'ACC va se réaliser sur deux niveaux : un niveau physique qui vise à réaliser les échanges d'énergie sur le réseau électrique lui-même et un niveau contractuel dont l'objectif sera de réaliser le bilan comptable des échanges d'énergie entre les foyers. Dans nos travaux, nous nous intéressons uniquement à la modélisation et à l'étude de la couche contractuelle. Plus précisément, nous visons une organisation collective des échanges où une entité centrale est responsable de réaliser le bilan comptable des échanges d'énergie en suivant un cadre contractuel. Ce type d'organisation est déjà utilisé dans des démonstrateurs réels comme Logis Cévenol en France (Curtil et al., 2020) ou le quartier de Brooklyn à New York.

Comme nous l'avons vu dans la section 1.2, il est nécessaire de comprendre l'activité humaine pour étudier son impact sur la consommation d'énergie au sein du secteur résidentiel. C'est ensuite la mise en place d'une simulation réaliste de l'activité humaine et plus précise des mécanismes impactant la consommation d'électricité qui va amener à une simulation réaliste de la consommation électrique. Cela permet de rendre compte de la diversité des modes de consommation entre différents foyers, ou encore d'étudier l'impact des processus de décisions individuelles sur la consommation d'énergie. Avec la mise en place de l'ACI, mais également de l'ACC, il devient également nécessaire de prendre en compte la manière dont ces nouvelles sources d'énergie (production individuelle, échanges...) vont impacter le comportement humain. En effet, simuler de manière réaliste l'activité dans le cadre de l'ACC et de l'ACI permet de mettre en relation la production locale d'énergie et la consommation d'énergie des foyers.

Dans nos travaux, nous proposons de modéliser un ensemble de foyers pratiquant l'ACC grâce à la simulation multi-agent. En effet, cette dernière fournit des outils pour représenter un environnement hétérogène qui sera composé d'entités différentes comme les foyers, les moyens de production ou encore les systèmes de stockage. L'utilisation d'un SMA permettra de faire interagir entre eux tous ces éléments au sein d'une organisation pour pratiquer l'ACC. De plus, grâce à la simulation multi-agent nous sommes capables de représenter différents niveaux de modélisation afin de simuler différentes échelles où pourra se pratiquer l'ACC. L'ensemble de notre modèle est organisé selon une structure holarchique. Chaque niveau où l'énergie est échangée prendra la forme d'un holon composé de foyers (pour les holons de plus bas niveau) ou de groupe de foyers qui échangent de l'énergie à travers une entité tierce et selon une organisation collective des échanges.

C'est pour cela que dans nos travaux nous avons mis en place la notion de groupement. Un groupement est un SMA (un holon) au sein duquel des foyers peuvent pratiquer l'ACC en s'échangeant de l'énergie en fonction de règles précises. L'utilisation de ce modèle de groupement permet de mettre en place de nombreuses configurations différentes pour étudier l'ACC. Ces configurations seront basées sur les règles contractuelles régissant les échanges d'énergie. Elles intégreront également les caractéristiques des foyers c'est-à-dire les individus et les bâtiments ainsi que les équipements de stockage et de production présents au sein du groupement.

# Chapitre 3 Modèle multi-niveau pour l'autoconsommation collective

3.1.	Principe général .....	87
3.2.	Grandeurs physiques et temporelles.....	91
3.2.1.	Puissance et énergie .....	91
3.2.2.	Les pas de temps de la simulation .....	92
3.3.	Formalisation du modèle .....	94
3.3.1.	Activités humaines et consommations électriques .....	94
3.3.2.	Modélisation thermique du bâtiment et consommation du chauffage.....	98
3.3.3.	Systèmes de production .....	100
3.3.4.	Systèmes de stockage .....	103
3.3.5.	Le foyer : unité de base du groupement .....	110
3.3.6.	Le groupement.....	117
3.4.	Échanges inter-groupements.....	124
3.4.1.	Principe général .....	124
3.4.2.	Formalisation des échanges inter-groupements.....	125
3.5.	Synthèse.....	127

## 3.1. Principe général

Afin de présenter le modèle que nous avons mis en place, il est nécessaire de comprendre précisément comment la gestion de l'ACC entre des foyers va s'organiser. L'ACC d'énergie est en réalité, comme nous l'avons déjà expliqué dans la section 2.4, une notion comptable qu'il faut différencier de la gestion de la charge physique de l'énergie et qui dépend du gestionnaire du réseau électrique. Cette opération comptable a pour objectif de calculer une répartition de l'énergie électrique entre des foyers. Il s'agit d'une opération qui se fait a posteriori des différentes opérations de consommation, production, stockage et déstockage d'énergie. Cependant, afin de réaliser l'opération d'allocation de l'énergie entre les foyers et qui caractérise l'ACC, il est nécessaire de connaître les résultats de ces différentes opérations. Pour pouvoir être mise en place au sein d'un groupement de foyer, l'ACC doit s'organiser sur trois niveaux différents. Le quatrième niveau qui permet la mise en place des échanges d'énergie entre des groupements de

foyers n'est pas abordé dans cette section mais est développé dans la section 3.4 de ce chapitre.

### *Les niveaux de l'activité humaine individuel et du foyer*

Tout d'abord, chaque foyer participant à l'ACC doit être capable de connaître son besoin et son surplus en énergie. Ces deux valeurs sont les résultats des opérations de consommation électrique, de production si le foyer dispose d'un système pour produire de l'énergie, de stockage et de déstockage si le foyer dispose d'un moyen adéquat. Au niveau des foyers, on retrouve donc un gestionnaire d'autoconsommation d'énergie qui a deux buts. Tout d'abord, assurer le contrôle des systèmes de stockage en indiquant la quantité d'énergie qui doit être stockée ou déstockée à chaque instant. Puis, calculer le besoin et le surplus en énergie d'un foyer à chaque pas de temps. Les agents dits foyers vont donc être caractérisés par quatre fonctions qui représentent les actions qu'ils peuvent entreprendre vis-à-vis de l'énergie électrique :

- $produce(h, t)$  : Fonction qui donne la quantité de ressource produite par un foyer  $h$  à un instant  $t$  ;
- $consume(h, t)$  : Fonction qui donne la quantité de ressource consommée par un foyer  $h$  à un instant  $t$  ;
- $charge(h, t)$  : Fonction qui donne la quantité de ressource stockée par un foyer  $h$  à un instant  $t$  ;
- $discharge(h, t)$  : Fonction qui donne la quantité de ressource déstockée par un foyer  $h$  à un instant  $t$ .

Ces différentes fonctions sont internes à chaque foyer  $h$ . Vu de l'extérieur les foyers ne sont caractérisés que par deux valeurs  $surplus(h, t)$  et  $besoin(h, t)$  qui représentent respectivement le besoin et le surplus en énergie d'un foyer  $h$  à un instant  $t$ .<sup>10</sup>

### *Le niveau du groupement de foyers*

Ensuite, une fois les différents besoins et surplus des foyers connus, c'est une entité que nous nommons le groupement qui réalise la suite des opérations comptables liées à l'ACC et plus particulièrement le calcul de l'allocation de l'énergie entre les foyers. Le

---

<sup>10</sup>Comme nous le verrons plus tard, un foyer peut, à un même instant disposer d'un besoin et d'un surplus en énergie. Par exemple, un foyer possédant un moyen de production peut décider de donner une part  $x$  % de sa production locale ( $produce$ ) au groupement, il aura alors un surplus d'énergie. Dans le même temps, si la consommation totale du foyer est supérieure à l'énergie produite localement qu'il peut autoconsommer (la part  $1-x$  % de sa production locale) alors le foyer aura également un besoin en énergie.

groupement est un agent représentant une structure au sein de laquelle les foyers se regroupent pour pratiquer l'ACC. Afin de calculer une répartition de l'énergie entre les foyers, le groupement se base sur les différents besoins et surplus en énergie calculés par ces derniers. Cependant, le groupement se base aussi sur les opérations de production, stockage et déstockage d'énergie qui ont lieu à son niveau. En effet, un groupement peut être constitué de moyens de production et de stockage dit mutualisés et qui sont donc gérés par ce dernier. Tout comme pour les foyers, on retrouve au niveau du groupement un gestionnaire d'ACC dont le rôle est de contrôler les systèmes de stockage mutualisés et de calculer une répartition de l'énergie entre les foyers en fonction des besoins et surplus de ces derniers, mais aussi des opérations de production, de stockage et de déstockage des appareils mutualisés. Ce gestionnaire va également spécifier à chaque foyer la quantité d'énergie qu'il a reçue des échanges d'énergie, des systèmes de stockage collectifs et de son fournisseur réseau. Le processus de répartition de l'énergie va suivre des règles précises, se basant sur différents critères pour assurer la répartition de l'énergie qui pourront être différents d'un groupement à un autre.

L'agent groupement est donc caractérisé par trois fonctions internes :

- $produce(group, t)$
- $charge(group, t)$
- $discharge(group, t)$

De plus, nous considérons qu'un groupement ne possède pas de consommation propre de la ressource. La consommation du groupement est donc uniquement définie par la somme des besoins et des surplus des foyers, comme nous le verrons à la section 3.3. A l'instar des foyers, un groupement est caractérisé à l'extérieur par deux valeurs  $besoin(group, t)$  et  $surplus(group, t)$  qui correspondent au besoin et au surplus en énergie d'un groupement à un instant  $t$ . Les foyers et les groupements sont donc caractérisés par la même interface, à savoir un besoin et un surplus en énergie qui sont déterminés par les gestionnaires présents au sein des deux agents et qui sont la conséquence des opérations de production, charge, décharge et consommation d'énergie.

### *Modèle informatique*

D'un point de vue informatique, la mise en place de l'ACC prend donc la forme d'un système multi-agent multi-niveaux. Les foyers correspondent aux niveaux de deux premiers niveaux de ce modèle : l'activité humaine individuelle et le foyer qui permet de simuler la composante collective de l'activité humaine ainsi que l'ACI. Dans notre modèle, le foyer est un SMA dont l'objectif est de fournir à chaque pas de temps de la simulation un besoin et un surplus en énergie au gestionnaire du groupement en fonction des opérations de production, consommation, stockage et déstockage qu'il réalise. Le

groupement quant à lui est le troisième niveau du modèle et va déterminer une répartition de l'énergie entre les foyers en fonction de leurs besoins et surplus, mais aussi en fonction des opérations de production, stockage et déstockage qui ont lieu dans le groupement.

L'objectif de notre travail est donc de concevoir un algorithme distribué d'allocation pour une ressource unique, l'énergie électrique, pour un SMA multi-niveau dans lequel chaque agent a la possibilité de produire et de stocker ou déstocker cette ressource, et ce à chaque niveau du modèle. La ressource est divisible à l'infini. Les agents du plus bas niveau expriment un besoin (leur consommation locale) qu'il faut alors satisfaire. Les différentes méthodes d'allocation envisageables, que nous verrons dans le chapitre suivant, visent alors toutes à minimiser la quantité totale de ressource qui provient de l'extérieur du SMA dans l'allocation. Mais comme dans toute allocation, on peut aussi s'intéresser à l'équité dans l'allocation de la ressource, en distinguant la part provenant de la production locale ou de l'extérieur du SMA.

Dans ce chapitre, nous présentons un modèle multi-agent multi-niveau qui gère ce dispositif. Les agents *foyers*, qui correspondent au deux premiers niveaux de modèle (l'activité humaine individuelle et le foyer) peuvent produire, stocker, déstocker et consommer de la ressource en quantité limitée et sont rassemblés au sein d'un agent *groupement* qui peut aussi produire, stocker et déstocker de l'énergie et dont le rôle va être de calculer une allocation. La Figure 19 présente le fonctionnement général du système multi-agent multi-niveau développé afin de modéliser les trois premiers niveaux de notre modèle c'est-à-dire l'activité humaine individuelle, les foyers et le groupement.

Le prochain chapitre (chapitre 4) présentera différents algorithmes d'allocation dans ce SMA.

1. On calcule :

- Les besoins et surplus de chaque agent
- L'énergie produite par le groupement
- L'énergie stockée ou déstockée des moyen de stockage

2. Synthèse de ces données par l'entité responsable de l'allocation de ressource

3. Définition de l'allocation de la ressource et notification aux différents agents de la quantité de ressource qui leur est allouée

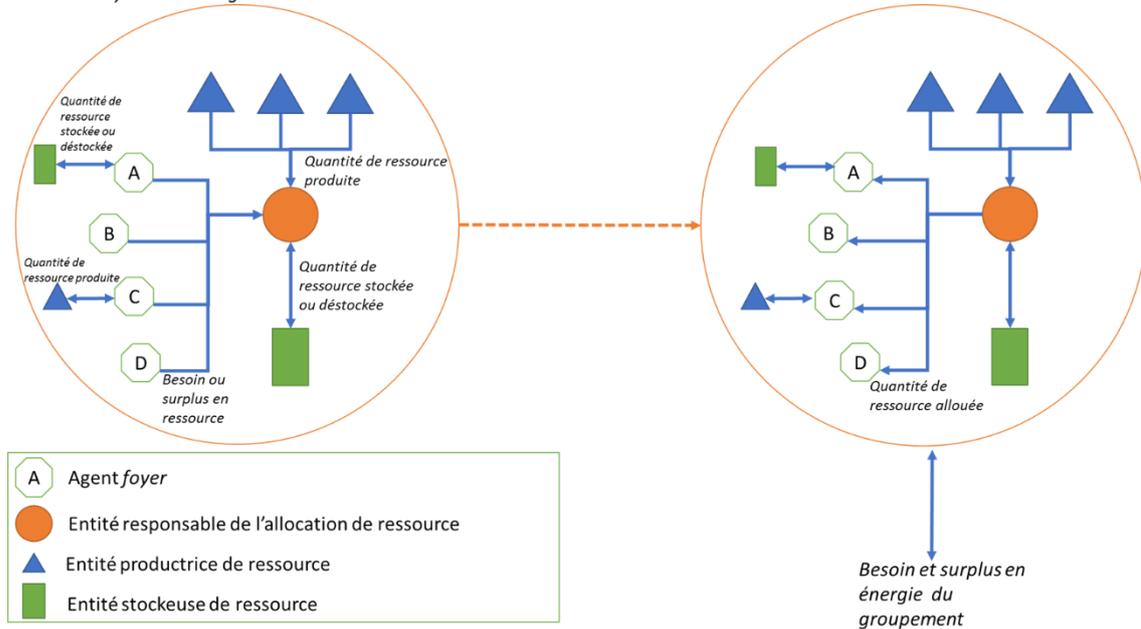


Figure 19 : Schéma du modèle multi-agent multi-niveau développé pour l'allocation de la ressource

## 3.2. Grandeurs physiques et temporelles

### 3.2.1. Puissance et énergie

La puissance est la première grandeur physique que nous utilisons, elle est exprimée en Watt. En électricité, il s'agit de la puissance instantanée associée à un appareil consommant ou produisant de l'énergie électrique, elle est définie par :

$$P(t) = U(t) * I(t) \quad (3)$$

Avec  $I(t)$  intensité (A) absorbée ou produite par l'appareil et  $U(t)$  tension électrique (V) à laquelle est soumis l'appareil.

Pour la plateforme SMACH, la consommation électrique des différents appareils d'un foyer est calculée à chaque pas de temps dit de simulation et égal à 1 mn. Ces consommations électriques correspondent à la puissance appelée par les différents appareils électriques. On considère qu'entre deux pas de temps de 1 mn, qui est le pas de temps utilisé pour simuler l'activité humaine, la puissance appelée par un appareil électrique est constante.

La seconde grandeur physique utilisée dans le modèle est l'énergie électrique exprimée en kilowatt-heure ( $kWh$ ). Le  $kWh$  est une unité d'énergie correspondant à la

consommation ou à la production de 1000  $W$  pendant une durée d'une heure. Dans le cadre de nos travaux, pour obtenir la quantité d'énergie consommée ou produite par les appareils électriques, il suffit d'intégrer la puissance instantanée sur la durée de fonctionnement :

$$E = P * t \quad (4)$$

Avec  $P$  puissance appelée ou produite en  $kW$  et  $t$  temps en heures.

La Figure 20 montre la relation entre la puissance et l'énergie électrique à chaque pas de temps de 1 mn pour la plateforme SMACH.

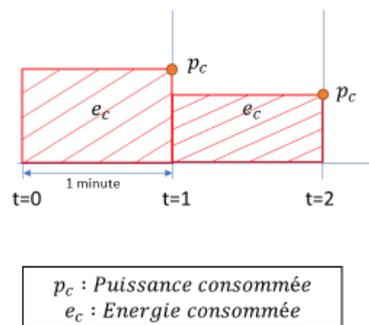


Figure 20 : Relation entre la puissance et l'énergie pour la simulation SMACH

Par la suite, nous considérons que nous travaillons uniquement avec la grandeur énergie électrique. Cependant, en réalité, certains composants du modèle utilisent la puissance électrique comme grandeur physique. C'est le cas par exemple du modèle de foyer de la plateforme SMACH dont la sortie est la puissance appelée. Dans ce cas, nous réalisons une simple intégration afin de transformer cette puissance électrique en énergie électrique.

### 3.2.2. Les pas de temps de la simulation

À l'origine, la simulation de l'activité humaine au sein de la plateforme SMACH est organisée autour de deux pas de temps :

- **Le pas de temps dit de simulation** : Il s'agit du pas de temps auquel sont simulées les activités humaines et il est égal à 1 mn ;
- **Le pas de temps dit de synchronisation** : Il s'agit du pas de temps auquel le FMU qui modélise le bâtiment échange avec le modèle du foyer i.e. les activités humaines. Dans la version précédente de SMACH, ce pas de temps était égal à 10 mn. Dans le cadre de notre étude, il est primordial que l'ACC soit comptabilisée le plus précisément possible. Cela suppose que toute action de l'utilisateur pouvant agir sur l'état thermique du foyer et donc du bâtiment (changement de consigne de la

température intérieure par exemple) soit connue du FMU modélisant le bâtiment. Il est alors nécessaire que le modèle des activités du foyer et celui du bâtiment communiquent avec le même pas de temps. Pour cette raison, les pas de temps de simulation et de synchronisation sont calés sur la même valeur de 1 mn.

Un autre pas de temps doit être considéré pour mettre en œuvre les organisations des échanges d'énergie entre les foyers et entre les groupements. Ainsi, l'ensemble des calculs liés aux échanges d'énergie sont réalisés à l'aide d'un nouveau pas de temps nommé **le pas de temps de comptage**.

Le pas de temps de comptage est un pas de temps lié à l'ACC. Le rôle de ce dernier est d'effectuer les opérations de comptage qui amèneront aux échanges d'énergie entre les foyers du groupement. Pour cela, le pas de temps de comptage utilise l'ensemble des données fournies au pas de temps de 1 mn.

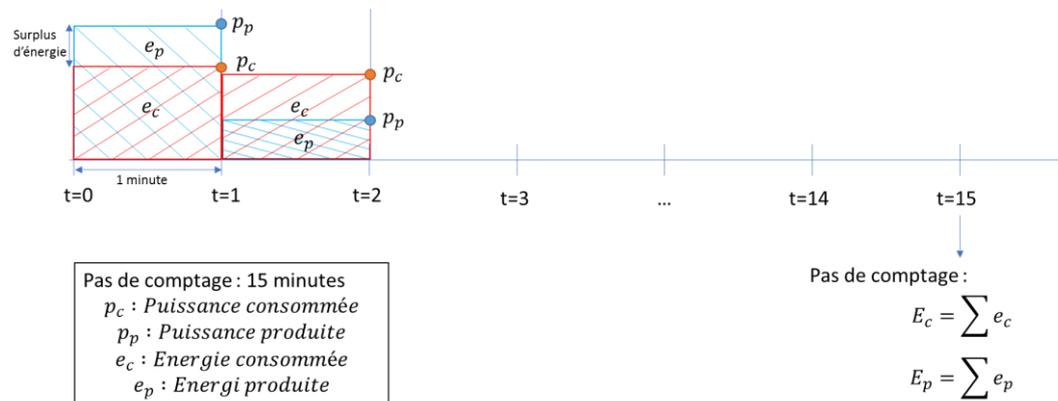


Figure 21 : Articulation entre pas de temps de simulation et pas de temps de comptage

La Figure 21 présente la relation mise en œuvre entre les pas de temps de comptage et de simulation. Sur la Figure 21, le pas de temps de simulation est égal à 1 mn et le pas de temps de comptage à 15 mn. À chaque minute, les puissances appelées et produites au sein du groupement sont calculées. À partir de ces données, il est possible de connaître le surplus ou le besoin en énergie des foyers, mais aussi du groupement. Le surplus ou encore le besoin en énergie est le bilan comptable à l'issue d'un pas de temps de comptage et qui permet de décrire ce qui fournit ou consomme de l'énergie. Ce bilan comptable est le résultat des différentes opérations de production, consommation, stockage ou déstockage d'énergie qui ont lieu lors de chaque pas de temps de simulation d'une minute.

La durée d'un pas de temps de comptage a été fixée à 15 mn car il s'agit de la valeur la plus utilisée en Europe (Küpper et al., 2018) par les compteurs communicants qui fournissent des informations sur la consommation ou la production d'électricité des foyers. Un compteur communicant est un compteur disposant d'une technologie

permettant de mesurer et de communiquer de manière détaillée et précise une consommation d'électricité, d'eau ou de gaz, éventuellement en temps réel.

Le modèle développé utilise donc trois pas de temps qui sont *le pas de temps de simulation* au cours duquel est simulée l'activité humaine ainsi que les différentes opérations de consommation, production, stockage et déstockage d'énergie, *le pas de temps de synchronisation* pour la communication entre le modèle de bâtiment et le modèle des activités humaines et *le pas de temps de comptage* pour réaliser les opérations de comptage liées aux échanges d'énergie entre les foyers du groupement. Les deux premiers sont égaux et ont pour valeur 1 mn alors que le troisième vaut 15 mn.

### 3.3. Formalisation du modèle

L'objectif de cette section est de présenter, de définir et de formaliser les différents composants du modèle développé. Il s'agit des modèles des moyens de production et de stockage d'énergie, des foyers autoconsommateurs ou non d'énergie et des groupements au sein desquels les foyers sont regroupés pour pratiquer l'ACC.

Dans la suite du document, nous notons  $t$  les pas de temps correspondants à la simulation des foyers et à la synchronisation et  $c$  le pas de temps de comptage. Nous écrivons donc par exemple  $produced(i, t) \in [0, +\infty]$  la production d'énergie d'un agent  $i$  lors d'un pas de temps de simulation  $t$  et  $besoin(i, c) \in [0, +\infty]$  le besoin en énergie d'un agent  $i$  lors d'un pas de temps de comptage  $c$ .

#### 3.3.1. Activités humaines et consommations électriques

Comme nous l'avons déjà présenté, l'activité humaine simulée au sein de la plateforme SMACH permet d'obtenir un diagramme d'activité de l'ensemble des activités réalisées par les humains d'un ménage au cours de la simulation. Ce diagramme d'activité est construit en deux temps (Reynaud, et al., 2017). Tout d'abord, chaque jour à 4 heures du matin, le modèle calcule pour chaque action que peut entreprendre un individu le nombre de réalisations pour les prochaines 24 h. Ce tirage dépend des caractéristiques d'une action comme sa fréquence de réalisation et l'écart type de cette fréquence. Pour les actions ayant une fréquence hebdomadaire comme *Laver le linge*, le nombre de réalisations prévues pour la semaine est planifié le lundi matin et à 4 h. Ce tirage permet la création pour chaque journée simulée d'un emploi du temps prévisionnel qui indique pour un individu l'ensemble des actions qu'il peut effectuer pour la journée à venir. Ensuite, pour chaque pas de temps dit de simulation, on calcule la priorité de chaque action présente dans l'emploi du temps prévisionnel d'un individu. Cette priorité est calculée en faisant la somme de différentes influences. Ces influences peuvent impacter

positivement ou négativement le niveau de priorité d'une action. L'action ayant la priorité la plus haute devient alors l'action courante.

Le calcul du niveau de priorité prend en compte les éléments suivants :

- Influence de réalisation : Elle impacte négativement le niveau de priorité d'une action qui ne peut plus être réalisée pour la journée en cours (nombre de réalisations déjà atteint) et son niveau de priorité est mis au plus bas ;
- Influence de périodes préférentielles : Elle augmente le niveau de priorité d'une action si, au temps courant, elle se situe entre ses périodes préférentielles de réalisation. Dans le cas contraire, cette influence diminue la priorité de l'action ;
- Influence de lassitude : Elle impacte négativement le niveau de priorité d'une action juste après sa réalisation sur une période fonction de la durée de l'action. Cela permet d'espacer la réalisation de deux actions identiques ;
- Influence d'engagement : Cette influence augmente fortement la priorité de l'action courante lorsqu'elle est débutée, mais décroît au cours du temps. Cela permet d'éviter l'arrêt prématuré d'une action enclenchée ;
- Influence d'urgence : Cette influence va augmenter la priorité d'une action si le délai pour sa réalisation devient trop faible ;
- Influence de tarif : Elle permet d'augmenter le niveau de priorité d'une action lorsque le prix de l'énergie est faible ou de le diminuer lorsque le prix de l'énergie est élevé ;
- Influence de collectivité : Cette influence a été créée pour inciter les occupants à réaliser des actions collectives concomitamment ou à éviter que des actions individuelles ne soient réalisées simultanément par plusieurs agents comme l'action *Prendre sa douche*, par exemple.

Lorsqu'une action est réalisée par un agent au cours de la simulation, cette dernière peut être attachée à l'utilisation d'un ou plusieurs appareils électriques. C'est cette utilisation des appareils électriques lors de chaque action entreprise par un agent qui va permettre de construire la courbe de charge d'un foyer en fonction de l'activité humaine.

Pour la plateforme SMACH, un appareil électrique est décrit par :

- Une catégorie ;
- Un lieu qui permet de rattacher l'utilisation d'un appareil électrique à une pièce du logement ;
- Ses caractéristiques ;
- Un mode de consommation ;
- Un modèle d'usage.

Ci-dessous, nous donnons la liste des appareils électriques modélisés par la plateforme SMACH :

- Chauffage électrique ;
- Chauffe-eau électrique ;
- Réfrigérateur-congélateur ;
- Télévision ;
- Console de jeux ;
- Lecteur DVD ;
- Ordinateur ;
- Sèche-linge ;
- Lave-linge ;
- Lave-vaisselle ;
- Éclairage ;
- Plaque de cuisson ;
- Micro-ondes ;
- Four ;
- Aspirateur ;
- Groupe veille.

Le groupe veille comporte des appareils dont la consommation est considérée constante tout le long de la simulation :

- VMC ;
- Radio-réveil ;
- Machine à café ;
- Décodeur ;
- Box internet ;
- Chaîne HI-FI.

Les caractéristiques d'un appareil électrique vont principalement permettre de décrire la consommation d'énergie de celui-ci. Celles-ci sont :

- Une puissance active constante en fonctionnement ;
- Une puissance active constante en veille ;
- Un cycle de puissance active ;
- Une capacité pour l'ECS ;
- Un réglage du thermostat pour l'ECS et le chauffage ;
- Une température de consigne.

Les valeurs de ces paramètres permettent d'évaluer la consommation de tous les appareils électriques et les conditions de déclenchement de certains d'entre eux.

Le modèle de consommation d'un appareil électrique va quant à lui permettre de caractériser la manière dont l'appareil consomme de l'énergie :

- Consommation constante : L'appareil peut être soit en mode veille soit en fonctionnement et consommera ainsi la puissance associée à chacun de ces deux états ;
- Cycle : L'appareil fonctionne sous forme de cycles d'une durée fixe et est associé à un profil de consommation variable au cours du cycle. À l'arrêt, l'appareil peut avoir une consommation nulle ou constante s'il dispose d'un mode veille. Par exemple, les machines à laver le linge ou les lave-vaisselles ont un modèle de consommation par cycles ;
- Thermostat qui commande la mise en route et l'arrêt de l'appareil.

Le modèle d'usage permet de faire le lien entre la mise en route et l'action associée :

- Fonctionnement forcé : L'appareil fonctionne pendant toute la durée de l'action ;
- Fonctionnement aléatoire : L'appareil ne fonctionne que durant une partie de l'action. Ce fonctionnement aléatoire est défini par des paramètres propres à chaque action ;
- Fonctionnement indirect : Seuls l'ECS et le réfrigérateur sont concernés par ce mode de fonctionnement. Le puisage de l'ECS ou l'ouverture de la porte du réfrigérateur vont déclencher la mise en marche de ces deux usages ;
- À cycles : Les appareils à cycles ne se déclenchent que lorsqu'une action spécifique a été réalisée par un occupant du foyer. Cette action implique généralement qu'un individu est en train de préparer la mise en route de l'appareil électrique à cycles. Par exemple, l'action *Laver Le Linge* indique qu'un occupant du foyer est en train de préparer une lessive. Une fois cette activité terminée, la machine à laver peut alors se mettre en marche soit immédiatement soit plus tard en fonction de la programmation de l'appareil. L'occupant peut alors effectuer d'autres activités pendant que la machine à laver fonctionne ;
- Éclairage : Le déclenchement de l'éclairage est contrôlé par le besoin en lumière artificielle. Ce besoin en lumière artificielle est calculé pour chaque occupant du foyer en fonction du flux solaire diffus. Ainsi, toute activité entreprise par un humain au sein du foyer à l'exception de l'action *Dormir* peut entraîner l'utilisation de l'éclairage artificiel en cas de besoin de lumière. En sortant d'une pièce vide et éclairée, chaque occupant possède une probabilité donnée d'éteindre l'éclairage. Si le foyer est vide ou si l'ensemble des habitants dorment, l'ensemble des lumières du foyer sont éteintes ;
- Thermostat : La mise en route de l'appareil est contrôlée par un thermostat. C'est le cas de l'ECS, du chauffage électrique et du réfrigérateur. Les occupants ont la possibilité de modifier la température de consigne de ces appareils.

La plateforme SMACH permet de simuler une réelle interaction entre les activités humaines et les appareils électriques. Ces derniers présentent des caractéristiques qui permettent de simuler la diversité de leur mode de fonctionnement. Ainsi, la plateforme SMACH est capable d'évaluer de manière très précise les courbes de charge des foyers. L'ensemble des usages des appareils électriques, à l'exception des veilles, est lié à l'activité humaine ou est influencé par cette dernière. Ainsi, la variabilité dans le comportement des occupants simulée par la plateforme SMACH est répercutée sur la consommation électrique. Il est à noter que la consommation électrique du chauffage est également liée à la modélisation thermique du bâtiment que nous présentons dans la section suivante.

### 3.3.2. Modélisation thermique du bâtiment et consommation du chauffage

Afin de calculer de manière précise et réaliste la température et la consommation de chauffage d'un bâtiment, la plateforme SMACH exploite des modèles thermiques dynamiques des bâtiments.

À ce jour, la plateforme SMACH utilise deux modèles de bâtiment issus d'une typologie établie par le département TREE d'EDF qui sont la **Maison individuelle Mozart** et l'**appartement Matisse** dont les plans sont présentés à la Figure 22. Ces deux typologies définissent les paramètres des bâtiments qui seront modélisés :

- **Maison individuelle Mozart :**

- Surface : 99,8 m<sup>2</sup> ;
- 3 chambres ;
- 1 salon ;
- 1 cuisine ;
- 1 une salle de bain ;
- 1 couloir non chauffé.

- **Appartement Matisse :**

- Surface : 65,8m<sup>2</sup> ;
- 2 chambres ;
- 1 salon ;
- 1 cuisine ;
- 1 salle de bain ;
- 1 couloir non chauffé.

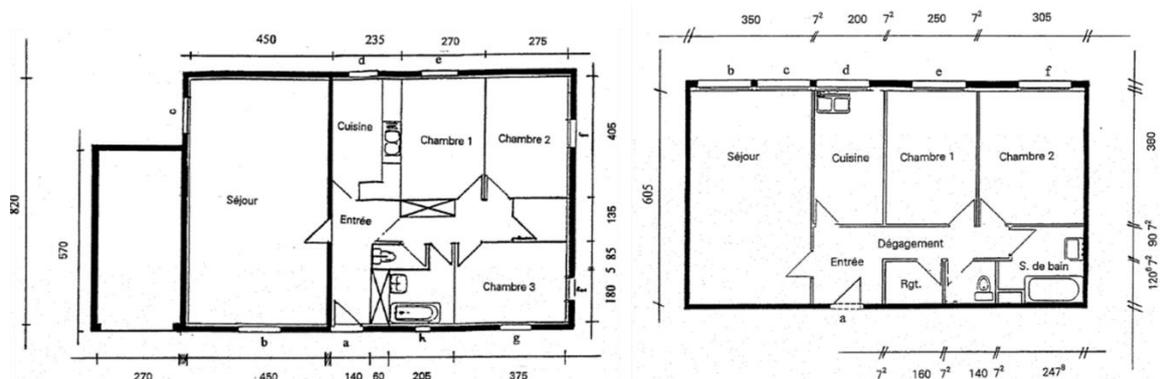


Figure 22 : Plans de la maison individuelle Mozart (à gauche) et de l'appartement Matisse (à droite)

À partir de ces deux bâtiments, des modèles thermiques ont été créés dans l'environnement Modelica et grâce à la bibliothèque BuildSysPro développée par EDF R&D (TREE). Ces modèles sont multizones c'est-à-dire que le calcul de la température est effectué pour chaque pièce du logement. Plusieurs modèles, pour chacun des bâtiments, ont été générés afin de correspondre aux différents niveaux de la performance thermique associée aux Réglementations Thermiques (RT) suivantes :

- Avant 1974 ;
- RT 1974 ;
- RT 1982 ;
- RT 1989 ;
- RT 2000 H1 H2 ;
- RT 2000 H3 ;
- RT 2005 (label BBC) ;
- RT 2012.

Afin de modéliser les systèmes de chauffage, chaque pièce chauffée du logement est équipée d'un chauffage à effet Joule dit « idéal » c'est-à-dire avec une régulation parfaite. Ainsi, la puissance est calculée de manière à ce que la température intérieure de chaque pièce soit égale à la température de consigne correspondante.

Les principales entrées du modèle sont :

- Un fichier météorologique ;
- La commande d'ouverture des fenêtres ;
- Les températures de consigne pour chaque pièce du logement ;
- Les apports internes de chaleur liés à la présence des occupants.

À chaque pas de temps de synchronisation, le modèle du bâtiment évalue :

- La température intérieure de chaque pièce du foyer si la zone thermique est en évolution libre ;
- La puissance appelée par chaque appareil de chauffage si la température intérieure de la zone thermique est contrôlée.

La Figure 23 présente schématiquement le modèle de bâtiment utilisé dans la plateforme SMACH (Plessis et al., 2014).



Figure 23 : Schéma-bloc du modèle de bâtiment

Afin de pouvoir évaluer des consommations de chauffage pour des bâtiments ayant une surface habitable différente des bâtiments Mozart ou Matisse, une valeur corrigée de la puissance appelée par les systèmes de chauffage est calculée grâce à l'Équation (5) :

$$Puissance_{corrigée} = P_{modèle} * \frac{S_{SMACH}}{S_{modèle}} \quad (5)$$

Avec  $P_{modèle}$  la puissance calculée par le modèle thermique,  $S_{modèle}$  la surface du logement simulé par le modèle thermique et  $S_{SMACH}$  la surface du logement par la plateforme SMACH.

### 3.3.3. Systèmes de production

Afin de modéliser l'AC, il est nécessaire d'ajouter des moyens de production locaux d'énergie. Dans nos travaux, nous considérons deux types de production locale d'énergie :

- Les moyens de production d'énergie individuels : Il s'agit de moyens de production directement installés au niveau d'un foyer et qui fournissent une énergie qui peut alors être consommée par ce dernier ;
- Les moyens de production d'énergie collectifs : Il s'agit de moyens de production installés au niveau d'un groupement. L'ensemble de l'énergie qu'ils produisent est alors échangée entre les foyers de ce groupement.

Il existe aujourd'hui différents moyens pour produire de l'énergie électrique dite renouvelable : panneaux PV, éoliennes... Pour notre part, nous avons décidé que la production locale d'énergie serait assurée par des panneaux PV, car il s'agit d'une technologie présentant un essor important pour produire de l'électricité d'origine renouvelable. Un autre moyen de production pourrait évidemment être intégré si nécessaire.

Dans le modèle, les panneaux PV sont modélisés à partir du langage Modelica et plus particulièrement grâce à la bibliothèque BuildSysPro développée par EDF (Plessis et al., 2014). Ce choix a été motivé par le fait que la modélisation thermique du bâtiment est déjà basée sur cette bibliothèque. Comme pour le modèle du bâtiment, le modèle de panneaux PV est placé dans un composant exécutable FMU ce qui permet sa co-simulation avec le modèle du bâtiment et celui des foyers.

Le modèle simule des panneaux PV de type silicium cristallin. Il permet de calculer la température du panneau PV, la puissance électrique instantanée et la production PV cumulée. Les principales composantes du modèle des panneaux PV sont :

- Les échanges thermiques entre le sol et l'arrière du panneau ;
- Les échanges thermiques entre le ciel et l'environnement ;

- Le rayonnement solaire reçu par le panneau PV.

Le modèle calcule également l'efficacité du panneau PV en fonction de la température de ses cellules PV.

Le modèle de panneaux PV est caractérisé par les paramètres suivants :

- *surface* : Surface du panneau PV ( $m^2$ ) ;
- *inclinaison* : Inclinaison du panneau PV ( $^\circ$ ) ;
- *azimut* : Orientation du panneau PV ( $^\circ$ ).

Les principales entrées du modèle sont :

- $T_{ext}$  : Température de l'air extérieur ( $^\circ C$ ) ;
- $T_{ciel}$  : Température du ciel ( $^\circ C$ ) ;
- $V$  : Direction et vitesse du vent ( $m/s$ ) ;
- $G$  : Flux solaires reçus par le panneau ( $W/m^2$ ) ;
- *meteo* : Fichier météorologique.

Les sorties du modèle sont :

- $P_{elec}$  : Puissance électrique du panneau PV ( $W$ )
- $prod_{kWh}$  : Énergie électrique cumulée du panneau PV ( $kWh$ )
- $T_{cellule}$  : Température des cellules ( $K$ )

La Figure 24 présente schématiquement le modèle des panneaux PV.



Figure 24 : Schéma-bloc du modèle de panneaux PV

La puissance électrique produite par le panneau PV  $j$  au pas de temps de simulation  $t$   $P_{elec}(j, t)$  s'écrit (Luque & Hegedus, 2003) :

$$P_{elec}(j, t) = Fluxsolaire(j, t) * Surface(j) * Rendement_{FctTemperature}(j, t) \quad (6)$$

Avec  $Fluxsolaire(j, t)$  rayonnement solaire reçu par le panneau PV  $j$ ,  $Surface$  surface du panneau PV  $j$  et  $Rendement_{FctTemperature}(j, t)$  rendement du panneau PV  $j$  au pas de temps  $t$ .

Pour le calcul du rayonnement solaire  $Fluxsolaire(j, t)$  reçu par le panneau PV nous utilisons le modèle analytique proposé par (Martin & Ruiz, 2001) :

$$Flux_{solaire}(j, t) = Flux_{Direct}(t) * \cos(i) * Facteur_{Direct} + Flux_{Diffus0}(t) * \frac{1 + \cos(\beta)}{2} * Facteur_{Diffus} + Flux_{Diffusreflechi}(t) * \frac{1 - \cos(\beta)}{2} * Facteur_{Diffusreflechi} \quad (7)$$

Avec :

$Flux_{Direct}(t)$  : Rayonnement solaire direct

$i$  : Angle d'incidence entre le rayonnement solaire direct et le panneau PV

$Flux_{Diffus0}(t)$  : Rayonnement solaire diffus de la voûte céleste sur une surface horizontale

$Flux_{Diffusreflechi}(t)$  : Flux solaire diffus réfléchi par le sol

$\beta$  : Angle du panneau par rapport à l'horizontale

Les trois facteurs intervenants dans l'équation (7) pondèrent les flux solaires afin de tenir compte des pertes angulaires et de l'encrassement du panneau.

Ils s'écrivent (Martin & Ruiz, 2001) :

$$Facteur_{Direct} = \frac{T_{Dirt}}{T_{clean}} * \left( 1 - \frac{e^{-\frac{\cos(i)}{a_r}} - e^{-\frac{1}{a_r}}}{1 - e^{-\frac{1}{a_r}}} \right) \quad (8)$$

$\frac{T_{Dirt}}{T_{clean}}$  est la transmittance relative du panneau PV en fonction de sa propreté et  $a_r$  est un coefficient caractérisant les pertes spectrales du panneau PV.

$$Facteur_{Diffus} = 1 - e^{-\frac{1}{a_r} * \left( c_1 * \left( \sin(\beta) + \frac{\pi - \frac{\beta * \pi}{180} - \sin(\beta)}{1 + \cos(\beta)} \right) + c_2 * \left( \sin(\beta) + \frac{\pi - \frac{\beta * \pi}{180} - \sin(\beta)}{1 + \cos(\beta)} \right)^2 \right)} \quad (9)$$

$$Facteur_{Diffusreflechi} = 1 - e^{-\frac{1}{a_r} * \left( c_1 * \left( \sin(\beta) + \frac{\frac{\beta * \pi}{180} - \sin(\beta)}{1 - \cos(\beta)} \right) + c_2 * \left( \sin(\beta) + \frac{\frac{\beta * \pi}{180} - \sin(\beta)}{1 - \cos(\beta)} \right)^2 \right)} \quad (10)$$

Avec  $c_1 = \frac{4}{3\pi}$  et  $c_2$  paramètres empiriques utilisés pour la régression entre les résultats expérimentaux et la fonction analytique proposée par les auteurs.

Le rendement du panneau PV  $Rendement_{FctTemperature}(j, t)$  est évalué en prenant en compte la variation de température des cellules photovoltaïques :

$$Rendement_{FctTemperature}(j, t) = \eta_{CS} + \mu_t * (T_{cellulereelle}(j, t) - T_{celluleCS}) \quad (11)$$

Avec  $\eta_{CS}$  rendement du panneau PV  $j$  dans les conditions standard de température,  $\mu_t$  coefficient de variation du rendement des cellules photovoltaïques due à la température,  $T_{cellulereelle}(j, t)$  température du panneau PV  $j$  au pas de temps de simulation  $t$  et  $T_{celluleCS}$  température du panneau pour les conditions standards.

Pour les valeurs des paramètres de l'équation (11), nous utilisons les valeurs par défaut de la bibliothèque BuildSysPro :

- $\eta_{CS} = 0,15$
- $\mu_t = -0,5 \%$
- $T_{celluleCS} = 298,15K = 25^\circ C$

On note  $e_{produced}(j, t) \in [0, +\infty]$  l'énergie électrique produite par les panneaux PV  $j$  au temps  $t$ . L'équation (12) permet de calculer l'énergie électrique produite par les panneaux PV :

$$e_{produced}(j, t) = \frac{P_{elec} * \frac{1}{60}}{1000} \quad (12)$$

### 3.3.4. Systèmes de stockage

Les systèmes de stockage sont des éléments importants à modéliser dans le cadre de l'AC et a fortiori de l'ACC. Leur rôle est de stocker ou de fournir de l'énergie en fonction des surplus et des besoins. À l'instar des moyens de production d'énergie, nous considérons deux types de systèmes de stockage d'énergie :

- Systèmes de stockage d'énergie individuels : Il s'agit de systèmes de stockage qui sont positionnés au niveau d'un foyer. Le foyer peut alors directement y stocker ou y déstocker de l'énergie ;
- Systèmes de stockage d'énergie collectifs : Il s'agit de systèmes de stockage qui sont situés au niveau d'un groupement et qui sont gérés par ce dernier pour les opérations de stockage et de déstockage. Un seul système de stockage collectif par groupement est autorisé.

Dans nos travaux, nous modélisons les systèmes de stockage qu'ils soient individuels ou collectifs grâce à un modèle de batterie avec une charge ou une décharge de type linéaire. De tels modèles ont déjà été utilisés dans la littérature pour étudier l'impact de systèmes de stockage dans le cadre de l'autoconsommation d'énergie (Munkhammar et al., 2013; Weniger et al., 2014).

### *Modes de fonctionnement des batteries*

Les batteries que nous modélisons sont caractérisées par des modes de fonctionnement. Ces modes de fonctionnement vont déterminer pour une batterie son comportement vis-à-vis de la charge et de la décharge d'énergie à chaque pas de temps de simulation  $t$ . Nous définissons deux familles de modes de fonctionnement à savoir les modes de fonctionnement souples et les modes de fonctionnement forcés. À chaque pas de temps de simulation, une batterie peut recevoir une demande pour charger ou décharger de l'énergie de la part de l'agent (foyer ou groupement) auquel elle est rattachée. En mode de fonctionnement souple, une batterie ne va charger ou décharger que la quantité d'énergie demandée par l'agent. Cette quantité d'énergie correspond à un surplus ou à un besoin et est calculée pour chaque pas de temps de simulation  $t$ . En mode de fonctionnement forcé, une batterie va charger ou décharger le maximum d'énergie possible en se basant sur la quantité maximale d'énergie qu'elle peut charger ou décharger lors d'un pas de temps de comptage  $c$ . Pour ce mode de fonctionnement, la batterie ne tient donc pas compte de la demande de charge ou de décharge qui lui est fournie et peut être amenée à charger ou décharger plus d'énergie que cette demande.

Nous définissons cinq modes de fonctionnement possibles pour une batterie :

- La charge souple : Pour ce mode de fonctionnement, une batterie ne va charger que le surplus d'énergie de l'agent (foyer ou groupement) dont elle dépend. Dans cette situation, si par exemple un foyer produit plus d'énergie qu'il n'en consomme, la différence entre la production et la consommation est stockée dans la batterie. Si le résultat de cette différence est supérieur à ce que la batterie peut stocker sur un pas de temps de simulation alors, ce que la batterie ne peut pas stocker est considéré comme un surplus d'énergie pour le foyer ;
- La décharge souple : Pour ce mode de fonctionnement, une batterie ne va décharger de l'énergie qu'en fonction du besoin en énergie de l'agent dont elle dépend (foyer ou groupement). Dans cette situation, si par exemple un foyer produit moins d'énergie qu'il n'en consomme, alors la différence entre la consommation et la production sera déchargée de la batterie. Si cette différence est supérieure à ce que la batterie peut décharger sur un pas de comptage, alors le foyer aura un besoin en énergie ;
- La charge-décharge souple : Pour ce mode de fonctionnement, une batterie va pouvoir pour chaque pas de temps de simulation charger ou décharger de l'énergie en fonction du surplus ou du besoin de l'agent dont elle dépend. Il est à noter qu'à chaque pas de temps de simulation la batterie n'effectue qu'une seule opération de décharge ou de charge. L'opération effectuée par la batterie dépend de la différence entre la production et la consommation du foyer. Si le foyer

produit plus d'énergie qu'il n'en consomme alors la batterie charge de l'énergie. Si le foyer consomme plus d'énergie qu'il n'en produit alors la batterie décharge de l'énergie ;

- La charge forcée : Pour ce mode de fonctionnement, une batterie va charger le maximum d'énergie possible en fonction de la quantité maximale d'énergie qu'elle peut charger durant un pas de temps de comptage. Dans ce mode de fonctionnement, la batterie stocke en priorité le surplus d'énergie d'un foyer sur un pas de temps de simulation. Si, pendant ce pas de temps de simulation, le surplus du foyer est inférieur à la capacité de charge de la batterie pour un pas de temps de simulation, alors cette dernière va consommer de l'énergie depuis l'extérieur du foyer ;
- La décharge forcée : Pour ce mode de fonctionnement, une batterie va décharger le maximum d'énergie possible en fonction de la quantité maximale d'énergie qu'elle peut décharger durant un pas de temps de comptage. Dans ce mode de fonctionnement, la batterie fournit en priorité de l'énergie au foyer en fonction de son besoin sur un pas de temps de simulation. Si pendant ce pas de temps de simulation le besoin en énergie est inférieur à la quantité d'énergie déchargée par la batterie, alors ce que le foyer ne peut pas consommer est considéré comme un surplus d'énergie du foyer qui va être échangé dans le groupement ou revendu au fournisseur d'électricité.

Il n'est pas possible pour une batterie d'être à la fois en mode de charge et de décharge forcée. En effet, si une batterie est en mode de charge forcée, elle va chercher à charger le plus d'énergie possible lors de chaque pas de temps de simulation. Cela rend donc impossible la décharge d'énergie. Le mode de fonctionnement d'une batterie est modifié uniquement à chaque pas de temps de comptage et détermine son fonctionnement pour le pas de temps de comptage suivant.

### *Batterie et pas de temps*

Notre modèle de batterie fonctionne donc sur deux pas de temps :

1. Lors du pas de temps de comptage, la batterie va se placer dans un des modes de fonctionnement que nous venons de définir. Elle ne peut pas changer de mode jusqu'au pas de temps de comptage suivant. La batterie fixe également lors du pas de temps de comptage son état de charge minimum et son état de charge maximum, elle ne pourra pas se charger ou se décharger au-delà de ses valeurs au cours du prochain pas de temps de comptage. Cela définit les bornes des états de la batterie à la fin d'un pas de temps de comptage. Ces bornes peuvent être définies par les habitants qui peuvent contrôler les limites de l'état de charge de

leur batterie.

Le modèle de batterie va ensuite calculer les quantités maximales d'énergie pouvant être réellement déchargées (ou chargées) durant ce pas de temps de comptage. Ce calcul dépend de la puissance maximale de la batterie, c.-à-d. de la quantité de puissance maximale qu'une batterie peut charger ou décharger à chaque instant et de l'état de charge courant de la batterie ;

2. Pour chaque pas de temps de simulation, le modèle de batterie calcule la quantité d'énergie stockée ou déstockée et actualise l'état de charge de la batterie. Ce calcul dépend du mode de fonctionnement de la batterie, mais aussi de la demande de charge ou de décharge de l'agent auquel est rattachée la batterie. Nous rappelons que pour un pas de temps de simulation une batterie ne peut effectuer qu'une opération de charge ou décharge.

### *Paramètres du modèle*

Les paramètres physiques du modèle de batterie sont :

- *capacity* : Capacité de la batterie en *kWh*. Elle représente la quantité maximale d'énergie que la batterie peut stocker ;
- *maxPower* : Puissance maximale de la batterie en *kW*.

À partir de ces paramètres, nous pouvons calculer la valeur de *maxEnergy* qui est la quantité d'énergie maximale en *kWh* qu'une batterie est capable de charger ou de décharger sur un pas de temps de comptage *c*. Elle est évaluée par l'Équation (13) :

$$maxEnergy = maxPower * \frac{duréePasComptage}{60} \quad (13)$$

Avec *duréePasComptage* la durée d'un pas de temps de comptage *c* (mn).

Afin d'exprimer le mode de fonctionnement dans lequel se trouve la batterie, nous utilisons trois variables booléennes internes au modèle :

- *canCharged* : Ce paramètre indique qu'une batterie va pouvoir charger de l'énergie au prochain pas de temps de comptage ;
- *canDischarged* : Ce paramètre indique qu'une batterie va pouvoir décharger de l'énergie au prochain pas de temps de comptage ;
- *isForcedMode* : Ce paramètre indique si une batterie est en mode forcée au prochain pas de temps de comptage.

En fonction des valeurs de ces différents booléens, la batterie va se retrouver dans un mode de fonctionnement précis pour un pas de temps de comptage. Le Tableau 1 présente les différentes combinaisons possibles de valeurs, ainsi que le mode de

fonctionnement correspondant. Dans ce tableau, le chiffre 0 indique un booléen ayant la valeur *False* tandis que le chiffre 1 indique un booléen ayant la valeur *True*.

<i>canCharged</i>	0	0	0	0	1	1	1	1
<i>canDischarged</i>	0	0	1	1	0	0	1	1
<i>forcedMode</i>	0	1	0	1	0	1	0	1
Mode obtenu	<i>off</i>		<i>Décharge souple</i>	<i>Décharge forcée</i>	<i>Charge souple</i>	<i>Charge forcée</i>	<i>Charge- décharge souple</i>	N/A

Tableau 1 : Valeur des variables booléennes et mode de fonctionnement des batteries

Il faut noter que lorsque les booléens *canCharged* et *canDischarged* sont tous les deux à *False* la batterie est considérée en mode *off* c'est-à-dire qu'elle ne déchargera ni ne chargera de l'énergie. Il est également impossible d'avoir à la fois les trois booléens à *True*, car cela signifierait que la batterie est à la fois en mode de décharge forcée et de charge forcée ce qui est impossible.

Enfin, nous utilisons deux variables, dont la valeur est fixée aussi à chaque pas de temps de comptage, qui déterminent la charge autorisée pour la batterie :

- $SoC_{min}$  : Pourcentage minimal de décharge autorisé pour la batterie :
- $SoC_{max}$  : Pourcentage maximal de charge autorisé pour la batterie.

L'ensemble des variables internes de la batterie, à l'exception de *maxEnergy*, permettent de définir le comportement du système de stockage en termes de charge et de décharge d'énergie. Ce comportement est fixé pour la durée d'un pas de temps de comptage et peut être modifié par une prise de décision d'un habitant du foyer. Cette notion de prise de décision sur le comportement des systèmes de stockage est présentée dans le chapitre 5.

#### *Entrées et sorties du modèle de batterie*

Lors de chaque pas de temps de simulation, la batterie va calculer la quantité d'énergie qu'elle a chargée ou déchargée et met à jour son état de charge. Pour réaliser ses opérations, la batterie prend en entrée les paramètres suivants :

- $SoC(t - 1)$  : État de charge de la batterie au pas de temps de simulation précédent (t-1) exprimé en pourcentage de sa capacité maximale avec  $0\% \leq Soc(t) \leq 100\%$  ;
- $e_{storage}(t)$  : Quantité d'énergie en *kWh* qui correspond à un surplus ou à un besoin d'un agent (foyer ou groupement) lors du pas de temps de simulation courant. Pour un agent, cette valeur est la différence entre une production et une consommation d'énergie :

$$e_{storage}(t) = e_{produced}(t) - e_{consumed}(t) \quad (14)$$

Toute ou partie de cette valeur peut être utilisée par la batterie pour stocker ou déstocker de l'énergie en fonction de son mode de fonctionnement pour le pas de temps de comptage courant. Si  $e_{storage}(t)$  est positif, cela signifie que l'agent dispose d'un surplus d'énergie qui peut être stocké dans la batterie. Au contraire, si  $e_{storage}(t)$  est négatif cela signifie que l'agent est en manque d'énergie et que la batterie peut lui en fournir. Par exemple, prenons un foyer produisant  $3 kWh$  d'énergie et consommant  $4 kWh$  d'énergie lors d'un pas de temps simulation. Ainsi, ce foyer a un besoin en énergie de  $1 kWh$ . On a alors  $e_{storage}(t) = -1 kWh$  ce qui signifie que l'on souhaite déstocker  $1 kWh$  d'énergie du système de stockage du foyer. De même, prenons un groupement au sein duquel la totalité de l'énergie produite est égale à  $5 kWh$ , et où le besoin de l'ensemble des foyers est égal à  $3 kWh$ . On a donc un surplus d'énergie égal à  $+2 kWh$  au sein du groupement. On va donc poser, pour le groupement,  $e_{storage} = 2 kWh$ . Cela signifie que l'on souhaite stocker  $2 kWh$  d'énergie dans le système de stockage collectif.

La sortie du modèle est :

- $SoC(t)$  : État de charge de la batterie à la suite d'une opération de charge ou de décharge ayant eu lieu au cours du pas de temps de simulation  $t$ .

#### *Calcul de l'état de la batterie*

Pour calculer la valeur de  $SoC(t)$  en fonction de  $SoC(t - 1)$  et de  $e_{storage}(t)$ , le modèle utilise les paramètres définis au pas de temps de comptage. Nous présentons d'abord le calcul des variables intermédiaires résultant de ces paramètres qui sont donc valables pour tout le pas de temps de comptage. Ensuite, nous présentons le calcul effectué à chaque pas de temps de simulation.

#### *Pas de temps de comptage et quantités maximales d'énergie chargeable et déchargeable*

Comme nous l'avons déjà spécifié, à chaque de temps de comptage, le modèle de batterie calcule les quantités minimale et maximale d'énergie qu'elle peut charger ou décharger pour le pas de temps de comptage suivant. Pour cela, le modèle de batterie a besoin des entrées suivantes :

- $SoC_{max}$
- $SoC_{min}$
- $maxEnergy$

À partir de ces données, le modèle de batterie fournit en sortie les valeurs suivantes :

- $maxEnergyDischarged(c)$  : Quantité d'énergie maximale en  $kWh$  qu'une batterie peut déstocker au cours d'un pas de temps de comptage  $c$  ;

- $maxEnergyCharged(c)$  : Quantité d'énergie maximale en  $kWh$  qu'une batterie peut stocker durant un pas de temps de comptage  $c$ .

Les équations (15) et (16) donnent les expressions de  $maxEnergyCharged(c)$  et  $maxEnergyDischarged(c)$  respectivement :

$$maxEnergyCharged(c) = \begin{cases} 0 & \text{si } SoC(t) \geq SoC_{max} \\ maxEnergy & \text{si } capacity * (SoC_{max} - SoC(t)) \geq maxEnergy \\ capacity * (SoC_{max} - SoC(t)) & \text{sinon} \end{cases} \quad (15)$$

$$maxEnergyDischarged(c) = \begin{cases} 0 & \text{si } SoC(t) \leq SoC_{min} \\ maxEnergy & \text{si } ((SoC(t) - SoC_{min}) * capacity) \geq maxEnergy \\ (SoC(t) - SoC_{min}) * capacity & \text{sinon} \end{cases} \quad (16)$$

#### *Pas de temps de simulation et calcul de l'état de charge*

Pour évaluer le nouvel état de charge de la batterie, nous calculons la quantité d'énergie  $e_{realStorage}(t)$  chargée ou déchargée durant le pas de temps de simulation en accord avec le mode de fonctionnement et les valeurs au pas de temps de simulation précédent.

Suivant les conditions,  $e_{realStorage}$  est évaluée par :

- Pour une opération de stockage :

- Si la batterie est en mode de charge souple :

$$e_{realStorage} = \max(|e_{storage}(t)|, \frac{maxEnergyCharged(c)}{duréePasComptage}) \quad (17)$$

- Si la batterie est en mode de charge forcée :

$$e_{realStorage} = \frac{maxEnergyCharged(c)}{duréePasComptage} \quad (18)$$

- Pour une opération de déstockage :

- Si la batterie est en mode de décharge souple :

$$e_{realStorage} = -\max(|e_{storage}(t)|, \frac{maxEnergyDischarged(c)}{duréePasComptage}) \quad (19)$$

- Si la batterie est en mode de décharge forcée :

$$e_{realStorage} = -\frac{maxEnergyDischarged(c)}{duréePasComptage} \quad (20)$$

Enfin, l'équation (21) est utilisée pour calculer le nouvel état de charge de la batterie :

$$SoC(t) = \frac{([SoC(t-1) * capacity] + e_{realStorage}(t))}{capacity} \quad (21)$$

La Figure 25 donne un schéma du modèle de batterie :

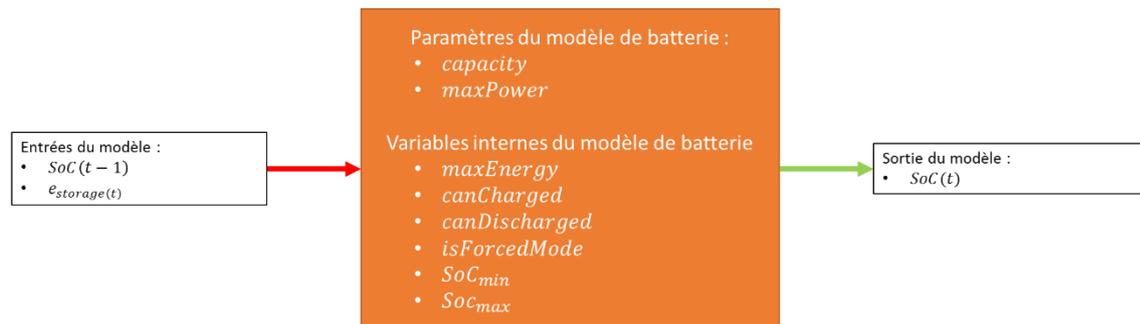


Figure 25 : Schéma-bloc du modèle de batterie

### Synthèse

Le modèle de batterie que nous utilisons permet de définir l'état de charge à chaque pas de temps de simulation. La notion de mode de fonctionnement permet de définir pour un pas de temps de comptage le comportement d'une batterie sur les opérations de charge et de décharge d'énergie qu'elle peut effectuer. Nous avons défini un ensemble de trois booléens qui permettent de modéliser le mode de fonctionnement. Ces derniers sont définis à chaque pas de temps de comptage à la suite d'une décision prise par un humain. Le modèle de décision qui modifie ces paramètres est présenté au Chapitre 5.

La modélisation des systèmes de stockage que nous mettons en place ne permet pas dans son état actuel de modéliser l'utilisation de véhicules électriques en tant que batterie individuelle pour un foyer. Néanmoins, afin de prendre en compte ce type de batterie, il faudrait que le modèle considère :

- La possibilité pour une batterie d'être présente ou absente d'un foyer. Une batterie absente d'un foyer ne pourrait plus charger ou décharger de l'énergie ;
- La possibilité de calculer un nouvel état de charge de la batterie à chaque absence en fonction de la distance parcourue avec le véhicule électrique.

À l'heure actuelle, ces travaux sont réalisés par EDF R&D, mais n'entrent pas dans le cadre de notre problématique.

### 3.3.5. Le foyer : unité de base du groupement

#### Présentation du modèle de foyer autoconsommateur d'énergie

Les foyers sont simulés grâce à la plateforme SMACH. Ces derniers représentent à la fois le premier et le second niveau de notre modèle et sont capables de consommer, produire, stocker ou déstocker l'énergie électrique. Afin de permettre aux foyers de la plateforme SMACH de pratiquer l'AC, nous avons ajouté trois éléments au modèle original de foyer de SMACH. Il s'agit d'un système de production individuel d'électricité à savoir des

panneaux PV, d'un système de stockage individuel et d'un gestionnaire d'autoconsommation d'énergie.

Le système de production individuel a pour objectif de produire de l'énergie pour le foyer auquel il est rattaché. Le foyer peut ensuite autoconsommer cette énergie pour alimenter ses différents appareils électriques. Les foyers peuvent également être équipés d'un système de stockage individuel sous la forme d'une batterie. Le rôle de la batterie est de permettre au foyer de stocker de l'énergie pour la réutiliser ultérieurement. Ces systèmes de stockage d'énergie individuels ne sont pas visibles par le groupement. Ainsi, si une batterie a besoin d'une source d'énergie extérieure au foyer pour se charger, la consommation d'électricité de cette dernière est ajoutée à la consommation totale du foyer vue de l'extérieur. Il ne sera alors pas possible de distinguer la consommation électrique de la batterie d'un autre appareil électrique consommant de l'énergie.

Afin de pouvoir gérer l'ensemble de l'énergie produite, consommée, stockée ou déstockée par un foyer, nous avons développé le modèle d'une nouvelle entité au sein des foyers nommée **module d'autoconsommation**. Il s'agit du gestionnaire d'autoconsommation d'énergie évoqué dans la section 3.1 et qui équipe chaque foyer pratiquant l'ACC. Le rôle de ce module est de faire le bilan à chaque pas de temps de simulation de l'ensemble des opérations liées à l'énergie au sein d'un foyer. Ainsi, à l'aide de la consommation du foyer, de sa production et de l'état de sa batterie, le module d'autoconsommation va pouvoir calculer à chaque pas de temps de simulation, le besoin et le surplus en énergie du foyer. C'est également le module d'autoconsommation qui sert d'interface entre le foyer et le groupement. Son rôle est à chaque pas de temps de comptage d'informer le groupement sur le besoin ou le surplus d'énergie du foyer afin que ce dernier puisse réaliser les opérations d'échange d'énergie.

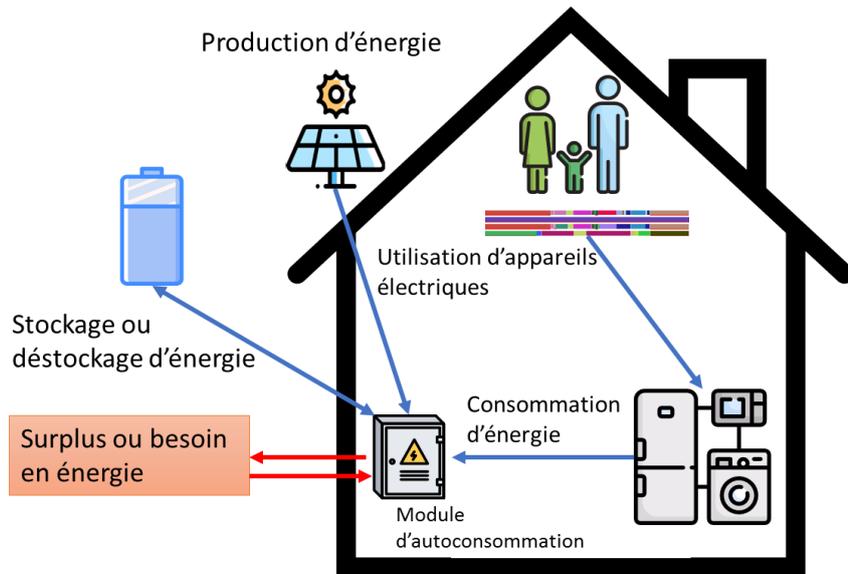


Figure 26 : Organisation d'un foyer autour de l'énergie

Le foyer est donc l'élément de base du modèle d'autoconsommation d'énergie collective. La Figure 26 présente la manière dont les différents composants d'un foyer autoconsommateur s'organisent et interagissent entre eux. À l'échelle du groupement, les foyers sont vus comme des agents dont le rôle est d'informer sur un besoin ou un surplus d'énergie à traiter dans le cadre de l'autoconsommation collective. Ce besoin ou ce surplus est obtenu grâce à la simulation de l'activité humaine couplée au modèle du bâtiment.

#### Modélisation de la consommation du foyer

La plateforme SMACH permet l'estimation de la consommation électrique d'un foyer par la co-simulation entre un modèle multi-agent de l'activité humaine et un modèle de thermique du bâtiment.

Pour la simulation de l'ACC, nous utilisons  $e_{consumedFoyer}(h, t) \in [0, +\infty[$  la quantité d'énergie consommée par un foyer  $h$  durant un pas de temps de simulation  $t$ . Cette quantité d'énergie correspond à la somme de l'énergie consommée par l'ensemble des appareils électriques en fonctionnement dans un foyer durant ce pas de temps de simulation  $t$ .

#### Production individuelle

Un foyer autoconsommateur d'énergie d'un groupement peut être équipé d'un moyen de production individuel d'énergie. Pour un foyer, on appelle  $solarPanel_{foyer}(h)$ , un panneau PV présent au niveau d'un foyer  $h$  par exemple installé sur sa toiture.

À chaque pas de temps de simulation  $t$ , on calcule  $e_{producedFoyer}(h, t) \in [0, +\infty[$  la quantité d'énergie produite par le moyen de production d'énergie du foyer  $h$ .

### *Système de stockage individuel*

Un foyer peut également posséder un système individuel de stockage. Pour un foyer, on note  $batterie_{foyer}(h)$  la batterie individuelle rattachée à un foyer  $h$  du groupement.

### *Modélisation du module d'autoconsommation d'énergie*

Le module d'autoconsommation a pour objectif de calculer le surplus et le besoin en énergie d'un foyer autoconsommateur à chaque pas de temps de simulation  $t$ . On note  $MAC(h)$  le module d'autoconsommation d'énergie du foyer  $h$ .

On nomme  $surplus_{foyer}(h, t) \in [0, +\infty[$  le surplus d'énergie d'un foyer au bout d'un pas de temps  $t$ . De même,  $besoin_{foyer}(h, t) \in [0, +\infty[$  est le besoin en énergie d'un foyer  $h$  au bout d'un pas de temps de simulation  $t$ . Il s'agit des sorties du module d'autoconsommation qui seront transmises au groupement afin d'être prises en compte dans le cadre des échanges d'énergie.

Au sein du module d'autoconsommation, on trouve également la grandeur  $taux_{utilisationProductionIndividuelle}(h, c) \in [0, 1]$ . Il s'agit de la fraction d'énergie qu'un foyer  $h$  peut consommer sur sa production individuelle, le reste de l'énergie sera fourni au groupement afin d'y être échangé. On peut alors calculer la quantité d'énergie qu'un foyer peut consommer de sa propre production :

$$e_{productionIndividuelle}(h, t) = e_{producedFoyer}(h, t) * \text{taux}_{utilisationProductionIndividuelle}(h, t) \quad (22)$$

Le module d'autoconsommation a aussi pour objectif de calculer la quantité d'énergie stockée ou fournie par une batterie individuelle. Ainsi, pour un foyer, nous pouvons évaluer  $e_{storageFoyer}(h, t) \in ]-\infty, +\infty[$  que le module d'autoconsommation souhaite stocker ou déstocker de la batterie individuelle du foyer  $h$  pour le pas de temps de simulation  $t$ .  $e_{storageFoyer}(h, t)$  est évaluée grâce à l'Équation (23) :

$$e_{storageFoyer}(h, t) = e_{productionIndividuelle}(h, t) - e_{consumedFoyer}(h, t) \quad (23)$$

La valeur de  $e_{storageFoyer}(h, t)$  est l'entrée du modèle de batterie puisqu'elle correspond à  $e_{storage}(h, t)$  de celui-ci.

À partir de ces valeurs, le module d'autoconsommation peut calculer le besoin et le surplus en énergie du foyer  $h$  au bout d'un pas de temps de simulation  $t$ . L'Algorithme 1 présente le fonctionnement du module d'autoconsommation d'énergie pour le calcul des besoins et du surplus en énergie d'un foyer.

---

```

1  $surplus_{foyer}(h, t) = 0;$ 
2  $besoin_{foyer}(h, t) = 0;$ 
3 if  $e_{productionIndividuelle}(h, t) \geq e_{consumedFoyer}(h, t)$  then
4   |  $surplus_{Foyer}(h, t) + = (e_{productionIndividuelle}(h, t) - e_{consumedFoyer}(h, t));$ 
5   |  $besoin_{foyer}(h, t) + = 0;$ 
6 else if  $e_{productionIndividuelle}(h, t) < e_{consumedFoyer}(h, t)$  then
7   |  $surplus_{foyer}(h, t) + = 0;$ 
8   |  $besoin_{foyer}(h, t) + = e_{consumedFoyer}(h, t) - e_{productionIndividuelle}(h, t);$ 
9 end
10 if  $storage_{foyer} \neq null$  then
11   |  $e_{storageFoyer}(h, t) = e_{productionIndividuelle}(h, t) - e_{consumedFoyer}(h, t);$ 
12   | if  $storage_{foyer}.canCharged$  and  $e_{storageFoyer}(h, t) > 0$  then
13     |  $e_{storageReal}(t) = storage_{foyer}.charged(e_{storageFoyer}(h, t));$ 
14     |  $surplus_{foyer}(h, t) - = e_{storageReal}(t)$ 
15   | else if  $storage_{foyer}.canForcedCharged$  then
16     |  $e_{storageReal}(t) = storage_{foyer}.charged(e_{storageFoyer}(h, t));$ 
17     | if  $e_{storageFoyer}(h, t) \geq e_{storageFoyer}(t)$  then
18       |  $surplus_{foyer}(h, t) - = e_{storageFoyer}(t);$ 
19     | else if  $e_{storageFoyer}(h, t) < e_{storageReal}(t)$  then
20       |  $besoin_{foyer}(h, t) + = e_{storageReal}(t) - e_{storageFoyer}(h, t);$ 
21       |  $surplus_{foyer}(h, t) = 0;$ 
22     |  $e_{consumedFoyer}(h, t) + = e_{storageReal}(t) - e_{storageFoyer}(h, t);$ 
23     | end
24   | end
25   | if  $storage_{foyer}.canDischarged$  and  $e_{storageFoyer}(h, t) < 0$  then
26     |  $e_{storageReal}(t) = storage_{foyer}.discharged(e_{storageFoyer}(h, t));$ 
27     |  $besoin_{foyer}(h, t) + = e_{storageReal}(t);$ 
28   | else if  $storage_{foyer}.canForcedDisCharged$  then
29     |  $e_{storageReal}(t) = storage_{foyer}.discharged(e_{storageFoyer}(h, t));$ 
30     | if  $|e_{storageFoyer}(h, t)| \geq |e_{storageReal}(t)|$  then
31       |  $besoin_{foyer}(h, t) - = |e_{storageReal}(t)|;$ 
32     | else if  $|e_{storageFoyer}(h, t)| < |e_{storageReal}(t)|$  then
33       |  $surplus_{foyer}(h, t) + = |e_{storageReal}(t)| - |e_{storageFoyer}|;$ 
34       |  $besoin_{foyer}(h, t) = 0;$ 
35     | end
36   | end
37 end
38  $surplus_{foyer}(h, t) + = e_{producedFoyer}(h, t) - e_{productionIndividuelle}(h, t);$ 

```

---

Algorithme 1 : Algorithme de fonctionnement du module d'autoconsommation

### Exemple de fonctionnement du module d'autoconsommation

À titre d'exemple, la Figure 27 montre des conditions de fonctionnement du module d'autoconsommation d'énergie.

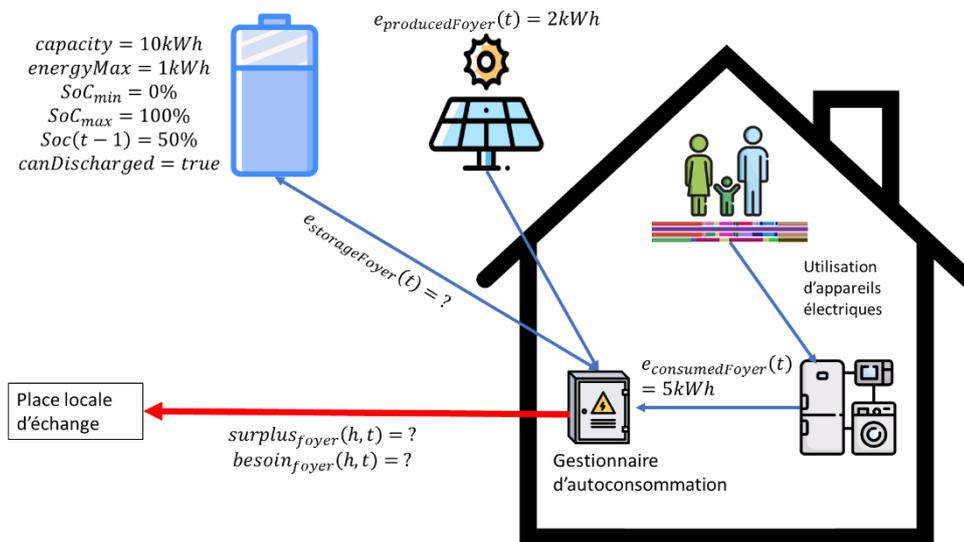


Figure 27 : Exemple de fonctionnement du module d'autoconsommation d'énergie d'un foyer

L'objectif ici est de calculer le bilan énergétique du foyer et l'état de charge de la batterie individuelle à la fin du pas de temps de simulation  $t$ . Pour ce faire, nous considérons que  $\text{taux}_{\text{utilisationProductionIndividuelle}} = 1$ .

Dans un premier temps, on peut calculer  $e_{\text{productionIndividuelle}}(h, t) = 1 * 2 = 2 \text{ kWh}$ . Le foyer peut donc consommer 2 kWh d'énergie de sa production locale. Ici, nous avons  $e_{\text{productionIndividuelle}}(h, t) < e_{\text{consumedFoyer}}(h, t)$ , il vient :

- $\text{surplus}_{\text{foyer}}(h, t) = 0$ ;
- $\text{besoin}_{\text{foyer}}(h, t) = 5 - 2 = 3 \text{ kWh}$ .

Maintenant, il est possible de solliciter la batterie. Nous sommes dans une situation où la batterie est en mode de décharge souple,  $\text{canDischarged} = \text{true}$  et où  $\text{besoin}_{\text{foyer}}(h, t) > 0$ . On va donc demander à la batterie de fournir de l'énergie au foyer. En respectant les différentes contraintes liées au modèle de batterie, on obtient  $e_{\text{storageFoyer}}(t) = -1 \text{ kWh}$ . Cela signifie qu'une quantité énergie égale à 1 kWh est fournie au foyer.

En prenant en compte l'énergie fournie par la batterie, nous obtenons :

- $\text{surplus}_{\text{foyer}}(h, t) = 0$ ;
- $\text{besoin}_{\text{foyer}}(h, t) = 3 - 1 = 2 \text{ kWh}$ .

Cela signifie qu'au pas de temps de simulation  $t$ , le foyer a un besoin d'énergie égal à  $2 \text{ kWh}$ . Le module d'autoconsommation notifie alors au groupement la valeur de ce besoin en énergie du foyer. Ce dernier sera ensuite pris en compte lors du prochain pas de temps de comptage  $c$  pour la réalisation des échanges d'énergie.

Enfin, le module d'autoconsommation met à jour l'état de charge de la batterie :

$$Soc(t) = \frac{\left(\left\lfloor \frac{50}{100} * 10 \right\rfloor + (-1)\right)}{10} = 40\%$$

Le taux de charge de la batterie est donc égal à 40% à la fin du pas de temps de simulation  $t$ .

### Conclusion sur la modélisation du foyer

Le modèle du foyer autoconsommateur permet de calculer à chaque pas de temps de simulation  $t$  le surplus, le besoin et l'énergie stockée ou fournie par la batterie de chaque foyer d'un groupement. La Figure 28 présente les modèles constituant le modèle complet d'un foyer.

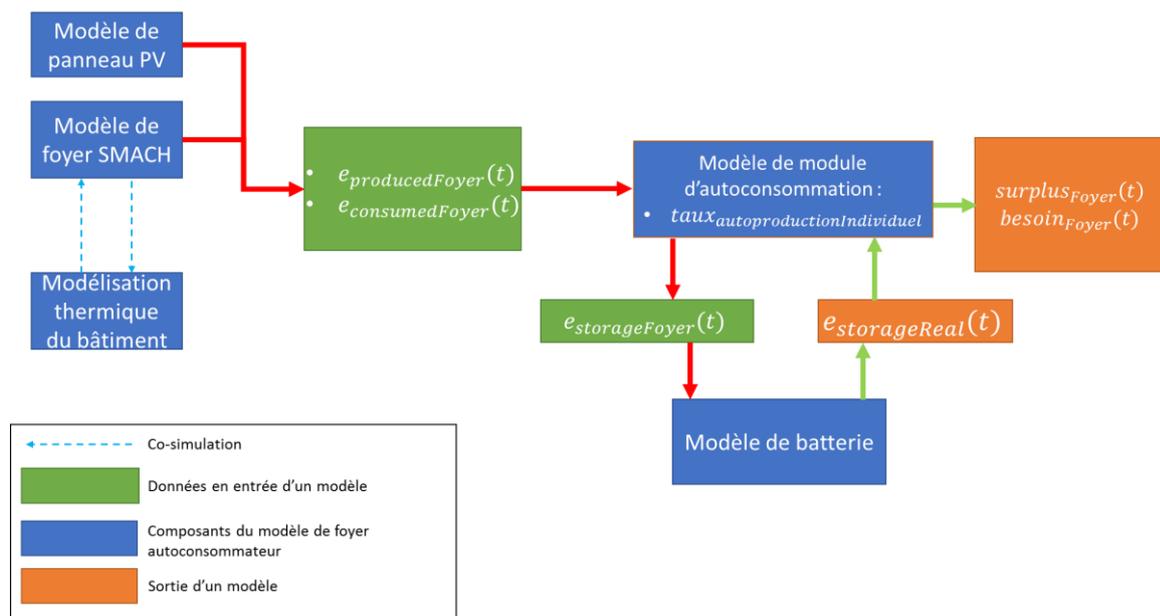


Figure 28 : Modèle d'un foyer autoconsommateur d'énergie

La Figure 29 donne le schéma général d'un modèle de foyer autoconsommateur d'énergie avec les différentes variables relatives à l'énergie du foyer.

Les surplus et les besoins d'énergie des foyers au bout du pas de temps de comptage  $c$  sont envoyés au groupement afin que cette dernière puisse réaliser les opérations d'échange d'énergie entre les foyers du groupement.

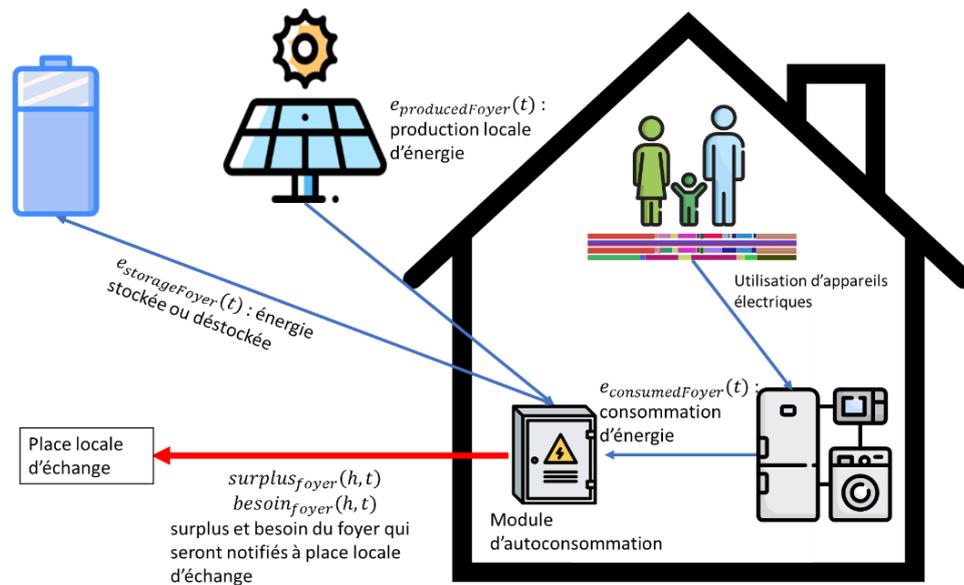


Figure 29 : Schéma général du modèle d'un foyer autoconsommateur d'énergie

### 3.3.6. Le groupement

#### Présentation du modèle de groupement

Le groupement est le troisième niveau de simulation du modèle au-dessus des niveaux simulant l'activité humaine individuelle et le foyer. Il s'agit de la structure au sein de laquelle les foyers vont pratiquer l'ACC. C'est le groupement qui gère les échanges d'énergie entre les foyers. Cependant, il est également capable de produire, stocker ou déstocker de l'énergie. Un groupement est constitué d'un certain nombre d'acteurs, de moyens de production collectifs, d'un moyen de stockage collectif et d'une place locale d'échange.

Dans un groupement, les acteurs sont des agents qui peuvent consommer de l'énergie ou percevoir une rémunération financière liée à la vente de l'énergie produite localement. On distingue deux types d'acteurs dans un groupement :

- Les foyers : Il s'agit des foyers pratiquant l'ACC au sein du groupement considéré dont on distingue deux types :
  - Les foyers producteurs d'énergie : Il s'agit de foyers qui peuvent apporter de l'énergie au groupement grâce à un moyen de production individuel ou un moyen de stockage individuel ;
  - Les foyers consommateurs d'énergie : Il s'agit de foyers ne possédant ni moyen de production ni moyen de stockage et qui ne peuvent donc que consommer de l'énergie provenant de l'ACC sans en fournir au groupement.

- Les acteurs externes : Un acteur externe est un agent pouvant posséder une part des moyens de production d'énergie collectifs. Ils ne vont ni consommer ni produire de l'énergie, mais pourront percevoir un revenu financier en fonction du profit réalisé au niveau du groupement.

Dans un groupement, les producteurs d'énergie sont des entités qui produisent une quantité d'énergie qui a pour objectif d'être échangée entre les foyers. On distingue deux types de producteurs d'énergie :

- Les foyers producteurs : Il s'agit d'un foyer possédant son propre moyen de production d'énergie ;
- Les moyens de production d'énergie collectifs : Les moyens de production collectifs produisent de l'énergie qui est directement mise à disposition du groupement pour les échanges. Ces moyens de production mutualisés peuvent appartenir à un ou plusieurs acteurs du groupement.

Dans un groupement, les systèmes de stockage collectifs permettent de stocker le surplus d'énergie qui ne peut être consommé. À chaque pas de temps de simulation, la consommation et la production d'énergie au sein du groupement sont calculées. En cas de surplus d'énergie, les moyens de stockage sont sollicités dans la limite de leurs capacités. En cas de besoin en énergie, leur rôle est de fournir au groupement une partie de l'énergie qu'ils auront stockée. L'énergie qui est fournie par un système de stockage d'énergie collectif est répartie entre les foyers par le groupement selon un ensemble de règles que nous nommons **organisation du stockage collectif**.

La **place locale d'échange** est la dernière entité du modèle de groupement développée. Elle correspond au gestionnaire d'ACC évoqué dans la section 3.1. Le rôle principal de la place locale d'échange est de distribuer l'énergie au sein du groupement à chaque pas de temps de comptage de 15 mn. Pour cela, la place locale d'échange a besoin de plusieurs informations :

- Le besoin en énergie des différents foyers ;
- Les surplus en énergie des différents foyers ;
- L'énergie produite par les différents moyens de production collectifs ;
- Les quantités d'énergie stockées ou déstockées par les systèmes de stockage d'énergie collectifs.

À chaque pas de temps de comptage, la place locale d'échange utilise l'ensemble de ces informations pour réaliser deux distributions d'énergie. Dans un premier temps et en fonction des besoins en énergie et de la production d'énergie du groupement, la place locale d'échange répartit l'énergie produite entre les foyers en fonction d'un ensemble de

règles que nous nommons **organisation des échanges**. Puis, la place locale d'échange calcule la manière selon laquelle l'énergie fournie par les systèmes de stockage collectifs est distribuée entre les foyers du groupement grâce à **l'organisation du stockage collectif**. Une fois les échanges d'énergie et la répartition de l'énergie provenant des batteries réalisées la place locale calcule :

- Pour chaque foyer, la quantité d'énergie qu'il a consommée et qui provient du réseau. Cette énergie aura un coût fonction du contrat passé entre le foyer et son fournisseur d'énergie ;
- La quantité d'énergie qui n'a pu être consommée ou stockée au sein du groupement et qui doit donc être revendue à l'extérieur du groupement. Dans ce cas, c'est le réseau qui rachète cette énergie à un prix donné.

Le réseau est donc une entité nécessaire dans le modèle. Il est considéré comme une source infinie d'énergie qui permet de répondre aux besoins en énergie des foyers, mais aussi comme une entité ayant pour rôle d'acheter tout surplus d'énergie provenant d'un groupement.

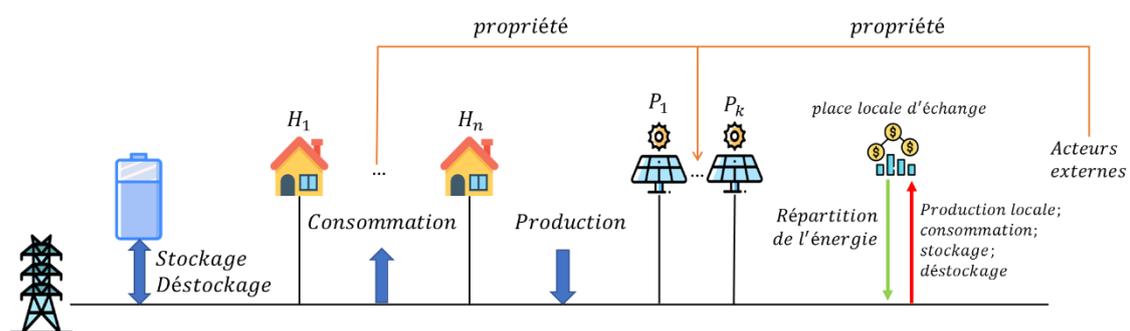


Figure 30 : Organisation d'un groupement avec ses entités

Le groupement est donc le troisième niveau de notre modèle. Il s'agit d'un système multi-agent dont le rôle est de répartir l'énergie entre les foyers, mais aussi de produire, stocker et déstocker de l'énergie. La Figure 30 présente schématiquement un groupement et les différentes entités dont il est constitué. Toutes ces entités échangent des informations qui sont concaténées par la place locale d'échange. C'est ensuite à partir de ces informations que la place locale d'échange peut déterminer une répartition de l'énergie à chaque pas de temps de comptage.

### Les acteurs

Notons  $H$  pour « Households » l'ensemble des foyers qui composent un groupement. À chaque pas de temps de simulation  $t$  et au niveau du groupement, on peut évaluer  $surplus_{Foyer}(h, t)$  et  $besoin_{Foyer}(h, t)$  qui sont respectivement le besoin et le surplus en énergie d'un foyer  $h$  calculés par son module d'autoconsommation. Par exemple, pour

un foyer  $h_1$  si l'on a  $surplus_{foyer}(h_1, 0) = 2kWh$  et  $besoin_{foyer}(h_1, 0) = 1kWh$ , cela signifie qu'au pas de temps  $t = 0$ , le foyer  $h_1$  a fourni au groupement  $2kWh$  d'énergie qui peuvent alors être distribués dans le cadre de l'ACC. Cela signifie également qu'au même pas de temps, ce foyer avait un besoin en énergie égal à  $1kWh$ .

On note également  $A$  pour « Actors » l'ensemble des acteurs externes que l'on peut retrouver dans le groupement.

### *Les moyens de production mutualisés*

Au sein d'un groupement, on retrouve un ensemble  $PROD$  d'appareils de production mutualisés. On note  $e_{producedGroup}(prod, t) \in [0, +\infty[$  la quantité d'énergie produite par un moyen de production mutualisé  $prod$  au bout du pas de temps de simulation  $t$ .

On note  $prop(a, prod) \in [0, 1]$  le taux de propriété d'un acteur externe  $a$  ou d'un foyer  $h$  pour un moyen de production  $prod$ . Par exemple,  $prop(h_0, p_7) = 0,62$  signifie que le moyen de production  $p_7$  appartient à 62% au foyer  $h_0$ . Une contrainte sur la variable  $prop$  est utilisée :

$$\forall j \in PROD, \sum_{a \in H \cup A} prop(a, p) = 1 \quad (24)$$

Cela signifie que pour un moyen de production  $p$ , la somme des taux de propriété de ce moyen de production est strictement égale à 1. Dans notre modèle, l'intégralité de l'énergie produite par les moyens de production collectifs doit être utilisée au sein du groupement, car c'est le principe de l'ACC. Contrairement aux foyers qui déterminent la part d'énergie qu'ils veulent autoconsommer avec la valeur de  $taux_{productionIndividuelle}$ , la place locale d'échange va donc essayer d'échanger l'ensemble de l'énergie mise à sa disposition.

### *Systèmes de stockage collectifs*

Le système de stockage collectif d'un groupement est basé sur le même modèle que celui du stockage individuel. On note  $batterie_{group}$  le système de stockage collectif d'un groupement.

Pour un système de stockage collectif, nous sommes capables de calculer à chaque pas de temps de simulation  $t$  :

$$e_{storageGroup}(t) = e_{produced}(t) - e_{consumed}(t) \quad (25)$$

$e_{storageGroup}(t) \in ]-\infty, +\infty[$  est la quantité d'énergie que le groupement souhaite charger ou décharger à l'aide de son système de stockage collectif. Cette valeur est une entrée du modèle de batterie, car elle correspond à  $e_{storage}(t)$  de ce dernier.

Pour un système de stockage collectif, nous définissons :

$$e_{produced}(t) = \sum_{h \in H} surplus_{foyer}(h, t) + \sum_{p \in PROD} e_{producedGroup}(p, t) \quad (26)$$

$$e_{consumed}(t) = \sum_{h \in H} besoin_{foyer}(h, t) \quad (27)$$

### Interface du groupement

On note  $r(h, t) \in [0, +\infty[$  le prix de l'énergie provenant du réseau à un instant  $t$  pour un foyer  $h$ .

De même,  $a(t) \in [0, +\infty[$  est le prix de vente de l'énergie à l'extérieur d'un groupement *group* lors d'un pas de temps de simulation  $t$ . Ce prix est appliqué lorsque le groupement vend de l'énergie produite localement à l'extérieur du groupement, car elle n'a pu être consommée ou stockée.

### Fonctions du groupement

Dans le groupement et pour chaque foyer, on note  $besoin_{foyerComptage}(h, c) \in [0, +\infty[$  le besoin en énergie d'un foyer  $h$  au bout d'un pas de temps de comptage  $c$ .

Ainsi, nous définissons :

$$besoin_{foyerComptage}(h, c) = \sum_{t \in T} besoin_{foyer}(h, t) \quad (28)$$

Avec  $T$  le nombre de pas de temps de simulation entre deux pas temps de comptage  $c - 1$  et  $c$  à savoir que  $T = 15$  si  $t = 1$  mn et  $c = 15$  mn.

On note également  $E_{consumedGroup}(c) \in [0, +\infty[$  l'ensemble de l'énergie consommée par le groupement au bout du pas de temps de comptage  $c$ . Ainsi,  $E_{consumedGroup}(c)$  est évaluée par :

$$E_{consumedGroup}(c) = \sum_{h \in H} besoin_{foyerComptage}(h, c) \quad (29)$$

De manière similaire, l'énergie qui peut être échangée au niveau du groupement et au bout du pas de temps de comptage  $c$  est nommée  $E_{producedGroup}(c) \in [0, +\infty[$ .

Celle-ci est calculée par :

$$E_{producedGroup}(c) = \sum_{t \in T} \left[ \sum_{p \in PROD} e_{producedGroup}(p, t) + \sum_{h \in H} surplus_{foyer}(h, t) \right] \quad (30)$$

Ainsi, l'énergie disponible pour les échanges au sein d'un groupement est égale à la somme des énergies produites par les moyens de production mutualisés du groupement et des énergies en surplus issues des foyers.

Au niveau du groupement et en termes d'utilisation des systèmes de stockage, nous définissons  $E_{chargedGroup}(c) \in [0, +\infty[$  et  $E_{dischargedGroup}(c) \in [0, +\infty[$  qui sont respectivement les quantités d'énergie stockée et déstockée pour un pas de temps de comptage  $c$ . Ces quantités d'énergie sont calculées par :

$$E_{chargedGroup}(c) = \sum_{t \in T} e_{storageGroup}(t) \quad \forall e_{storageGroup}(t) > 0 \quad (31)$$

$$E_{dischargedGroup}(c) = \sum_{t \in T} e_{storageGroup}(t) \quad \forall e_{storageGroup}(t) < 0 \quad (32)$$

Pour chaque foyer du groupement, la dépense financière d'un foyer  $h$  pour un pas de temps de comptage  $c$  est nommée  $depense(h, c) \in [0, +\infty[$ . Par exemple,  $depense(h_0, 10) = 23$  € signifiera que le foyer  $h_0$  a dépensé 23 € durant le 10<sup>ème</sup> pas de temps de comptage  $c$ .

Il en est de même pour la recette que nous appelons  $recette(h, c) \in [0, +\infty[$ . Ainsi,  $recette(h_0, 10) = 13$  €, signifiera que le foyer  $h_0$  a reçu 13 € durant le 10<sup>ème</sup> pas de temps de comptage  $c$ .

Enfin,  $bilan(h, c) \in ] - \infty, +\infty[$  est la valeur du bilan financier total pour un foyer  $h$  du groupement :

$$\forall i \in (H \cup A), bilan(h, c) = recette(h, c) - depense(h, c) \quad (33)$$

Pour un acteur externe, nous considérons que  $depense(i, c) = 0$ .

### *Place locale d'échange*

Dans un groupement, on note *PLE* la place locale d'échange dont la fonction est la distribution de l'énergie entre les foyers du groupement. Pour cela, la fonction *organisationEchange* est utilisée.

Ainsi, pour chaque foyer, la place locale d'échange *PLE* évalue :

- $e_{localFoyer}(h, c) \in [0, +\infty[$  : La quantité d'énergie qu'un foyer a reçue et qui provient des échanges d'énergie liés à l'ACC. Par exemple,  $e_{localFoyer}(h_1, 1) = 3$  kWh signifie que le foyer  $h_1$  a reçu 3 kWh d'énergie produite localement durant le 1<sup>er</sup> pas de temps de comptage  $c$  avec la contrainte :

$$\sum_{h \in H} e_{localFoyer}(h, c) < E_{produced}(c) \quad (34)$$

L'énergie reçue par tous les foyers du groupement ne peut pas être supérieure à l'énergie produite et échangée au sein du groupement ;

- $e_{storageConsumptionGroup}(h, c) \in [0, +\infty[$  : La quantité d'énergie qu'un foyer a reçue et qui provient du moyen de stockage mutualisé pour un pas de temps de comptage  $c$  ;
- $e_{networkFoyer}(h, c) \in [0, +\infty[$  : La quantité d'énergie provenant du réseau et qu'un foyer a reçu durant le pas de temps de comptage  $c$ .

Pour chaque foyer  $h \in H$ ,  $PLE$  doit respecter la contrainte suivante :

$$e_{localFoyer}(h, c) + e_{storageConsumptionGroup}(c) + e_{networkFoyer}(c) = besoin_{foyerComptage}(h, c) \quad (35)$$

Cela signifie que la quantité d'énergie qu'un foyer reçoit des échanges au sein du groupement, du système de stockage collectif et du réseau doit être strictement égale au besoin en énergie du foyer. Il faut noter que le stockage individuel n'est pas visible au niveau du groupement. Il peut néanmoins exister des quantités d'énergie chargées ou déchargées pour ces systèmes, mais qui sont confondues avec les besoins et les surplus d'énergie signifiés par le foyer.

La Figure 31 présente l'assemblage des modèles qui constituent le modèle complet d'un groupement.

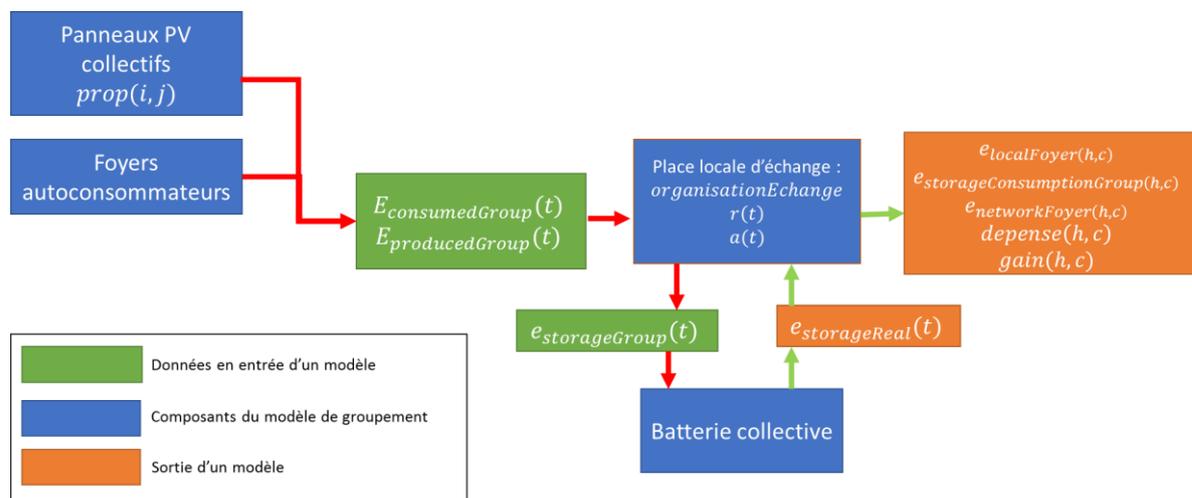


Figure 31 : Modèle du groupement

La Figure 32 donne une vue schématique du modèle de groupement.

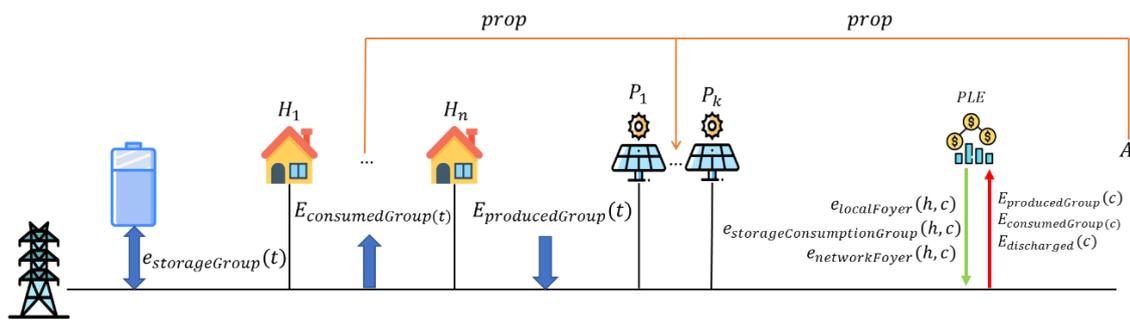


Figure 32 : Schéma général du modèle de groupement

## 3.4. Échanges inter-groupements

### 3.4.1. Principe général

Jusqu'à présent, nous avons traité les échanges d'énergie entre des foyers appartenant à un même groupement. Maintenant, nous évoquons les échanges d'énergie intra-groupements. Dans cette situation quand de l'énergie est achetée ou revendue à l'extérieur du groupement c'est le fournisseur d'énergie qui vend et qui achète cette énergie. Or, le groupement est censé représenter l'échelle du quartier et il est évident qu'une ville sera constituée de plusieurs groupements. Ainsi, pour essayer d'être complet sur les échanges d'énergie, il nous faut aborder les échanges d'énergie entre les groupements c'est-à-dire les échanges d'énergie inter-groupements.

Pour ce faire, nous nous appuyons sur la fonction *organisationEchange* présent dans la place locale d'échange d'un groupement. En effet, à la fin de chaque pas de temps de comptage  $c$ , la place locale d'échange a calculé un besoin ou un surplus d'énergie au niveau de son groupement. Sans échange d'énergie entre les groupements, cela se traduit soit par un achat en cas de besoin soit par une vente d'énergie au fournisseur réseau. Cependant, en ajoutant un nouveau niveau de simulation dans le modèle, il devient possible de modéliser les échanges d'énergie inter-groupements. À l'instar des échanges d'énergie au sein d'un groupement, les échanges d'énergie entre les groupements sont gérés par une entité centrale que nous nommons **Place centrale d'échange**.

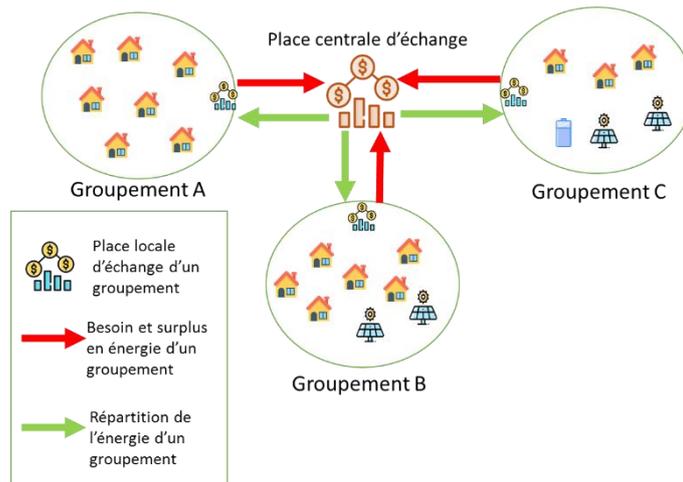


Figure 33 : Exemple d'une organisation pour réaliser des échanges d'énergie inter-groupements

La Figure 33 montre un exemple de configuration où plusieurs groupements échangent de l'énergie entre eux grâce à la place centrale d'échange. Tout comme une place locale d'échange, le rôle de la place centrale d'échange sera d'évaluer l'ensemble des informations nécessaires au calcul des besoins et des surplus d'énergie de chaque groupement au bout du pas de temps de comptage  $c$ . L'objectif est de mettre en place une ou des politiques de répartition des demandes et des offres. Bien entendu, cette répartition de l'énergie suit, comme pour la place locale d'échange, un ensemble de règles. De plus, les échanges d'énergie inter-groupements se font entre les places locales des groupements et la place centrale.

Lorsqu'un groupement reçoit de l'énergie grâce aux échanges entre groupements, cette dernière est répartie entre les foyers du groupement par la place locale d'échange en suivant l'organisation des échanges définis par le groupement.

Il faut cependant noter une différence entre la simulation inter-groupement et la simulation dans le groupement. En effet, le groupement est une entité qui est capable de produire, stocker et déstocker de l'énergie grâce aux moyens de production et de stockage mutualisés. A contrario, les relations entre les groupements ne considèrent et ne gèrent que des échanges d'énergie. Il s'agit ici uniquement de transferts.

### 3.4.2. Formalisation des échanges inter-groupements

À la fin de chaque pas de temps de comptage  $c$  et après avoir considéré les échanges entre les foyers, la place locale d'échange d'un groupement a évalué les besoins et les surplus en énergie du groupement étudié. Les valeurs obtenues sont transmises à la place centrale d'échange.

Tout d'abord, on note  $e_{echangesExtGroup}(group, c) \in [0, +\infty[$  la quantité d'énergie reçue par un groupement  $group$  à la suite des échanges d'énergie inter-groupements. À partir

de cette valeur, la place locale d'échange du groupement calcule pour chaque foyer la valeur  $e_{echangesExtFoyer}(h, c) \in [0, +\infty[$  qui définit la quantité d'énergie que reçoit chaque foyer et qui provient des échanges d'énergie entre les groupements. Bien entendu, la place locale d'échange du groupement utilise des règles conformes à l'organisation choisie pour les échanges d'énergie du groupement considéré pour calculer  $e_{echangesExtFoyer}(h, c)$ .

On note  $PCE$  la place centrale d'échange en charge de l'opération de comptage qu'est la répartition de l'énergie entre les groupements. Pour chaque  $PCE$ , nous définissons la fonction  $organisationEchange$  qui doit organiser les échanges d'énergie au sein de la place centrale d'échange. C'est l'organisation des échanges entre les groupements.

Pour chaque groupement, le rôle de la place centrale d'échange, et plus particulièrement de la fonction  $organisationEchange$ , est de calculer pour chaque groupement  $e_{echangesExtGroup}(group, c)$  qui représente la quantité d'énergie reçue à la fin d'un pas de temps de comptage  $c$  par un groupement  $group$  et ceci à la suite des échanges d'énergie entre les groupements. Il est à noter que nous devons appliquer les contraintes suivantes :

$$\sum_{\forall group} Surplus(group, c) \leq \sum_{\forall group} e_{echangesExtGroup}(group, c) \quad (36)$$

- Une place centrale d'échange ne peut allouer aux groupements plus d'énergie qu'elle ne dispose pour le pas de temps de comptage  $c$  considéré ;

$$e_{echangesExtGroup}(group, c) \leq Besoin_{group}(group, c) \quad (37)$$

- Un groupement ne peut pas se voir allouer plus d'énergie que ce dont il a besoin pour un pas de temps de comptage  $c$ .

Le modèle des échanges inter-groupements permet de simuler un niveau supplémentaire d'échange d'énergie, à savoir celui entre les groupements. Cet étage supplémentaire de simulation peut être répété à l'infini ce qui peut permettre de créer de grandes structures au sein desquelles l'énergie est échangée à plusieurs niveaux i.e. du foyer à la ville. La Figure 34 présente un exemple d'organisation avec six groupements et une répartition de l'énergie sur trois niveaux à savoir au sein des foyers puis des groupements et, enfin, entre les groupements.

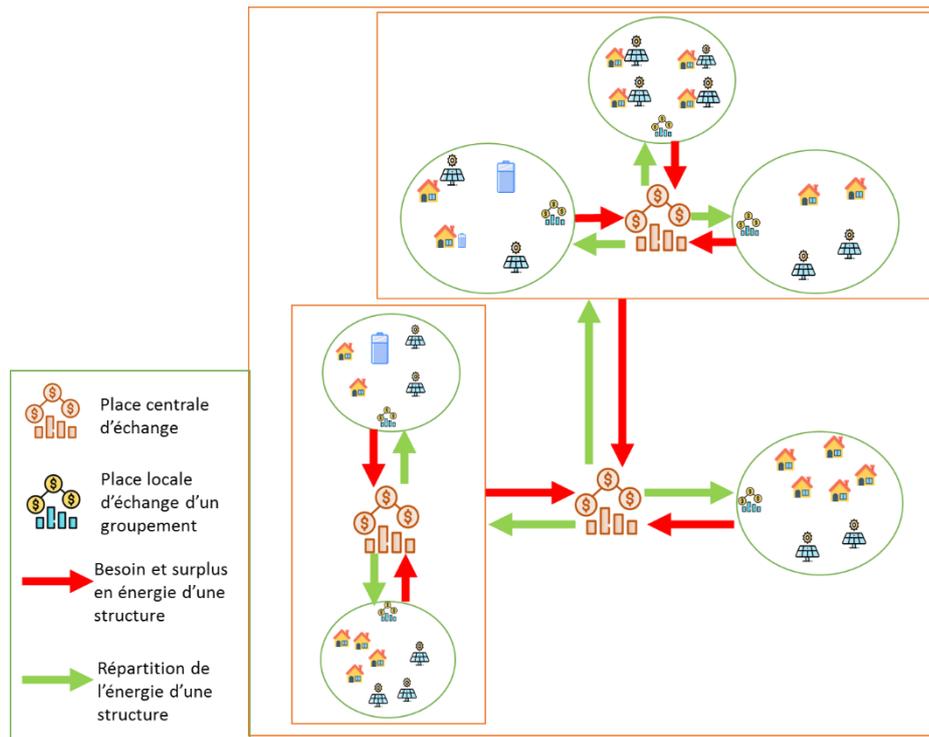


Figure 34 : Exemple d'une organisation sur trois niveaux de simulation pour échanger de l'énergie

### 3.5. Synthèse

Le modèle développé ici est basé sur une représentation multi-niveau de l'allocation de ressources. Le premier niveau simule des agents qui sont capables de consommer, produire, stocker ou fournir une ressource. Le second niveau du modèle simule le groupement qui est un système multi-agent au sein duquel les agents gérant la ressource sont regroupés et qui a pour rôle la répartition de la ressource grâce à la mise en place d'un processus d'allocation centralisé défini au sein de la place locale d'échange. Dans le cadre de l'ACC, les agents sont représentés par des foyers caractérisés par leurs habitants, le bâtiment, les appareils électriques et la présence possible d'un moyen de production d'énergie et d'un système de stockage de l'énergie. Ces modèles de foyers sont basés sur ceux utilisés dans la plateforme SMACH qui permettent de co-simuler l'activité humaine et le comportement thermique des bâtiments pour connaître la consommation électrique d'un foyer. Ici, les moyens de production d'électricité sont des panneaux photovoltaïques et pour le stockage, nous avons utilisé des modèles de batteries. Le modèle ne considère pas dans son état actuel les véhicules électriques. Cependant, les batteries de ces véhicules peuvent tout à fait être utilisées comme systèmes de stockage individuels par un foyer. Un véhicule électrique serait alors considéré comme une batterie individuelle, mais avec un paramètre supplémentaire. Ce paramètre permettrait d'indiquer la présence ou l'absence du véhicule et donc de la batterie au sein du foyer.

Le modèle développé permet également d'échanger de l'énergie à une échelle plus grande que celle du groupement grâce à la notion de place centrale d'échange. Une place centrale d'échange est une entité qui se trouve à l'extérieur des groupements et qui a pour objectif de répartir l'énergie entre des groupements et des ensembles de groupements.

Le modèle que nous proposons dans ce chapitre a été développé dans l'optique de modéliser et de permettre la simulation de l'ACC d'énergie. Cependant, le modèle de simulation multi-niveau multi-agent est suffisamment générique pour être appliqué dans d'autres situations mettant en œuvre une ressource différente divisible et stockable. Par exemple, ce modèle pourrait s'appliquer pour le calcul de l'allocation de l'eau entre différents agents. Chaque agent peut produire de l'eau grâce à un puits par exemple et peut consommer cette dernière et la stocker. Le groupement pourrait lui aussi produire de l'eau par exemple à partir de nappe phréatique et la stocker dans des structures comme des châteaux d'eau. En fonction de la production, de la consommation, des systèmes de stockage collectifs et des différents besoins et surplus, le groupement pourrait alors déterminer une répartition de l'eau entre les agents tout comme il réalise une allocation de l'énergie dans le modèle développé ici. Ce modèle pourrait également être appliqué à la production, au stockage et à l'allocation de denrées alimentaires comme du blé ou du riz par exemple.

Cependant, quelle que soit la ressource utilisée, il est important pour le groupement et plus particulièrement la place locale d'échange de disposer de règles qui vont régir la manière dont la ressource va être allouée entre les agents présents dans le groupement. Dans le chapitre suivant, nous présentons différentes organisations qui permettent à la place locale d'échange de déterminer l'allocation de la ressource à chaque pas de temps de comptage en se basant sur différents critères.

## Chapitre 4 Organisation des échanges au sein d'un groupement

4.1.	Principe général .....	130
4.1.1.	Définition d'une organisation des échanges .....	130
4.1.2.	Proposition d'organisations .....	130
4.2.	Organisation proportionnelle des échanges .....	132
4.2.1.	Principe général .....	132
4.2.2.	Algorithme de calcul .....	133
4.2.3.	Exemple.....	134
4.3.	Organisation des échanges à taux fixe .....	135
4.3.1.	Principe général .....	135
4.3.2.	Algorithme de calcul .....	137
4.3.3.	Exemple.....	138
4.3.4.	Gestion du surplus par revente .....	139
4.3.5.	Gestion du surplus par itération .....	140
4.4.	Organisation concurrentielle des échanges .....	142
4.4.1.	Vente au plus offrant .....	142
4.4.2.	Achat au moins-disant .....	147
4.4.3.	Définition des prix.....	151
4.5.	Gestion du stockage collectif .....	153
4.5.1.	Principe général .....	154
4.5.2.	Algorithme de calcul .....	154
4.5.3.	Exemple.....	155
4.6.	Synthèse.....	156

## 4.1. Principe général

### 4.1.1. Définition d'une organisation des échanges

L'objectif d'une organisation des échanges est de définir un ensemble de règles précises régissant les échanges d'énergie au sein d'un groupement pratiquant l'ACC. Il s'agit des règles appliquées par la place locale d'échange afin de calculer une répartition de l'énergie entre les différents foyers du groupement pour chaque pas de temps de comptage  $c$ .

Pour être fonctionnelle, une organisation des échanges doit être capable de répondre aux trois questions suivantes :

1. Comment sont effectués les échanges ou le partage de l'énergie produite localement au sein d'un groupement entre les différents foyers du groupement ?
2. Comment est géré le surplus d'énergie au sein d'un groupement ?
3. Comment l'énergie provenant de la batterie collective d'un groupement est-elle répartie entre les foyers de ce groupement ?

Plus formellement, une organisation d'échange est une fonction dont le rôle est de calculer pour chaque foyer du groupement  $e_{localFoyer}(h, c)$  l'énergie provenant des échanges,  $e_{storageConsumptionGroup}(h, c)$  l'énergie provenant de la batterie collective du groupement et  $e_{networkFoyer}(h, c)$ , l'énergie qu'un foyer a achetée à son fournisseur d'électricité. Ces trois fonctions sont évaluées de manière séquentielle. Tout d'abord, la place locale d'échange estime la fonction  $e_{localFoyer}(h, c)$ . Ensuite, elle quantifie  $e_{storageConsumptionGroup}(h, c)$  pour chaque foyer et enfin, à partir de ces deux premières valeurs et du besoin de chaque foyer, la place locale d'échange calcule  $e_{networkFoyer}(h, c)$ . De plus, la place locale d'échange peut estimer, pour chaque foyer, et pour un pas de temps de comptage  $c$ , la dépense  $depense(h, c)$  et le bénéfice  $recette(h, c)$  du foyer  $h$ .

Dans ce chapitre, nous présentons trois organisations pour échanger de l'énergie provenant des moyens de production entre les foyers. Ces trois organisations sont également celles que nous utilisons pour réaliser les échanges d'énergie inter-groupements. En effet, nous considérons que la politique de répartition de l'énergie par la place centrale d'échange est similaire à la répartition de l'énergie réalisée par la place locale d'échange. Nous proposons également une organisation dont l'objectif est de répartir l'énergie provenant des moyens de stockage collectifs du groupement

### 4.1.2. Proposition d'organisations

Les organisations d'échange que nous avons développées sont issues de différentes sources. Tout d'abord, les premières réflexions proviennent des échanges que nous avons

eus avec des experts d'EDF R&D travaillant sur l'ACC et plus particulièrement sur l'écoquartier LOGIS CÉVENOLS au sein duquel 100 appartements pratiquent l'ACC. Dans ce quartier, l'énergie échangée entre les foyers provient d'une installation PV mutualisée d'une puissance de 100 kWc. Pour cette organisation d'échange, chaque foyer reçoit un taux fixe de l'énergie produite localement. Ce taux est fonction de la surface habitable de chaque foyer. Ainsi, plus un foyer est grand, plus la quantité d'énergie qu'il recevra des échanges sera importante. Ce mode de fonctionnement pratiqué au sein du quartier LOGIS CÉVENOLS a été utilisé pour développer une première organisation d'échange nommée *Organisation des échanges à taux fixe*.

Les travaux de (Bonnardot et al., 2020) nous ont aussi permis d'identifier différentes organisations des échanges que nous avons mises en place. Les auteurs ont réalisé un cas d'étude de l'ACC sous la forme d'un jeu de société présenté lors de la biennale du design de Saint-Étienne en mars 2019. Les auteurs ont ainsi réalisé 14 sessions durant laquelle des participants ont pu expérimenter une simulation de partage d'énergie entre des voisins. Pour chaque session, les participants étaient libres de fixer entre eux les différentes règles qui allaient régir ces échanges. En analysant les retranscriptions vidéo et audio de ses expériences, les auteurs ont pu dégager trois typologies de collectifs pour l'échange d'énergie :

- Stratégie n°1 : Chaque participant à l'ACC investit de manière individuelle dans les équipements qui leur permettent de produire et/ou de stocker de l'énergie. L'énergie est alors vendue et achetée directement entre voisins sous la forme d'un marché concurrentiel de l'énergie. L'organisation des échanges nommée *Organisations des échanges concurrentielles* s'inspire directement de cette typologie ;
- Stratégie n°2 : L'investissement dans des moyens de production est fait de manière collective ;
- Stratégie n°3 : Les moyens de production et de stockage sont détenus par un tiers de confiance qui régule les échanges d'énergie.

Pour les deux dernières stratégies, les participants au jeu ont mis en avant un besoin d'équité entre les participants à l'ACC que cela soit d'un point de vue financier ou d'un point de vue de la répartition de l'énergie entre les foyers. C'est à ce besoin d'équité que répond la troisième organisation des échanges que nous proposons. Elle est nommée *Organisation proportionnelle des échanges*. Dans le cadre de cette organisation, l'énergie est répartie entre les foyers du groupement en fonction de leur besoin en énergie. Ainsi, plus un foyer a un besoin d'énergie important, plus la part de l'énergie qu'il recevra des échanges sera grande. Cette notion d'équité peut aussi se retrouver dans le cadre de

l'organisation des échanges à taux fixe lorsque le taux d'énergie reçu par chaque foyer est fonction de sa surface habitable.

Il est également nécessaire de mettre en place une organisation pour l'énergie provenant des systèmes de stockage collectif du groupement. Dans nos travaux, nous proposons une organisation basée sur une répartition proportionnelle de l'énergie provenant de la batterie collective du groupement. Ainsi, plus un foyer a un besoin en énergie important, plus la part d'énergie que ce dernier reçoit du stockage collectif sera grande. Nous avons choisi cette organisation, car elle fait écho à l'organisation proportionnelle des échanges qui répartit l'énergie produite dans le groupement et propose donc une certaine équité dans la manière dont l'énergie est distribuée aux foyers.

En résumé, nous proposons 3 modes d'organisation pour échanger l'énergie produite localement :

- Une organisation proportionnelle des échanges ;
- Une organisation des échanges à taux fixe ;
- Une organisation concurrentielle des échanges.

Nous avons également développée une organisation du stockage collectif pour répartir l'énergie provenant des batteries collectives à savoir une organisation proportionnelle du stockage collectif.

D'autres organisations d'échange peuvent être imaginées et implémentées dans la plateforme SMACH afin de tester et de valider des hypothèses sur la manière dont l'énergie est échangée dans un groupement.

## 4.2. Organisation proportionnelle des échanges

### 4.2.1. Principe général

Au sein d'un groupement et avec une organisation proportionnelle des échanges, les foyers reçoivent une part variable de l'énergie produite localement en fonction de leur besoin en énergie.

Pour rappel, la fonction  $E_{producedGroup}(c)$  évalue la quantité totale d'énergie produite par le groupement à chaque pas de temps de comptage  $c$ .

Tout d'abord, nous définissons la fonction  $besoin_{foyerComptage}(h, c)$  qui représente le besoin en énergie d'un foyer  $h$  à chaque pas de temps de comptage  $c$  et la fonction  $E_{consumedGroup}(c)$  pour estimer le besoin total en énergie du groupement à chaque pas de temps de comptage  $c$ .

Pour mettre en œuvre cette organisation des échanges, les entrées nécessaires sont :

- $besoin_{foyerComptage}(h, c)$  : Besoin en énergie de chaque foyer  $h$  du groupement au pas de temps de comptage  $c$  ;
- $surplus_{foyerComptage}(h, c)$  : Surplus en énergie de chaque foyer  $h$  du groupement au pas de temps de comptage  $c$  ;
- $E_{consumedGroup}(c)$  : Besoin total en énergie du groupement au pas de temps de comptage  $c$  ;
- $E_{producedGroup}(c)$  : Énergie produite par le groupement au pas de temps de comptage  $c$  et qui doit être répartie entre les foyers.

En sortie, nous obtenons :

- $e_{localFoyer}(h, c)$  : Énergie attribuée à chaque foyer  $h$  au pas de temps de comptage  $c$ .

La Figure 35 présente le schéma de fonctionnement de l'organisation proportionnelle des échanges.



Figure 35 : Schéma-bloc d'une organisation proportionnelle des échanges

#### 4.2.2. Algorithme de calcul

Tout d'abord, nous distinguons à chaque pas de temps de comptage deux situations possibles pour calculer la quantité d'énergie reçue par chaque foyer du groupement :

- $E_{consumedGroup}(c) > E_{producedGroup}(c)$  c'est-à-dire que la consommation d'énergie au sein du groupement est supérieure à la production d'énergie au sein de celui-ci. Dans ce cas, la place locale d'échange calcule la quantité d'énergie allouée à chaque foyer en utilisant l'équation (38).

$$e_{localFoyer}(h, c) = \frac{besoin_{foyer}(h, c)}{E_{consumedGroup}(c)} * E_{producedGroup}(c) \quad (38)$$

- $E_{consumedGroup}(c) \leq E_{producedGroup}(c)$  c'est-à-dire que la consommation d'énergie au sein du groupement est inférieure ou égale à la production d'énergie au sein de celui-ci. Dans ce cas, la place locale d'échange calcule la quantité d'énergie allouée à chaque foyer par l'équation (39).

$$e_{localFoyer}(h, c) = besoin_{foyer}(h, c) \quad (39)$$

Avec une organisation proportionnelle, la répartition de l'énergie est effectuée en fonction de la consommation d'énergie de chaque foyer. De plus, un foyer ne peut pas recevoir plus d'énergie qu'il n'en consomme. Ainsi, à la différence d'une organisation à taux fixe, une organisation proportionnelle des échanges ne produit pas de surplus d'énergie à répartir entre les foyers.

#### 4.2.3. Exemple

La Figure 36 présente une configuration de groupement pratiquant une organisation proportionnelle des échanges d'énergie entre trois foyers consommateurs  $h_1, h_2$  et  $h_3$  et équipé de deux moyens de production d'énergie mutualisés  $p_1$  et  $p_2$ .

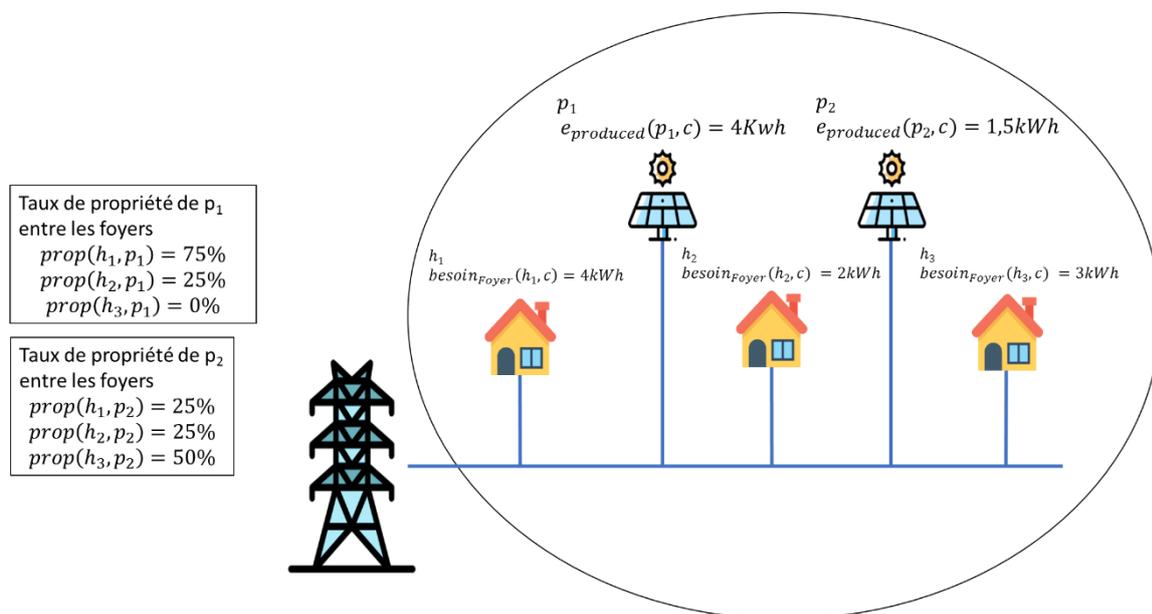


Figure 36 : Exemple de groupement avec une répartition proportionnelle des échanges et équipé de deux moyens de production d'énergie

Dans un premier temps, nous calculons les fonctions  $E_{producedGroup}(c)$  et  $E_{consumedGroup}(c)$  :

$$E_{producedGroup}(c) = 5,5 kWh$$

$$E_{consumedGroup}(c) = 9 kWh$$

Nous remarquons aisément que  $E_{consumedGroup}(c) > E_{producedGroup}(c)$ . Pour cette organisation, la répartition de l'énergie entre les foyers est réalisée de la manière suivante :

- Pour le foyer  $h_1$  :
  - $e_{localFoyer}(h_1, c) = \frac{4}{9} * 5,5 = 2,4 kWh$
  - $besoin_{foyerComptage}(h_1, c) = 4 - 2,4 = 1,6 kWh$

- Pour le foyer  $h_2$  :
  - $e_{localFoyer}(h_2, c) = \frac{2}{9} * 5,5 = 1,2 \text{ kWh}$
  - $besoin_{foyerComptage}(h_2, c) = 2 - 1,2 = 0,8 \text{ kWh}$
- Pour le foyer  $h_3$  :
  - $e_{localFoyer}(h_3, c) = \frac{3}{9} * 5,5 = 1,9 \text{ kWh}$
  - $besoin_{foyerComptage}(h_3, c) = 3 - 1,9 = 1,1 \text{ kWh}$

Pour chaque foyer, il est possible de calculer la dépense et la recette liées aux échanges d'énergie au niveau du groupement. Nous définissons  $igp = 0,120 \text{ €/kWh}$  le prix de l'énergie produite localement et échangée au sein le groupement. Par ailleurs, le coût de l'électricité du réseau est égal à  $r(h, c) = 0,145 \text{ €/kWh}$ .

Il est alors possible d'estimer la dépense de chaque foyer :

- $depense(h_1, c) = 2,4 * 0,120 + 1,6 * 0,145 = 0,520 \text{ €}$
- $depense(h_2, c) = 1,2 * 0,120 + 0,8 * 0,145 = 0,260 \text{ €}$
- $depense(h_3, c) = 1,9 * 0,120 + 1,1 * 0,145 = 0,388 \text{ €}$

De même pour la recette au niveau du groupement :

$$recette_{group} = (2,4 + 1,2 + 1,9) * 0,120 = 0,66 \text{ €}$$

Ensuite, nous répartissons ces gains entre les foyers et ceci en fonction de leur taux de propriété des moyens de production d'énergie :

- $recette(h_1, c) = \left[ \frac{4}{5,5} * 0,66 * 0,75 \right] + \left[ \frac{1,5}{5,5} * 0,66 * 0,25 \right] = 0,405 \text{ €}$
- $recette(h_2, c) = \left[ \frac{4}{5,5} * 0,66 * 0,25 \right] + \left[ \frac{1,5}{5,5} * 0,66 * 0,25 \right] = 0,165 \text{ €}$
- $recette(h_3, c) = \left[ \frac{4}{5,5} * 0,66 * 0 \right] + \left[ \frac{1,5}{5,5} * 0,66 * 0,5 \right] = 0,090 \text{ €}$

Enfin, un bilan financier au pas de temps de comptage  $c$  et pour chaque foyer du groupement peut être chiffré :

- $bilan(h_1, c) = 0,405 - 0,520 = -0,115 \text{ €}$
- $bilan(h_2, c) = 0,165 - 0,260 = -0,095 \text{ €}$
- $bilan(h_3, c) = 0,090 - 0,388 = -0,298 \text{ €}$

## 4.3. Organisation des échanges à taux fixe

### 4.3.1. Principe général

Au sein d'un groupement avec une organisation des échanges à taux fixe, les foyers reçoivent à chaque pas de temps de comptage une part fixe de l'énergie échangée au sein du groupement.

On définit  $taux_{energieFoyer}(h) \in [0,1]$  la fonction qui correspond au taux d'énergie qu'un foyer peut au maximum obtenir lors des échanges. Ce taux peut être défini en fonction de différents paramètres. Par exemple, le taux peut être proportionnel à la surface des foyers comme c'est le cas pour l'écoquartier LOGIS CÉVENOLS. On peut aussi imaginer un taux défini à partir du nombre de foyers dans le groupement, par exemple.

De plus, nous appliquons la contrainte suivante qui traduit le fait que la somme des taux d'énergie des différents foyers du groupement doit être égale à 1 :

$$\sum_{h \in H} taux_{energieFoyer}(h) = 1 \quad (40)$$

Cependant, ce type de répartition d'énergie peut avoir pour résultat que certains foyers reçoivent plus d'énergie que leur besoin. Pour un foyer, la fonction  $surplus_{fixeFoyer}(h, c) \in [0, +\infty[$  représente le surplus d'énergie attribué à un foyer par rapport à son besoin. De même, nous notons  $surplus_{fixeGroup}(c) \in [0, +\infty[$  le surplus d'énergie au niveau d'un groupement à chaque pas de temps de comptage. L'équation (41) permet de calculer le surplus d'énergie d'un groupement comme étant la somme des surplus d'énergie des foyers :

$$surplus_{fixeGroup}(c) = \sum_h surplus_{fixeFoyer}(h, c) \quad (41)$$

Il est à noter qu'avec une organisation à taux fixe, ces surplus d'énergie n'apparaissent que lorsque la place locale d'échange calcule la répartition de l'énergie entre les foyers i.e. au niveau de la couche contractuelle et à chaque pas de temps de comptage et ne sont pas visibles à chaque pas de temps de simulation à savoir au niveau de la couche physique. Or, les opérations de charge et de décharge de l'énergie sont des opérations ayant lieu au niveau de la couche physique. Comme ce surplus n'apparaît qu'au niveau de la couche contractuelle, il n'est alors pas possible de le stocker. Il faut alors mettre en place un mécanisme visant à déterminer la manière dont l'opération de comptage va gérer ce surplus.

Il existe deux solutions pour gérer ce surplus lié à l'organisation des échanges. La première est de permettre sa redistribution. Pour ce faire, nous proposons une répartition itérative. La seconde est de ne pas traiter ce surplus au niveau du groupement c'est-à-dire qu'il est systématiquement renvoyé vers le réseau.

L'organisation des échanges à taux fixe a donc pour entrées :

- $besoin_{foyerComptage}(h, c)$  : Besoin en énergie de chaque foyer  $h$  au pas de temps de comptage  $c$  ;

- $surplus_{foyerComptage}(h, c)$  : Surplus en énergie de chaque foyer  $h$  au pas de temps de comptage  $c$  ;
- $taux_{energieFoyer}(h, c)$  : Taux d'énergie que chaque foyer  $h$  peut obtenir au pas de temps de comptage  $c$  ;
- $E_{producedGroup}(c)$  : Énergie produite par le groupement et qui peut être répartie au pas de temps de comptage  $c$ .

En sortie l'organisation des échanges fournit :

- $e_{localFoyer}(h, c)$  : Énergie attribuée à chaque foyer  $h$  au pas de temps de comptage  $c$ .

La Figure 37 présente schématiquement le fonctionnement de l'organisation des échanges à taux fixe.

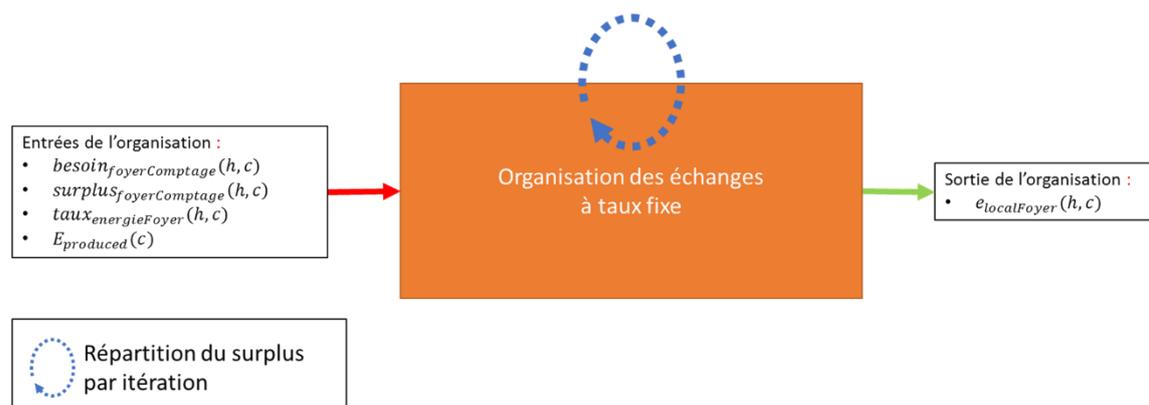


Figure 37 : Schéma-bloc d'une organisation des échanges à taux fixe

#### 4.3.2. Algorithme de calcul

Pour la mise en œuvre de l'algorithme, nous utilisons une variable intermédiaire nommée  $besoin_{foyerRestant}(h, c)$  qui évalue la quantité d'énergie dont un foyer a toujours besoin à la suite des échanges d'énergie. Nous rappelons que pour un foyer,  $besoin_{foyerComptage}(h, c)$  est le besoin en énergie d'un foyer à chaque pas de temps de comptage.

Pour chaque foyer, la place locale d'échange calcule dans un premier temps  $avoir(h, c) \in [0, +\infty[$ , l'avoir en énergie d'un foyer i.e. la quantité d'énergie maximale qu'un foyer du groupement peut recevoir pour chaque pas de temps de comptage :

$$avoir(h, c) = taux_{energie}(h) * E_{producedGroup}(c) \quad (42)$$

Avec  $E_{producedGroup}(c)$  l'ensemble de l'énergie produite au sein d'un groupement au pas de temps de comptage  $c$  et qui peut être répartie entre les foyers.

À partir de là, on peut identifier deux cas :

- L'avoir d'un foyer est inférieur à son besoin en énergie :

$$surplus_{fixeFoyer}(h, c) = 0 \quad (43)$$

$$e_{localFoyer}(h, c) = avoir(h, c) \quad (44)$$

$$besoin_{Foyerrestant}(h, c) = besoin_{foyerComptage}(h, c) - avoir(h, c) \quad (45)$$

- L'avoir d'un foyer est supérieur à son besoin en énergie :

$$surplus_{fixeFoyer}(h, c) = avoir(h, c) - besoin_{foyerComptage}(h, c) \quad (46)$$

$$e_{localFoyer}(h, c) = besoin_{foyerComptage}(h, c) \quad (47)$$

$$besoin_{foyerRestant}(h, c) = 0 \quad (48)$$

On peut ensuite calculer le surplus d'énergie au niveau du groupement :

$$surplus_{fixeGroup}(c) = \sum_h surplus_{fixeFoyer}(h, c) \quad (49)$$

Si  $surplus_{fixeGroup}(c) = 0$ , cela signifie qu'il n'y a pas de surplus à répartir. On peut alors faire le bilan financier du groupement.

### 4.3.3. Exemple

La Figure 38 donne un exemple de groupement avec trois foyers consommateurs d'énergie  $h_1, h_2$  et  $h_3$  et deux moyens de production mutualisés  $p_1$  et  $p_2$ . Les taux de répartition et les taux de propriété sont indiqués sur la Figure 38.

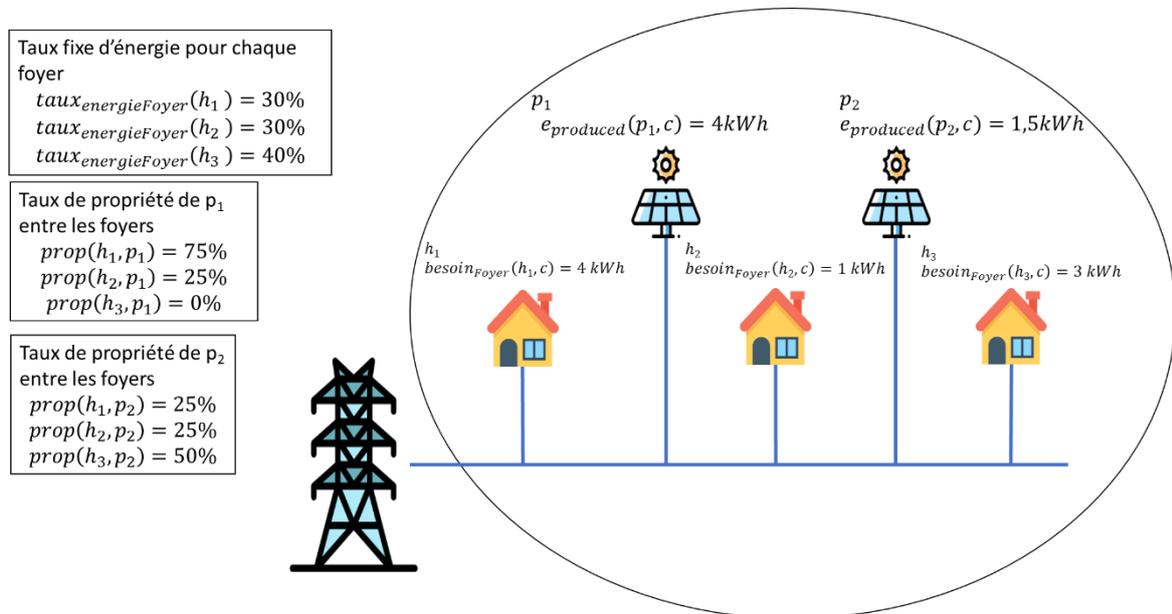


Figure 38 : Exemple de groupement avec une organisation des échanges à taux fixe et deux moyens de production mutualisés

Dans un premier temps, la quantité d'énergie à répartir au sein du groupement est estimée :

$$E_{producedGroup}(c) = 4 + 1,5 = 5,5 \text{ kWh}$$

Pour chaque foyer, nous obtenons :

- $avoir(h_1, c) = 5,5 * 0,3 = 1,65 \text{ kWh}$
- $avoir(h_2, c) = 5,5 * 0,4 = 1,65 \text{ kWh}$
- $avoir(h_3, c) = 5,5 * 0,3 = 2,20 \text{ kWh}$

Ensuite, pour chaque foyer, nous comparons  $avoir(h, c)$  et  $besoin_{Foyer}(h, c)$  :

- Pour le foyer  $h_1$ ,  $avoir(h_1, c) < besoin_{Foyer}(h_1, c)$  :
  - $surplus_{fixeFoyer}(h_1, c) = 0$
  - $e_{localFoyer}(h_1, c) = 1,65 \text{ kWh}$
  - $besoin_{foyerRestant}(h_1, c) = 4 - 1,65 = 2,35 \text{ kWh}$
- Pour le foyer  $h_2$ ,  $avoir(h_2, c) > besoin(h_2, c)$  :
  - $surplus_{fixeFoyer}(h_2, c) = 1,65 - 1 = 0,65 \text{ kWh}$
  - $e_{localFoyer}(h_2, c) = 1 \text{ kWh}$
  - $besoin_{foyerRestant}(h_2, c) = 0$
- Pour le foyer  $h_3$ ,  $avoir(h_3, c) < besoin(h_3, c)$  :
  - $surplus_{fixeFoyer}(h_3, c) = 0$
  - $e_{localFoyer}(h_3, c) = 2,20 \text{ kWh}$
  - $besoin_{foyerRestant}(h_3, c) = 3 - 2,20 = 0,8 \text{ kWh}$

Il apparaît que  $surplus_{fixeGroup}(c) = 0,65 \text{ kWh}$ . Il s'agit d'un surplus d'énergie provenant du foyer  $h_2$  qui n'a pas consommé tout ce que l'organisation des échanges lui a permis d'obtenir. Différentes stratégies pour gérer ce surplus sont alors possibles. Nous en proposons deux dans ce qui suit.

#### 4.3.4. Gestion du surplus par revente

Le principe de la gestion du surplus par revente consiste à vendre le surplus d'énergie à l'extérieur du groupement. Le bénéfice ainsi réalisé est réparti entre les différents foyers du groupement en fonction des taux de propriétés  $prop(h, j)$  avec  $h \in H$  et  $j \in PROD$ .

Dans un premier temps, le bénéfice réalisé par la vente du surplus d'énergie est estimé grâce à l'équation (50) :

$$benefice_{surplus}(c) = surplus_{fixe}(c) * a(t) \quad (50)$$

Ensuite, le gain financier de chaque foyer est calculé par l'équation (51) :

$$\forall i \in H \cup A, gain_{surplus}(i, c) = \sum_{j \in PROD} \left[ \frac{e_{produced}(j, c)}{E_{producedGroup}(c)} * prop(i, j) \right] * benefice_{surplus}(c) \quad (51)$$

À titre d'exemple, reprenons la configuration de la Figure 38. À la fin des échanges d'énergie, un surplus d'énergie de 0,65 kWh est apparu. Si  $a(t) = 2 \text{ €/kWh}$  est le prix de vente de l'énergie, la recette réalisée par la vente de l'énergie est égale à :

$$recette_{surplusGroup}(c) = 0,65 * 2 = 1,30 \text{ €}$$

Il en résulte, pour chaque foyer, un bénéfice de :

- $recette_{surplus}(h_1, t) = \left[ \left( \frac{4}{5,5} * 0,75 \right) + \left( \frac{1,5}{5,5} * 0,25 \right) \right] * 1,3 = 0,798 \text{ €}$
- $recette_{surplus}(h_2, t) = \left[ \left( \frac{4}{5,5} * 0,25 \right) + \left( \frac{1,5}{5,5} * 0,25 \right) \right] * 1,3 = 0,325 \text{ €}$
- $recette_{surplus}(h_3, t) = \left[ \left( \frac{4}{5,5} * 0 \right) + \left( \frac{1,5}{5,5} * 0,5 \right) \right] * 1,3 = 0,177 \text{ €}.$

#### 4.3.5. Gestion du surplus par itération

Le principe de la gestion du surplus par itération est de répartir le surplus en énergie en fonction du nombre de foyers avec des besoins en énergie. La distribution d'énergie est répétée jusqu'à épuisement du surplus et tant que des foyers ont un besoin en énergie.

Pour réaliser cette répartition, nous définissons la fonction  $surplus_{fixeGroup}(c)$  qui représente le surplus en énergie du groupement après la répartition initiale effectuée suivant les règles de l'organisation à taux fixe. Nous définissons également la fonction  $besoin_{FoyerRestant}(h, c)$  qui évalue le besoin en énergie de chaque foyer  $h$  à chaque pas de temps de comptage  $c$ .

Les entrées de l'algorithme de gestion du surplus par itération sont :

- $surplus_{fixeGroup}(c)$  : Surplus d'énergie du groupement qui doit être réparti au pas de temps de comptage  $c$  ;
- $besoin_{foyerComptage}(h, c)$  : Besoin d'énergie du foyer  $h$  au pas de temps de comptage  $c$  ;
- $besoin_{foyerRestant}(h, c)$  : Besoin d'énergie du foyer  $h$  au pas de temps de comptage  $c$  et après la répartition d'énergie initiale effectuée suivant les règles de l'organisation à taux fixe.

L'algorithme fournit en sortie :

- $e_{localFoyer}(h, c)$  : Énergie allouée à chaque foyer  $h$  au pas de temps de comptage  $c$  et à la suite de l'opération de distribution itérative du surplus.

L'algorithme pour la répartition du surplus par itération est donné par l'Algorithme 2.

---

```

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

```

---

Algorithme 2 : Algorithme de répartition du surplus d'énergie par itération

Pour illustrer le fonctionnement de cet algorithme, nous considérons la configuration de la Figure 38.

Nous rappelons les résultats suivants obtenus précédemment :

- Pour le foyer  $h_1$  :
  - $surplus_{fixeFoyer}(h_1, c) = 0$
  - $e_{localFoyer}(h_1, c) = 1,65 \text{ kWh}$
  - $besoin_{foyerRestant}(h_1, c) = 4 - 1,65 = 2,35 \text{ kWh}$
- Pour le foyer  $h_2$  :
  - $surplus_{fixeFoyer}(h_2, c) = 1,65 - 1 = 0,65 \text{ kWh}$
  - $e_{localFoyer}(h_2, c) = 1 \text{ kWh}$
  - $besoin_{foyerRestant}(h_2, c) = 0$
- Pour le foyer  $h_3$  :
  - $surplus_{fixeFoyer}(h_3, c) = 0$
  - $e_{localFoyer}(h_3, c) = 2,20 \text{ kWh}$
  - $besoin_{foyerRestant}(h_3, c) = 3 - 2,20 = 0,8 \text{ kWh}$

Seuls les foyers  $h_1$  et  $h_3$  ont un besoin en énergie avec un surplus total au niveau du groupement égal à  $0,65 \text{ kWh}$ .

Pour la première itération de l'algorithme, nous avons  $residu = surplus_{fixe}(c) = 0,65$  kWh. Ainsi, nous obtenons :

- Le foyer  $h_1$  reçoit 0,325 kWh, il vient :
  - $besoin_{foyerComptage}(h_1, c) = 2,35 - 0,325 = 2,025$  kWh
  - $residu = 0,65 - 0,325 = 0,325$  kWh
  - $e_{local}(h_1, c) = 1,65 + 0,325 = 1,975$  kWh
- Le foyer  $h_3$  reçoit 0,325 kWh, il vient :
  - $besoin_{foyerComptage}(h_3, c) = 0,8 - 0,325 = 0,475$  kWh
  - $residu = 0,325 - 0,325 = 0$  kWh
  - $e_{local}(h_3, c) = 2,20 + 0,325 = 2,525$  kWh

Ensuite, la valeur du surplus est actualisée :  $surplus_{fixe}(c) = residu = 0$  kWh.

Le surplus d'énergie étant épuisé, l'algorithme est stoppé, car il n'y a plus d'énergie à répartir entre les foyers du groupement. Cependant, les foyers  $h_1$  et  $h_3$  ont toujours des besoins en énergie. Ces besoins peuvent potentiellement être satisfaits par un déstockage d'énergie depuis une batterie collective ou par l'achat d'énergie au réseau.

## 4.4. Organisation concurrentielle des échanges

Au sein d'un groupement et avec une organisation concurrentielle des échanges, les foyers échangent de l'énergie à travers un marché et des processus d'achats et de ventes. Nous considérons deux fonctionnements possibles pour ce mode d'échange. Un premier pour lequel les prix sont fixés par les acheteurs et dans lequel les vendeurs vont vendre l'énergie au plus offrant et un second où ce sont les vendeurs qui décident de leur prix et dans lequel les acheteurs vont acheter l'énergie au moins-disant. Dans ce scénario, nous considérons qu'une organisation concurrentielle des échanges se fait sans présence de moyens de production d'énergie mutualisés.

### 4.4.1. Vente au plus offrant

#### *Principe général*

Dans la configuration vente au plus offrant, chaque foyer souhaitant acheter de l'énergie soumet à la place locale d'échange une offre indiquant la quantité d'énergie qu'il souhaite acheter correspondant à son besoin ainsi que le prix auquel il désire acheter cette énergie. Les foyers vendant de l'énergie proposent à la place locale d'échange la quantité d'énergie qu'ils souhaitent vendre correspondant à leur surplus d'énergie. En fonction de ces offres d'achat et de vente, la place locale d'échange calcule une répartition de l'énergie entre les foyers privilégiant les foyers qui proposent les prix d'achat les plus élevés.

Nous définissons le tableau  $offres_{achat}$  dans lequel sont placées les offres d'achat. Une offre d'achat est constituée de trois éléments tels que  $achat = <$

$acheteur, quantité_{achat}, prix >$  avec  $acheteur$  le foyer ayant émis l'offre d'achat,  $quantité_{achat}$  la quantité d'énergie qu'un foyer désire acheter et  $prix$  le prix proposé par le foyer. Ce tableau est ordonné par ordre de prix décroissant à savoir du plus offrant au moins offrant.

De même, nous définissons un tableau  $offre_{vente}$  qui est constitué des différentes offres de vente telle que  $vente = < vendeur, quantité_{vente} >$  avec  $vendeur$  le foyer ayant émis l'offre de vente et  $quantité_{vente}$  la quantité d'énergie vendue par le foyer.

Ainsi, en entrée nous avons :

- $offres_{achat}$  : Tableau des offres d'achat des foyers du groupement ;
- $offres_{vente}$  : Tableau des offres de vente des foyers du groupement.

En sortie, les fonctions suivantes sont évaluées :

- $e_{localFoyer}(h, c)$  : Énergie achetée par un foyer  $h$  au pas de temps de comptage  $c$  ;
- $e_{venduFoyer}(h, c)$  : Énergie vendue par un foyer  $h$  au pas de temps de comptage  $c$ .

La Figure 39 présente schématiquement le fonctionnement de cette organisation des échanges :



Figure 39 : Schéma-bloc d'une organisation concurrentielle des échanges avec vente au plus offrant

### Algorithme de calcul

L'algorithme de calcul des échanges d'énergie avec vente au plus offrant nécessite donc en entrée deux tableaux :

1. Tableau contenant les offres d'achat :

$$offres_{achat} = [achat_1; \dots; achat_n]$$

2. Tableau contenant les offres de vente :

$$offres_{vente} = [vente_1; \dots; vente_n]$$

Ensuite, l'algorithme répartit l'énergie en fonction des prix d'achat :

1. Les offres d'achat avec le prix le plus élevé sont regroupées ce qui produit un nouveau tableau d'offres d'achat nommé *plusOffrant* ;

2. Calcul de la fonction  $Besoin_{conc} = \sum_{achat \in plusOffrant} quantité_{achat}$  qui représente l'énergie totale demandée par les foyers du tableau *plusOffrant* ;
3. Calcul de la fonction  $Vente_{conc} = \sum_{vente \in offres_{vente}} quantité_{vente}$  qui représente l'énergie totale disponible chez les vendeurs ;
4. On distingue alors deux situations :

- Situation n°1 :  $Besoin_{conc} \leq Vente_{conc}$  : La quantité d'énergie de l'ensemble des offres d'achat produites par les foyers qui offrent le prix le plus élevé est inférieure à la quantité d'énergie disponible à la vente. Dans ce cas, pour chaque acheteur, nous évaluons la fonction  $vendu(v)$  qui constitue l'énergie qu'un foyer  $v$  a vendu aux foyers proposant le prix d'achat le plus élevé :

$$vendu(v) = \frac{quantité_{vente}(v)}{Vente_{conc}} * Besoin_{conc} \quad (52)$$

Ensuite, la valeur de la quantité d'énergie disponible à la vente est actualisée :

$$quantité(v) = quantité_{vente}(v) - vendu(v) \quad (53)$$

Enfin, pour chaque foyer du tableau *plusOffrant*, nous estimons la fonction  $achat(a)$  qui est la quantité d'énergie achetée par ces foyers ce qui permet de mettre à jour la quantité d'énergie de leur offre d'achat :

$$achat(a) = quantité_{achat}(a) \quad (54)$$

$$quantité_{achat}(a) = 0 \quad (55)$$

- Situation n°2 :  $Besoin_{conc} > Vente_{conc}$  : La quantité d'énergie de l'ensemble des offres d'achat produites par les foyers qui offrent le prix le plus élevé est supérieure à la quantité d'énergie disponible à la vente. Dans ce cas, pour chaque vendeur nous estimons la quantité d'énergie qu'il a vendue et son offre de vente est mise à jour :

$$vendu(v) = quantité_{vente}(v) \quad (56)$$

$$quantité_{vente}(v) = 0 \quad (57)$$

Pour chaque acheteur du tableau *plusOffrant*, la fonction  $achat(a)$  est évaluée et leur offre d'achat est actualisée :

$$achat(a) = \frac{quantité_{achat}(a)}{Besoin_{conc}} * Vente_{conc} \quad (58)$$

$$quantité_{achat}(a) = quantité_{achat} - achat(a) \quad (59)$$

5. Nous retirons du tableau *offres\_{vente}* l'ensemble des vendeurs qui n'ont plus d'énergie à vendre i.e.  $quantité_{vente}(v) = 0$  et nous retirons du tableau

$offres_{achat}$  l'ensemble des foyers pour lesquels la fonction  $quantité_{achat}(a) = 0$  ;

- Tant que l'un des deux tableaux  $offres_{achat}$  ou  $offres_{vente}$  n'est pas vide, les étapes 1 à 5 sont répétées.

Il est à noter qu'à chaque fois qu'une quantité d'énergie est achetée par un foyer, la fonction  $e_{localFoyer}(h, c)$  est mise à jour ainsi que la dépense du foyer :

$$e_{localFoyer}(h, c) = e_{localFoyer}(h, c) + achat(a) \quad (60)$$

$$depense(h, c) = depense(h, c) + (achat(a) * prix(a)) \quad (61)$$

De même pour chaque opération de vente, la quantité d'énergie vendue par chaque foyer est mise à jour ainsi que le gain financier associé à cette vente :

$$e_{venduFoyer}(h, c) = e_{venduFoyer}(h, c) + vendu(v) \quad (62)$$

$$gain(h, c) = gain(h, c) + (vendu(v) * prix(a)) \quad (63)$$

### Exemple

La Figure 40 présente une configuration pour laquelle les foyers  $h_1$  et  $h_2$  sont des vendeurs d'énergie et les foyers  $h_3, h_4, h_5$  sont des acheteurs d'énergie.

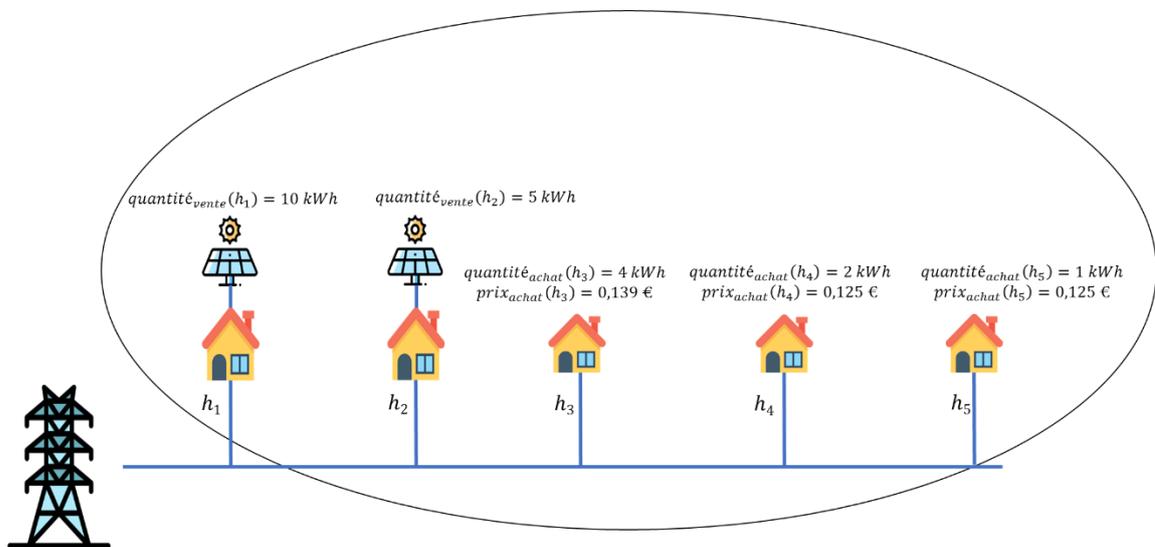


Figure 40 : Exemple de groupement avec une organisation concurrentielle des échanges d'énergie et vente aux plus offrants

La première étape consiste à construire les tableaux  $offres_{vente}$  et  $offres_{achat}$  :

$$offres_{achat} = [ \langle h_3; 4; 0,139 \rangle, \langle h_4; 2; 0,125 \rangle, \langle h_5; 1; 0,125 \rangle ]$$

$$offres_{vente} = [ \langle h_1, 10 \rangle, \langle h_2, 5 \rangle ]$$

Ensuite, nous créons  $plusOffrant = [ < h_3; 4; 0,139 > ]$  le tableau des foyers proposant le prix le plus élevé. Le besoin en énergie des foyers les plus offrants est  $Besoin_{Cons} = 4 kWh$ . Nous pouvons également évaluer la fonction  $Vente_{Conc} = 10 + 5 = 15 kWh$  qui est la quantité d'énergie disponible à la vente.

Nous sommes dans la situation n°1 à savoir que  $Besoin_{Conc} \leq Vente_{Conc}$

- Pour chaque vendeur :
  - Pour le foyer  $h_1$  :
    - $venu(h_1) = \frac{10}{15} * 4 = 2,7 kWh$
    - $quantité_{vente}(h_1) = 10 - 2,7 = 7,3 kWh$
    - $gain(h_1, c) = 0 + (2,7 * 0,139) = 0,375 €$
    - $e_{venuFoyer}(h_1, c) = 0 + 2,7 = 2,7 kWh$
  - Pour le foyer  $h_2$  :
    - $venu(h_2) = \frac{5}{15} * 4 = 1,3 kWh$
    - $quantité_{vente}(h_2) = 5 - 1,3 = 3,7 kWh$
    - $gain(h_2, c) = 0 + (1,3 * 0,139) = 0,181 €$
    - $e_{venuFoyer}(h_2, c) = 0 + 1,3 = 1,3 kWh$
- Pour chaque acheteur :
  - Pour le foyer  $h_3$  :
    - $achat(h_3) = 4 kWh$
    - $e_{localFoyer}(h_3, c) = 0 + 4 = 4 kWh$
    - $quantité_{achat}(h_3) = 4 - 4 = 0$
    - $depense(h_3, c) = 4 * 0,139 = 0,556 €$
- Les deux tableaux  $offres_{achat}$  et  $offres_{vente}$  sont alors mis à jour :

$$offres_{achat} = [ < h_4; 2; 0,125 >, < h_5; 1; 0,125 > ]$$

$$offres_{vente} = [ < h_1; 7,3 >, < h_2; 3,7 > ]$$

Le tableau  $plusOffrant = [ < h_4; 2; 0,125 >, < h_5; 1; 0,125 > ]$  est alors actualisé. ce qui permet d'estimer à nouveau  $Besoin_{Conc} = 2 + 1 = 3 kWh$  le besoin en énergie des foyers les plus offrants. Nous pouvons également calculer  $Vente_{Conc} = 7,3 + 3,7 = 11 kWh$  la quantité d'énergie disponible à la vente.

Nous sommes à nouveau dans la situation n°1 pour laquelle  $Besoin_{Conc} \leq Vente_{Conc}$  :

- Pour chaque vendeur :
  - Pour le foyer  $h_1$  :
    - $venu(h_1) = \frac{7,3}{11} * 3 = 2 kWh$
    - $quantité_{vente}(h_1) = 7,3 - 2,0 = 5,3 kWh$

- $gain(h_1, c) = 0,375 + (2 * 0,125) = 0,625 \text{ €}$
- $e_{venduFoyer}(h_1, c) = 2,7 + 2,0 = 4,7 \text{ kWh}$
- Pour le foyer  $h_2$  :
  - $vendu(h_2) = \frac{3,7}{11} * 3 = 1 \text{ kWh}$
  - $quantité_{vente}(h_2) = 3,7 - 1 = 2,7 \text{ kWh}$
  - $gain(h_2, c) = 0,181 + (1 * 0,125) = 0,306 \text{ €}$
  - $e_{venduFoyer}(h_2, c) = 1,3 + 1 = 2,3 \text{ kWh}$
- Pour chaque acheteur :
  - Pour le foyer  $h_4$  :
    - $achat(h_4) = 2 \text{ kWh}$
    - $e_{localFoyer}(h_4, c) = 0 + 2 = 2 \text{ kWh}$
    - $quantité_{achat}(h_4) = 0$
    - $depense(h_4, c) = 0 + (2 * 0,125) = 0,25 \text{ €}$
  - Pour le foyer  $h_5$  :
    - $achat(h_5) = 1 \text{ kWh}$
    - $e_{localFoyer}(h_5, c) = 0 + 1 = 1 \text{ kWh}$
    - $quantité_{achat}(h_5) = 0$
    - $depense(h_5, c) = 0 + (1 * 0,125) = 0,125 \text{ €}$
- Les deux tableaux suivants sont alors actualisés :

$$offres_{achat} = [\text{vide}]$$

$$offres_{vente} = [< X_1; 5,3 >, < X_2; 2,7 >]$$

Le tableau  $offres_{achat}$  étant vide, cela signifie qu'il ne reste plus de foyers souhaitant acheter de l'énergie dans le groupement. L'algorithme est alors terminé.

#### 4.4.2. Achat au moins-disant

##### *Principe général*

Au sein d'un groupement avec une organisation concurrentielle d'achat au moins-disant, chaque foyer souhaitant vendre de l'énergie propose à la place locale d'échange une offre de vente indiquant la quantité d'énergie qu'il souhaite vendre correspondant à son surplus d'énergie ainsi que le prix auquel il souhaite vendre cette énergie. Les foyers achetant de l'énergie soumettent à la place locale d'échange la quantité d'énergie qu'ils souhaitent acheter équivalente à leur besoin en énergie. En fonction de ces offres d'achat et de vente, la place locale d'échange évalue une répartition de l'énergie entre les foyers en faisant en sorte d'acheter en priorité l'énergie aux foyers proposant les prix d'achat les plus bas.

Le tableau  $offres_{achat}$  contient les offres d'achat dont le contenu est constitué des deux champs suivants  $achat = \langle acheteur, quantité_{achat} \rangle$  spécifiant quelle quantité d'énergie un acheteur désire acquérir.

Nous créons également le tableau  $offre_{vente}$  qui est composé des offres de vente telles que  $vente = \langle vendeur, quantité_{vente}, prix \rangle$  permettant de connaître la quantité d'énergie proposée à la vente et à quel prix. Ce tableau est classé par ordre de prix croissant à savoir du moins cher au plus cher.

Il est nécessaire de disposer en entrée :

- $offres_{achat}$  : Tableau contenant les offres d'achat des foyers du groupement ;
- $offres_{vente}$  : Tableau contenant les offres de vente des foyers du groupement.

Les sorties du modèle sont :

- $e_{localFoyer}(h, c)$  : Énergie achetée par un foyer  $h$  au pas de temps de comptage  $c$  ;
- $e_{venduFoyer}(h, c)$  : Énergie vendue par un foyer  $h$  au pas de temps de comptage  $c$ .

La Figure 41 présente schématiquement le fonctionnement de cette organisation des échanges.



Figure 41 : Schéma-bloc d'une organisation concurrentielle des échanges avec achat au moins-disant

### Algorithme de calcul

L'algorithme de calcul dans le cadre d'un achat au moins-disant fonctionne de la même manière que l'algorithme de vente au plus offrant. La seule différence est que l'algorithme va considérer en priorité les foyers vendant l'énergie au prix le plus bas dans le groupement.

### Exemple

Dans la configuration présentée à la Figure 42, les foyers  $h_1$  et  $h_2$  vendent de l'énergie alors que les foyers  $h_3, h_4, h_5$  en achètent.

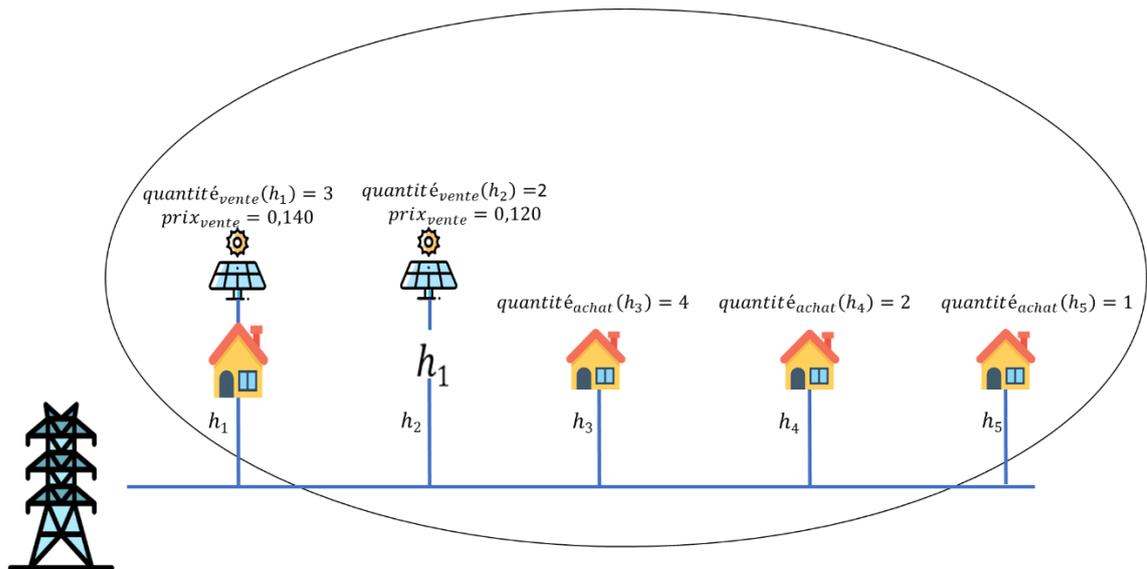


Figure 42 : Exemple de groupement avec une organisation concurrentielle des échanges et achat au moins-disant

Dans un premier temps, nous construisons les tableaux  $offres_{vente}$  et  $offres_{achat}$  :

$$offres_{achat} = [< h_3; 4 >, < h_4; 2 >, < h_5; 1 >]$$

$$offres_{vente} = [< h_1; 3; 0,140 >, < h_2; 2; 0,120 >]$$

Maintenant, déroulons l'algorithme qui va permettre de réaliser la répartition de l'énergie.

Tout d'abord, nous créons le tableau  $moinsCher = [< h_2; 2; 0,120 >]$  qui est composé des foyers proposant le prix de vente de l'énergie le plus bas. Ensuite, nous estimons la fonction  $Besoin_{cons} = 4 + 2 + 1 = 7 kWh$  qui représente le besoin en énergie des foyers acheteurs et la fonction  $Vente_{conc} = 2 kWh$  qui est la quantité d'énergie disponible à la vente.

Nous sommes dans la situation où  $Besoin_{conc} > Vente_{conc}$  :

- Pour chaque vendeur du tableau  $moinsCher$  :
  - Pour le foyer  $h_2$  :
    - $vendu(h_2) = 2 kWh$
    - $quantité_{vente}(h_2) = 0$
    - $gain(h_2, c) = 0 + (2 * 0,120) = 0,240 €$
    - $e_{venduFoyer}(h_2, c) = 0 + 2 = 2 kWh$
- Pour chaque foyer acheteur d'énergie :
  - Pour le foyer  $h_3$  :
    - $achat(h_3) = \frac{4}{7} * 2 = 1,1 kWh$
    - $e_{localFoyer}(h_3) = 1,1 kWh$
    - $quantité_{achat}(h_3) = 4 - 1,1 = 2,9 kWh$

- $depense(h_3, c) = 0 + (1,1 * 0,120) = 0,132 \text{ €}$
- Pour le foyer  $h_4$  :
  - $achat(h_4) = \frac{2}{7} * 2 = 0,6 \text{ kWh}$
  - $e_{localFoyer}(h_4) = 0,6 \text{ kWh}$
  - $quantité_{achat}(h_4) = 2 - 0,6 = 1,4 \text{ kWh}$
  - $depense(h_4, c) = 0 + (0,6 * 0,120) = 0,072 \text{ €}$
- Pour le foyer  $h_5$  :
  - $achat(h_5) = \frac{1}{7} * 2 = 0,3 \text{ kWh}$
  - $e_{localFoyer}(h_5) = 0,3 \text{ kWh}$
  - $quantité_{achat}(h_5) = 1 - 0,3 = 0,7 \text{ kWh}$
  - $depense(h_5, c) = 0 + (0,3 * 0,120) = 0,036 \text{ €}$

Ensuite, les tableaux  $offres_{achat}$  et  $offres_{vente}$  sont mis à jour :

$$offres_{achat} = [ < h_3; 2,9 > < h_4; 1,4 > , < h_5; 0,7 > ]$$

$$offres_{vente} = [ < h_1; 3; 0,140 > ]$$

De même, le tableau  $moinsCher = [ < h_1; 3; 0,140 > ]$  est actualisé. Les nouveaux besoins en énergie des foyers acheteurs sont alors actualisés par la fonction  $Besoin_{conc} = 2,9 + 1,4 + 0,7 = 5 \text{ kWh}$  ainsi que  $Vente_{conc} = 3 \text{ kWh}$  qui est la nouvelle la quantité d'énergie proposée à la vente par les moins-disants.

Nous sommes toujours dans la situation où  $Besoin_{conc} > Vente_{conc}$  :

- Pour chaque vendeur du tableau  $moinsCher$  :
  - Pour le foyer  $h_1$  :
    - $vendu(h_1) = 3 \text{ kWh}$
    - $quantité_{vente}(h_1) = 0$
    - $gain(h_1, c) = 0 + (3 * 0,140) = 0,42 \text{ €}$
    - $e_{venduFoyer}(h_1, c) = 0 + 3 = 3 \text{ kWh}$
- Pour chaque foyer acheteur d'énergie :
  - Pour le foyer  $h_3$  :
    - $achat(h_3) = \frac{2,9}{5} * 3 = 1,8 \text{ kWh}$
    - $e_{localFoyer}(h_3) = 1,1 + 1,8 = 2,9 \text{ kWh}$
    - $quantité_{achat}(h_3) = 2,9 - 1,8 = 1,1 \text{ kWh}$
    - $depense(h_3, c) = 0,132 + (1,8 * 0,140) = 0,384 \text{ €}$
  - Pour le foyer  $h_4$  :
    - $achat(h_4) = \frac{1,4}{5,0} * 3 = 0,8 \text{ kWh}$
    - $e_{localFoyer}(h_4) = 0,6 + 0,8 = 1,4 \text{ kWh}$

- $quantité_{achat}(h_4) = 1,4 - 0,8 = 0,6 \text{ kWh}$
- $depense(h_4, c) = 0,072 + (0,8 * 0,140) = 0,184 \text{ €}$
- Pour le foyer  $h_5$  :
  - $achat(h_5) = \frac{0,7}{5} * 3 = 0,4 \text{ kWh}$
  - $e_{localFoyer}(h_5) = 0,3 + 0,4 = 0,7 \text{ kWh}$
  - $quantité_{achat}(h_5) = 0,7 - 0,4 = 0,3 \text{ kWh}$
  - $depense(h_5, c) = 0,036 + (0,4 * 0,140) = 0,092 \text{ €}$
- Enfin, le contenu des deux tableaux suivants est actualisé :

$$offres_{achat} = [< h_3, 1,1 > < h_4, 0,6 >, < h_5, 0,3 >]$$

$$offres_{vente} = [vide]$$

Le tableau  $offres_{vente}$  est vide, cela signifie qu'il ne reste plus de foyers souhaitant vendre de l'énergie dans le groupement, les itérations sont alors stoppées.

#### 4.4.3. Définition des prix

L'un des intérêts de l'utilisation d'une organisation concurrentielle des échanges est qu'elle permet aux foyers de décider eux-mêmes des prix auxquels ils sont prêts à acheter ou à revendre l'énergie produite localement. Considérant qu'un foyer ne va pas fixer manuellement, à chaque pas de temps, le prix de son énergie, on peut concevoir que des politiques de prix seront proposées et gérées de manière automatique, avec l'accord du client. Il devient alors intéressant, dans une simulation, d'étudier l'impact de ces politiques de prix sur la répartition de l'énergie, par exemple.

Pour réaliser la simulation de l'ACC, il est nécessaire de définir un algorithme pour fixer les prix. En l'absence de donnée, nous avons choisi de mettre en place un algorithme simple fondé sur trois principes :

- Calcul de la différence entre un objectif et un résultat : plus le résultat est éloigné de l'objectif visé par le foyer, plus le prix de vente ou d'achat de l'énergie évoluera vite ;
- Calcul d'un prix cible pour le foyer et qui est fonction de l'écart entre le résultat et l'objectif visé par le foyer ;
- Calcul du nouveau prix en fonction du prix souhaité par le foyer et du prix pratiqué au pas de temps de comptage précédent. La stratégie utilisée permet à la fois de garder un historique des anciens prix et de contrôler la vitesse d'évolution.

Ainsi, à chaque pas de temps de comptage, les foyers vendeurs ou acheteurs d'énergie recalculent leurs prix en fonction du résultat des échanges d'énergie et des prix pratiqués précédemment.

### *Définition des prix pour une vente au plus offrant*

Pour une organisation concurrentielle de vente au plus offrant, ce sont les acheteurs d'énergie qui fixe le prix auquel ils souhaitent acheter cette dernière. Ce sont donc eux qui à chaque pas de temps de comptage réviseront leur prix d'achat pour le pas de temps de comptage suivant.

Les paramètres de l'algorithme sont :

- *prixMax* : Prix d'achat maximum proposé par le foyer ;
- *prixMin* : Prix d'achat minimum proposé par le foyer ;
- *seuilMin* : Résultat minimum attendu par un foyer achetant de l'énergie. Il s'agit d'un pourcentage indiquant la part minimale d'énergie qu'un foyer veut acheter lors des échanges ;
- *seuilMax* : Résultat minimum attendu par un foyer achetant de l'énergie. Il s'agit d'un pourcentage indiquant la part maximale d'énergie qu'un foyer veut acheter lors des échanges ;
- $\alpha$  : Constante qui permet de contrôler la rapidité avec laquelle les prix évoluent en gardant en mémoire les prix pratiqués lors des pas de temps de comptage précédents. Plus  $\alpha$  est petit plus les prix évolueront rapidement.

Les données d'entrée de l'algorithme sont :

- *prix(c)* : Prix d'achat de l'énergie pour un foyer à un pas de temps de comptage  $c$  ;
- *resultatEchange(c)* : Pourcentage indiquant pour un foyer la part d'énergie issue des échanges qu'il a consommée durant le pas de temps de comptage  $c$  :

$$resultatEchange(c) = \frac{e_{localFoyer}(c)}{besoin_{foyerComptage}(c)} \quad (64)$$

Avec  $e_{localFoyer}(c)$  énergie consommée issue des échanges et  $besoin_{foyerComptage}(c)$  besoin en énergie du foyer.

En sortie l'algorithme fournit *prix(c + 1)* le prix d'achat de l'énergie pour le pas de temps de comptage suivant.

L'Algorithme 3 présente le calcul de ce nouveau prix.

---

```

1 Soit  $prix(c)$ ;
2 Soit  $resultatEchange(c)$  ;
3 if  $resultatEchange(c) > seuilMax$  then
4   |  $\Delta = \frac{resultatEchange(c) - seuilMax}{1 - seuilMax}$ ;
5   |  $prixCible = prix(c) - (prix(c) - prixMin) * \Delta$ ;
6 end
7 else if  $resultatEchange(c) > seuilMin$  then
8   |  $\Delta = \frac{seuilMax - resultatEchange(c)}{seuilMin}$ ;
9   |  $prixCible = prix(c) - (prixMax - prix(c)) * \Delta$ ;
10 end
11 retourne  $prix(c + 1) = prix(c) * \alpha + prixCible * (1 - \alpha)$ ;

```

---

Algorithme 3 : Algorithme de calcul du prix d'achat de l'énergie lors d'une vente au plus offrant

Il est à noter qu'un foyer acheteur ne révisé pas son prix d'achat si :

- Aucune énergie n'était en vente au sein du groupement ;
- Le foyer n'a pas fait d'offre d'achat d'énergie.

#### Définition des prix pour l'achat au moins-disant

Pour une organisation concurrentielle d'achat au moins-disant, ce sont les foyers vendeurs d'énergie qui révisent leur prix de vente de l'énergie à chaque pas de temps de comptage. L'algorithme pour fixer les prix fonctionne de manière similaire à celui présenté dans le cadre de la vente au plus offrant. La seule différence est que les foyers baissent leurs prix si  $resultatEchange(c) < seuilMin$  et que les foyers montent leurs prix si  $resultatEchange(c) > seuilMax$

Il faut aussi noter qu'un foyer acheteur ne révisé pas son prix d'achat si :

- Aucune énergie n'était en vente au sein du groupement ;
- Le foyer n'a pas fait d'offre d'achat d'énergie.

## 4.5. Gestion du stockage collectif

Pour rappel, une organisation du stockage collectif a pour but de déterminer la manière dont l'énergie provenant des moyens de stockage collectifs du groupement est échangée entre les foyers. Dans nos travaux, nous avons implémenté une unique organisation du stockage collectif c'est à dire l'organisation proportionnelle du stockage collectif. En effet, il s'agit d'une organisation qui propose une certaine équité entre les foyers (plus un foyer consomme, plus il recevra de l'énergie), mais également, elle fait écho à l'organisation proportionnelle des échanges décrite dans la section 4.2. Dans nos travaux et par souci de simplification, nous ne considérons que des groupements possédant un seul système de

stockage collectif. Cependant, ce système peut aussi bien représenter une seule batterie qu'un ensemble de batteries collectives fonctionnant suivant les mêmes règles.

#### 4.5.1. Principe général

Le principe général adopté est de répartir l'énergie déstockée proportionnellement aux besoins en énergie des foyers.

En entrée, nous avons :

- $E_{dischargedGroup}(c)$  : Quantité d'énergie déstockée par le moyen de stockage collectif du groupement au pas de temps de comptage  $c$  ;
- $besoin_{foyerComptage}(h, c)$  : Besoin en énergie du foyer  $h$  au pas de temps de comptage  $c$  ;
- $e_{localFoyer}(h, c)$  : Quantité d'énergie issue des échanges et reçue par le foyer  $h$  au pas de temps de comptage  $c$ .

En sortie, l'algorithme fournit :

- $e_{storageConsumptionGroup}(h, c)$  : Quantité d'énergie issue du déstockage et consommée par le foyer  $h$  au pas de temps de comptage  $c$ .

La Figure 43 présente schématiquement le fonctionnement d'une organisation proportionnelle du stockage collectif.



Figure 43 : Schéma-bloc d'une organisation proportionnelle du stockage collectif

#### 4.5.2. Algorithme de calcul

Tout d'abord, pour chaque foyer, nous définissons une variable intermédiaire nommée  $besoin_{storageFoyer}(h, c) \in [0, +\infty[$  qui correspond au besoin en énergie d'un foyer une fois les échanges d'énergie réalisés par la place locale d'échange. Il est alors fait appel au déstockage collectif pour satisfaire ce besoin en énergie persistant :

$$besoin_{storageFoyer}(h, c) = besoin_{foyer}(h, c) - e_{localFoyer}(h, c) \quad (65)$$

Pour le besoin en énergie de l'ensemble du groupement, la fonction  $Besoin_{storageGroup}(c) \in [0, +\infty[$  est utilisée :

$$Besoin_{storageGroup}(c) = \sum_{\forall h \in H} besoin_{storageFoyer}(h, c) \quad (66)$$

Ensuite, pour chaque foyer du groupement on calcule  $e_{storageConsumptionGroup}(h, c)$  en fonction des valeurs de  $E_{dischargedGroup}$  et de  $Besoin_{storageGroup}(c)$  :

- Si  $E_{dischargedGroup}(c) < Besoin_{storageGroup}(c)$  alors :

$$e_{storageConsumptionGroup}(h, c) = \frac{besoin_{storageFoyer}(h, c)}{Besoin_{storageGroup}(c)} * E_{dischargedGroup}(c) \quad (67)$$

- Si  $E_{dischargedGroup}(c) \geq Besoin_{storageGroup}(c)$  alors :

$$e_{storageConsumptionGroup}(h, c) = besoin_{storageFoyer}(h, c) \quad (68)$$

### 4.5.3. Exemple

Nous considérons la configuration présentée à la Figure 44. Il s'agit d'un groupement utilisant une organisation proportionnelle des échanges et disposant d'un moyen de stockage collectif d'énergie.

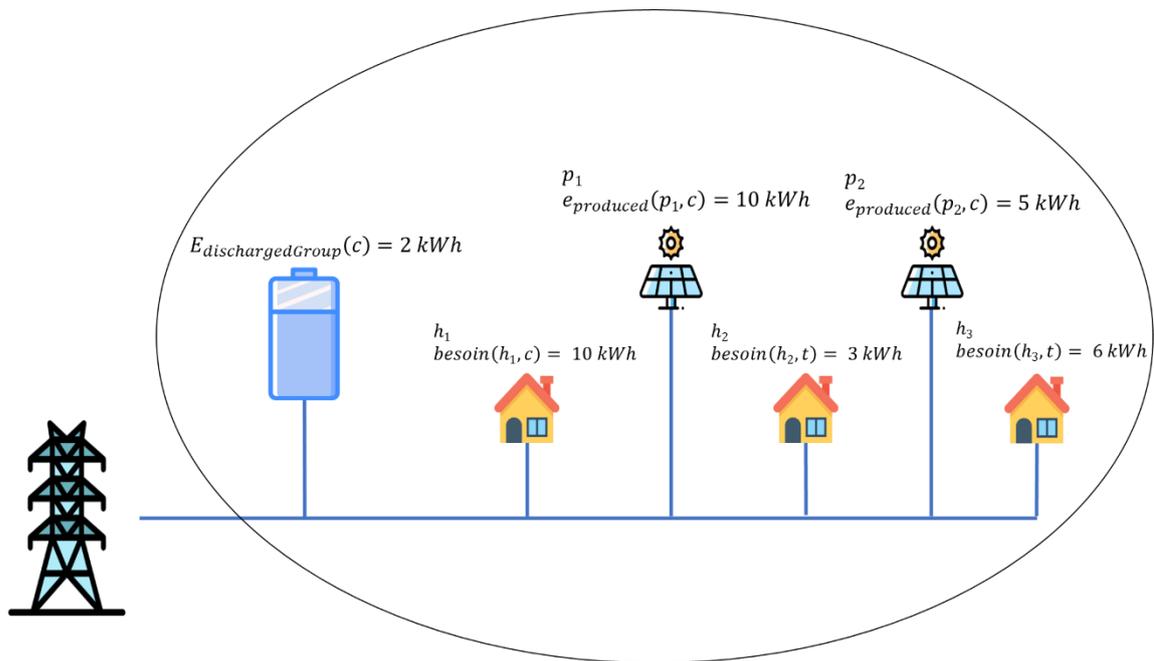


Figure 44 : Exemple d'une répartition proportionnelle de l'énergie avec un système de stockage collectif

Grâce à une organisation proportionnelle de l'énergie, les échanges d'énergie amènent aux résultats suivants :

- Pour le foyer  $h_1$  :
  - $e_{localFoyer}(h_1, c) = 7,9 \text{ kWh}$

- Pour le foyer  $h_2$  :
  - $e_{localFoyer}(h_2, c) = 2,4 \text{ kWh}$
- Pour le foyer  $h_3$  :
  - $e_{localFoyer}(h_3, c) = 4,7 \text{ kWh}$

Pour ce cas, l'objectif de l'organisation proportionnelle du stockage collectif est de répartir  $2 \text{ kWh}$  d'énergie déstockée par la batterie collective entre les foyers du groupement.

Dans un premier temps, les besoins en énergie de chaque foyer et pouvant être potentiellement satisfaits par le déstockage sont évalués :

- Pour le foyer  $h_1$  :
  - $besoin_{storageFoyer}(h_1, c) = 10 - 7,9 = 2,1 \text{ kWh}$
- Pour le foyer  $h_2$  :
  - $besoin_{storageFoyer}(h_2, c) = 3 - 2,4 = 0,6 \text{ kWh}$
- Pour le foyer  $h_3$  :
  - $besoin_{storageFoyer}(h_3, c) = 6 - 4,7 = 1,3 \text{ kWh}$

Pour le groupement, il vient :  $Besoin_{storageGroup} = 40 \text{ kWh}$

Enfin, l'énergie attribuée à chaque foyer et provenant du système de stockage collectif est calculée :

- Pour le foyer  $h_1$  :
  - $e_{storageConsumptionGroup}(h_1, c) = \frac{2,1}{4} * 2 = 1,1 \text{ kWh}$
- Pour le foyer  $h_2$  :
  - $e_{storageConsumptionGroup}(h_2, c) = \frac{0,6}{4} * 2 = 0,3 \text{ kWh}$
- Pour le foyer  $h_3$  :
  - $e_{storageConsumptionGroup}(h_3, c) = \frac{1,3}{4} * 2 = 0,6 \text{ kWh}$

## 4.6. Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons défini la notion d'organisation des échanges d'énergie dans le cadre de la modélisation et de la simulation de l'ACC. Cette notion d'organisation des échanges est importante, car c'est elle qui va, pour un groupement, définir les règles qui régissent la manière dont l'énergie, qu'elle provienne des moyens de production ou des systèmes de stockage mutualisés, va être allouée entre les différents foyers participants à l'ACC.

Un point important à retenir de ce chapitre est que les différentes organisations que nous proposons pour échanger de l'énergie sont des exemples parmi une infinité d'alternatives possibles. Nous avons choisi d'implémenter ces trois organisations, car elles s'appuient sur le démonstrateur réel LOGIS CÉVENOL et les travaux de (Bonnardot et al., 2020). Mais

aussi, car elles permettent de couvrir une diversité de stratégies d'échange, certaines collectives comme pour l'organisation proportionnelle des échanges, d'autres plus individualistes comme l'organisation concurrentielle des échanges. Dans la réalité, les quartiers pratiquant l'ACC pourront utiliser des variantes hybrides des organisations que nous proposons voire des organisations complètement différentes. Nous pouvons implémenter dans la plateforme SMACH de très nombreux scénarii pour les échanges d'énergie aussi bien au sein des groupements qu'au niveau supérieur (inter-groupement). Par exemple, les foyers d'un groupement peuvent échanger de l'énergie suivant une organisation proportionnelle des échanges alors que ceux d'un autre groupement peuvent suivre les règles d'échange d'une organisation concurrentielle.

Concernant les organisations mises en œuvre dans le cadre de ce travail, les organisations à taux fixe et proportionnelle mettent en avant une volonté des foyers participant à l'ACC de faire partie d'une communauté équitable sur les questions d'échange d'énergie en basant les échanges sur des critères comme la surface des logements ou la consommation totale d'énergie d'un foyer. L'organisation concurrentielle quant à elle est basée sur un marché de l'énergie où les acheteurs et les vendeurs sont clairement en concurrence. Dans le cadre de l'organisation concurrentielle que nous proposons ici, ce sont soit les vendeurs soit les acheteurs qui fixent le prix de l'énergie. On peut cependant imaginer d'autres types de marchés concurrentiels comme un marché à doubles carnets d'ordres (Gode & al., 1993) où acheteurs et vendeurs fixent le prix de l'énergie concomitamment. Ces trois organisations des échanges sont également celles utilisées dans le modèle pour les échanges d'énergie inter-groupements.

Pour distribuer l'énergie déstockée des batteries collectives, nous avons proposé et mis en œuvre une organisation proportionnelle du stockage collectif. D'autres alternatives peuvent être imaginées telles qu'une organisation prenant en considération la participation de chaque foyer au stockage collectif de l'énergie comme critère de répartition.

L'utilisation de l'ACI, de l'ACC et du stockage (individuel et collectif) va ajouter de nouvelles sources d'énergie utilisables pour les foyers. Ainsi, l'apparition de ces nouvelles alternatives pour consommer l'énergie va impacter l'activité des habitants. Il est donc nécessaire de simuler des prises de décision des habitants en fonction de la disponibilité de ces sources d'énergie, mais aussi d'évènements pouvant intervenir au cours de la simulation (départ en vacances par exemple). Dans le chapitre suivant, nous présentons les politiques de prise de décision des habitants sur des équipements de leur foyer tel que leur système de stockage ou encore le pilotage d'appareils électriques.



## Chapitre 5 Prise de décision individuelle et collective dans le contexte de l'ACC

5.1.	Modélisation de la prise de décision .....	160
5.1.1.	Prise de décision et ACC.....	160
5.1.2.	Simuler une prise de décision dans le cadre de l'ACC .....	161
5.1.3.	Mise en œuvre d'une prise de décision.....	162
5.2.	Politique de décision pour l'autoconsommation individuelle.....	164
5.2.1.	Principe général .....	164
5.2.2.	Exemple de politique de décision pour l'autoconsommation individuelle. 166	
	Taux de production individuel fixé au niveau du foyer .....	166
	Taux de production individuel fixé au niveau du groupement.....	168
5.3.	Politique de décision liée au stockage de l'énergie .....	168
5.3.1.	Principe général .....	168
5.3.2.	Exemple de politique de décision liée au stockage individuel .....	171
	Politique de décision liée au stockage individuel standard.....	171
	Politique de décision liée au stockage asservie aux heures creuses.....	171
	Politique de décision liée au stockage en réponse aux prix du marché.....	172
5.3.3.	Exemple de politique de décision liée au stockage collectif .....	174
5.4.	Politique de décision sur le pilotage des équipements électriques .....	177
5.4.1.	Principe général .....	177
5.4.2.	Exemple de politiques de décision sur le pilotage des équipements.....	179
	Pilotage du ballon d'eau chaude en fonction de la production PV individuelle .....	179
	Pilotage des appareils en réponse à une offre de prix .....	180
5.5.	Synthèse.....	182

## 5.1. Modélisation de la prise de décision

### 5.1.1. Prise de décision et ACC

Dans le chapitre 3, nous avons présenté le modèle que nous utilisons afin de simuler l'ACC au sein d'un groupement de foyers. Dans ce modèle, nous avons introduit différentes variables et de fonctions. On peut citer, par exemple, le taux d'utilisation de la production individuelle d'énergie,  $taux_{UtilisationProductionIndividuelle}$  qui correspond à la part d'énergie qu'un foyer peut consommer de sa propre production, ou encore *canCharged*, *canDischarged* ou *isForcedMode* qui permettent de caractériser le mode de fonctionnement d'un système de stockage. Sur l'ensemble de ces variables, les foyers vont devoir prendre des décisions afin de modifier leurs valeurs voire leurs consignes. Par exemple, un foyer possédant un panneau PV peut déterminer la part de sa production qu'il va auto-consommer à travers le taux d'utilisation de sa production individuelle d'énergie. De même, un foyer possédant une batterie va devoir décider à quel moment il souhaite pouvoir stocker ou déstocker de l'énergie, par exemple pour charger son véhicule électrique. Enfin, un foyer peut également se poser la question du déplacement des périodes de fonctionnement de certains appareils électriques afin de profiter au mieux de l'énergie qu'il produit. L'idée principale est donc pour chaque foyer de décider de la manière dont il consomme sa production d'énergie, comment il stocke ou déstocke l'énergie dans sa batterie et comment il déplace le fonctionnement de ses appareils électriques eu égard aux nouvelles problématiques que sont l'ACI et l'ACC. Dans le cadre de l'ACI, les foyers mettent déjà en place de telles politiques, par exemple pour déplacer l'usage de certains appareils électriques (Keirstead, 2007). Cependant, le passage à l'ACC amène deux nouvelles problématiques sur ces prises de décision.

Tout d'abord, certaines décisions peuvent se prendre au niveau du groupement. C'est le cas, par exemple, pour le fonctionnement des systèmes de stockage collectifs. Dans ce cadre, nous considérons qu'une décision qui doit s'appliquer à l'ensemble du groupement est réalisée par une **personne morale**. Il peut par exemple s'agir d'un individu, d'un ensemble d'individus, d'une collectivité territoriale...

La seconde problématique est l'apparition de trois nouvelles sources d'énergie locale : les échanges d'énergie interne au groupement, les systèmes de stockage collectifs et les échanges d'énergie entre les groupements. Les foyers vont donc pouvoir prendre des décisions en fonction, par exemple, de la quantité d'énergie reçue en provenance de chacune de ces sources ainsi que de son prix. Une prise de décision d'un foyer ne va donc pas seulement dépendre de sa production d'énergie ou d'un système de stockage individuel, mais aussi d'un ensemble d'éléments qui sont externes aux foyers.

Ainsi la simulation de la prise de décision dans le cadre de l'ACC nécessite une modélisation particulière, c'est l'objet de ce chapitre.

### 5.1.2. Simuler une prise de décision dans le cadre de l'ACC

Un foyer va donc être amené à prendre des décisions qui vont porter sur :

1. **La quantité d'énergie produite qu'il va consommer en priorité** : En fonction d'une décision de ses habitants, un foyer peut n'autoconsommer qu'une partie de sa production. L'autre partie est alors directement fournie au groupement pour être échangée ;
2. **Le fonctionnement de sa batterie** : Le foyer va décider du mode de fonctionnement de sa batterie ainsi que des états de charge minimum et maximum ;
3. **Les périodes d'utilisation de certains appareils électriques** : Comment les habitants du foyer vont-ils déplacer certains usages d'appareils électriques afin de profiter au mieux de l'énergie produite localement ?

Un groupement va lui aussi être amené à prendre des décisions qui vont porter sur **le fonctionnement de sa batterie** collective à savoir le mode de fonctionnement de sa batterie ainsi que les états de charge minimum et maximum.

Notre proposition est de regrouper ces différentes prises de décision autour d'un même concept. Ce concept, que nous nommons **politique de décision**, est utilisé au niveau des foyers et du groupement afin de simuler des prises de décision sur la consommation de la production locale, le stockage d'énergie ou le déclenchement d'appareils électriques.

Formellement, une politique de décision est une fonction qui modifie la valeur de certains paramètres du modèle pour simuler une prise de décision de la part du foyer ou du groupement. Par exemple, une politique de décision peut impliquer la mise en marche du lave-vaisselle suite à une prise de décision des habitants du foyer. Un autre exemple serait la programmation du ballon d'ECS de manière à ce qu'il se déclenche en cas de production d'énergie par les panneaux PV. Dans les deux cas, il s'agit bien d'une politique de décision au niveau de la simulation.

Les fonctions des politiques de décision ont des entrées qui correspondent à l'état de l'entité que l'on considère (foyer ou groupement). Par exemple, pour le déplacement du fonctionnement de certains appareils électriques, la politique de décision peut prendre en entrée le prix moyen du *kWh* d'énergie payé par le foyer durant le pas de temps de comptage précédent. On souhaite également donner la possibilité qu'un événement ponctuel puisse modifier les habitudes du foyer et amener à des prises de décisions

ponctuelles. Par exemple, l'arrivée de nouvelles personnes dans le foyer peut décider les habitants à prendre la décision de modifier leur taux d'utilisation de la production individuelle pour autoconsommer une part plus importante de leur production d'énergie. Pour représenter ces situations ponctuelles, nous utilisons la notion **d'évènement** issu du moteur SMACH. Un évènement, que l'on note *evt*, est une modification ponctuelle de certains aspects de la simulation qui va amener les foyers ou le groupement à prendre une décision. Un évènement est caractérisé par une condition de déclenchement, une durée et la prise de décision du foyer ou du groupement à la suite de l'évènement.

En sortie, une politique de décision fournit les nouvelles valeurs, pour le foyer ou le groupement, des paramètres qui seront utilisés par la simulation. Par exemple, une politique de décision portant sur la quantité d'énergie qu'un foyer consomme de sa propre production retourne la nouvelle valeur du taux d'utilisation de la production individuelle d'énergie que le foyer va devoir utiliser. Une politique portant sur le stockage va par exemple donner le mode de fonctionnement de la batterie du foyer ou du groupement. Enfin, une politique portant sur le pilotage des équipements va, par exemple, retourner une liste d'appareils électriques à mettre en marche.

Formellement, une politique de décision est définie par :  $pol_x : evt \times etat \rightarrow param\grave{e}tres_x$ .

La Figure 45 présente de manière schématique le fonctionnement d'une politique de décision :



Figure 45 : Schéma-bloc d'une politique de décision

### 5.1.3. Mise en œuvre d'une prise de décision

La littérature met en avant aujourd'hui plusieurs manières de mettre en œuvre une prise de décision dans le cadre de l'ACI ou de l'ACC. Nous avons identifié trois niveaux de contrôle.

Le premier niveau est l'intervention humaine directe. En effet, dans les premiers travaux étudiant l'impact de l'ACI sur l'activité humaine, les différentes prises de décision étaient appliquées directement par les habitants du foyer. Dans le cas des travaux de (Keirstead, 2007), les habitants décalent manuellement les périodes de fonctionnement de certains appareils électriques. Si les habitants ne sont pas chez eux, le fonctionnement des appareils électriques ne peut donc pas être déplacé.

Le second niveau, qui a été développé avec l'arrivée de l'ACC, est l'utilisation de systèmes automatisés pour appliquer une décision. Par exemple, dans le cas du quartier LOGIS CÉVENOL, la production d'eau chaude sanitaire est asservie à la production d'énergie issue des panneaux PV. Lorsque le surplus d'énergie dépasse une certaine valeur, les ballons d'eau chaude se mettent en route pour consommer ce surplus. Dans cette situation, le déclenchement des ballons d'eau chaude est fait de manière automatique. Cependant, le choix du seuil pour mettre en marche l'appareil électrique est le résultat d'une prise de décision. La littérature s'intéresse aujourd'hui beaucoup à ce niveau de contrôle dans le cadre de l'ACC pour appliquer une prise de décision relative au décalage de l'usage d'appareils électriques (Stephant et al., 2018).

Enfin, la littérature nous permet d'imaginer un troisième niveau de contrôle qui est l'intervention humaine indirecte. Dans leurs travaux sur l'ACC, (Ghiani et al., 2019) utilisent une application fonctionnant sur smartphone, tablette et PC afin d'informer en temps réel les habitants sur leur production, sur leur consommation ou sur les périodes optimales d'utilisation de certains appareils. En couplant cette manière d'informer les habitants à différentes technologies issues du domaine de la domotique (Ayan & Turkey, 2017), on peut imaginer un niveau de contrôle où les habitants appliquent leurs prises de décision à distance.

Dans nos travaux, nous considérons ces trois niveaux de contrôle :

- **L'intervention humaine directe** : L'application de la décision est effectuée par un occupant obligatoirement présent dans le foyer ;
- **L'utilisation d'un système automatisé** : L'application de la décision est pilotée par un automate programmé préalablement ;
- **Intervention humaine indirecte** : L'application de la décision est faite par un habitant du foyer même s'il n'est pas présent. Ce troisième niveau est confondu dans son implémentation avec l'utilisation d'un système automatisé car il a le même comportement.

Dans la suite du chapitre, nous présentons ces politiques de décision. Pour chaque politique de décision, nous proposons différents exemples représentant à chaque fois un ensemble de décisions que peut prendre un foyer, en mode direct ou automatisé. Nous considérons qu'avant l'application de chacune des politiques que nous présentons, le modèle vérifie qu'elle peut être mise en œuvre. Nous vérifions par exemple que des habitants sont bien présents dans le foyer si une intervention humaine directe est nécessaire pour faire appliquer la prise de décision.

## 5.2. Politique de décision pour l'autoconsommation individuelle

### 5.2.1. Principe général

Une politique de décision pour l'autoconsommation individuelle est définie pour chaque foyer possédant un moyen de production individuel (aussi appelé foyer autoconsommateur). Le rôle de cette politique est de gérer les préférences du foyer sur l'utilisation de l'énergie qu'il produit. Cela se traduit par une variable nommée  $taux_{utilisationProductionIndividuelle}$  présentée à la section 3.3.5.

La module d'autoconsommation est en effet paramétré par cette valeur. Il prend en entrée la quantité d'énergie produite localement par le foyer ainsi que sa consommation. En sortie il fournit la quantité d'énergie autoconsommée par le foyer, son besoin et son surplus qui sera échangé dans le groupement.

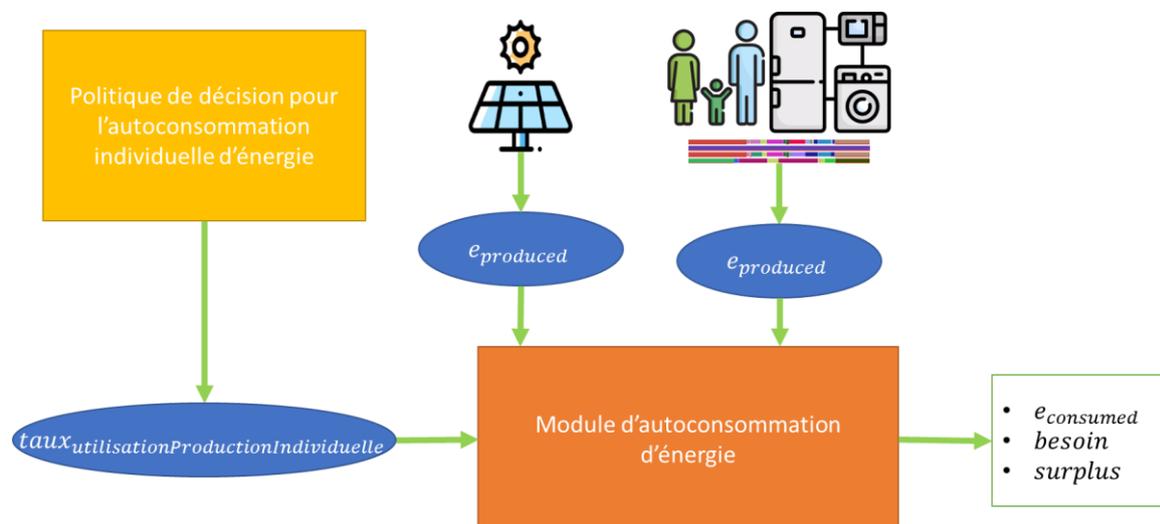


Figure 46 : Schéma-bloc présentant l'articulation entre la politique de décision pour l'autoconsommation individuelle et le module d'autoconsommation d'un foyer

Formellement, la politique de décision pour l'autoconsommation individuelle est définie par la fonction  $pol_{UPI} : evt \times etat \rightarrow taux_{utilisationProductionIndividuelle}$ .

Les entrées d'une politique de décision pour l'autoconsommation individuelle sont :

- *evt* : Un évènement qui va permettre de représenter une prise de décision d'un foyer ou du groupement sur cette politique ;
- *etat* : Un ensemble de paramètres qui donne l'état du système considéré.

En sortie, nous obtenons :

- $taux_{utilisationProductionIndividuelle}$  : Le nouveau taux d'utilisation de la production individuelle d'énergie du foyer. Cette nouvelle valeur va être utilisée soit par le

foyer prenant la décision de modifier son taux d'utilisation de la production individuelle d'énergie soit par tous les foyers producteurs d'énergie si c'est le groupement qui prend la décision de modifier cette valeur.

La Figure 47 présente schématiquement la politique de décision pour l'autoconsommation individuelle.



Figure 47 : Schéma-bloc de la politique de décision pour l'autoconsommation individuelle

La politique de décision pour l'autoconsommation individuelle va être impactée par l'organisation des échanges du groupement :

- **Pour une organisation concurrentielle des échanges** par exemple les foyers vont prendre la décision de modifier leur taux de production individuelle en fonction du prix de vente ou d'achat de l'énergie pratiqué par les autres foyers du groupement. Par exemple, un foyer peut prendre la décision de diminuer son taux de production individuelle pour vendre plus d'énergie lorsque le prix d'achat dans le groupement est élevé ;
- **Pour les organisations à taux fixe ou proportionnelle**, les prises de décision des habitants ou du groupement vont dépendre de la disponibilité de l'énergie locale plutôt que de son prix (qui est fixé par la place locale d'échange dans notre modèle). Par exemple, un groupement peut décider d'imposer un taux de production individuelle aux foyers producteurs lorsque la production d'énergie est basse pour assurer qu'un minimum d'énergie puisse être échangé.

Le contrat d'énergie d'un foyer (tarif base ou heures creuses par exemple) va également impacter les prises de décision des foyers :

- **Dans le cadre d'un contrat tarif base**, un foyer peut mettre en place une politique de décision cherchant à maximiser la quantité d'énergie qu'il produit et qu'il va consommer, car le prix de l'énergie est constant au cours de la journée ;
- **Dans la cadre d'un contrat heures creuses**, un foyer peut décider de diminuer son taux de production individuelle pendant les périodes d'heures-creuses. Il s'assure ainsi de fournir une quantité minimale d'énergie au groupement quitte à devoir acheter de l'énergie à son fournisseur réseau (à un prix réduit du fait heures creuses).

Dans la section suivante, nous donnons des exemples de politiques de décision pour l'autoconsommation individuelle.

### 5.2.2. Exemple de politique de décision pour l'autoconsommation individuelle.

#### *Taux de production individuel fixé au niveau du foyer*

Soit un foyer avec une politique de décision pour l'autoconsommation individuelle répondant à l'évènement *Visite d'invités*. Dans cet exemple, on considère qu'habituellement le foyer consomme au maximum 50% de sa propre production d'énergie et fournit au groupement au minimum 50% de sa production d'énergie pour qu'elle soit échangée. Cependant, lorsque le foyer reçoit des invités (c'est l'évènement), il prend alors la décision d'augmenter son taux d'utilisation de sa production individuelle d'énergie à 1.

L'Algorithme 4 présente le mode de calcul utilisé pour cet exemple.

---

```
1 Soit evt un évènement en entrée de l'algorithme;  
2 if evt == ArriveInvite then // Si l'évènement en entrée de l'algorithme correspond à l'arrivé  
  d'invités dans le foyer  
3 | return 0.5  
4 end  
5 return 1
```

---

*Algorithme 4 : Algorithme d'une politique de décision pour l'autoconsommation individuelle d'énergie avec un taux fixé par les habitants du foyer*

La Figure 48 présente le groupement que nous considérons pour deux pas de temps de comptage différents. Ce groupement est composé de trois foyers : le foyer  $h_1$  qui possède un panneau PV et les foyers  $h_2$  et  $h_3$ . Pour cet exemple, le foyer  $h_1$  applique la politique de décision présentée dans l'Algorithme 4.

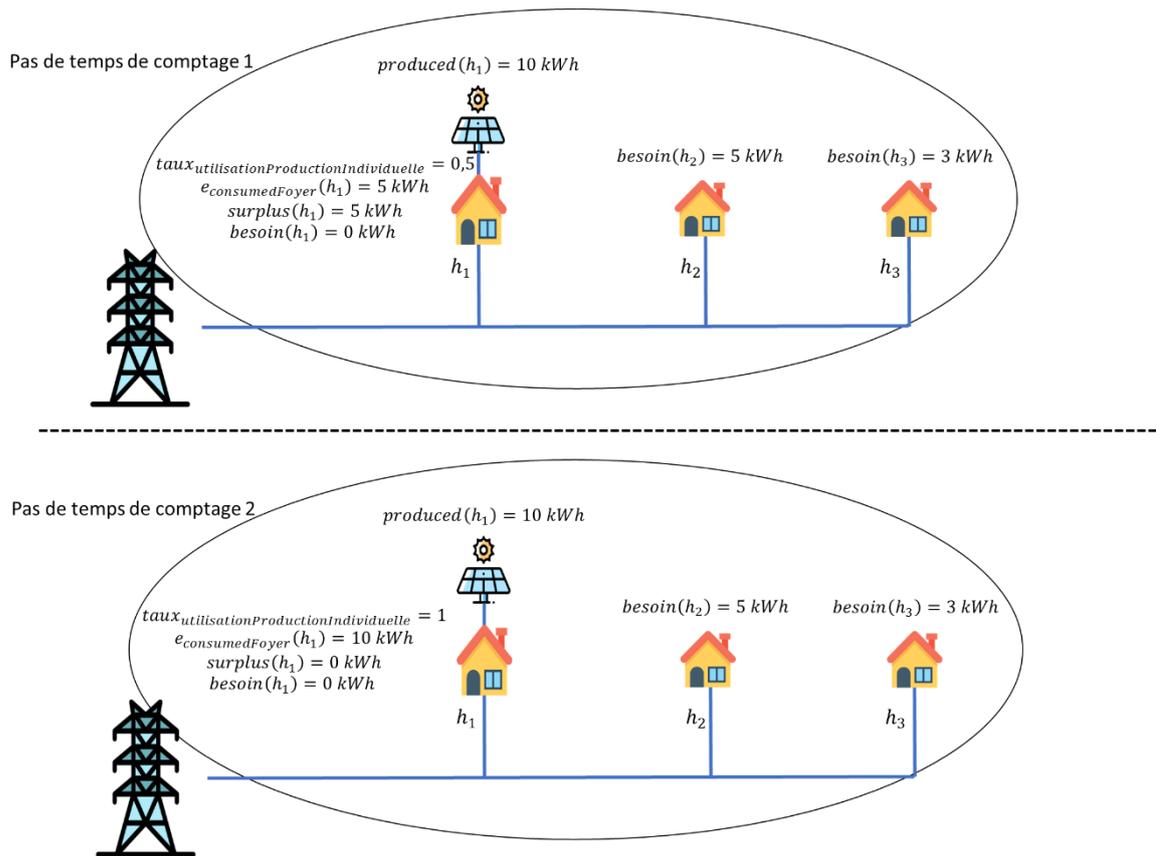


Figure 48 : Exemple de groupement avec un foyer pratiquant une politique de décision pour l'autoconsommation individuelle d'énergie avec un taux fixé par les foyers

Nous considérons que pour le pas de temps de comptage  $c_1$ , l'évènement *Visite d'invités* n'a pas été déclenché pour le foyer  $h_1$ . Ainsi, le foyer  $h_1$  ne consomme que 50% de sa production locale d'énergie et fournit donc 5 kWh d'énergie au groupement pour qu'elle soit échangée avec  $h_2$  et  $h_3$  qui ont exprimé des besoins.

Pour le pas de temps de comptage  $c_2$ , nous considérons que des invités sont présents dans le foyer  $h_1$ . Ainsi l'évènement *Visite d'invités* a été déclenché. Conformément à sa politique de décision, le foyer a donc modifié la valeur de  $taux_{utilisationProductionIndividuelle}$ . Cette prise de décision a plusieurs conséquences qui sont observables pour le pas de temps de comptage  $c_2$  :

- Le foyer  $h_1$  consomme une plus grande part de sa production d'énergie, cela lui permet de réduire son besoin extérieur en énergie à la suite de l'augmentation de sa consommation d'énergie qu'il a produite ;
- Suppression de l'énergie produite par  $h_1$  et qui peut être échangée avec le groupement, ce qui signifie que les foyers  $h_2$  et  $h_3$  doivent acheter de l'énergie à leur fournisseur réseau.

### *Taux de production individuel fixé au niveau du groupement*

On peut imaginer un autre exemple dans lequel le taux d'utilisation de la production individuelle n'est pas directement décidé au niveau des foyers, mais par le groupement lui-même. Le taux est alors fixé par contrat entre les foyers au sein du groupement et est invariable au cours du temps. Par exemple, un groupement où tout nouveau foyer propriétaire d'un panneau PV arrive s'engage à fournir 30% de sa production d'énergie au groupement et ceci en permanence. Cependant, si la consommation d'énergie du foyer est trop faible par rapport à sa production individuelle, i.e. inférieure à 30%, il pourra alors échanger plus d'énergie avec le groupement.

## 5.3. Politique de décision liée au stockage de l'énergie

### 5.3.1. Principe général

Une politique de décision liée au stockage est définie pour chaque foyer ou groupement disposant d'une batterie. Nous parlons de politique de décision liée au stockage individuel lorsque celle-ci est définie pour un foyer et de politique de décision liée au stockage collectif lorsque celle-ci est définie pour un groupement. Le but de cette politique est de fixer des règles de fonctionnement d'une batterie individuelle ou collective pour un pas de temps de comptage. Plus précisément, cette politique définit :

- Le mode de fonctionnement de la batterie parmi les cinq disponibles à savoir :
  - La charge souple, un mode dans lequel une batterie ne va charger que le surplus d'énergie du foyer ou du groupement ;
  - La décharge souple, un mode dans lequel la batterie ne va décharger de l'énergie qu'en fonction du besoin en énergie du foyer ou du groupement ;
  - La charge-décharge souple, un mode dans lequel la batterie va pouvoir pour chaque pas de temps de simulation charger ou décharger de l'énergie en fonction du surplus ou du besoin ;
  - La charge forcée, un mode dans lequel la batterie va charger le maximum d'énergie possible en fonction de la quantité maximale d'énergie qu'elle peut charger durant un pas de temps de comptage ;
  - La décharge forcée un mode dans lequel la batterie va décharger le maximum d'énergie possible en fonction de la quantité maximale d'énergie qu'elle peut décharger durant un pas de temps de comptage .
- Les niveaux minimum et maximum de l'état de charge de la batterie.

La politique va donc positionner la batterie dans l'un des cinq modes de fonctionnement possibles en ce qui concerne les opérations de charge et de décharge d'électricité. Les modes de fonctionnement étant exclusifs entre eux, c'est-à-dire qu'une batterie ne peut

être dans deux modes de fonctionnement simultanément, la politique doit positionner la batterie dans un seul et unique mode de fonctionnement.

Formellement, la politique de décision liée au stockage est définie par la fonction suivante :

$$pol_{stockage} : evt \times etat_{Batterie} \times TC \rightarrow canCharged, \\ canDischarged, isForcedMode, SoC_{max}, SoC_{min}$$

Ainsi, à chaque pas de temps de comptage, la politique de décision liée au stockage pourra modifier certains paramètres du modèle de batterie en fonction de différentes données d'entrée qui sont :

- *evt* : Évènement permettant de représenter la prise de décision des occupants d'un foyer ;
- *etat<sub>Batterie</sub>* : État de la batterie c'est-à-dire son état de charge, son mode de fonctionnement ;
- *TC* : Bilan énergétique du foyer (besoin, surplus, production, consommation, stockage) pour un ou plusieurs pas de temps de comptage précédents.

En sortie, la politique fournit les nouvelles valeurs des paramètres qui caractérisent la batterie à savoir :

- *canCharged* : Booléen qui indique si la batterie peut charger de l'énergie ;
- *canDischarged* : Booléen qui indique si la batterie peut décharger de l'énergie ;
- *isForcedMode* : Booléen qui indique si la batterie est en mode de fonctionnement forcé ;
- *SoC<sub>min</sub>* : Pourcentage de charge minimum autorisé pour la batterie ;
- *SoC<sub>max</sub>* : Pourcentage de charge maximum autorisé pour la batterie.

En fonction de la valeur des sorties *canCharged*, *canDischarged*, *isForcedMode*, la batterie aura un mode de fonctionnement défini pour le pas de temps de comptage suivant (voir Tableau 1 section 3.3.4).

La Figure 49 présente schématiquement la politique de décision liée au stockage individuel ou collectif pour une batterie.



Figure 49 : Schéma-bloc de la politique de décision liée au stockage

La politique de décision liée au stockage de l'énergie est elle aussi dépendante de l'organisation des échanges du groupement où se trouve le foyer :

- **Pour une organisation concurrentielle des échanges**, les politiques de décision mises en place vont chercher à maximiser le gain financier des propriétaires de batteries. Nous donnons dans la section suivante un exemple d'une telle politique où un foyer va charger sa batterie lorsque le prix de vente de l'énergie au sein du groupement est bas et vendre l'énergie contenue dans sa batterie lorsque le prix de vente de l'énergie dans le groupement est élevé.
- **Pour une organisation à taux fixe ou proportionnelle des échanges**, les politiques de décision mises en place vont par exemple se baser non pas sur le prix de l'énergie locale, mais sur sa disponibilité. Nous donnons dans la section 5.3.3 un exemple de politique liée au stockage collectif dans laquelle la décision de décharger l'énergie contenue dans la batterie collective dépend du besoin en énergie des foyers et de la disponibilité de l'énergie produite localement.

Le contrat des foyers, et donc le prix de l'énergie, va aussi impacter les politiques de décision liées au stockage :

- **Dans le cadre d'un contrat tarif base** le prix de l'énergie réseau étant constant, les politiques de décision liées au stockage individuel vont par exemple chercher à maximiser la quantité d'énergie stockée et consommée par le foyer ;
- **Dans la cadre d'un contrat heures-creuses** la prise de décision va prendre en compte les périodes où l'énergie produite par le groupement est moins chère. Nous donnons dans la section suivante un exemple où un foyer en contrat heures-creuses va prendre la décision de modifier le mode de fonctionnement de sa batterie en fonction des périodes d'heures creuses.

Dans les sections suivantes, nous donnons des exemples concrets de politique de décision liée au stockage.

### 5.3.2. Exemple de politique de décision liée au stockage individuel

#### *Politique de décision liée au stockage individuel standard*

Une Politique de décision liée au stockage individuel standard vise à reproduire le fonctionnement le plus courant d'une batterie. Avec une telle politique de décision liée au stockage, les habitants ont pris la décision de ne pas changer le comportement de leur batterie à chaque pas de temps de comptage. Cette dernière est toujours dans un mode de fonctionnement charge-décharge souple et va toujours avoir un état de charge compris en 0% et 100%. Cela signifie que l'algorithme d'une telle politique renvoie toujours les mêmes valeurs pour forcer un tel mode de fonctionnement :

- $canCharged = true$  ;
- $canDischarged = true$  ;
- $isForcedMode = false$  ;
- $SoC_{min} = 0$  ;
- $SoC_{max} = 100$ .

#### *Politique de décision liée au stockage asservie aux heures creuses*

La politique de décision liée au stockage individuel asservie aux heures creuses est une politique où les occupants des foyers décident d'assujettir leur batterie individuelle au prix de l'électricité vendue par le réseau. L'objectif d'une telle politique est, pour un foyer disposant d'un contrat heures creuses, de profiter au maximum de cette énergie à faible coût. De plus, cette politique peut être appliquée par un foyer qui ne possède pas de système de production d'énergie, dans ce cas la batterie charge uniquement de l'énergie en période d'heures creuses. Le fonctionnement est basé sur deux alternatives :

- Pendant les périodes d'heures creuses (avec ou sans production d'énergie), la batterie est en mode charge forcée c'est-à-dire que la batterie charge autant d'énergie qu'elle le peut. Pour rappel dans ce mode de fonctionnement la batterie charge le surplus de production du foyer s'il existe puis va charger de l'énergie provenant de l'extérieur du foyer (des échanges ou du réseau). Cela permet au foyer de stocker une énergie à faible coût. Tout d'abord, nous considérons avec cette politique que le prix de l'énergie échangée est toujours inférieur au prix du réseau. Ensuite, le foyer étant en heures creuses le coût de l'énergie provenant du réseau est faible ;
- Pendant les périodes d'heures pleines (avec ou sans production d'énergie), la batterie est en mode de charge-décharge souple. Ainsi, elle ne stockera de l'énergie que lorsque la production d'énergie du foyer est supérieure à sa consommation et elle déstockera de l'énergie dans le cas contraire.

La décision d'asservir le fonctionnement de la batterie aux heures creuses permet aux occupants des foyers de profiter d'une énergie à un prix réduit même pendant les périodes d'heures pleines. En effet, la batterie stocke de l'énergie pendant les périodes d'heures creuses et déstocke cette énergie pendant les périodes d'heures pleines.

L'Algorithme 5 présente un exemple de politique de décision liée au stockage individuel asservie aux heures creuses. Pour cet algorithme, la fonction *isHeureCreuse()* est une fonction du foyer qui renvoie « *true* » si le foyer est en heures creuses et qui renvoie « *false* » sinon.

---

```

1 Soit evt un évènement en entrée de l'algorithme;
2 Soit etatbatterie l'état de la batterie;
3 Soit TC le résultat de un ou plusieurs pas de comptage précédent;
4 if foyer.isHeureCreuse then // Si le foyer est en période d'heures creuses
5 |   return {canCharged = true, canDischarged = false, isForcedMode = true, SoCmin = 0, SoCmax = 100};
6 end
7 else
8 |   return {canCharged = true, canDischarged = true, isForcedMode = false, SoCmin = 0, SoCmax = 100};
9 end

```

---

*Algorithme 5 : Algorithme d'une politique de décision liée au stockage individuel asservie aux heures creuses*

Considérons un foyer disposant d'une batterie individuelle et d'un contrat heures creuses. D'après son contrat, le foyer dispose de deux périodes d'heures creuses :

- De 14h00 à 17h00
- De 2h00 à 6h00

Ainsi en appliquant cette politique de décision, la batterie du foyer sera en mode de charge forcée de 14h00 à 17h00 et de 2h00 à 6h00. En dehors de ces plages horaires, la batterie est en mode de charge-décharge souple.

#### *Politique de décision liée au stockage en réponse aux prix du marché*

Cette politique de décision est principalement mise en place pour une organisation concurrentielle de l'énergie. Les foyers propriétaires d'un moyen de stockage individuel vont prendre des décisions concernant l'énergie stockée dans la batterie en fonction du prix de vente ou d'achat de l'énergie au sein du groupement.

Dans notre exemple, nous considérons un foyer propriétaire d'un moyen de production et d'un système de stockage. Si, pour ce foyer, le prix de vente de l'énergie est bas, inférieur à 0,110 €, alors ce foyer décide de stocker de l'énergie via le mode charge forcée. Dans un même temps, si le prix de vente de l'énergie dans le groupement est élevé, supérieur à 0,135 €, alors le foyer décide de déstocker de l'énergie via le mode de décharge forcée pour qu'elle puisse être vendue dans le groupement. Si jamais les prix de

l'énergie ne permettent pas à la batterie d'être en mode de charge ou de décharge forcée, alors le foyer décide de mettre sa batterie en mode charge-décharge souple.

Ainsi, cette politique est fortement liée à l'organisation des échanges mise en place. On peut retrouver le même type de politique dans les organisations proportionnelle et à taux fixe où un foyer peut décider de revendre l'énergie stockée par sa batterie lorsque la demande en énergie au sein du groupement est élevée.

L'Algorithme 6 présente la mise en œuvre de cet exemple. On considère que le foyer définit plusieurs valeurs :

- $prix_{VenteBatterieMin}$  : Prix au-dessus duquel le foyer veut vendre de l'énergie ;
- $prix_{AchatBatterieMax}$  : Prix en dessous duquel le foyer veut acheter de l'énergie.

On considère que ces deux prix sont fixes tout au long de la période d'étude.

---

```

1 Soit  $TC.prixVenteEnergie$  le prix de vente de l'énergie lors du pas de temps de comptage précédent;
2 Soit  $TC.prixAchatEnergie$  le prix d'achat de l'énergie lors du pas de temps de comptage précédent;
3 if  $TC.prixAchatEnergie < 0.11$  then // le prix d'achat de l'énergie dans le groupement était bas lors
  du pas de comptage précédent
4 | return { $canCharged = true, canDischarged = false, isForcedMode = true, SoC_{min} = 0, SoC_{max} = 100$ };
5 end
6 else if  $TC.prixVenteEnergie > 0.135$  then // le prix de vente de l'énergie dans le groupement était
  élevé lors du pas de comptage précédent
7 | return { $canCharged = false, canDischarged = true, isForcedMode = true, SoC_{min} = 0, SoC_{max} = 100$ };
8 end
  // Si le prix de l'énergie ne permet pas d'être en charge ou décharge forcée, la batterie se met
  en mode charge souple
9 return { $canCharged = true, canDischarged = false, isForcedMode = false, SoC_{min} = 0, SoC_{max} = 100$ };

```

---

*Algorithme 6 : Algorithme d'une politique de décision liée au stockage individuel en réponse au prix du marché*

Considérons la situation décrite à la Figure 50. Pour cet exemple, le foyer  $h_1$  applique une politique de stockage en réponse au prix du marché et le groupement utilise une organisation des échanges concurrentielle de vente de l'énergie au plus offrant.

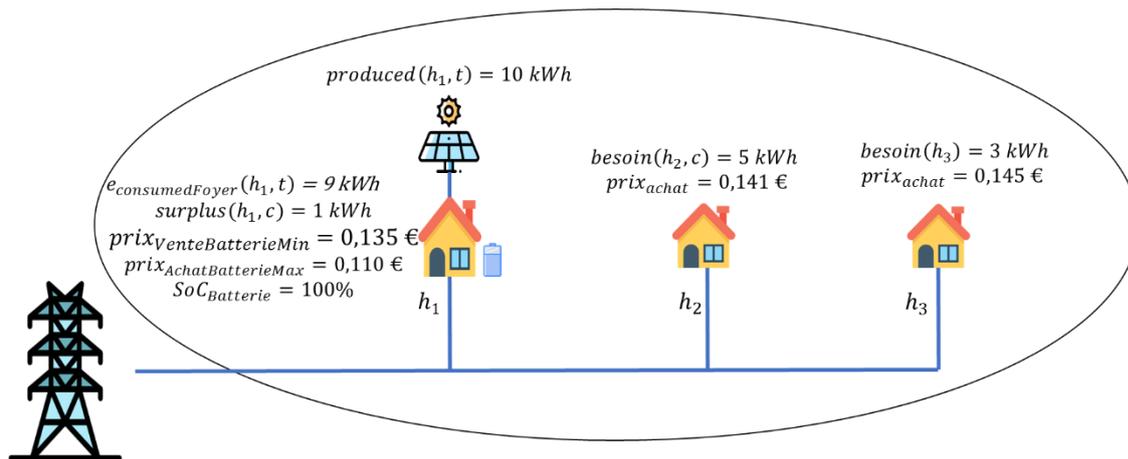


Figure 50 : Exemple de groupement avec un foyer pratiquant une politique de décision liée au stockage individuel en réponse au prix du marché.

En appliquant une organisation concurrentielle de vente de l'énergie au plus offrant, le foyer  $h_1$  va vendre l'ensemble de sa production au foyer  $h_3$ . Le foyer  $h_1$  va donc vendre  $1 kWh$  au prix de  $0,145 €/kWh$ . Une fois les échanges du pas de temps de comptage réalisé, le foyer  $h_1$  va constater que  $TC.prixEnergie > prix_{venteBatterieMin}$ . En appliquant sa politique de décision, la batterie du foyer va donc passer en mode décharge forcée pour le pas de temps de comptage suivant.

L'application d'une telle politique va donc conduire le foyer  $h_1$  à décharger l'énergie de sa batterie autant que possible pour qu'elle soit échangée dans le groupement. À la fin du pas de temps de comptage suivant, l'état de charge de la batterie aura diminué et la quantité d'énergie vendue par le foyer  $h_1$  aura augmenté. En faisant cela, le foyer  $h_1$  s'assure de vendre l'énergie qu'il a stockée à un prix intéressant respectant le prix de vente défini (le prix de vente ne peut être que supérieur ou égal au prix minimum désiré).

### 5.3.3. Exemple de politique de décision liée au stockage collectif

Dans cette section, nous présentons une politique de décision liée au stockage collectif en réponse aux besoins en énergie des foyers. Le mode par défaut pour la batterie collective est la charge souple c'est-à-dire que tout le surplus d'énergie au niveau du groupement est stocké dans la batterie. La prise de décision du groupement porte sur les périodes où la batterie collective va pouvoir déstocker de l'énergie et donc activer la décharge souple. Pour ce faire, la personne morale qui gère la batterie est régulièrement informée du besoin en énergie des foyers une fois les échanges d'énergie au sein du groupement réalisés. Si le nombre de foyers qui ont des besoins en énergie est au-dessus d'un seuil donné, le gestionnaire prend alors la décision de permettre à la batterie collective de décharger de l'énergie en choisissant un mode de fonctionnement charge-décharge souple. Dans notre exemple, nous avons fixé ce seuil à 3 foyers pour un

groupement de 6 foyers. Tant que ce seuil de 3 foyers n'est pas atteint, le groupement positionne la batterie dans son mode de fonctionnement par défaut à savoir la charge souple.

Cette politique de décision permet au gestionnaire d'assurer qu'un nombre minimum de foyers bénéficie de l'énergie stockée dans la batterie collective. Cela permet d'assurer une forme d'équité entre les foyers et d'éviter qu'un faible nombre de foyers n'utilise trop souvent l'énergie stockée dans la batterie.

L'Algorithme 7 présente la mise en œuvre de cette politique de stockage collectif.

---

```
1 Soit evt un évènement en entrée de l'algorithme;
2 Soit etatbatterie l'état de la batterie;
3 Soit TC.nbFoyerBesoin le nombre de foyers ayant eue un besoin en énergie lors du pas de comptage;
4 if TC.nbFoyerBesoin >= 3 then // Si lors du pas de comptage précédent le nombre de foyer avec un
   besoin était supérieure au seuil fixé par le groupement
5 | return {canCharged = true, canDischarged = true, isForcedMode = false, SoCmin = 0, SoCmax = 100};
6 end
7 else
8 | return {canCharged = true, canDischarged = false, isForcedMode = false, SoCmin = 0, SoCmax = 100};
9 end
```

---

*Algorithme 7 : Algorithme pour une politique de décision liée au stockage collectif en fonction des besoins du groupement*

Pour illustrer cet exemple, nous considérons les deux groupements présentés à la Figure 51. Ces deux groupements sont caractérisés par la présence d'une batterie collective et l'utilisation d'une politique de décision liée au stockage collectif basée sur le besoin des foyers.

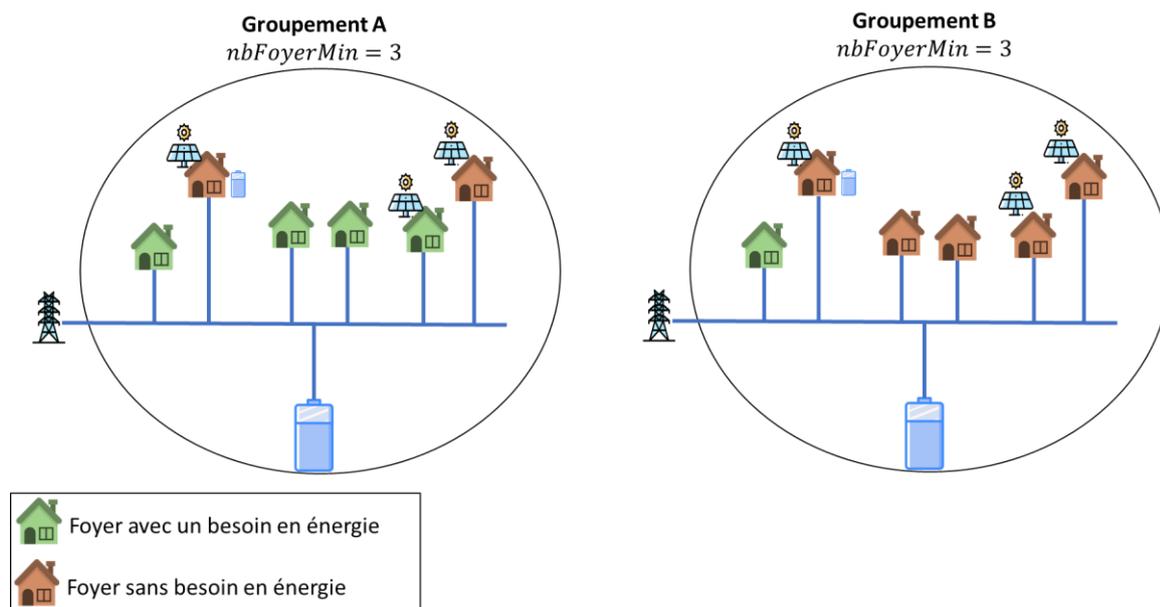


Figure 51 : Exemple de deux groupements pratiquant une politique de décision liée au stockage collectif basée sur le besoin en énergie des foyers

Pour le groupement A, nous constatons que 4 foyers sur les 6 foyers du groupement ont un besoin en énergie au pas de temps de comptage considéré ce qui est supérieur à la valeur du paramètre *nbFoyerMin*. Conformément à sa politique, le groupement prend alors la décision de faire fonctionner la batterie en mode charge-décharge souple pour le pas de temps de comptage suivant. Les paramètres de la batterie sont alors égaux à :

- *canCharged = true*
- *canDischarged = true*
- *isForcedMode = false*
- $SoC_{min} = 0\%$
- $SoC_{max} = 100$

Au contraire, dans le groupement B, un seul foyer a un besoin en énergie. Le groupement prend alors la décision de mettre la batterie en mode de charge souple pour le pas de temps de comptage suivant. Les valeurs des paramètres de la batterie seront alors posées égaux à :

- *canCharged = true*
- *canDischarged = false*
- *isForcedMode = false*
- $SoC_{min} = 0\%$
- $SoC_{max} = 100$

## 5.4. Politique de décision sur le pilotage des équipements électriques

### 5.4.1. Principe général

Une politique de décision sur le pilotage des équipements électriques va permettre de simuler la prise de décision d'un ou plusieurs individus vis-à-vis de la mise en fonctionnement de certains appareils électriques. L'objectif de cette politique est de piloter automatiquement certains appareils électriques en fonction de l'état global du système. Nous avons défini une liste des équipements pouvant être pilotés automatiquement. Il s'agit du :

- Ballon d'ECS ;
- Lave-linge ;
- Sèche-linge ;
- Lave-vaisselle.

Nous avons sélectionné le ballon d'ECS, car le fonctionnement de ce dernier ne nécessite pas l'intervention d'un humain pour fonctionner, il est donc facilement pilotable. En ce qui concerne les lave-linges, les sèche-linges et les lave-vaisselles, une fois approvisionnés et programmés par les habitants du foyer ils sont facilement pilotables.

Pour chaque foyer, nous définissons la liste des appareils pilotables par l'ensemble  $appareils_{pilotables}(h)$ .

La politique de décision sur le pilotage des équipements va gérer les décisions des occupants d'un foyer de mettre en route ou non certains appareils pilotables du foyer.

Formellement, la politique de décision sur le pilotage des équipements est définie par la fonction suivante :

$$pol : evt \times prix_{reseau} \times appareils_{pilotables} \times etat_{appareils} \quad (69) \\ \times TC \rightarrow appareils_{declenchés}$$

Les entrées d'une politique de décision sur le pilotage des équipements sont :

- $evt$  : Évènement permettant de représenter une prise de décision d'un ou plusieurs occupants du foyer ;
- $prix_{reseau}$  : Prix de l'énergie provenant du réseau pour un foyer ;
- $appareils_{pilotables}$  : Liste des appareils pilotables du foyer ;
- $etat_{appareils}$  : État des appareils pilotables du foyer ;

- $TC$  : Bilan énergétique du foyer (besoin, surplus, production, consommation, stockage) pour un ou plusieurs pas de temps de comptage précédents.

La sortie d'une politique de décision sur le pilotage des équipements est :

- $appareils_{délanchés}$  : Liste des appareils qui sont mis en fonctionnement par la politique de décision sur le pilotage des équipements du foyer.

Une politique de décision liée au pilotage des équipements est donc une fonction ayant en entrée l'état du modèle décrit par les différentes variables adéquates et qui fournit en sortie une liste d'appareils électriques qui seront mis en fonctionnement au pas de temps de comptage suivant.



Figure 52 : Schéma-bloc de la politique de décision sur le pilotage des équipements

La politique de décision liée au pilotage des équipements électriques est, elle aussi, dépendante de l'organisation des échanges du groupement où se trouve le foyer :

- **Pour une organisation concurrentielle des échanges**, les politiques de décision sur le pilotage des équipements vont se baser sur le prix de l'énergie échangée dans le groupement. Par exemple, les foyers vont prendre la décision de mettre en route leurs appareils lorsque le prix de l'énergie est faible dans le groupement. Nous donnons dans la section suivante un exemple d'une telle politique adapté à une organisation concurrentielle,
- **Pour une organisation à taux fixe ou proportionnelle des échanges**, les politiques de décision sur le pilotage des équipements vont se baser sur la disponibilité de l'énergie locale sans prendre en compte son prix, fixé pour tout le groupement. On peut imaginer une politique où un foyer prend la décision de différer le fonctionnement de ses appareils électriques si le temps est beau et qu'il reçoit suffisamment d'énergie.

Le contrat des foyers, et donc le prix de l'énergie, va aussi impacter les politiques de décision liées au pilotage des équipements mis en place par les foyers :

- **Dans le cadre d'un contrat tarif base**, les foyers vont chercher à consommer le maximum d'énergie produite localement. Un foyer avec ce type de contrat va donc chercher à déplacer ses appareils sur les périodes où l'énergie est produite ;

- **Dans la cadre d'un contrat heures creuses**, les foyers vont devoir décider de déplacer le fonctionnement ou non leurs appareils électriques tout en considérant leur période d'heures creuses et la quantité d'énergie produite localement disponible. Dans la section suivante, nous donnons un exemple du pilotage du ballon d'eau chaude dans le cas d'un foyer possédant un contrat heures creuses.

Dans la section suivante, nous présentons différents exemples de politiques de décision liées au pilotage des équipements.

#### 5.4.2. Exemple de politiques de décision sur le pilotage des équipements

##### *Pilotage du ballon d'eau chaude en fonction de la production PV individuelle*

Cette politique peut être mise en place lorsque les occupants du foyer disposent d'un contrat heures creuses avec leur fournisseur d'électricité et d'un moyen de production individuel d'énergie. Dans ce cas, ils prennent la décision de piloter leur ballon d'ECS en fonction de leur production d'énergie. Il est à noter qu'avec un contrat heures creuses, le ballon d'ECS ne peut fonctionner que pendant les heures creuses à moins de décider de déclencher manuellement sa marche forcée. Ainsi, l'objectif d'une politique de décision sur le pilotage du ballon d'ECS est de lui permettre de fonctionner même durant les heures pleines à condition de disposer d'énergie produite par les panneaux PV du foyer, i.e. de ne pas faire appel au réseau.

Nous considérons dans cet exemple un foyer possédant un panneau PV ainsi qu'un ballon d'eau chaude électrique d'une puissance de 2000 W. Ainsi, pour ce foyer,  $Energie_{maxECS} = 0,5 kWh$  est la consommation d'énergie maximale du ballon d'ECS du foyer pour la durée d'un pas de temps de comptage. L'Algorithme 8 présente la mise en œuvre de cet exemple de politique de décision au sein de ce foyer.

---

```

1 Soit  $TC.consomptionReseau$  la consommation réseau du foyer sur le pas de comptage précédent;
2 Soit  $appareils = \{\}$  la liste des appareils déclenchés par la politique;
   // Si la consommation réseau du foyer est nulle au pas de comptage précédent et que son surplus
   // de production est supérieure à la puissance de son ballon d'eau chaude
3 if  $TC.consomptionReseau == 0$  AND  $TC.surplusProduction > 0.5$  then
4   |  $Appareils.ajouter(ECS)$ ;
5 end
6 return  $Appareils$ 

```

---

*Algorithme 8 : Algorithme pour une politique de décision pour le pilotage du ballon d'ECS en fonction de la production PV individuelle*

La Figure 53 donne un exemple de groupement avec 3 foyers. Le foyer  $h_1$  est le foyer producteur d'énergie qui possède un ballon d'eau chaude électrique.

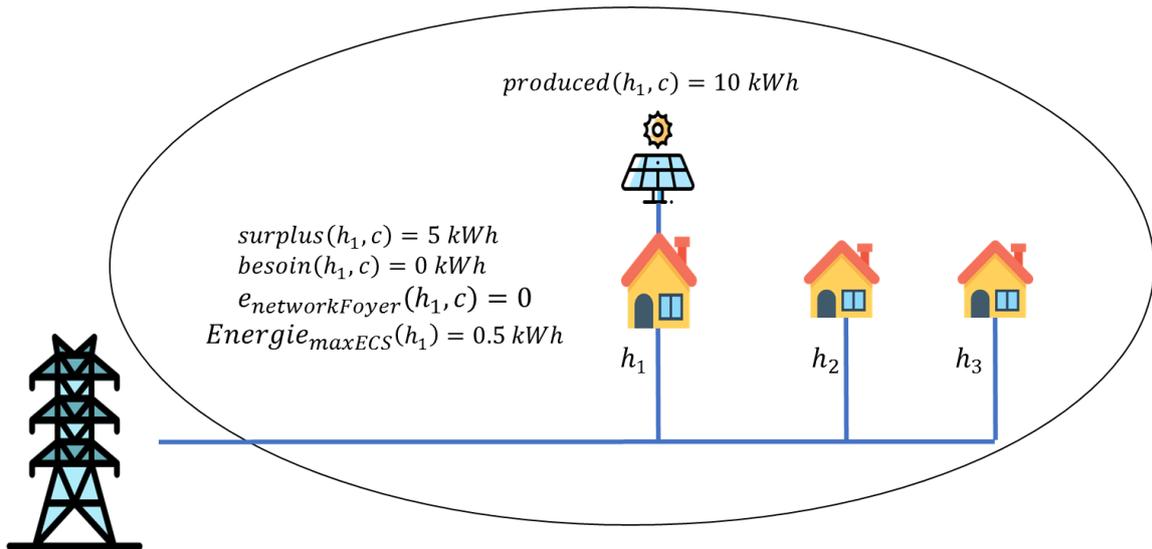


Figure 53 : Exemple d'un groupement avec un foyer pratiquant une politique de décision pour le pilotage du ballon d'ECS asservie aux heures creuses.

Pour ce pas de temps de comptage, nous observons deux éléments importants :

- $e_{network}(h_1, c) = 0 \text{ kWh}$  : Le foyer  $h_1$  ne consomme pas d'énergie provenant du réseau ;
- $surplus(h_1, c) > Energie_{maxECS}(h_1)$  : Le surplus d'énergie du groupement est suffisant pour alimenter le ballon d'ECS pendant le pas de temps de comptage.

Dans cette situation, le foyer  $h_1$  va prendre la décision d'enclencher le ballon d'ECS pour le prochain pas de temps de comptage. Cela va donc augmenter la consommation d'énergie produite localement par le foyer.

En appliquant une telle politique, le foyer  $h_1$  consomme une plus grande part de sa production d'énergie et par conséquent diminue la quantité d'énergie qu'il va échanger avec les autres foyers du groupement.

#### *Pilotage des appareils en réponse à une offre de prix*

Pour une politique de décision sur le pilotage des équipements en réponse à une offre de prix, les occupants d'un foyer vont prendre la décision de mettre en route ou non leurs appareils en fonction du prix de l'énergie. Ainsi, lorsque le prix de l'énergie pour un foyer est bas, ses occupants peuvent être amenés à prendre la décision d'enclencher certains de leurs appareils électriques à condition que ces derniers aient été approvisionnés par les habitants du foyer. Au contraire, pour un prix de l'énergie élevé, ils peuvent retarder le fonctionnement de certains de leurs appareils électriques.

Considérons trois foyers  $h_1$ ,  $h_2$  et  $h_3$  qui pratiquent une politique de décision sur le pilotage des appareils électriques en réponse à une offre de prix. Si le prix moyen du  $kWh$  payé par le foyer, noté  $prixMoyenkWh$ , est inférieur à un seuil donné, que l'on note

$seuilPrixDeclenchement$ , alors le foyer prend la décision d'enclencher ses appareils électriques :

- Le foyer  $h_1$  met en marche ses appareils si  $prixMoyenkWh < 0,13 \text{ €}$  ;
- Le foyer  $h_2$  met en marche ses appareils si  $prixMoyenkWh < 0,11 \text{ €}$  ;
- Le foyer  $h_3$  met en marche ses appareils si  $prixMoyenkWh < 0,12 \text{ €}$ .

On positionne ces trois foyers dans un groupement présenté à la Figure 54. Les trois foyers possèdent chacun un lave-vaisselle, un lave-linge et un sèche-linge et ces trois appareils sont disponibles au fonctionnement.

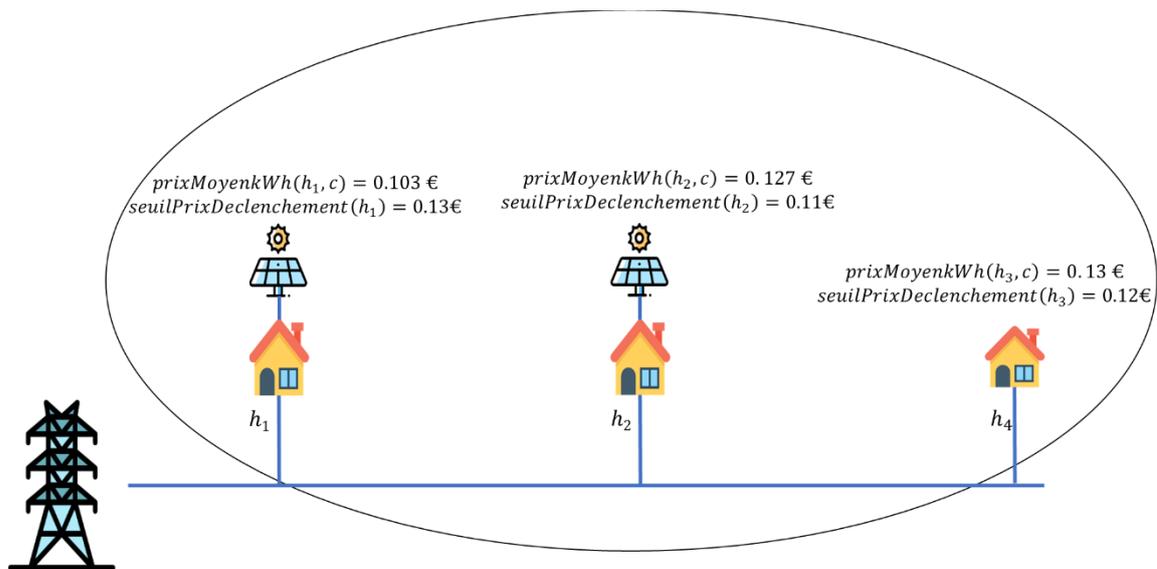


Figure 54 : Exemple d'un groupement avec des foyers pratiquant une politique de décision sur le pilotage des équipements en réponse à une offre de prix

En fonction des résultats du pas de temps de comptage, les trois foyers du groupement vont prendre des décisions différentes quant à la mise en marche de leurs appareils électriques :

- Pour le foyer  $h_1$ ,  $prixMoyenkWh(h_1, c) < seuilPrixDeclenchement(h_1)$ . Le foyer va donc prendre la décision d'enclencher ses appareils pilotables. L'algorithme renvoie  $Appareils = \{laveLinge, secheLinge, LaveVaiselle\}$  ;
- Pour le foyer  $h_2$ ,  $prixMoyenkWh(h_2, c) > seuilPrixDeclenchement(h_2)$ . Le foyer va donc prendre la décision de ne pas déclencher ses appareils pilotables. L'algorithme renvoie  $Appareils = \{\emptyset\}$  ;
- Pour le foyer  $h_4$ ,  $prixMoyenkWh(h_4, c) > seuilPrixDeclenchement(h_4)$ . Le foyer va donc prendre la décision de ne pas déclencher ses appareils pilotables. L'algorithme renvoie  $Appareils = \{\emptyset\}$  ;

Cette prise de décision va conduire le foyer  $h_1$  à consommer plus d'énergie qu'il n'en produit. Cela peut avoir différentes conséquences pour le foyer lui-même et le groupement :

- Le besoin en énergie du foyer  $h_1$  va augmenter. Cela peut avoir une conséquence sur les échanges d'énergie en fonction de l'organisation des échanges du groupement ;
- Le surplus d'énergie du foyer  $h_1$  va diminuer. Le foyer aura donc moins d'énergie à échanger avec les autres foyers du groupement.

Cependant, dans cet exemple, les foyers peuvent déclencher simultanément tous leurs appareils ce qui entraînerait un pic de consommation qui pourrait nécessiter de faire appel au réseau.

## 5.5. Synthèse

Une politique de décision a pour objectif de gérer les prises de décision d'un ou plusieurs individus sur différents éléments liés à l'ACC à l'échelle d'un foyer ou d'un groupement. La mise en œuvre des politiques peut être effectuée soit manuellement et en présentiel, soit à distance par les occupants des foyers, ou encore de manière totalement automatique. Pour un groupement, c'est une personne morale qui gère la prise de décision.

Dans ce chapitre, nous avons présenté trois politiques de décision pour gérer les systèmes de production individuels, les systèmes de stockage individuels et collectifs ainsi que le pilotage de certains équipements électriques des foyers. Pour chacune d'entre elles, nous avons présenté plusieurs exemples qui illustrent différentes prises de décision des foyers. Il faut cependant noter que tous les exemples illustrés dans ce chapitre ne constituent pas une liste exhaustive des situations pouvant être rencontrées. Cependant, le modèle que nous avons mis en place permet facilement d'implémenter de nouvelles politiques pour simuler les prises de décision des habitants.

Une quatrième famille de politiques de décision peut être imaginée en plus de celles décrites dans ce chapitre. En effet, il est tout à fait possible d'envisager que l'ACI et l'ACC vont à terme modifier l'activité même des habitants.

Dans le chapitre précédent, nous avons décrit la notion d'organisation des échanges à savoir un cadre contractuel qui fixe les règles des échanges d'énergie réalisés au sein d'un groupement. Comme nous l'avons évoqué tout au long de ce chapitre, les prises de décision, qu'elles se fassent au niveau d'un groupement ou d'un foyer, sont grandement influencées par l'organisation des échanges et l'énergie allouée à chaque foyer. Cela est

d'autant plus vrai dans le cadre d'une politique concurrentielle où les décisions de vendre, acheter, stocker ou déstocker de l'énergie pour un foyer vont fortement dépendre des conditions du marché. C'est donc l'articulation entre les politiques de décision et l'organisation des échanges qui nous permet de mettre en œuvre des simulations où se lient ACC, activité humaine et prise de décision.

Un point important concernant le modèle de simulation de l'ACC développé dans la plateforme SMACH réside dans la grande variété de situations et de configurations qu'il permet d'étudier et des questions auxquelles il permet de répondre. Dans le chapitre suivant, nous présentons, dans un premier temps l'implémentation du modèle d'ACC développé dans la plateforme SMACH. Puis, nous mettons en avant l'expressivité de notre modèle, c'est-à-dire sa capacité à simuler de nombreuses configurations d'ACC. Pour cela, nous présentons un ensemble de résultats au travers de différents cas d'étude qui visent à caractériser les performances de l'ACC voire de les augmenter.



## Chapitre 6 Implémentation et cas d'étude

5.1.	Modélisation de la prise de décision .....	160
5.1.1.	Prise de décision et ACC.....	160
5.1.2.	Simuler une prise de décision dans le cadre de l'ACC .....	161
5.1.3.	Mise en œuvre d'une prise de décision.....	162
5.2.	Politique de décision pour l'autoconsommation individuelle.....	164
5.2.1.	Principe général .....	164
5.2.2.	Exemple de politique de décision pour l'autoconsommation individuelle. 166	
5.3.	Politique de décision liée au stockage de l'énergie .....	168
5.3.1.	Principe général .....	168
5.3.2.	Exemple de politique de décision liée au stockage individuel .....	171
5.3.3.	Exemple de politique de décision liée au stockage collectif .....	174
5.4.	Politique de décision sur le pilotage des équipements électriques .....	177
5.4.1.	Principe général .....	177
5.4.2.	Exemple de politiques de décision sur le pilotage des équipements.....	179
5.5.	Synthèse.....	182
6.1.	Implémentation du modèle d'ACC .....	187
6.1.1.	Articulation des pas de temps de simulation et de comptage .....	187
6.1.2.	Classes du modèle de groupement .....	187
6.2.	Etude de l'ACC grâce à la simulation multi-agent.....	193
6.2.1.	ACC et axes d'étude .....	193
6.2.2.	Indicateurs de l'ACC .....	197
6.2.3.	Situation de référence .....	203
6.2.4.	Représentativité des résultats des simulations .....	206
6.3.	ACC dans les groupements : impact sur la consommation d'énergie et le budget d'une population représentative .....	217
6.3.1.	Impact de l'ACI et de l'ACC en fonction de l'organisation des échanges du groupement .....	217
6.3.2.	Impact sur les taux d'autoproduction des foyers du groupement.....	218

6.3.3.	Impact sur les taux d'autoconsommation des foyers du groupement .....	223
6.3.4.	Impact sur les factures d'énergie des foyers du groupement.....	225
6.3.5.	Impact sur les gains financiers des foyers du groupement .....	230
6.3.6.	Synthèse.....	232
6.4.	ACC dans les groupements : impact d'un stockage d'énergie individuel pour une population représentative .....	234
6.4.1.	Impact du stockage individuel à l'échelle du groupement.....	234
6.4.2.	Impact sur les taux d'autoproduction des foyers du groupement.....	235
6.4.3.	Impact sur les taux d'autoconsommation des foyers du groupement .....	238
6.4.4.	Impact sur les factures d'énergie des foyers du groupement.....	239
6.4.5.	Impact sur les gains financiers des foyers du groupement .....	242
6.4.6.	Synthèse.....	244
6.5.	ACC dans les groupements : impact d'un stockage d'énergie centralisé pour une population représentative .....	245
6.5.1.	Impact du stockage collectif à l'échelle du groupement.....	245
6.5.2.	Impact sur les taux d'autoproduction des foyers du groupement.....	246
6.5.3.	Impact sur les taux d'autoconsommation des foyers du groupement .....	248
6.5.4.	Impact sur les factures d'énergie des foyers du groupement.....	248
6.5.5.	Impact sur les gains financiers des foyers du groupement .....	251
6.5.6.	Synthèse.....	253
6.6.	Quartier performant et PV collectif.....	254
6.6.1.	Impact d'un quartier performant et d'un PV collectif à l'échelle du groupement .....	254
6.6.2.	Impact sur les taux d'autoproduction des foyers du groupement.....	255
6.6.3.	Impact sur les factures d'énergie des foyers du groupement.....	258
6.6.4.	Synthèse.....	260
6.7.	ACC et prise de décision.....	261
6.7.1.	Politique de décision sur le pilotage des équipements électriques .....	261
6.7.2.	Résultats des simulations.....	262
6.8.	Inter-groupement .....	265

6.8.1. Configuration des groupements .....	265
6.8.2. Résultats des simulations.....	267
6.9. Synthèse.....	269

## 6.1. Implémentation du modèle d'ACC

Nous avons intégré le modèle de groupement directement au sein de la plateforme de simulation SMACH présentée dans les chapitres 1 et 3. La plateforme ayant été initialement développée en JAVA, c'est le langage que nous avons également utilisé pour implémenter le modèle d'ACC. Dans cette section, nous présentons tout d'abord la manière dont nous avons organisé les pas de temps de simulation et de comptage. Ensuite, nous présentons les principales classes du modèle d'ACC.

### 6.1.1. Articulation des pas de temps de simulation et de comptage

L'implémentation de la plateforme SMACH repose sur l'utilisation d'une classe abstraite<sup>11</sup> nommée *SimulationComponent*. Toute classe héritant de cette classe abstraite devient alors un élément de la simulation de l'activité humaine. Par exemple, la classe *Human*, qui décrit les caractéristiques d'un individu telles que son âge ou sexe par exemple, hérite de la classe *simulationComponent*. Au sein de cette classe abstraite, une méthode nous intéresse particulièrement, la méthode *simulationStep()*. Cette méthode permet, dans la plateforme SMACH, de déclencher l'exécution d'un pas de temps de simulation.

La méthode *simulationStep()* déjà existante permet de déclencher l'exécution des pas de temps de simulation des nouveaux composants du modèle, comme le module d'autoconsommation d'énergie. Pour permettre d'exécuter un pas de temps de comptage, nous avons ajouté la méthode *countSimulationStep()*. Ainsi, toutes les classes que nous implémentons et que nous présentons dans la section suivante héritent de la classe *simulationComponent()*.

### 6.1.2. Classes du modèle de groupement

L'implémentation du modèle de groupement dans la plateforme SMACH repose sur 7 classes principales. L'agencement de l'ensemble de ces classes est présenté par le diagramme de classe simplifié de la Figure 55. Dans ce diagramme, les classes présentées dans l'encadré jaune ainsi que la classe *Household* sont des classes faisant partie de la

---

<sup>11</sup> En programmation orientée objet (POO), une classe abstraite est une classe dont l'implémentation n'est pas complète et qui n'est pas instanciable. Elle sert de base à d'autres classes dérivées (héritées). ([https://fr.wikipedia.org/wiki/Classe\\_abstraite](https://fr.wikipedia.org/wiki/Classe_abstraite))

plateforme SMACH. L'implémentation de notre modèle est reliée à la plateforme SMACH à travers la classe *Household*, qui définit les caractéristiques d'un ménage SMACH (famille, habitat, équipements électriques, tarif de l'électricité, etc.).

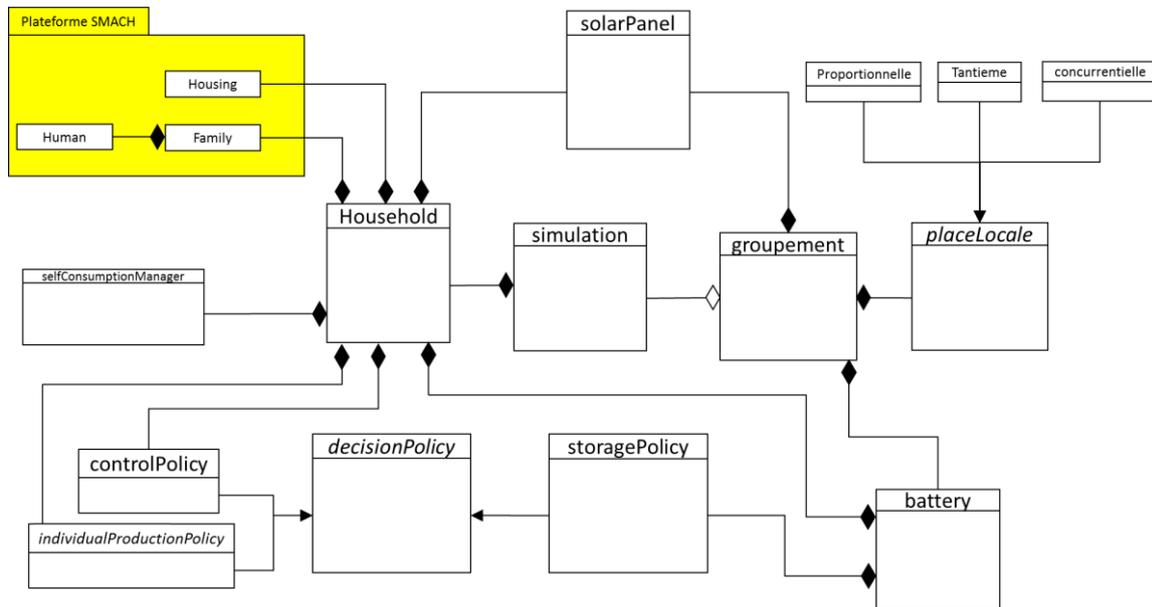


Figure 55 : Diagramme de classe simplifié de l'implémentation du modèle de groupement

### La classe *solarPanel*

Le panneau solaire est implémenté par une classe appelée *solarPanel*. Cette classe est caractérisée par les attributs suivants :

```
private int size;
private int azimuth;
private int orientation;
private FMU_Listener_PV fmuPV = null;
```

Les attributs *size*, *azimut* et *orientation* représentent respectivement les paramètres du modèle des panneaux PV qui sont la surface, l'inclinaison et l'orientation des panneaux PV. Le dernier attribut, *fmuPV*, est un objet qui permet de réaliser la co-simulation entre le SMA et le FMU qui simule le modèle des panneaux PV. La méthode *simulationStep()* va déclencher l'exécution d'un pas de temps de simulation pour les panneaux PV. Concrètement, cette méthode permet de récupérer depuis le FMU la quantité d'énergie produite par les panneaux PV pour le pas de temps de simulation courant.

### La classe *storage*

Cette classe représente un système de stockage d'énergie individuel ou collectif. Elle est caractérisée par les attributs suivants :

```
//DESCRIPTION STATIQUES DE LA BATTERIE
private double capacity;
private double continuousPower;
private StoragePolicy policy;
```

```

//MODELE DE FONCTIONNEMENT
boolean canCharged;
boolean canForcedCharged;
boolean isForcedMode
double minSOC = 0d;
double maxSOC = 1d;
double maxCharged;
double maxDischarged;

//PARTIE FONCTIONNELLE
private double SOC = 0d;
private double eCharged;
private double eDischarged;

```

Parmi ces attributs, *capacity* et *continuousPower* sont relatifs au fonctionnement de la batterie. Ils représentent respectivement la capacité de la batterie et la puissance maximale qu'elle peut charger ou décharger à chaque pas de temps de simulation. L'attribut *policy* correspond à la politique de décision sur le stockage appliquée par le propriétaire de la batterie à savoir un foyer ou un groupement. Les attributs contenus dans la section « *MODELE DE FONCTIONNEMENT* » sont ceux qui permettent de caractériser le mode de fonctionnement de la batterie ainsi que les états de charge minimum et maximum. Les attributs *maxCharged* et *maxDischarged* sont les quantités maximale et minimale d'énergie que la batterie peut charger ou décharger pour un pas de temps de comptage. Enfin, dans la section « *PARTIE FONCTIONNELLE* », il existe *SOC* qui correspond à l'état de charge de la batterie (« State Of Charge »), *eCharged* la quantité d'énergie chargée par la batterie et *eDischarged* la quantité d'énergie déchargée par la batterie pour un pas de temps de comptage.

L'implémentation du modèle repose sur l'utilisation de deux méthodes pour charger ou décharger de l'énergie dans la batterie à savoir *Charged(double Power)* et *Discharged(double Power)*. Ces deux méthodes ont pour paramètres d'entrée la puissance à charger et à décharger et fournissent en sorties les puissances effectivement chargée et déchargée par la batterie. Concrètement, ces deux méthodes vont évaluer la quantité d'énergie effectivement chargée ou déchargée de la batterie et vont retourner cette valeur. L'Algorithme 9 donne l'implémentation de la méthode *Charged* (le fonctionnement est similaire pour la méthode *Discharged*).

```

public double Charged(double power)
{
    double powerStored = 0;
    if(this.canCharged || this.canForcedCharged)
    {
        double wantedEnergyCharged = power*(this.simulationTimeStep/60d)/1000d;
        double RealEnergyCharged = wantedEnergyCharged;

        if(wantedEnergyCharged > this.maxCharged/this.comptageTimeStep )
            RealEnergyCharged = this.maxCharged/this.comptageTimeStep;

        powerStored = RealEnergyCharged/(this.simulationTimeStep/60d)*1000d;

        double percentageCharged = (RealEnergyCharged * 1d)/capacity;
        this.SOC += percentageCharged;
    }
    return powerStored;
}

```

*Algorithme 9 : Implémentation de la méthode Charged de la classe storage*

À chaque pas de temps de comptage, la méthode *CountTimeStep()* applique les prises de décision sur le fonctionnement de la batterie et calcule les quantités maximales d'énergie qui pourront être chargée ou déchargée lors du pas de temps de comptage suivant.

### ***La classe selfConsumptionManager***

Cette classe correspond au module d'autoconsommation d'énergie d'un foyer. Son rôle est de calculer, à chaque pas de temps de simulation, le besoin et le surplus d'énergie des foyers, mais aussi de calculer la quantité d'énergie chargée ou déchargée par les batteries. C'est la méthode *simulationStep()* qui effectue l'ensemble de ces opérations. Dans cette méthode, nous avons implémenté l'Algorithme 1 présenté au chapitre 3, qui modélise le fonctionnement du module d'autoconsommation d'énergie, et ceci pour un pas de temps de simulation.

La méthode *countSimulationStep()* quant à elle permet de déclencher le pas de temps de comptage du module d'autoconsommation d'énergie d'un foyer. Cette méthode va appliquer les différentes politiques de décision du foyer en termes de quantité d'énergie produite consommée, de fonctionnement des batteries et de déclenchement des appareils électriques.

### ***La classe household***

La classe *household* est une classe déjà existante dans la plateforme SMACH. Il s'agit de l'élément central de cette plateforme qui permet de reproduire l'activité humaine des habitants du foyer et sa consommation électrique. Afin de permettre à un foyer de pratiquer l'ACC, nous avons ajouté à cette classe les attributs suivants :

```

private SelfConsumptionManager SCM;
private SolarPanel solarPanel;
private Battery battery;

```

```

private double selfProductionUseRate;

private controlPolicy control;
private IndividualProductionPolicy IPPolicy;

```

L'attribut *selfProductionUseRate* représente le taux d'utilisation de la production individuelle du foyer. Les attributs *control* et *IPPolicy* sont respectivement les politiques d'utilisation de la production d'énergie individuelle et de décision pour le pilotage des équipements électriques du foyer.

Par ailleurs, la méthode *simulationStep()* exécute un pas de temps de simulation du foyer et ceci pour chaque habitant. Il s'agit de la réalisation des activités courantes, le fonctionnement des appareils électriques, la sélection de l'action pour chaque habitant et les prises de décision. Cette méthode va également enclencher un pas de temps de simulation pour le bâtiment en évaluant la température de chaque zone du modèle thermique et en évaluant la consommation électrique de chaque appareil de chauffage du foyer. Cette méthode fait appel à la méthode *simulationStep()* de la classe *selfConsumptionManager* pour exécuter le pas de temps de simulation du module d'autoconsommation. Elle évalue pour un foyer ses surplus et besoins en énergie ainsi que la quantité d'énergie chargée ou déchargée par ces systèmes de stockage.

Enfin, la méthode *countSimulationStep()* enclenche un pas de temps de comptage pour le foyer. C'est avec cette méthode qu'ont lieu les différentes prises de décision des habitants du foyer grâce aux politiques de décision.

### ***La classe placeLocale***

Cette classe abstraite va permettre de représenter la place locale d'échange d'énergie ainsi que l'organisation des échanges d'énergie au sein d'un groupement. Pour implémenter une organisation des échanges, il suffit de créer une nouvelle classe héritant de celle-ci. Ainsi, nous avons implémenté trois classes qui correspondent à chaque organisation des échanges présentée dans le chapitre 4.

La méthode *simulationStep()* de la classe *placeLocale* évalue le surplus et le besoin en énergie d'un groupement pour un pas de temps de simulation. C'est également par cette méthode que va être évaluée la charge ou la décharge de l'énergie des batteries collectives en appelant la méthode *charged(double power)* ou *dischagred(double power)*.

La méthode *countSimulationStep()* exécute un pas de temps de comptage pour la place locale d'échange. Dans un premier temps, elle estime l'allocation de l'énergie en accord avec un des algorithmes présentés dans le chapitre 4. Ensuite, cette méthode applique la politique de décision liée au stockage collectif du groupement.

### ***La classe groupement***

La classe *groupement* est au cœur du modèle d'ACC. Elle permet de représenter un groupement ainsi que l'ensemble des équipements et des foyers qui le compose. Les attributs de cette classe sont :

```
private PlaceLocale place;  
private ArrayList<Simulation> simulations;  
private Battery collectiveBattery;  
private ArrayList<SolarPanel> collectivePanels
```

L'attribut *simulations* est une liste qui contient l'ensemble des simulations des foyers du groupement. À partir d'une classe appelée *Simulation*, on peut accéder aux attributs du foyer qu'elle simule.

La méthode *simulationStep()* de la classe *Groupement* déclenche un pas de temps de simulation pour tous les composants du groupement *i.e.* les systèmes de stockage collectifs, les foyers et la place locale d'échange. Concrètement, elle fait appel aux méthodes *simulationStep()* des classes *solarPanel*, *placeLocale* et *household*.

La méthode *countSimulationStep()* va exécuter un pas de temps de comptage pour l'ensemble des composants du groupement c'est à dire la place locale d'échange et les foyers. Pour cela, elle appelle les méthodes *countSimulationStep()* des classes *household* et *placeLocale*.

### ***La classe decisionPolicy***

Cette classe abstraite correspond à une politique de décision d'un point de vue général. Nous avons créé trois classes abstraites héritant de *decisionPolicy* , *individualProductionPolicy* , *storagePolicy* et *controlPolicy* . Chacune de ces classes représente respectivement la politique de décision pour l'autoconsommation individuelle d'énergie, la politique de décision liée au stockage et la politique de décision sur le pilotage des équipements électriques.

Chaque politique de décision implémentée dans le modèle possède une méthode nommée *applyPolicy()*. C'est dans cette méthode que l'on va retrouver l'algorithme qui permet d'appliquer une prise de décision d'un foyer ou d'un groupement. Pour chaque nouvelle politique de décision que l'on souhaite implémenter, il suffira donc de créer une nouvelle classe héritant de *individualProductionPolicy* , *storagePolicy* ou *controlPolicy* (qui hérite elles-mêmes de la classe *decisionPolicy*) et d'implémenter la méthode *applyPolicy()*.

## 6.2. Etude de l'ACC grâce à la simulation multi-agent

L'objectif principal du modèle qui a été créé et implémenté tout au long de cette thèse est de permettre aux experts de l'énergie d'émettre, mettre en œuvre, et de valider des hypothèses en lien avec l'ACC grâce à la simulation multi-agent. Dans la suite de ce chapitre, nous présentons la simulation de différents cas d'étude et dont les résultats permettent de mettre en avant l'expressivité du modèle pour diverses configurations d'ACC. Tout d'abord, dans cette section, nous décrivons le contexte général des différents cas d'étude.

### 6.2.1. ACC et axes d'étude

Actuellement, l'étude et la compréhension des différents mécanismes de l'ACC sont des défis majeurs pour les principaux acteurs du monde de l'énergie, dont EDF fait partie. En effet, le passage à l'ACC va soulever de nouveaux questionnements sur la manière dont l'énergie va être consommée, échangée ou encore sur l'impact des systèmes de stockage sur la consommation ou l'activité des habitants... L'objectif premier du modèle développé ici est de permettre de simuler des configurations d'ACC pour répondre à ces questionnements majeurs. Pour évaluer les capacités du modèle à atteindre cet objectif, nous avons échangé avec des experts en ACC d'EDF afin d'établir des questionnements pertinents. Nous avons ainsi identifié un certain nombre de questions métiers d'intérêt. Nous avons regroupé ces différentes questions selon quatre axes d'étude que nous présentons dans la Figure 56. Chaque axe représente une thématique spécifique liée à l'ACC et se rapporte à un ensemble d'études et de simulations qui peuvent être réalisées avec notre outil pour répondre à des questions en lien avec l'ACC. Chacune de ces questions fait donc référence à un ou plusieurs questionnements métiers soulevés par les experts en ACC.

Ci-dessous, nous exposons brièvement chacun des axes d'étude :

- **Effet de l'ACC dans les groupements** : L'objectif de cet axe est d'étudier l'impact des échanges d'énergie sur le bilan énergétique du groupement lorsque la production d'énergie est assurée par des panneaux PV individuels en lien avec l'ACC. Dans cet axe, nous étudions également l'impact des systèmes de stockage d'énergie individuels et collectifs du groupement ;
- **Effet d'un quartier performant dans les groupements** : L'objectif de cet axe est d'étudier l'impact des échanges dans un groupement dit « performant » du point de vue énergétique, lorsque la production d'énergie est assurée par un système de production collectif d'énergie. Nous considérons qu'un groupement performant est un groupement possédant au moins un moyen de production

locale d'énergie, et composé de foyers dont les bâtiments sont construits dans le but d'avoir une faible consommation d'énergie et une faible empreinte carbone ;

- **Effet d'une politique d'offre et de demande dans un groupement** : L'objectif de cet axe est d'étudier l'impact de différentes politiques de décision mises en place par les habitants ou le groupement ;
- **Effet de l'inter-groupement** : L'objectif de cet axe est de permettre d'étudier comment les échanges inter-groupements vont impacter l'ACC.

Il faut noter que chaque axe présenté ici est caractérisé par une configuration technique spécifique. Cela nous permet de comparer les questions propres à chaque axe par rapport à une situation de référence, mais aussi chaque question de chaque axe entre elles. Par exemple, pour l'axe « Effets de l'ACC dans les groupements », les foyers sont équipés de panneaux PV individuels tandis que pour l'axe « Effet d'un quartier performant dans les groupements », il s'agit d'un quartier construit dans l'objectif d'avoir une consommation d'électricité faible avec des panneaux PV collectifs. Cependant, chaque question de chaque thématique peut modifier certains paramètres des configurations techniques proposées, comme par exemple l'ajout de batteries individuelles dans les foyers pour évaluer l'impact sur la consommation totale d'énergie du groupement.

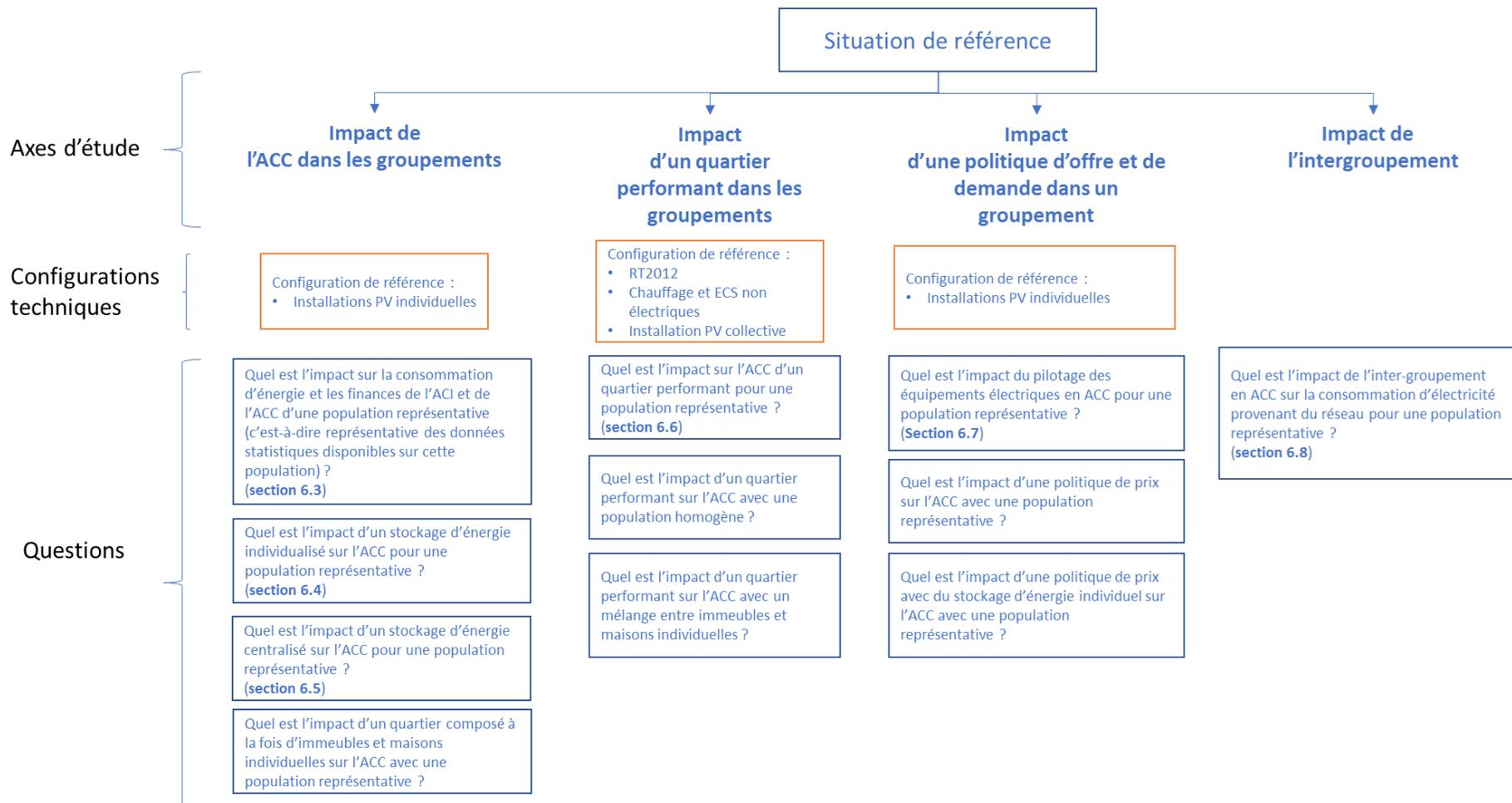


Figure 56 : Présentation de quatre axes d'étude métiers liés à l'ACC

Le modèle mis en place permet de simuler et d'étudier un grand nombre de configurations d'ACC. Les caractéristiques de ces configurations s'organisent en trois catégories qui sont :

- La catégorie **Population** rassemble les paramètres qui décrivent les foyers, les habitants, les bâtiments et les appareils électriques de chaque foyer. Cette catégorie définit également les équipements d'autoconsommation d'énergie individuelle de chaque foyer du groupement *i.e.* la présence d'un panneau PV ou d'une batterie individuelle ;
- La catégorie **Équipements collectifs** permet de définir les paramètres des différents équipements collectifs d'un groupement. Ils définissent, notamment, le nombre de panneaux PV collectifs et leurs paramètres ainsi que le nombre et les paramètres des batteries collectives ;
- La catégorie **Échanges d'énergie** définit l'organisation des échanges d'énergie que la place locale d'échange applique pour allouer l'énergie aux foyers. Elle détermine également l'organisation du stockage collectif.

Le modèle d'ACC permet donc aux experts du domaine de caractériser et de simuler de nombreuses configurations dans le but de proposer et de valider des hypothèses ou de répondre à des questionnements scientifiques, techniques ou encore économiques liés à l'ACC. Afin de mettre en avant les possibilités offertes par ce modèle, nous présentons dans ce qui suit les résultats de 6 configurations répondant chacune à une des questions métiers présentées à la Figure 56 à savoir :

- Quel est l'impact sur la consommation d'énergie et les finances de l'ACI et de l'ACC d'une population dite représentative (c'est-à-dire représentative des données statistiques disponibles sur cette population) ?
- Quel est l'impact d'un stockage d'énergie individualisé sur l'ACC pour une population représentative ?
- Quel est l'impact d'un stockage d'énergie centralisé sur l'ACC pour une population représentative ?
- Quel est l'impact sur l'ACC d'un quartier performant pour une population représentative ?
- Quel est l'impact du pilotage des équipements électriques en ACC pour une population représentative ?
- Quel est l'impact de l'inter-groupement en ACC sur la consommation d'électricité provenant du réseau pour une population représentative ?

Pour chacune de ces questions nous étudierons principalement 5 indicateurs liés à l'ACC à savoir, les taux d'autoproduction et d'autoconsommation à l'échelle du groupement et des foyers, les factures et gains financiers à l'échelle des foyers, et l'origine de l'énergie

consommée par le groupement. Dans la section suivante, nous présentons plus en détail ces différents indicateurs que nous utilisons pour évaluer l'impact de l'ACC.

## 6.2.2. Indicateurs de l'ACC

### *Les indicateurs liés à la performance énergétique*

Afin d'étudier l'ACC, mais aussi l'ACI, nous utilisons principalement deux indicateurs liés à la consommation et à la production d'énergie qui sont le **taux d'autoproduction** et le **taux d'autoconsommation** d'énergie.

Le **taux d'autoproduction d'énergie** est défini comme la quantité d'énergie autoconsommée par rapport à la consommation totale d'énergie. Généralement, dans le cadre de l'ACI l'indicateur utilisé est le taux d'autoproduction individuel qui est défini de la manière suivante :

**Taux d'autoproduction individuel**  $Taux_{AP\text{individuel}}$  : Ce taux est calculé pour un foyer possédant un moyen de production d'énergie individuel et potentiellement une batterie pour le stockage. Il permet d'évaluer la part d'énergie produite par le foyer qui est effectivement consommée par ce dernier. Si on note  $E_{\text{consoLocale}}$  la quantité d'énergie autoconsommée par un foyer,  $E_{\text{consoBatterie}}$  la quantité d'énergie consommée par un foyer et qui provient de sa batterie et  $E_{\text{totaleFoyer}}$  la consommation totale d'énergie du foyer, nous obtenons :

$$Taux_{AP\text{individuel}} = \frac{E_{\text{consoLocale}} + E_{\text{consoBatterie}}}{E_{\text{totaleFoyer}}} \quad (70)$$

Cependant, dans le cadre de l'ACC, nous proposons d'utiliser deux nouvelles définitions du taux d'autoproduction d'énergie :

- **Taux d'autoproduction collectif**  $Taux_{AP\text{collectif}}$  : Il s'agit ici de calculer le taux d'autoproduction de chaque foyer du groupement en prenant en compte l'énergie reçue grâce aux échanges d'énergie au sein du groupement, mais aussi issue de la batterie collective. Ce taux peut être calculé pour tous les foyers qu'ils possèdent ou non un système de production ou de stockage d'énergie. Si l'on note  $E_{\text{consoEchange}}$  la quantité d'énergie consommée par un foyer et qui provient des échanges d'énergie et  $E_{\text{batterieCollective}}$  la quantité d'énergie consommée par un foyer et qui provient du stockage d'énergie collectif du groupement, il vient :

$$Taux_{AP\text{collectif}} = \frac{E_{\text{consoLocale}} + E_{\text{consoBatterie}} + E_{\text{consoEchange}} + E_{\text{batterieCollective}}}{E_{\text{totaleFoyer}}} \quad (71)$$

- **Taux d'autoproduction du groupement**  $Taux_{AP\text{Groupement}}$  : Ce taux d'autoproduction est évalué à l'échelle du groupement. Il va nous permettre d'analyser comment, au sein d'un groupement, l'ACI, l'ACC et les systèmes de

stockage subviennent au besoin en énergie. Si l'on note  $E_{consoLocaleGroup}$  la quantité d'énergie autoconsommée au sein du groupement, nous avons :

$$E_{consoLocaleGroup} = \sum_{\forall foyer \in Groupement} [E_{consoLocale} + E_{consoBatterie} + E_{consoEchange} + E_{batterieCollective}] \quad (72)$$

Le taux d'autoproduction du groupement est alors défini par :

$$Taux_{APGroupement} = \frac{E_{consoLocaleGroup}}{E_{totaleGroupement}} \quad (73)$$

avec  $E_{totaleGroupement}$  la quantité totale d'énergie consommée au sein du groupement.

**Le taux d'autoconsommation d'énergie** est, pour un producteur d'énergie locale, la part d'énergie que ce dernier a autoconsommée par rapport à sa production totale d'énergie. Ce taux peut donc être quantifié pour un foyer ou pour un groupement possédant un moyen de production d'énergie. Cependant, l'évaluation de ce taux devient complexe lorsque les foyers ou le groupement sont équipés de systèmes de stockage individuels. En effet, dans ces systèmes, il est possible de stocker de l'énergie qui ne provient pas de la production locale du foyer ou du groupement et il ne faut alors pas considérer cette énergie dans le calcul du taux d'autoconsommation.

La Figure 57 présente schématiquement d'où provient l'énergie consommée pour un foyer, l'origine de l'énergie stockée par la batterie et la destination de l'énergie produite par les panneaux PV.

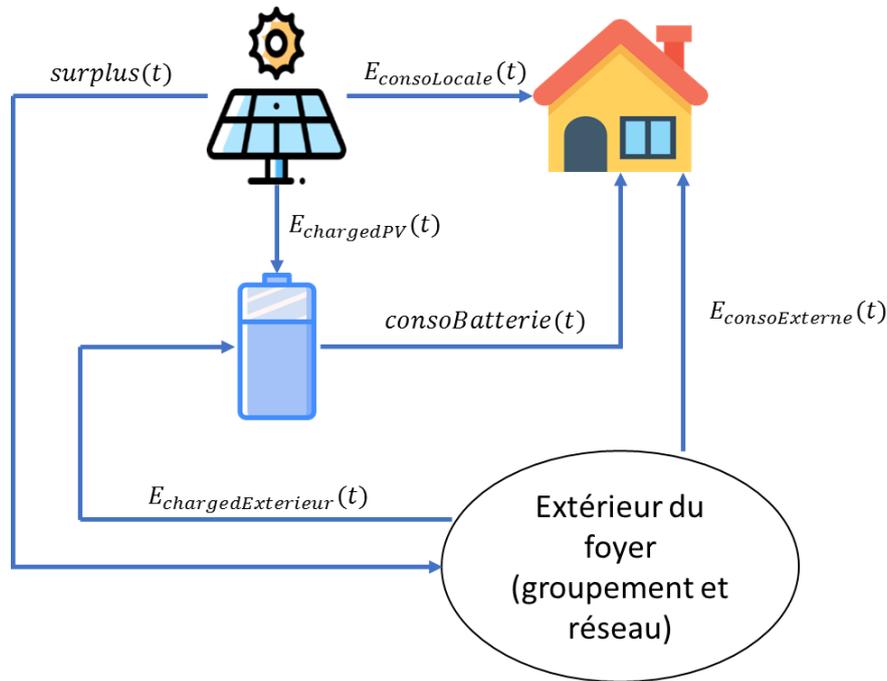


Figure 57 : Schéma des flux d'énergie pour un foyer pratiquant l'ACC avec un système de stockage individuel

Dans la Figure 57,  $E_{chargedPV}(t)$  correspond, pour un pas de temps de simulation, à la quantité d'énergie chargée par la batterie individuelle,  $E_{chargedExterne}(t)$  correspond à la quantité d'énergie chargée par la batterie mais qui ne provient pas de la production locale du foyer et  $E_{consoBatterie}(t)$  est la quantité totale d'énergie déchargée par la batterie toujours pour un pas de temps de simulation. Pour évaluer le taux d'autoconsommation en présence d'une batterie, on calcule dans un premier temps la part d'énergie stockée par la batterie et qui provient de la production locale pour toute la durée de la simulation :

$$Part_{batterieLocale} = \frac{\sum E_{chargedPV}}{\sum E_{chargedPV} + \sum E_{chargedExterne}} \quad (74)$$

On peut ensuite calculer pour toute la durée de la simulation la quantité d'énergie déchargée par la batterie et qui provient de la production d'énergie locale du foyer <sup>12</sup>:

$$E_{batterieLocale} = Part_{batterieLocale} * \sum E_{consoBatterie} \quad (75)$$

Notons que cette équation ignore la nature de l'énergie initialement présente dans la batterie. Mais, cette part est généralement négligeable devant la quantité d'énergie qui transite par la batterie.

<sup>12</sup> Pour les configurations étudiées dans ce chapitre, les foyers et le groupement pratiquent une politique de décision sur le stockage qui ne permet aux batteries de stocker que de l'énergie provenant d'une production locale. Ainsi, on aura donc :

$$E_{batterieLocale} = \sum E_{consoBatterie}$$

Ainsi, dans le cadre de l'ACC nous proposons deux indicateurs pour évaluer les taux d'autoconsommation :

- **Le taux d'autoconsommation individuel  $Taux_{AC\text{individuel}}$**  : Ce taux permet de connaître la part d'énergie qu'un foyer autoconsomme, c'est-à-dire la part de sa production qu'il consomme localement. Il intègre l'énergie produite par le foyer et directement consommée par celui-ci, mais également l'énergie qui provient de sa batterie individuelle s'il en possède une. Si l'on note  $E_{prodFoyer}$  la quantité d'énergie produite localement par un foyer, nous avons :

$$Taux_{AC\text{individuel}} = \frac{E_{consoLocale} + E_{consoBatterie}}{E_{prodFoyer}} \quad (76)$$

- **Le taux d'autoconsommation du groupement  $Taux_{AC\text{Groupement}}$**  : Ce taux évalue à l'échelle du groupement la part d'énergie autoconsommée par ce dernier. Si l'on note  $E_{prodGroupement}$  la quantité d'énergie produite dans le groupement par les moyens de production individuels et collectifs, nous avons :

$$Taux_{AC\text{Groupement}} = \frac{E_{consoLocaleGroup} + E_{consoBatterie}}{E_{prodGroupement}} \quad (77)$$

Au niveau du groupement, nous étudions également la provenance de l'énergie consommée par l'ensemble des foyers.

Grâce à ces différents taux, nous pouvons espérer avoir une vision globale de la manière dont l'énergie est consommée au sein du groupement et ceci pour chaque foyer.

### *Les indicateurs financiers*

Ces indicateurs vont permettre de mesurer l'impact financier de l'ACC sur les différents foyers d'un groupement. Nous proposons de le faire à l'aide de deux indicateurs financiers :

- **La facture d'énergie de chaque foyer du groupement** : Cet indicateur donne le prix payé pour l'énergie consommée par un foyer (il ne prend pas en compte les autres coûts tels que les coûts d'abonnement ou taxes). Si l'on note  $Facture_{reseau}$  le prix payé par un foyer pour l'énergie qu'il consomme depuis le réseau et  $Facture_{consoEchange}$  le prix payé par le foyer pour l'énergie qu'il consomme et qui provient des échanges, il vient :

$$Facture_{individuelle} = Facture_{reseau} + Facture_{consoEchange} \quad (78)$$

- **Les gains financiers de chaque foyer du groupement** : Cet indicateur est calculé pour les foyers possédant un moyen de production d'énergie individuel. Il permet de connaître la somme d'argent reçue par un foyer pour la quantité d'énergie que

ce dernier a échangée dans le groupement et vendue au réseau. Si l'on note  $Gain_{réseau}$  la somme d'argent reçue par un foyer lorsqu'il vend de l'énergie au réseau et  $Gain_{échange}$  la somme d'argent reçue par un foyer lorsque ce dernier échange de l'énergie dans le groupement, il vient :

$$Gain_{individuel} = Gain_{réseau} + Gain_{échange} \quad (79)$$

### *Représentation des indicateurs*

Afin de présenter nos indicateurs et les valeurs associées, nous utilisons des représentations différentes.

Les valeurs des taux d'autoconsommation et d'autoproduction à l'échelle du groupement seront données dans des tableaux.

Pour les taux d'autoconsommation individuels, les taux d'autoproduction individuels, les factures d'énergie et les gains financiers, nous utilisons une représentation de type « boîte à moustaches ». Ce type de graphique permet d'avoir une vision globale de la manière dont se répartissent les différents indicateurs pour chaque foyer dans un groupement. Tout d'abord on retrouve sur ce type de graphique une boîte. Les extrémités de la boîte représentent les seconds et troisièmes quartiles, appelés quartile inférieur et quartile supérieur. La boîte contient donc 50% des valeurs. On retrouve également sur ces graphiques la moyenne ainsi que la valeur médiane. Les extrémités des moustaches peuvent indiquer les valeurs maximale et minimale de l'échantillon considéré ou les 5<sup>ème</sup> et 95<sup>ème</sup> quartile. Lorsque l'extrémité des moustaches représente les 5<sup>ème</sup> et 95<sup>ème</sup> déciles, on retrouve sur les schémas des valeurs extrêmes, représentées sous la forme de points, qui peuvent mettre en avant des cas particuliers. La Figure 58 présente une boîte à moustache.

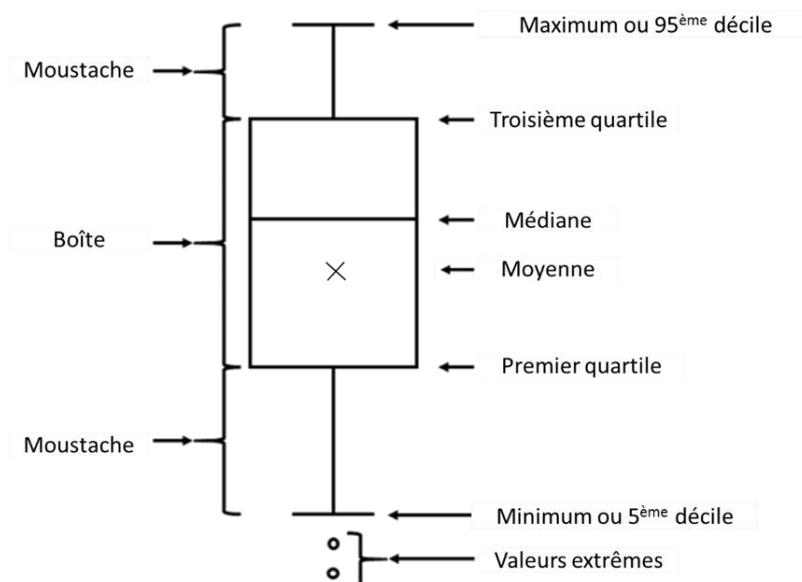


Figure 58 : Représentation d'une boîte à moustaches

Pour comparer les indicateurs entre deux configurations, par exemple les taux d'autoproduction des foyers du groupement pour deux organisations des échanges, nous utilisons un graphe dit de Bland-Altman. Sur ces graphiques, chaque point correspond à un foyer et à une semaine de l'année. L'abscisse de chaque point est la moyenne de l'indicateur considéré pour les deux situations que nous souhaitons comparer. L'ordonnée de chaque point correspond à la différence entre les indicateurs. Ainsi, en regardant la dispersion des différents points sur ces graphiques nous sommes capables de voir, par exemple, si le passage d'une configuration des échanges à une autre impacte ou non l'indicateur considéré. Sur chaque graphique, nous indiquons la moyenne des différences entre les indicateurs ainsi que les limites haute et basse qui indiquent l'intervalle où se trouvent 95% des valeurs.

Pour représenter la provenance de l'énergie dans le groupement nous utilisons un graphe de type « camembert » qui permet facilement de voir la part d'énergie qui provient du réseau, des échanges d'énergie, des moyens locaux, des systèmes de stockage individuels ou collectifs.

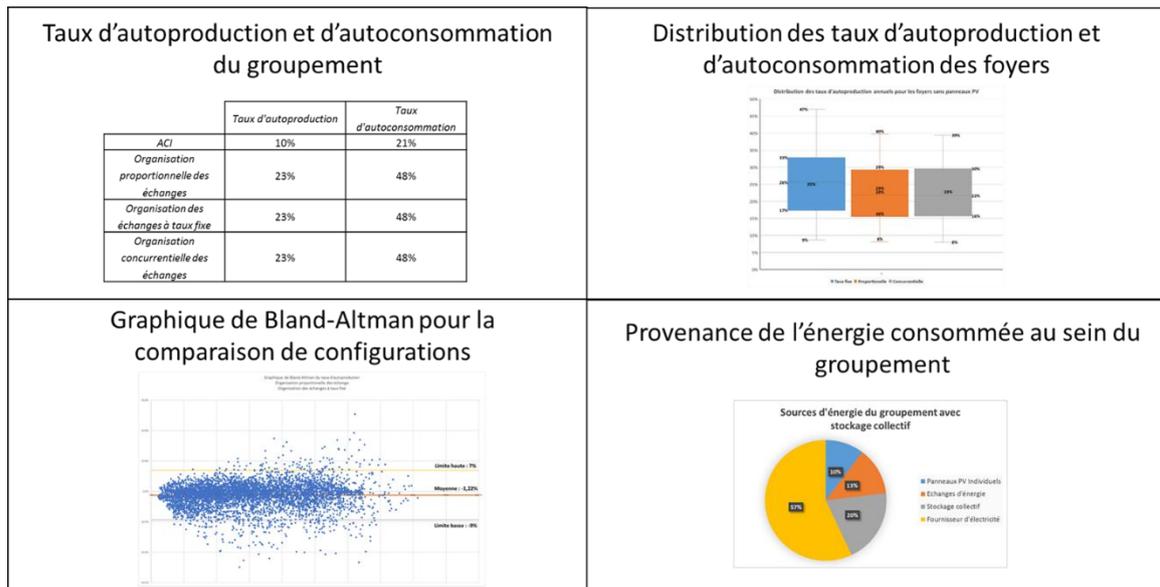


Figure 59 : Présentation des différents indicateurs

La Figure 59 donne schématiquement la représentation graphique des indicateurs utilisée dans la suite du chapitre.

Dans la section suivante, nous exposons les caractéristiques de la situation de référence qui sera la base de l'ensemble des simulations.

### 6.2.3. Situation de référence

Nous proposons une situation de référence avec un groupement composé de 100 foyers. La population et les bâtiments sont générés par la plateforme SMACH avec les caractéristiques suivantes :

- **Type de bâtiment** : Appartements ;
- **Performance thermique des bâtiments** : Répartition statistique des niveaux de la réglementation thermique française entre 1982 et 2012. Cette répartition est construite par le générateur SMACH à partir des statistiques INSEE portant sur les dates de construction des bâtiments ;
- **Chauffage électrique** : Distribution statistique française entre le chauffage électrique à effet joule et le chauffage non-électrique en fonction du type de logement. Cette distribution provient des données d'EDF ;
- **Production d'ECS** : Distribution statistique française entre un ballon d'eau chaude électrique et un ballon d'eau chaude non électrique en fonction du type de logement. Cette répartition provient des données d'EDF ;
- **Population** : Statistiquement représentative de la population française à partir des données fournies par l'INSEE ;
- **Fichier météo** : Ville de La Rochelle, France.

Ces paramètres définissent une situation de référence avec une population statistiquement représentative de la population française vivant en appartement. Nous avons choisi de localiser cette population dans la ville de La Rochelle située dans le sud-ouest de la France, car c'est une région avec un grand nombre de panneaux PV installés<sup>13</sup>. Les données météorologiques utilisées sont fournies par le logiciel Meteonorm et représentent une année moyenne construite à partir de données de plusieurs décennies. Pour chaque mois simulé, un mois médian représentatif de la période considérée est sélectionné. Ensuite, un raccordement est fait entre les mois pour assurer la cohérence des données. Pour cela, Meteonorm réalise une interpolation sur les 8 dernières heures de chaque mois et les 8 premières heures du mois. Les Figures 60 et 61 présentent les fréquences cumulées de la température extérieure et du flux solaire global sur une surface horizontale pour l'année simulée. La Figure 62 donne la rose des vents pour le site et l'année étudiés.

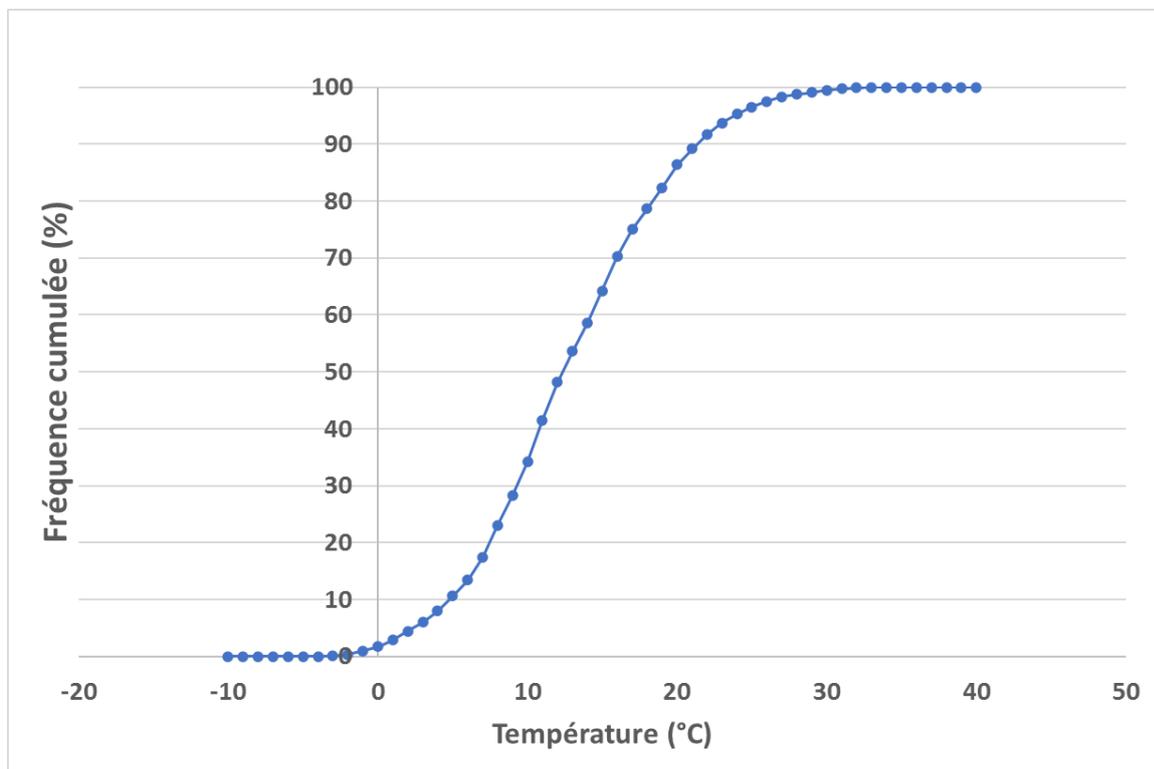


Figure 60 : Fréquence cumulée de la température extérieure pour la ville de La Rochelle

<sup>13</sup> <https://resources.solarbusinesshub.com/solar-industry-reports/item/global-market-outlook-for-photovoltaics-2014-2018>

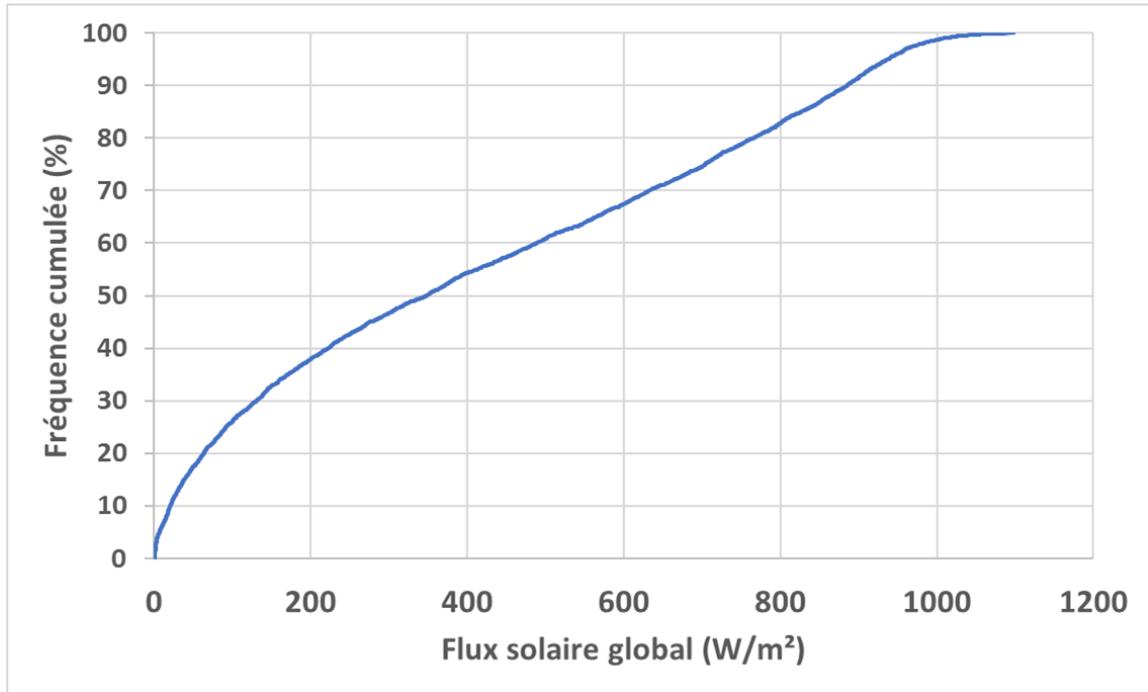


Figure 61 : Fréquence cumulée du flux solaire global sur une surface horizontale pour la ville de La Rochelle

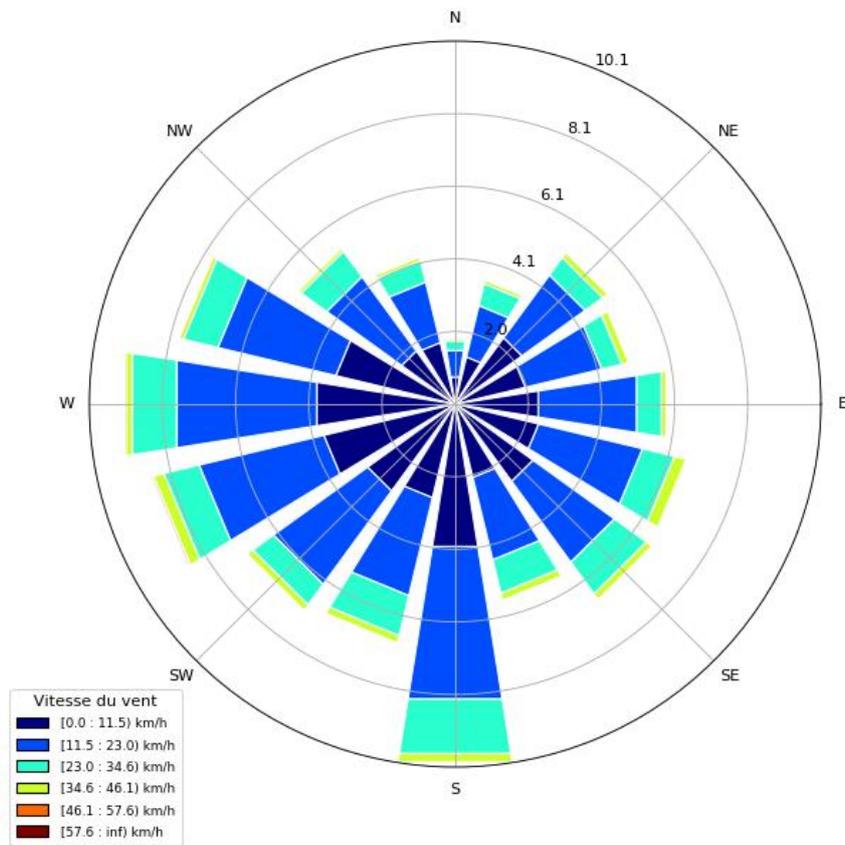


Figure 62 : Rose des vents pour la ville de La Rochelle

Comme nous l'avons précisé à la fin du chapitre 5, le modèle d'ACC développé permet d'avoir une variabilité importante dans les politiques de décision mises en place entre les foyers d'un même groupement. Cependant, pour nos simulations et par simplification, nous avons défini des politiques de décision qui seront appliquées par l'ensemble des foyers ou par le groupement entier :

- Les foyers possédant un panneau PV individuel utiliseront en priorité, pour leur autoconsommation individuelle, la totalité de leur production locale d'énergie ;
- Les foyers et le groupement utilisent une politique de décision liée au stockage standard c'est-à-dire que les batteries individuelles et collectives sont en mode de charge-décharge souple pour toute la durée des simulations ;
- Les foyers utilisent une politique de décision sur le pilotage ne permettant pas de déplacer le fonctionnement de leurs appareils électriques excepté pour le dernier cas d'étude présenté dans la section 6.7.

L'ensemble des simulations ont été réalisées sur une période d'un an à savoir du 1er janvier au 31 décembre de l'année type. Cela permet d'obtenir des résultats qui prennent en compte l'impact saisonnier sur la production d'énergie, sur l'activité humaine et sur la consommation électrique des foyers.

De plus, les trois organisations des échanges présentées dans le chapitre 4 sont également simulées :

- Organisation proportionnelle des échanges d'énergie ;
- Organisation des échanges d'énergie à taux fixe ;
- Organisation concurrentielle de l'énergie avec une vente au plus offrant.

Concernant les prix de l'énergie échangée au sein du groupement et dans le cadre des organisations des échanges proportionnelle et à taux fixe, nous considérons que le groupement impose un prix fixe de l'énergie égal à 0,125 €/kWh. Pour une organisation concurrentielle, les foyers qui achètent l'énergie recalculent leurs prix à chaque pas de temps de comptage selon l'algorithme présenté à la section 4.4.3. L'énergie revendue à l'extérieur du groupement est rachetée par le fournisseur d'électricité au prix de 0,100 €/kWh.

#### 6.2.4. Représentativité des résultats des simulations

Tout d'abord, nous proposons d'effectuer chaque simulation sur une période annuelle afin de pouvoir représenter toutes les saisons. Ensuite, compte tenu de la variabilité dans l'activité humaine simulée par la plateforme SMACH, nous devons nous assurer que cette variabilité nous permette tout de même de comparer des simulations différentes de

manière rigoureuse. Pour cela, il existe deux possibilités. La première est de réaliser plusieurs fois une même simulation puis d'utiliser les valeurs moyennes des résultats obtenus. La seconde possibilité est de démontrer que pour deux simulations, avec les mêmes paramètres, les résultats sont suffisamment proches ou similaires. Dans cette section, nous avons effectué deux études visant à montrer que pour des simulations avec les mêmes paramètres le modèle fournit des résultats similaires.

Les deux études que nous avons réalisées visent à évaluer si :

- Pour une population identique, les valeurs des indicateurs sont très proches pour deux simulations avec une même configuration d'ACC ;
- Pour deux populations différentes générées avec les mêmes paramètres, les valeurs des indicateurs sont très proches pour deux simulations avec une même configuration d'ACC.

Pour ce faire, nous avons simulé la situation de référence avec les paramètres suivants :

- 50 foyers du groupement sont équipés de panneaux PV individuels d'une puissance de 3,5 kWc chacun ;
- Le groupement pratique une organisation proportionnelle des échanges d'énergie.

L'analyse comparative est effectuée au travers des écarts entre deux indicateurs majeurs de l'ACC qui sont le taux d'autoconsommation et le taux d'autoproduction au niveau du groupement. Afin de mesurer les écarts entre ces indicateurs, nous utilisons la distance de Fréchet (Fréchet, 1906). Il s'agit d'une mesure de similarité entre deux ensembles de données qui conserve l'ordre des données. Concrètement, cette distance correspond au plus grand écart existant entre les deux séries de données. L'algorithme permettant de calculer cette distance renvoie un nombre compris entre 0 et 1, plus ce nombre est proche de zéro, plus les deux séries de données sont semblables.

#### *Analyse pour une population identique*

Pour deux populations nommées A et B respectivement, les Figures 63 et 64 montrent les valeurs hebdomadaires des taux d'autoproduction et d'autoconsommation d'énergie pour l'année entière et au niveau du groupement. Sur ces figures sont également reportées les valeurs moyennes pour l'année entière, l'hiver (d'octobre à mars) et l'été (d'avril à septembre).

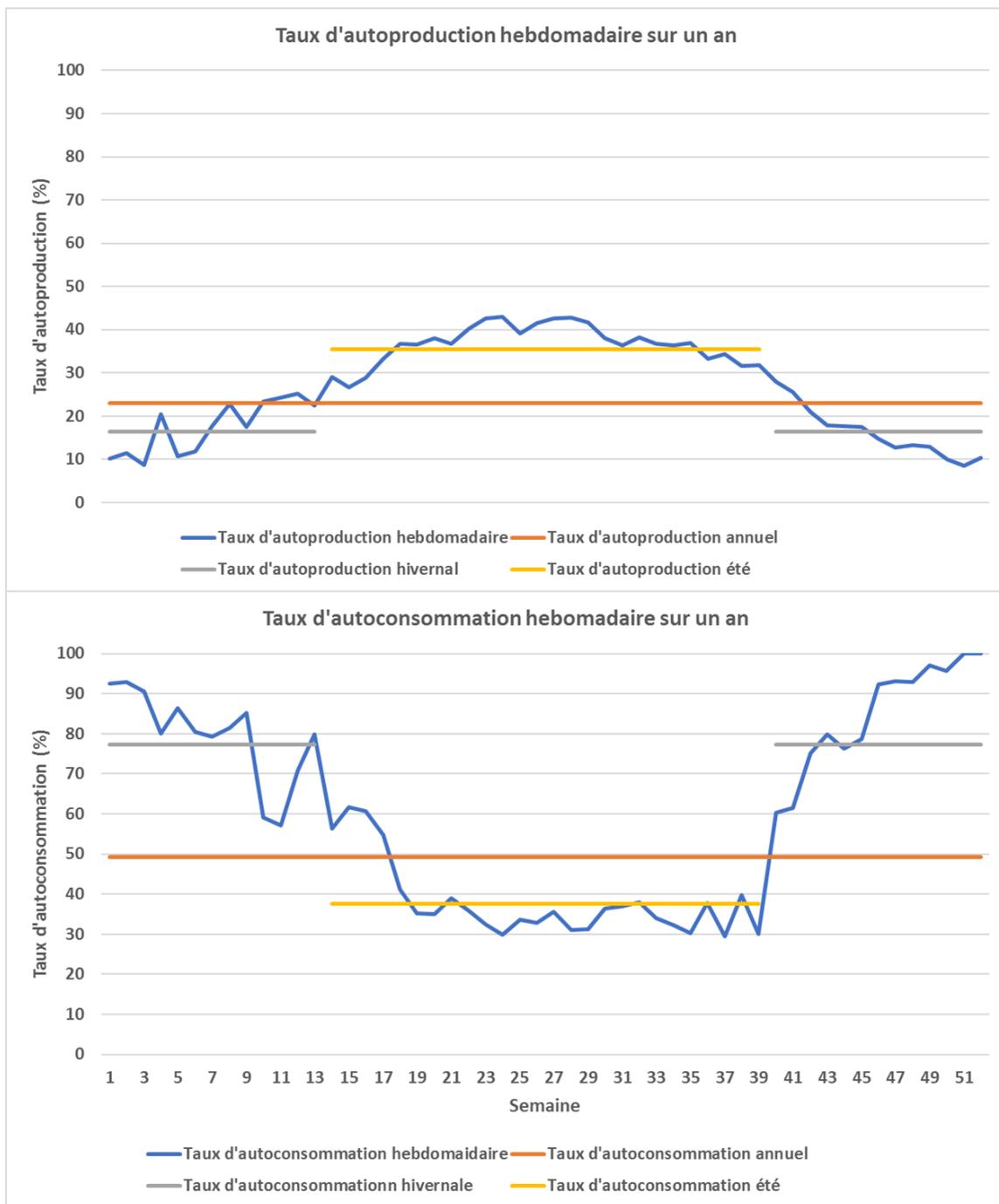


Figure 63 : Valeur hebdomadaire des taux d'autoconsommation et d'autoproduction d'énergie pour la population A

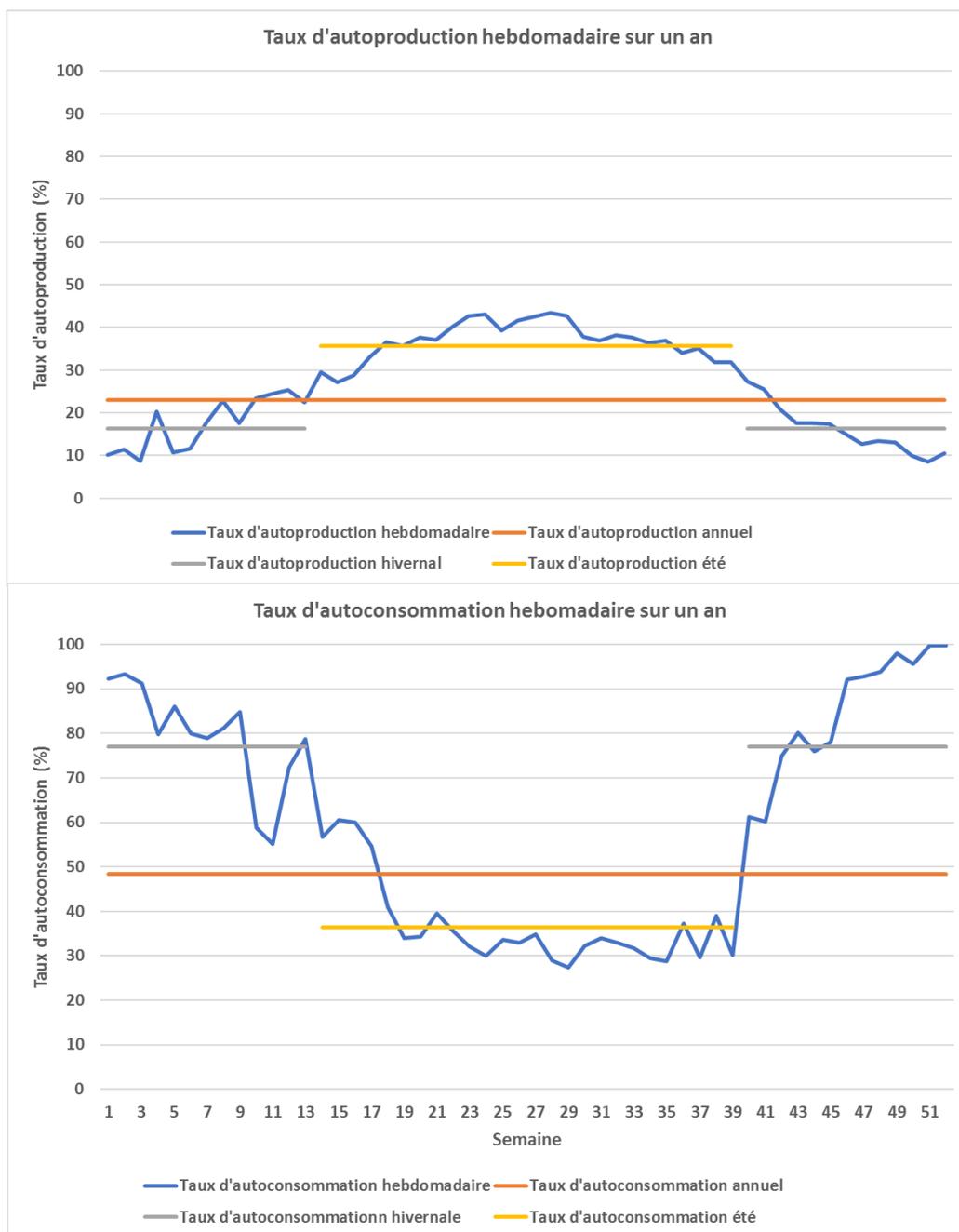


Figure 64 : Valeur hebdomadaire des taux d'autoconsommation et d'autoproduction d'énergie pour la population B

Tout d'abord, nous pouvons analyser les valeurs moyennes annuelles et saisonnières des indicateurs présentés dans le Tableau 2 pour la population A et dans le Tableau 3 pour la population B.

	Annuel	Hiver	Été
Taux d'autoproduction	23%	16%	35%
Taux d'autoconsommation	49%	77%	38%

Tableau 2 : Valeur des taux d'autoproduction et d'autoconsommation pour l'année, l'hiver et l'été pour la population A

	Annuel	Hiver	Été
Taux d'autoproduction	23%	16%	36%
Taux d'autoconsommation	48%	77%	37%

*Tableau 3 : Valeur des taux d'autoproduction et d'autoconsommation pour l'année, l'hiver et l'été pour la population B*

On constate que les valeurs des différents taux d'autoproduction et d'autoconsommation sont très proches pour les trois périodes considérées. En effet, l'écart maximal observé est d'un point de pourcentage

De la même manière, nous pouvons comparer les indicateurs pour chaque semaine de l'année afin de vérifier que les résultats obtenus sont similaires. Lorsque l'on regarde l'évolution hebdomadaire des indicateurs, il existe, à l'évidence, une similitude très forte entre les deux courbes ce qui est confirmé par le calcul des distances de Fréchet :

- Distance de Fréchet pour les taux d'autoproduction : 0,0100 ;
- Distance de Fréchet pour les taux d'autoconsommation : 0,0377.

Lors de cette étude, nous avons également étudié le lien entre les indicateurs moyens pour l'année, l'hiver et l'été et les indicateurs hebdomadaires sur les mêmes périodes. Pour cela, nous avons intégré sur chacune de ces périodes les indicateurs hebdomadaires et nous les avons comparés aux indicateurs moyens. La Figure 65 présente pour la population A les résultats obtenus.

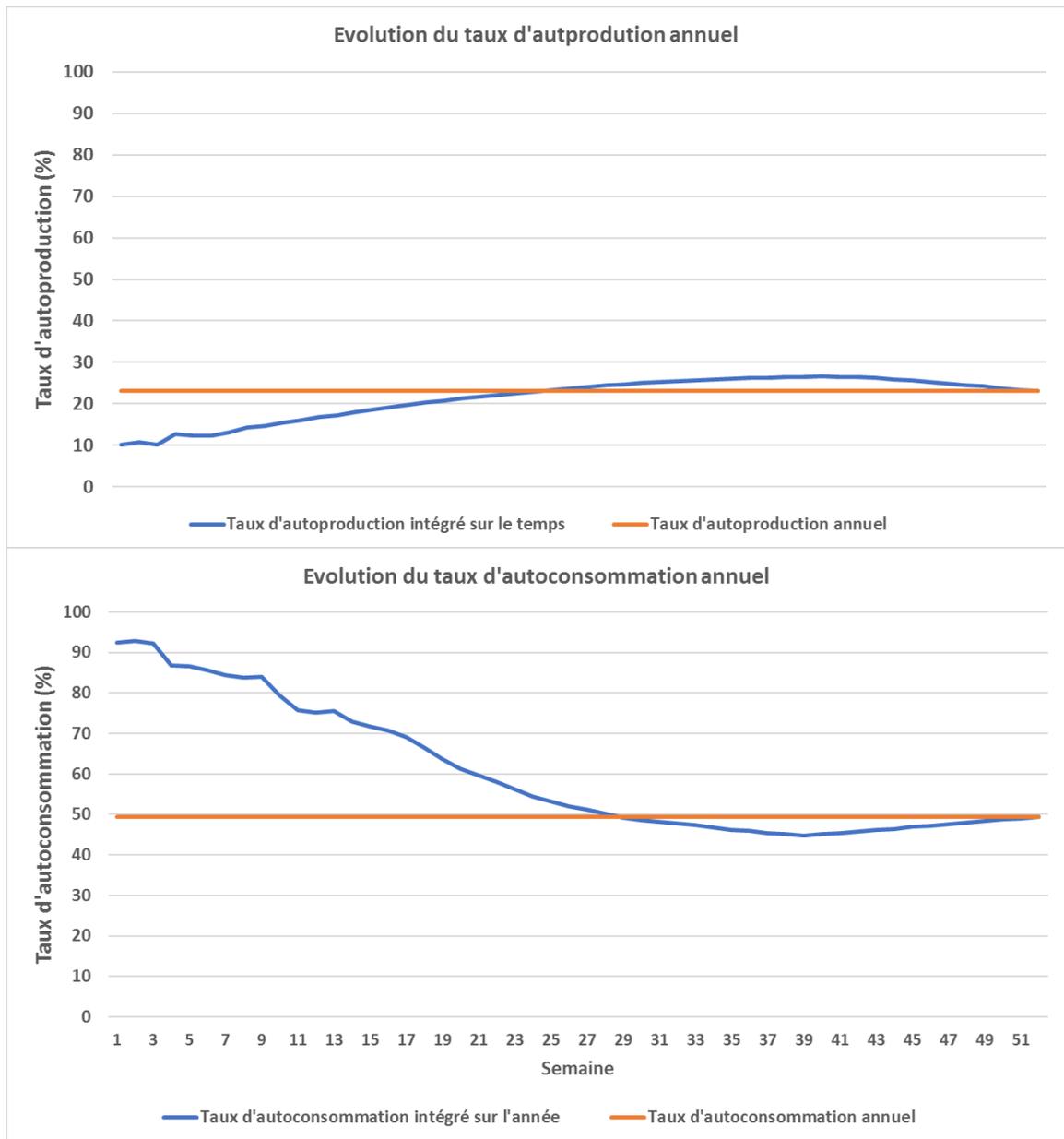


Figure 65 : Valeur intégrée et moyenne annuelle des taux d'autoproduction et d'autoconsommation d'énergie pour la population A

Tout d'abord, la Figure 65 permet de vérifier la cohérence des résultats pour ces deux indicateurs. En effet, pour le taux d'autoproduction, par exemple, sa valeur intégrée sur le temps passe au-dessus de la valeur moyenne annuelle pour la semaine 24. Cette période correspond à l'été où les panneaux PV produisent plus d'énergie et où les foyers ont la consommation d'énergie la plus faible. À l'inverse, à partir de la semaine 40, le taux d'autoproduction commence à diminuer pour tendre vers sa valeur moyenne annuelle. Les mêmes observations peuvent être faites pour le taux d'autoconsommation. À partir de la semaine 29, la valeur intégrée de ce taux devient inférieure à la valeur moyenne annuelle. Cette période est caractérisée par une forte production d'énergie et une faible consommation, ce qui explique un taux d'autoconsommation faible. À l'inverse à partir

de la semaine 39 ce taux augmente. En effet, la période hivernale qui débute implique une faible production associée à une forte consommation d'énergie.

Nous pouvons faire les mêmes constatations pour la population B (Figure 66).

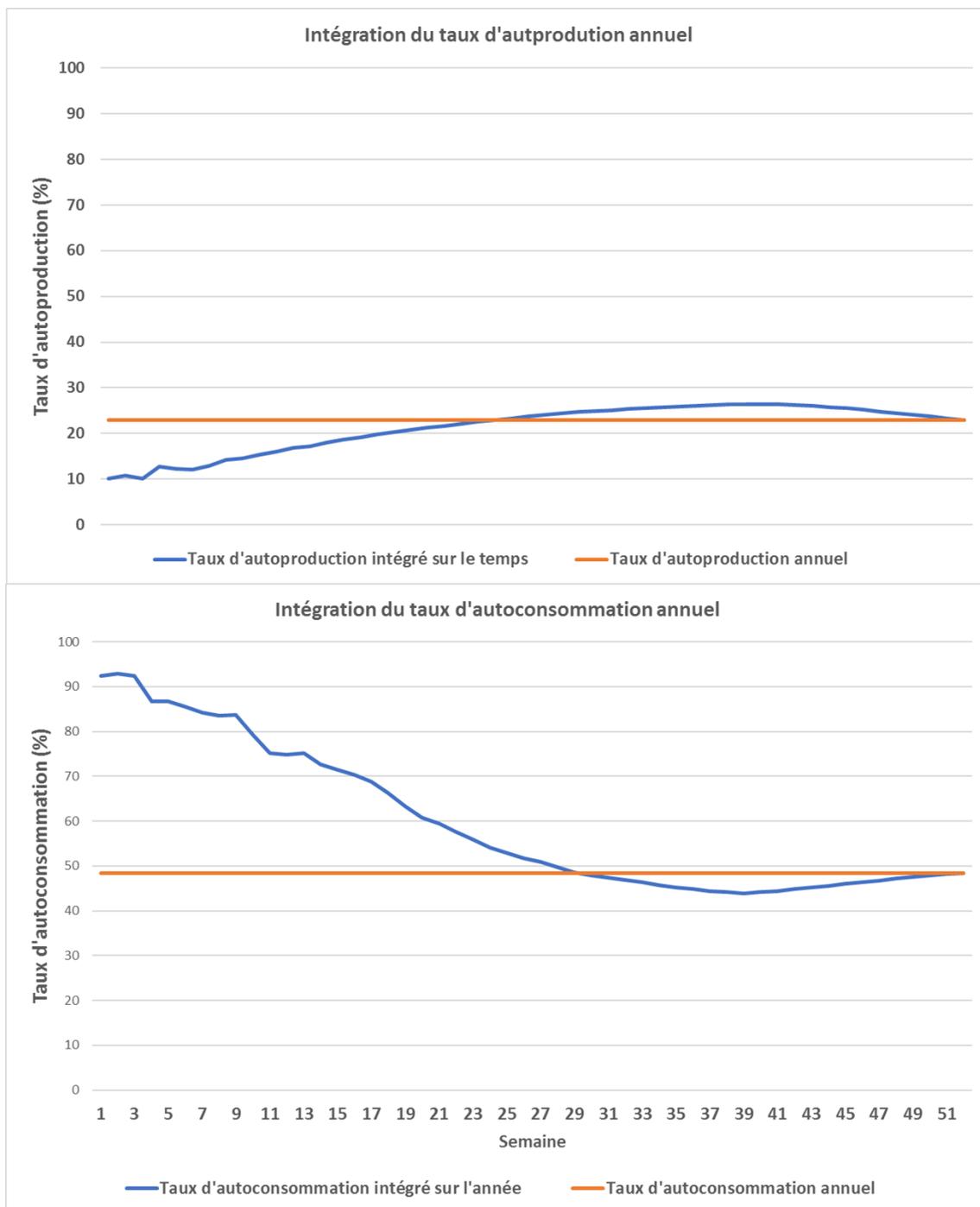


Figure 66 Valeur intégrée et moyenne annuelle des taux d'autoproduction et d'autoconsommation d'énergie pour la population B

L'analyse des valeurs saisonnières des indicateurs sont également, non seulement, cohérentes mais, de plus, très proches pour les populations A et B.

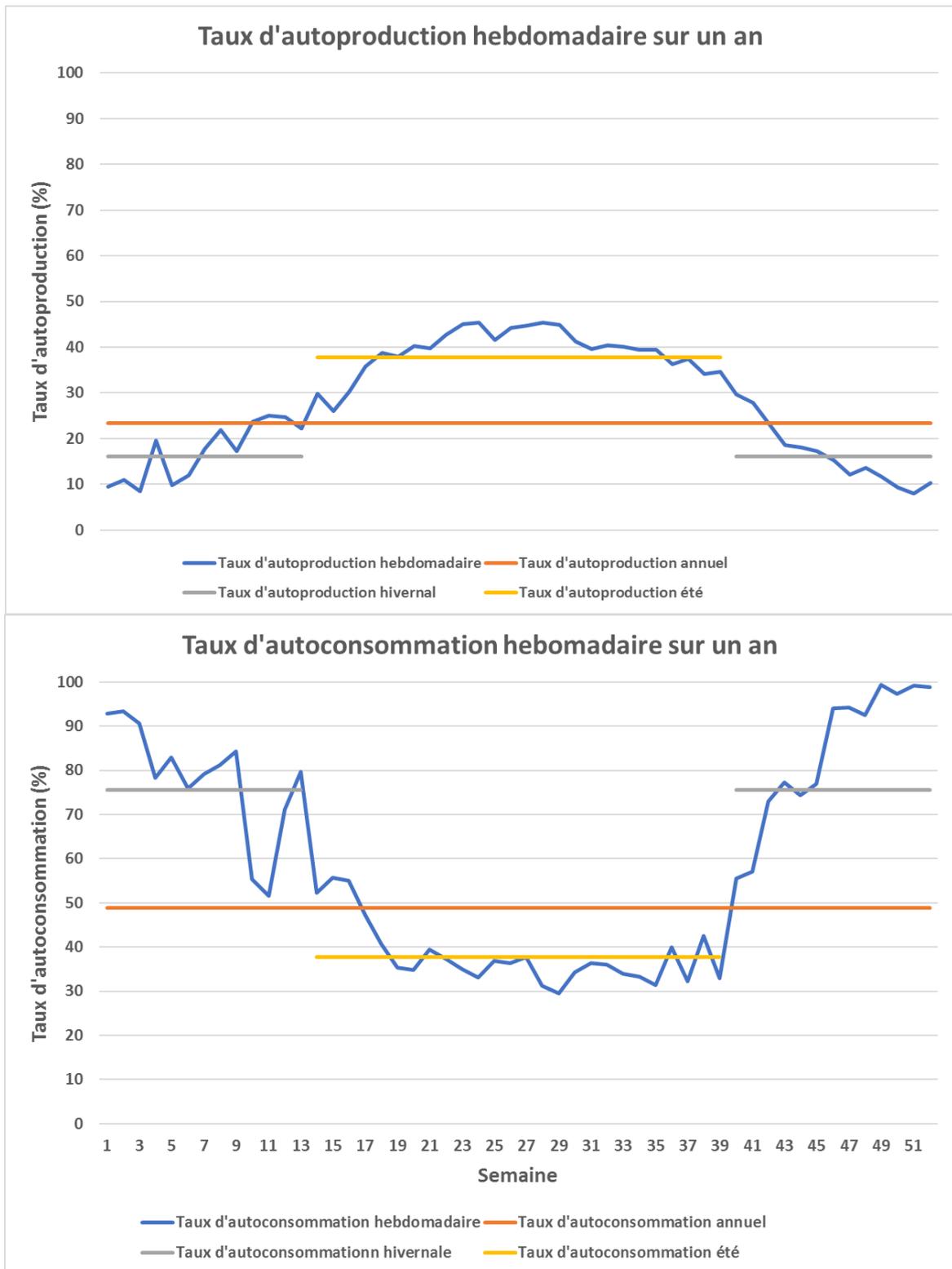
Ainsi, nous observons qu'en été, les valeurs des taux d'autoconsommation sont faibles et que les taux d'autoproduction sont relativement élevés. Cependant, en hiver, les taux d'autoconsommation augmentent et les taux d'autoproduction diminuent, car la consommation des foyers est largement supérieure à la production d'énergie.

Ainsi, pour une population identique et la même configuration d'ACC, le modèle renvoie, pour les deux indicateurs sélectionnés, des résultats très similaires. Les quelques différences visibles peuvent être expliquées par la variabilité de l'activité humaine simulée par la plateforme SMACH.

#### *Analyse pour deux populations générées avec les mêmes paramètres*

Afin de valider la seconde hypothèse, nous avons généré une population de 100 foyers dite population C avec exactement les mêmes paramètres que ceux utilisés pour la population A.

La Figure 67 montre, pour la population C, les valeurs hebdomadaires, moyennes annuelles et saisonnières des deux indicateurs considérés.



Par ailleurs, le Tableau 4 donne les valeurs moyennes annuelles et saisonnières des deux indicateurs pour les populations A et C.

	Annuel	Hiver	Été
Taux d'autoproduction	23%	16%	38%
Taux d'autoconsommation	49%	76%	39%

*Tableau 4 : Valeur des taux d'autoproduction et d'autoconsommation d'énergie annuels et saisonniers pour la population C*

Encore une fois, nous constatons que les valeurs du Tableau 4 sont très proches puisque l'écart ne dépasse pas 3 points de pourcentages.

Quant à la comparaison pour les valeurs hebdomadaires des indicateurs, les valeurs obtenues pour les distances de Fréchet sont :

- Distance de Fréchet pour les taux d'autoproduction : 0,0305 ;
- Distance de Fréchet pour les taux d'autoconsommation : 0,0622.

Une fois encore, les valeurs des distances sont très proches de zéro. Ceci permet de conclure que, à l'échelle de la semaine et pour deux populations générées avec les mêmes paramètres, les résultats obtenus en termes d'indicateurs de l'ACC sont très proches.

Il est à noter que l'examen des valeurs intégrées des indicateurs a amené à des conclusions identiques à celles obtenues avec les populations A et B. Ainsi, cette étude paramétrique a permis de tirer deux conclusions importantes :

1. Les valeurs hebdomadaires, saisonnières et annuelles des indicateurs de l'ACC à savoir le taux d'autoproduction et d'autoconsommation d'énergie sont cohérentes ;
2. De plus et pour deux populations identiques ou générées avec les mêmes paramètres, les valeurs des indicateurs de l'ACC sont très proches pour les trois échelles temporelles examinées c'est à dire l'année, les saisons hiver et été et la semaine. Ainsi, par la suite, nous ne nous appuierons que sur une seule simulation annuelle pour chaque configuration d'ACC étudiée.

Ainsi, à partir de la situation de référence que nous avons présentée dans cette section, nous allons réaliser différentes simulations afin de répondre aux questions précédemment identifiées par les experts du domaine de l'énergie. Pour rappel, nous considérons quatre axes d'étude, possédant une configuration spécifique. Pour le premier axe, nous ajoutons des panneaux PV individuels, puis nous étudions le groupement sans systèmes de stockage d'énergie, avec des systèmes de stockage individuels et avec un système de stockage collectif. Pour le second axe d'étude, nous considérons un quartier performant équipé de panneaux PV collectifs. Concernant le troisième axe d'étude, nous ajoutons des panneaux PV individuels et étudions l'impact sur les indicateurs d'une politique de décision sur le pilotage des appareils électriques. Enfin, pour le dernier axe,

nous étudions l'impact des échanges d'énergie entre des groupements sur les indicateurs de l'ACC.

## 6.3. ACC dans les groupements : impact sur la consommation d'énergie et le budget d'une population représentative

L'objectif de cette simulation est de comprendre l'impact que va avoir l'ACI et l'ACC sur la consommation d'énergie et le budget d'un groupement donné. Pour ce faire, nous modélisons l'ACI et l'ACC en équipant 50 foyers du groupement de panneaux PV individuels. La puissance de chaque panneau PV installé est de 3,6 kWc. Nous avons choisi d'équiper 50 foyers du groupement, car d'après (Luthander et al., 2015) un foyer ne consomme qu'entre 30% et 40% de sa production d'énergie. Un surplus d'énergie pourra donc être échangé entre les foyers au sein du groupement.

### 6.3.1. Impact de l'ACI et de l'ACC en fonction de l'organisation des échanges du groupement

Avec cette étude, nous souhaitons évaluer la manière dont la mise en place de l'ACC va impacter les indicateurs au sein du groupement. Durant l'année simulée, les différents moyens de production du groupement ont produit **207 MWh** et les foyers du groupement ont consommé **438 MWh**.

	<i>Taux d'autoproduction</i>	<i>Taux d'autoconsommation</i>
<i>ACI</i>	10%	21%
<i>Organisation proportionnelle des échanges</i>	23%	48%
<i>Organisation des échanges à taux fixe</i>	23%	48%
<i>Organisation concurrentielle des échanges</i>	23%	48%

*Tableau 5 : Valeur annuelle des taux d'autoproduction et d'autoconsommation d'énergie du groupement pour l'ACI et les trois organisations d'échange*

Le Tableau 5 donne les valeurs annuelles des taux d'autoconsommation et d'autoproduction pour un groupement sans échanges d'énergie (ACI) et pour chaque organisation des échanges que nous avons implémentée. Les résultats permettent d'identifier clairement l'impact des échanges d'énergie au niveau du groupement. Leur mise en place, quelle que soit l'organisation choisie, augmente fortement les taux d'autoproduction et d'autoconsommation d'énergie. L'augmentation du taux d'autoconsommation signifie qu'une plus grande quantité d'énergie est autoconsommée au sein du groupement. L'augmentation du taux d'autoproduction montre que les foyers consomment moins d'énergie qui provient de leur fournisseur d'électricité. Le Tableau 5 met également en évidence qu'à l'échelle du groupement le type d'organisation des

échanges ne semble pas impacter les taux d’autoconsommation et d’autoproduction. En effet, les organisations des échanges que nous avons implémentées ont pour but d’allouer le maximum d’énergie possible entre les foyers du groupement. C’est pour cela que les valeurs de ces taux ne sont quasiment pas impactées à l’échelle du groupement.

### 6.3.2. Impact sur les taux d’autoproduction des foyers du groupement

Pour étudier plus précisément l’impact des organisations des échanges au sein du groupement, nous analysons les indicateurs de l’ACC au niveau des foyers. Ainsi, nous regardons le taux d’autoproduction des 50 foyers du groupement ne possédant pas de moyen de production d’énergie. Ces foyers reçoivent de l’énergie produite localement uniquement à partir des échanges. L’impact des organisations des échanges sur leur taux d’autoproduction est donc, a priori, plus important sur ces foyers. La Figure 68 présente la distribution des taux d’autoproduction annuels pour les 50 foyers sans panneaux PV.

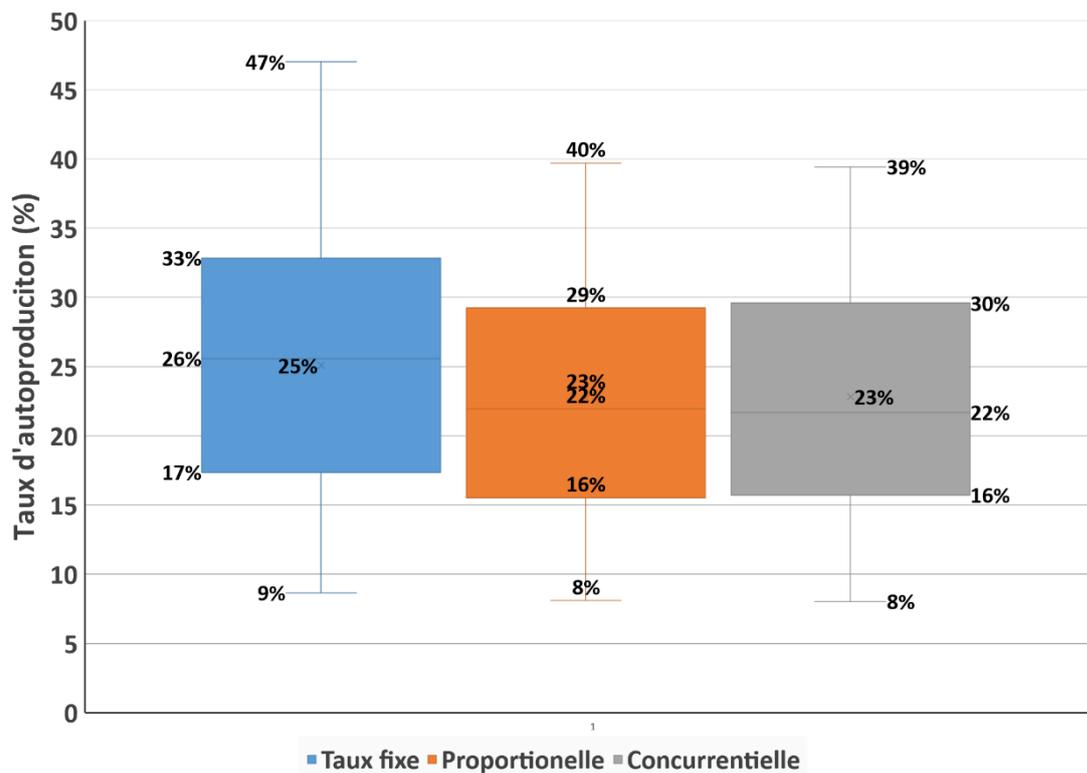


Figure 68 : Distribution des taux d'autoproduction annuels des foyers sans panneaux PV pour les trois organisations d'échange

On constate que le taux d’autoproduction moyen dans le cadre d’une organisation des échanges à taux fixe est légèrement plus élevé (**26%**) qu’avec les deux autres organisations des échanges (**22%**). De la même manière, le taux d’autoconsommation maximum pour un foyer est de **47%** avec une organisation des échanges à taux fixe contre **40%** et **39%** pour les deux autres organisations. Cela signifie que pour la situation de

référence, une organisation des échanges à taux fixe permet aux foyers d'obtenir plus d'énergie provenant des échanges. Cependant, l'écart entre le taux d'autoproduction minimum et le taux d'autoproduction maximum est plus élevé avec une organisation des échanges à taux fixe (**38 %**) qu'avec une organisation proportionnelle ou concurrentielle (respectivement **32 et 31 %**). Ceci indique que l'organisation des échanges à taux fixe augmente les écarts entre le taux d'autoproduction des foyers du groupement. Les organisations proportionnelles et concurrentielles résultent en des résultats très proches car lorsque deux foyers proposent d'acheter ou de vendre l'énergie au même prix, alors l'organisation répartit l'énergie entre ses deux foyers proportionnellement à leurs besoins. Les mêmes différences entre les organisations des échanges peuvent être observées lorsqu'on regarde sur l'hiver et l'été.

Les Figures 69 à 71 présentent la distribution des taux d'autoproduction hebdomadaires pour tous les foyers du groupement.

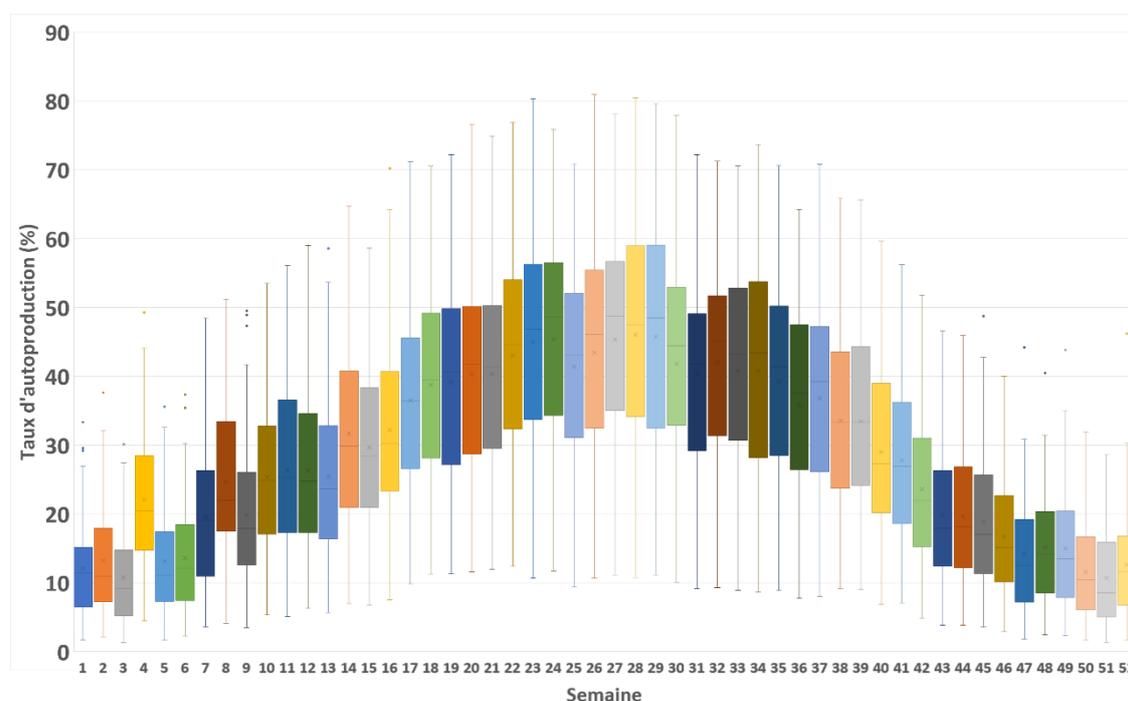


Figure 69 : Distribution des taux d'autoproduction hebdomadaires des foyers pour une organisation proportionnelle des échanges

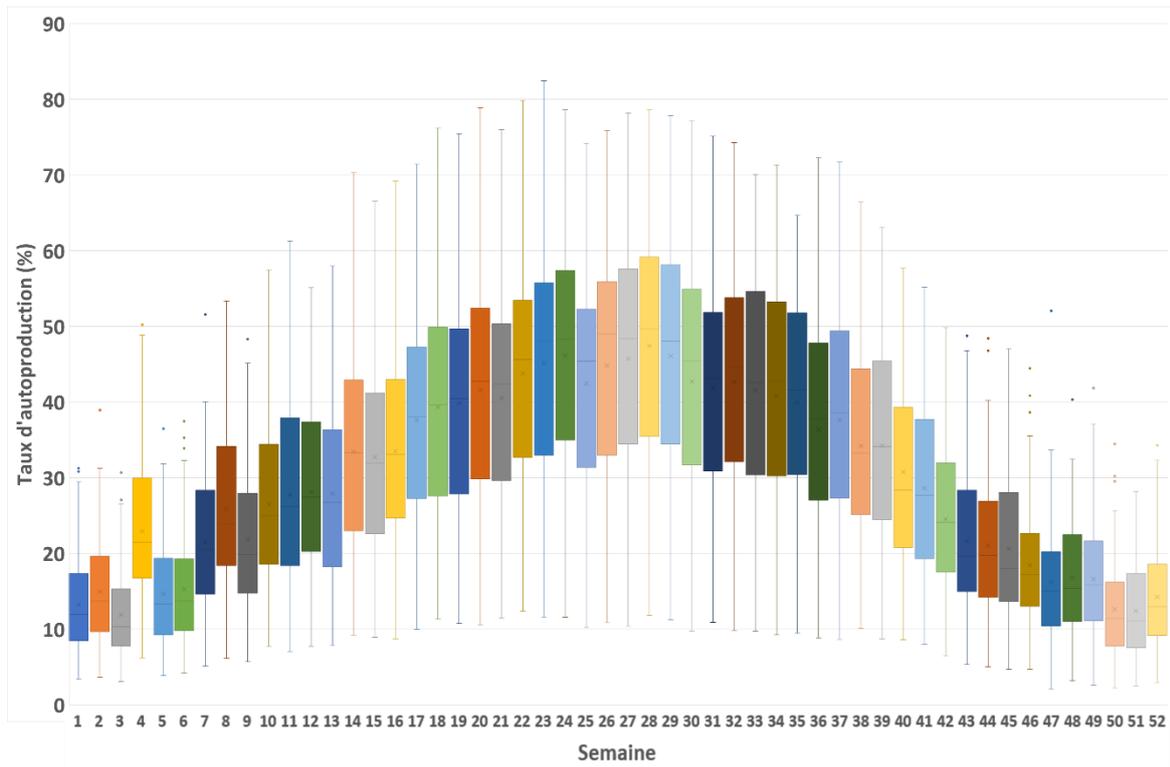


Figure 70 : Distribution des taux d'autoproduction hebdomadaires des foyers pour une organisation des échanges à taux fixe

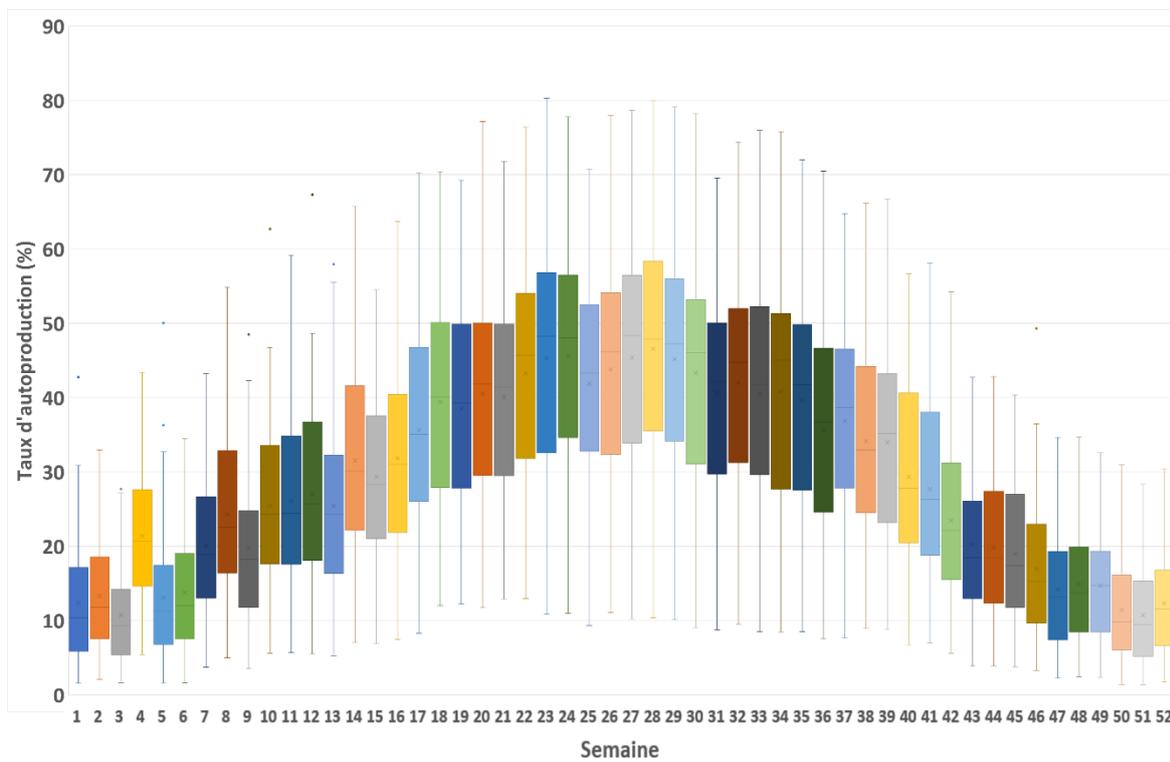


Figure 71 : Distribution des taux d'autoproduction hebdomadaires des foyers pour une organisation concurrentielle des échanges

Sur les Figures 69 à 71, il apparaît que le taux d'autoproduction saisonnier est relativement faible en hiver, car la production d'énergie est très largement inférieure à la consommation d'énergie. Au contraire, ces derniers sont élevés l'été, car la production d'énergie est importante et la consommation des foyers plus faible. Sur la période hivernale, c'est-à-dire du mois d'octobre au mois de mars, le taux d'autoproduction moyen des foyers du groupement est de **18%** pour une organisation des échanges proportionnelle. En été, c'est-à-dire du mois d'avril au mois de septembre, pour une même organisation des échanges, le taux d'autoproduction moyen des foyers du groupement est de **39%**. On observe également que les écarts types entre les taux d'autoproduction sont plus importants en été par rapport à l'hiver. Sur les Figures 69 à 71, on remarque également que pour la semaine 4 les taux d'autoproduction individuels sont plus élevés par rapport aux autres semaines de la même période. En effet, cette semaine est caractérisée par un fort ensoleillement ce qui conduit à une hausse de la production d'énergie par les panneaux PV et donc une augmentation du taux d'autoproduction.

Les Figures 72 à 74 présentent les graphes de Bland-Altman des différences entre les taux d'autoproduction hebdomadaires pour deux des organisations des échanges.

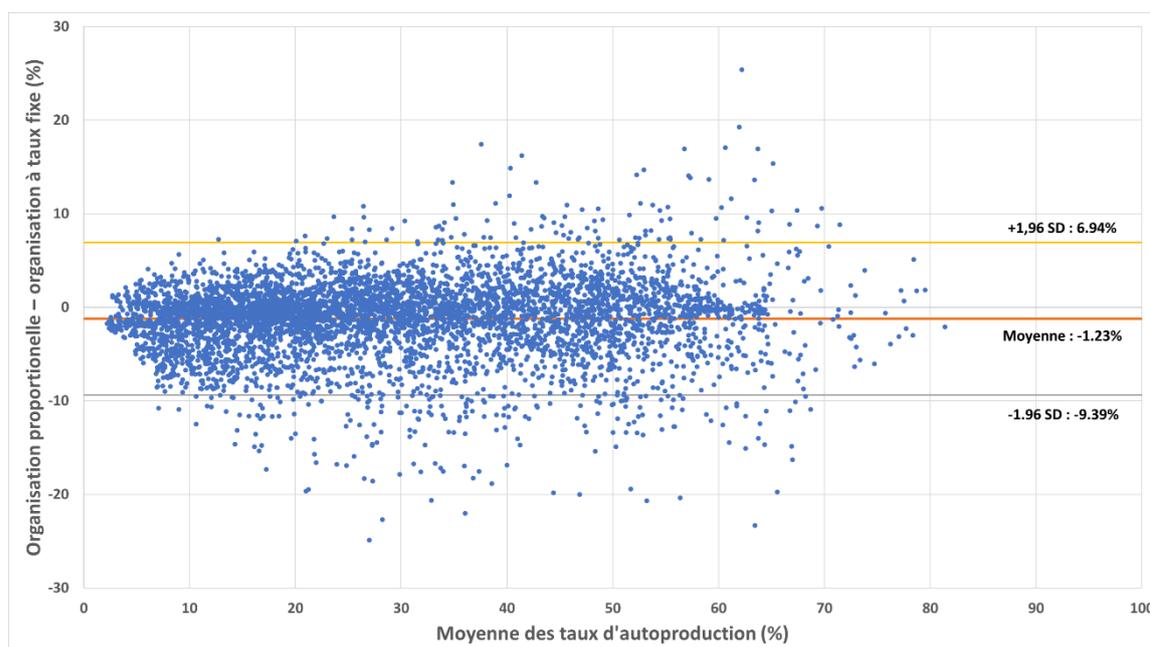


Figure 72 : Comparaison entre les taux d'autoproduction hebdomadaires pour les organisations proportionnelle et à taux fixe des échanges

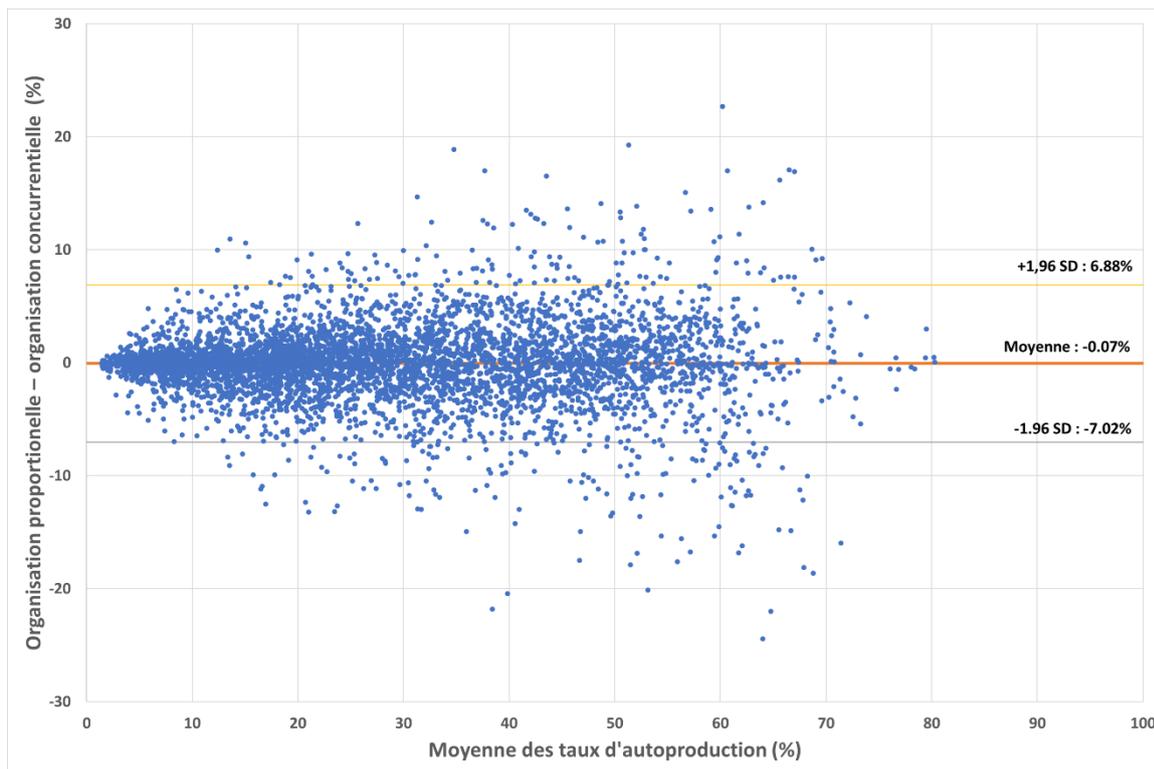


Figure 73 : Comparaison entre les taux d'autoproduction hebdomadaires pour les organisations proportionnelle et concurrentielle des échanges



Figure 74 : Comparaison entre les taux d'autoproduction hebdomadaires pour les organisations concurrentielle et à taux fixe des échanges

L'analyse des Figures 72 à 74 montre que, d'une organisation des échanges à une autre, les taux hebdomadaires d'autoproduction d'un foyer donné peuvent être très différents

avec des écarts pouvant atteindre 20 %. Cependant, en moyenne, nous n’observons pas de différences importantes entre les organisations des échanges. En effet, les moyennes des différences des taux d’autoconsommation restent très faibles.

### 6.3.3. Impact sur les taux d’autoconsommation des foyers du groupement

Concernant les taux d’autoconsommation individuels des foyers producteurs, les résultats permettent d’observer que le passage de l’ACI à l’ACC ne modifie pas le taux d’autoconsommation de ces foyers. En effet, l’ajout des échanges d’énergie n’autorise pas à ces foyers de consommer une plus grande part de leur production. De plus, les résultats montrent que, quelle que soit l’organisation des échanges considérée, les taux d’autoconsommation annuels sont très similaires comme le montre la Figure 75.

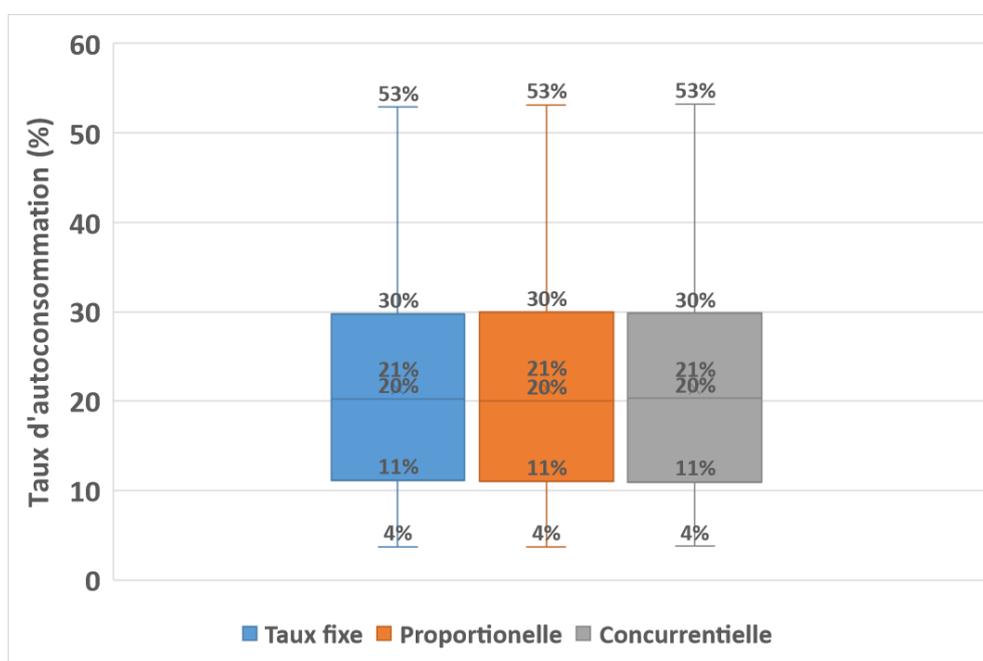


Figure 75 : Distribution des taux d’autoconsommation annuels des foyers avec panneaux PV pour les trois organisations des échanges

Cette très faible différence d’une organisation des échanges à une autre est quantifiée par les valeurs portées dans le Tableau 6.

	Organisation proportionnelle - organisation à taux fixe	Organisation proportionnelle - organisation concurrentielle	Organisation à taux fixe – organisation concurrentielle
Différence des moyennes	+0,09%	+0,03%	-0,07%

Tableau 6 : Différence des moyennes entre les taux d’autoconsommation annuels en fonction des organisations des échanges

Cependant, nos résultats permettent d'observer l'impact des saisons sur le taux d'autoconsommation. En effet, d'après la Figure 76, il apparaît clairement qu'en hiver les taux d'autoconsommation sont bien plus élevés qu'en été. Durant l'hiver, certains foyers peuvent consommer **95%** de leur production car une forte consommation associée à une faible production d'énergie permet d'obtenir des taux d'autoconsommation élevés. Sur la Figure 76, on constate que la semaine 4 est caractérisée par un taux d'autoconsommation plus faible. Cela est de nouveau dû au fort ensoleillement qui caractérise cette semaine et qui augmente la quantité d'énergie produite par les panneaux PV individuels. Cependant comme les foyers possédant des panneaux PV ne peuvent pas consommer directement cette énergie supplémentaire cela se traduit par une diminution de leur taux d'autoconsommation.

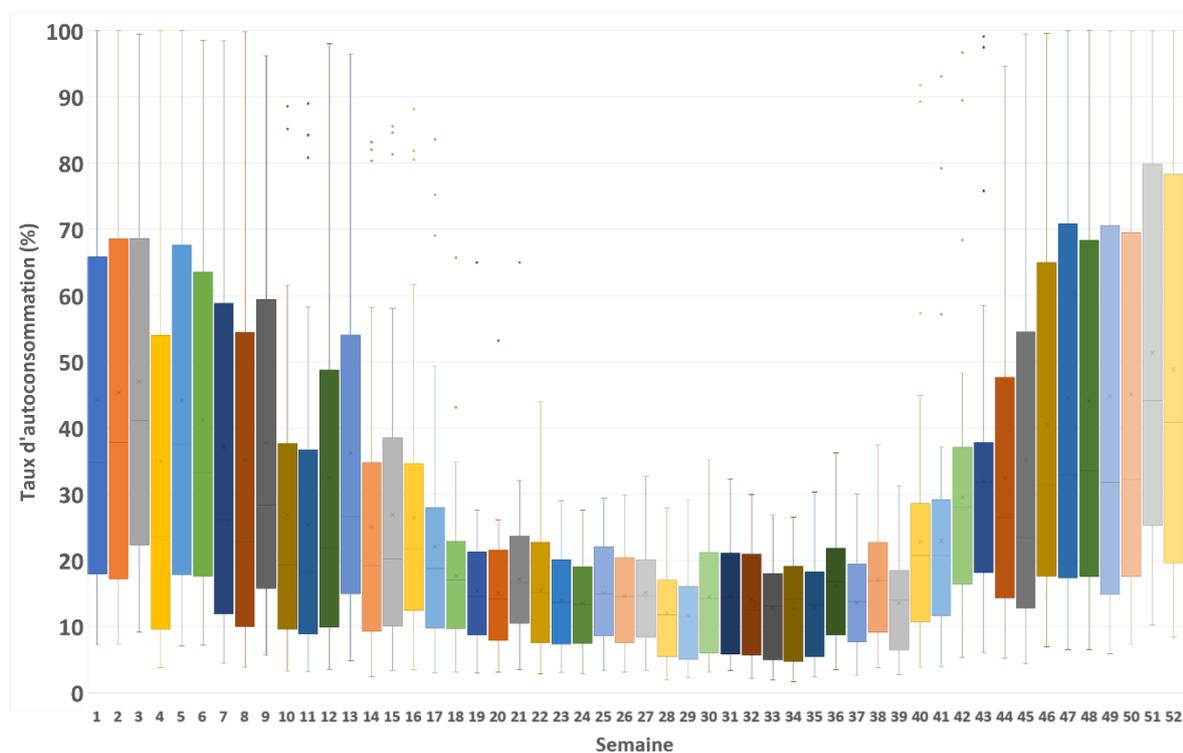


Figure 76 Distribution des taux d'autoconsommation hebdomadaires des foyers pour une organisation proportionnelle des échanges

### 6.3.4. Impact sur les factures d'énergie des foyers du groupement

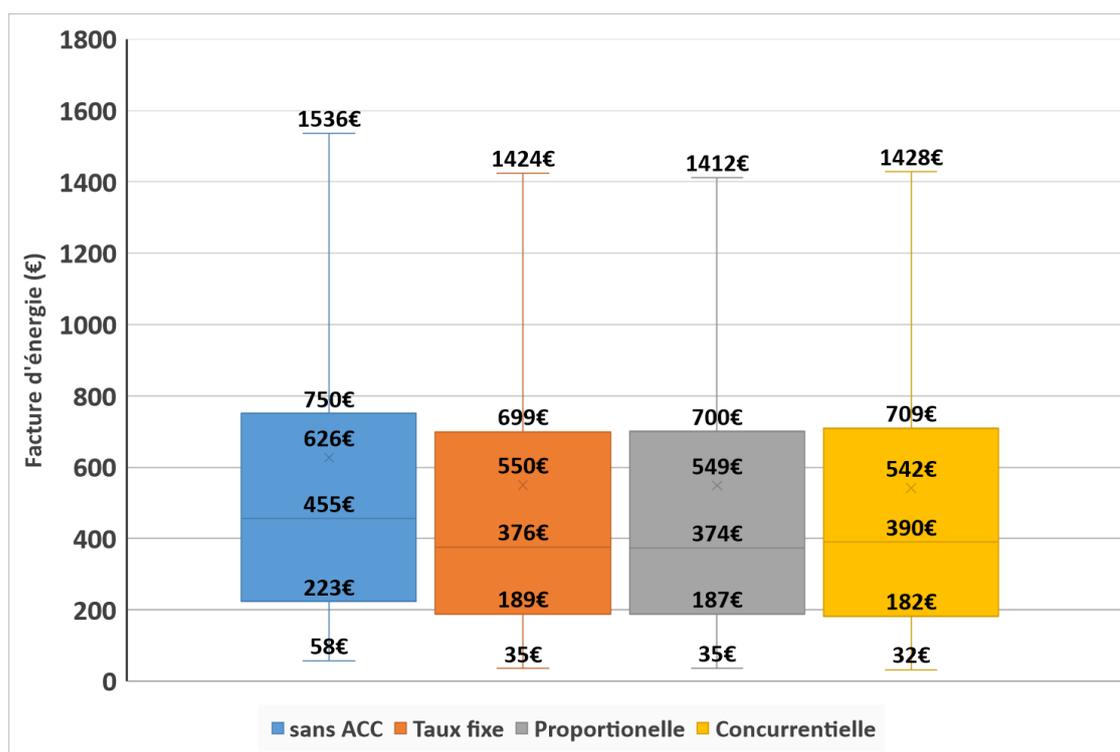


Figure 77 : Distribution des factures annuelles d'électricité des foyers sans pratique de l'ACC et pour les trois organisations des échanges

D'un point financier, la Figure 77 présente la distribution des factures annuelles d'électricité des foyers du groupement. On constate que le passage à l'ACC, quelle que soit l'organisation des échanges, permet de diminuer les factures d'énergie des foyers. Ainsi, la facture moyenne annuelle pour le groupement égale à **455 €** sans ACC prend une valeur comprise entre **376 €** et **390 €** en fonction de l'organisation des échanges. De plus, nous observons que, sur l'année, une organisation concurrentielle des échanges résulte en une facture d'énergie légèrement supérieure par rapport aux deux autres organisations des échanges. En effet, le prix moyen pour acheter de l'énergie avec une organisation concurrentielle des échanges est de **0,1280 €/kWh**, ce qui est légèrement supérieur au prix de l'énergie pour les deux autres organisations, à savoir **0,1250 €/kWh**. Si l'on regarde plus précisément les prix moyens annuels proposés par chaque foyer du groupement, la Figure 78 met en avant deux tendances. Les foyers ne possédant pas de panneaux PV proposent un prix d'achat moyen annuel identique plutôt faible et égal à **0,1219 €/kWh**. A contrario, les foyers possédant des panneaux PV ont tendance à proposer des prix élevés pour acheter de l'énergie. Ceci s'explique par le fait que lorsque ces foyers doivent acheter de l'énergie par manque de production individuelle, ils le font pendant des périodes où la production locale est faible. Ce sont des périodes où la

demande en énergie est forte et où les acheteurs proposent alors des prix élevés et différents pour tenter d'acheter le maximum d'énergie.

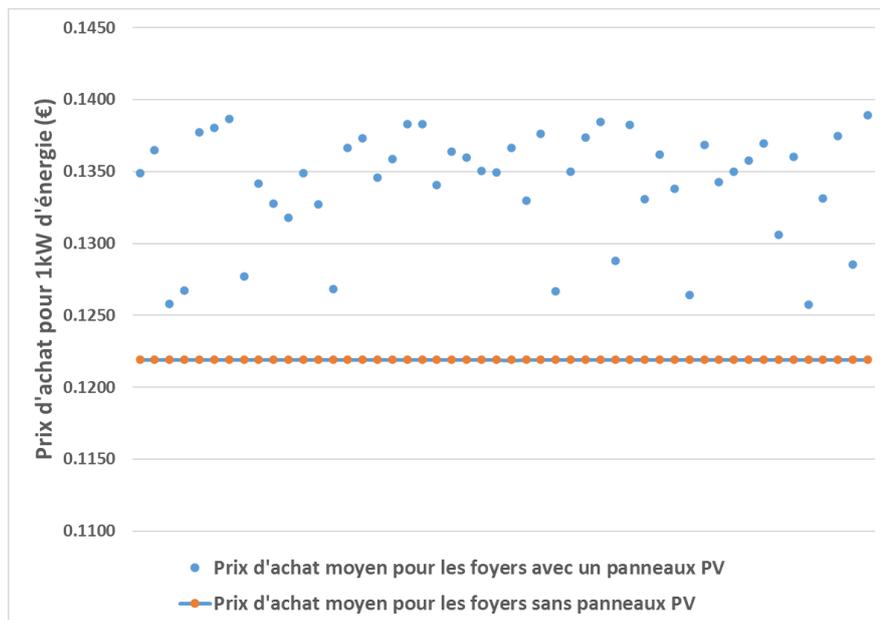


Figure 78 : Prix moyen annuel d'achat de l'énergie pour une organisation concurrentielle et pour les foyers avec et sans production d'énergie

Les Figures 79 et 80 présentent la distribution des factures hebdomadaires d'énergie sans ACC et pour une organisation proportionnelle des échanges.

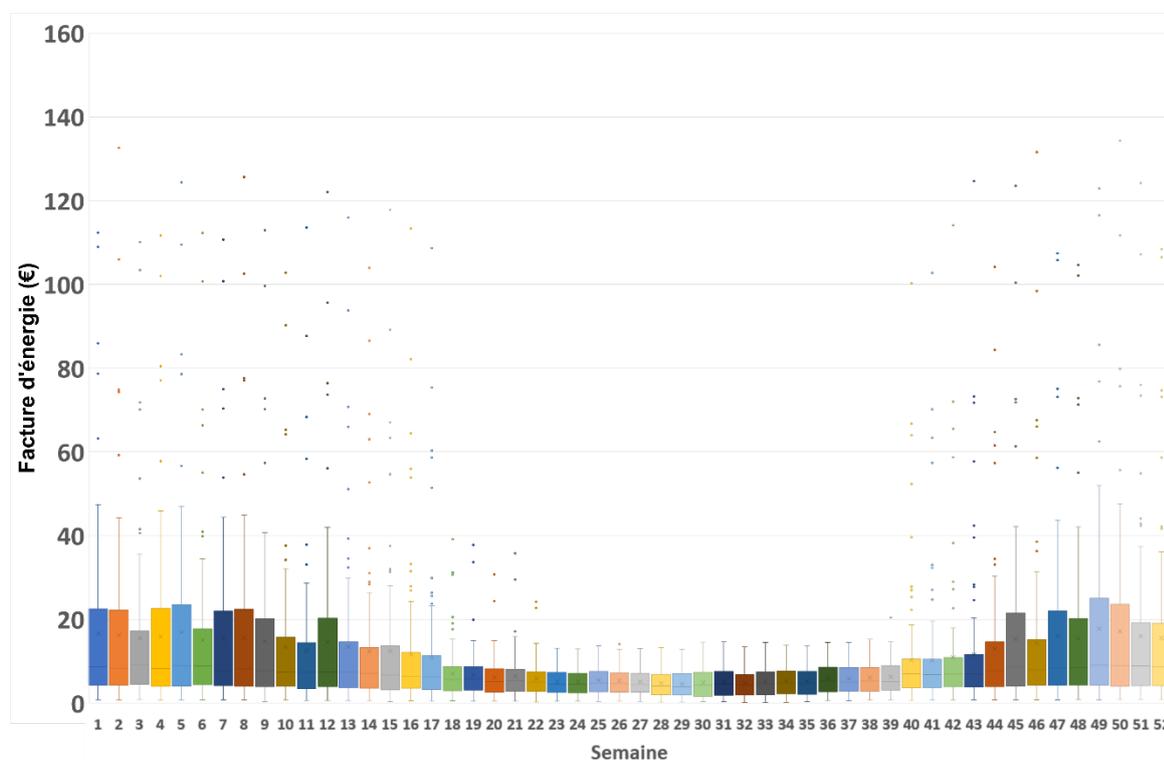
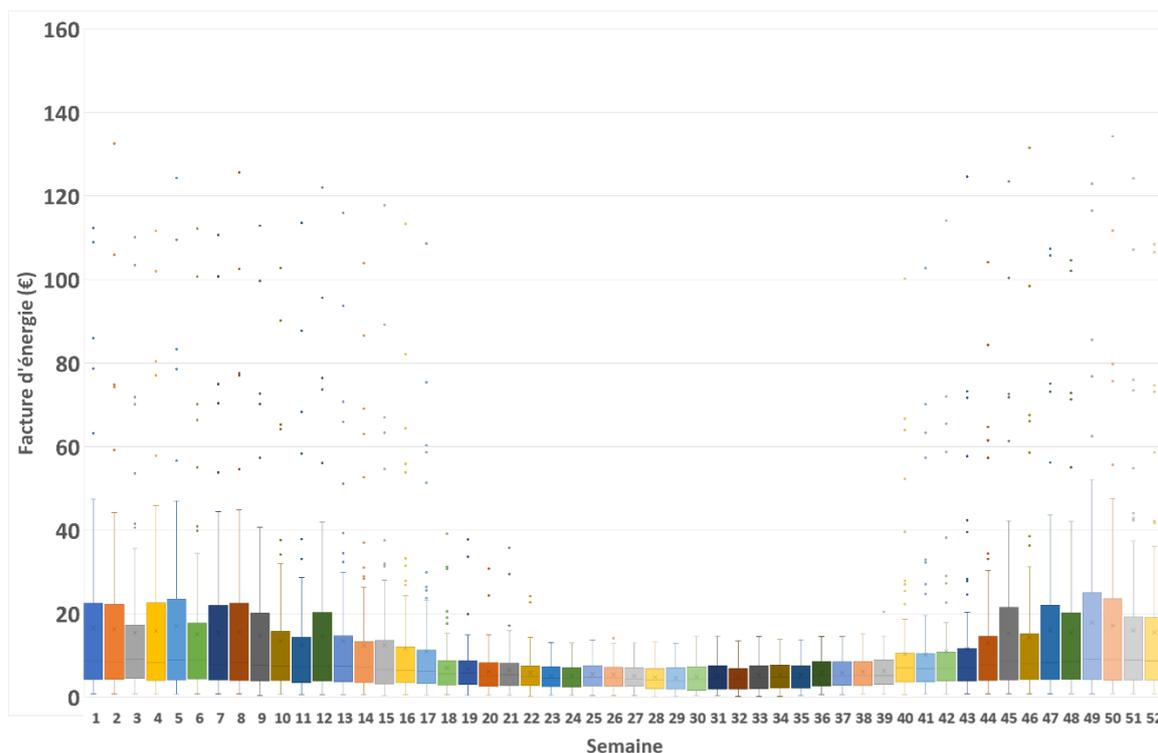


Figure 79 : Distribution des factures hebdomadaires d'énergie des foyers sans ACC



*Figure 80 : Distribution des factures hebdomadaires d'énergie des foyers pour une organisation proportionnelle des échanges*

La première constatation que l'on peut faire est que, pour chaque semaine de l'année, l'ajout des échanges d'énergie permet bien de diminuer globalement les factures d'énergie de chaque foyer du groupement. On observe également que les factures d'énergie des foyers subissent une baisse plus importante l'été que l'hiver. En effet, la facture moyenne des foyers l'été baisse d'environ **20%** tandis que pour l'hiver la facture moyenne ne diminue que de **16%**.

Les Figures 81 à 83 permettent de visualiser l'impact sur les factures hebdomadaires d'énergie des trois organisations des échanges et ceci comparativement au cas sans ACC.

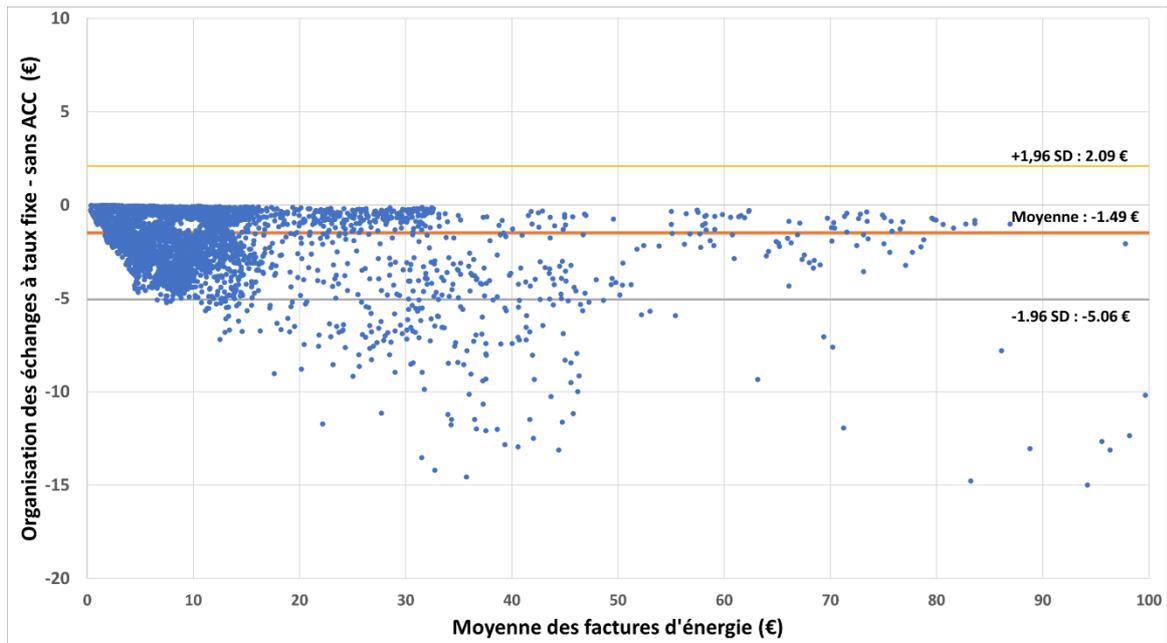


Figure 81 : Comparaison entre les factures hebdomadaires d'énergie sans ACC et avec une organisation des échanges à taux fixe

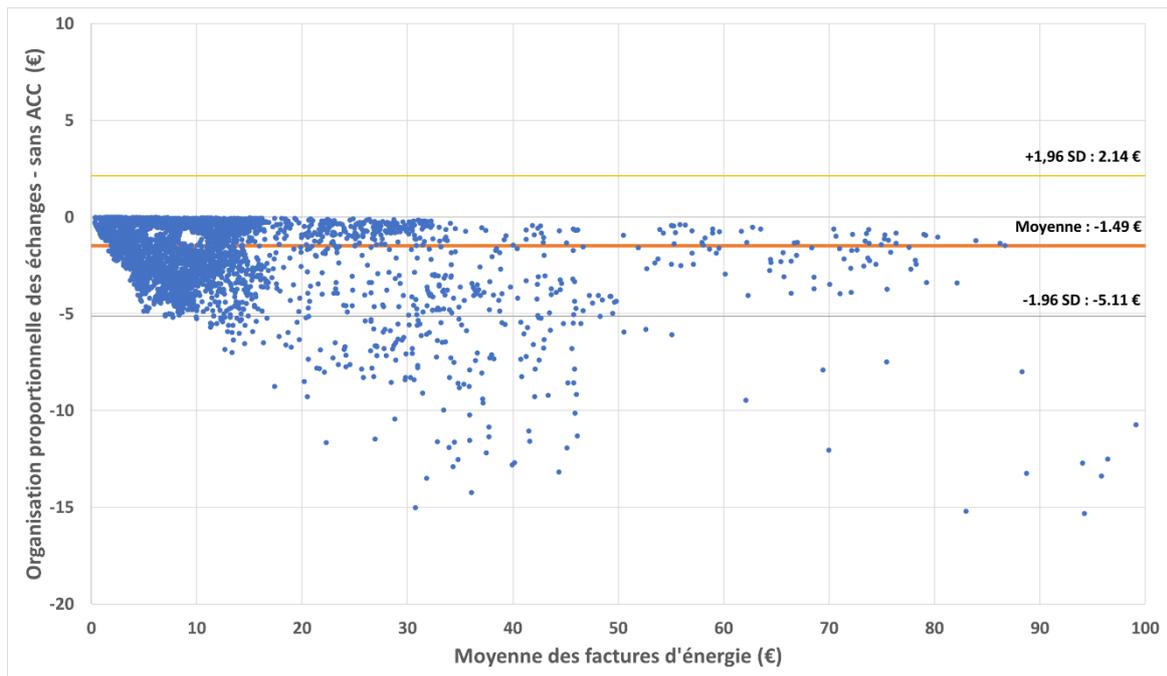


Figure 82 : Comparaison entre les factures hebdomadaires d'énergie sans ACC et avec une organisation proportionnelle des échanges

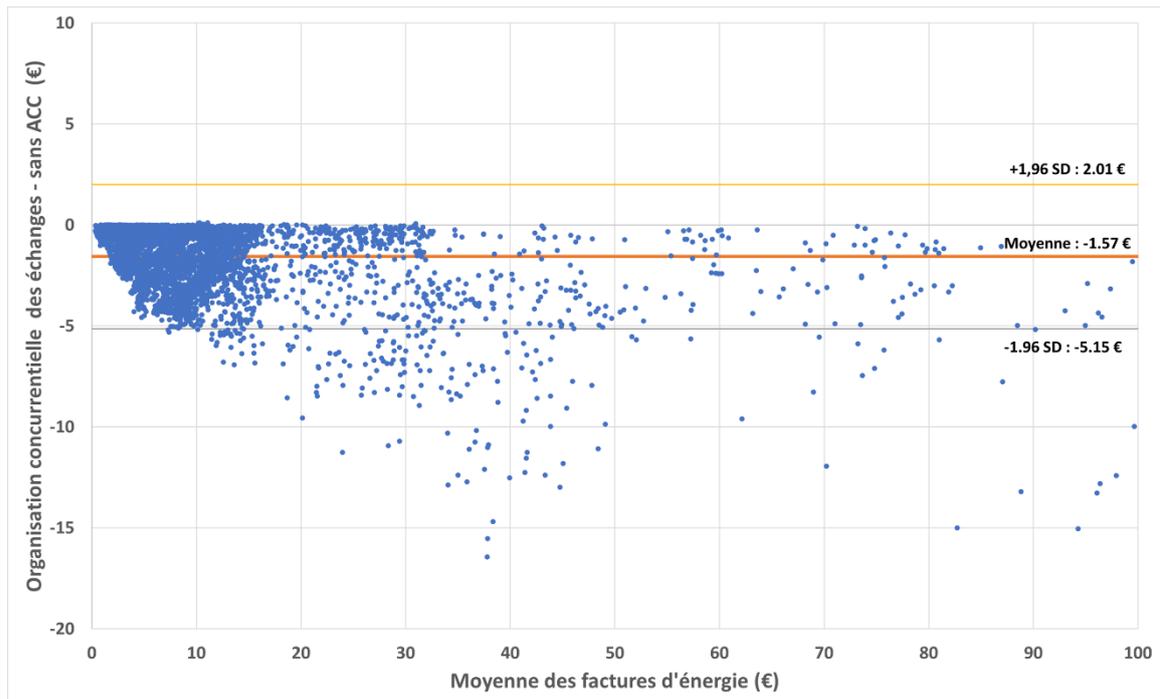


Figure 83 : Comparaison entre les factures hebdomadaires d'énergie sans ACC et avec une organisation concurrentielle des échanges

L'étude des Figures 81 à 83 montre que les moyennes des différences entre les factures sont très proches les unes des autres. Cela signifie que globalement pour l'année et à l'échelle du groupement l'organisation des échanges d'énergie n'impacte que très peu les factures des foyers. Pour les organisations proportionnelles et à taux fixe, la moyenne des différences entre les factures est identique, car le prix de l'énergie est le même pour ces deux organisations des échanges. De plus, pour une organisation concurrentielle des échanges, il apparaît une diminution relativement importante des factures hebdomadaires. Or, les résultats sur l'année, pour ce type d'organisation, montrent une facture moyenne plus élevée par rapport aux deux autres organisations des échanges. Cela signifie que même si, semaine par semaine, de nombreux foyers ont pu réduire leur facture, certains foyers du groupement à l'échelle de l'année ont des factures beaucoup plus élevées.

### 6.3.5. Impact sur les gains financiers des foyers du groupement

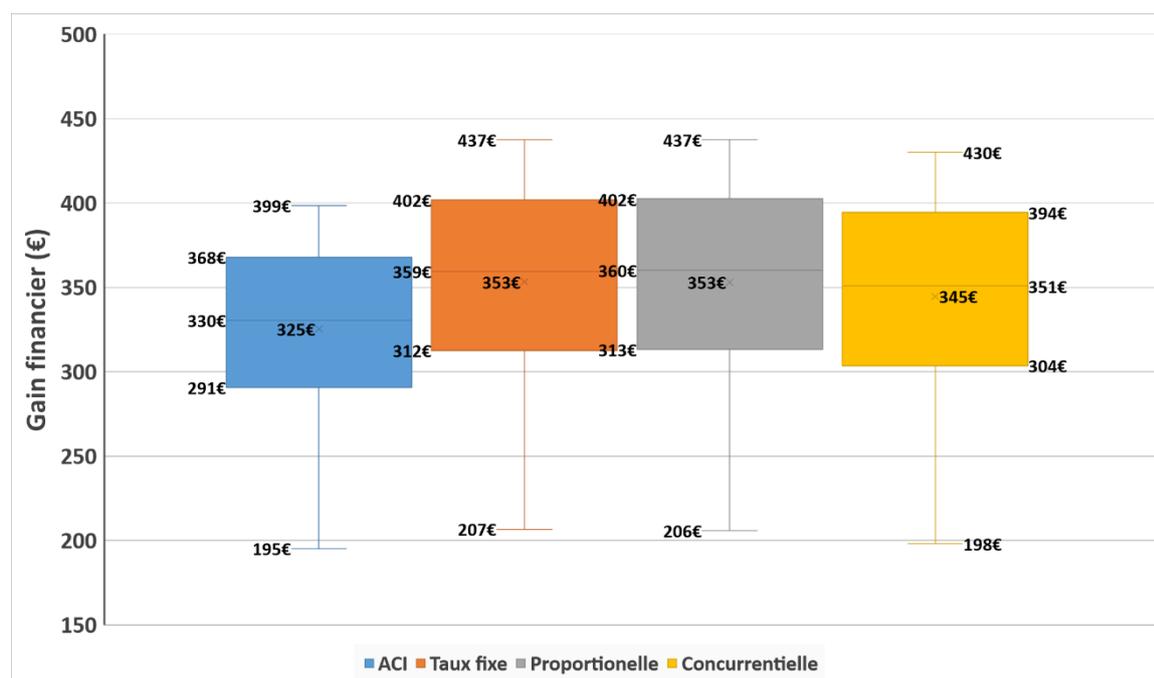


Figure 84 : Distribution des gains financiers annuels pour les foyers possédant des panneaux PV avec ACI et pour les trois organisations des échanges

La Figure 84 présente les bénéfices annuels réalisés par les foyers du groupement possédant un moyen de production d'énergie. On constate que les bénéfices annuels réalisés pour une organisation proportionnelle des échanges ou à taux fixe sont très proches car le prix de l'énergie est identique et fixe pour tout le groupement. Au contraire, le gain financier des foyers vendant de l'énergie est plus faible pour une organisation concurrentielle. Cela est la conséquence d'un prix d'achat de l'énergie en moyenne plus faible pour ce type d'organisation. En ce qui concerne les gains pour chaque saison, le gain financier moyen des foyers produisant de l'énergie est plus élevé en été qu'en hiver. Par exemple, dans le cadre d'une organisation proportionnelle des échanges, le gain moyen des foyers est de **104€** en hiver contre **260€** en été.

Les Figures 85 et 86 présentent la distribution hebdomadaire des gains financiers des foyers du groupement sans ACC et avec une organisation proportionnelle des échanges respectivement.

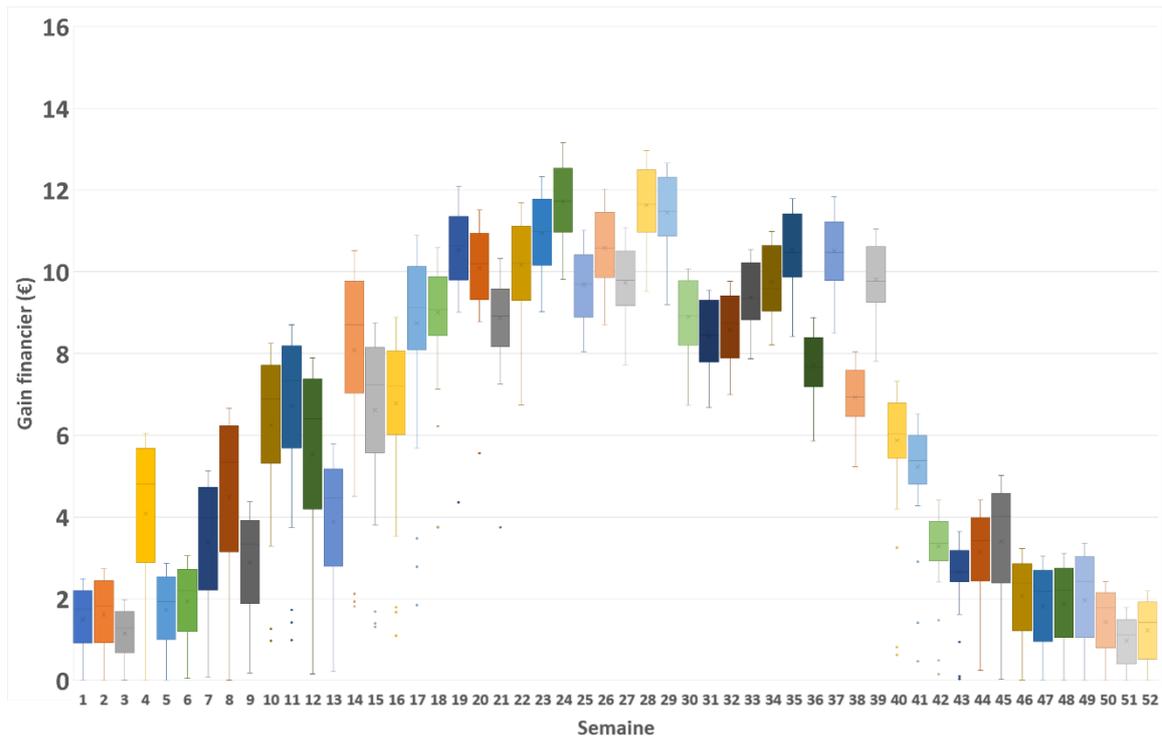


Figure 85 : Distribution hebdomadaire des gains financiers des foyers du groupement sans ACC

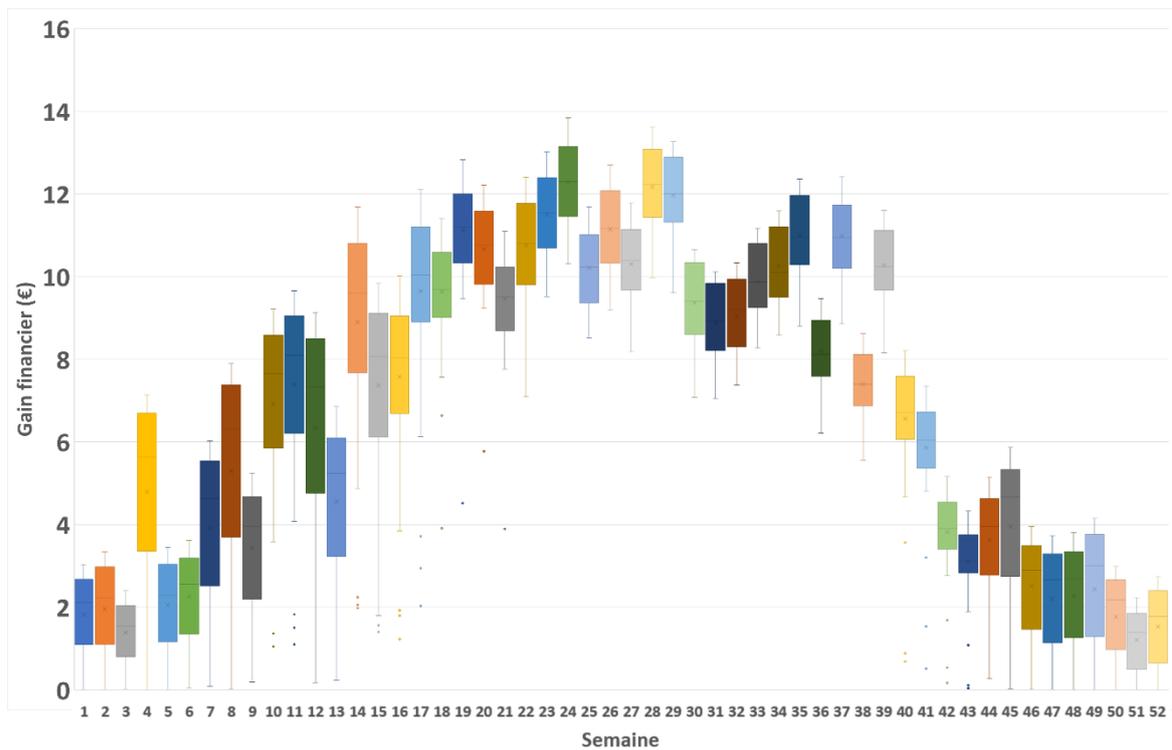


Figure 86 : Distribution hebdomadaire des gains financiers des foyers du groupement pour une organisation proportionnelle des échanges

On constate que l'introduction des échanges d'énergie permet d'augmenter les gains réalisés par les foyers du groupement. Ce résultat est quantifié sur la Figure 87 sur laquelle il apparaît clairement une augmentation des écarts avec l'amplitude des gains financiers.

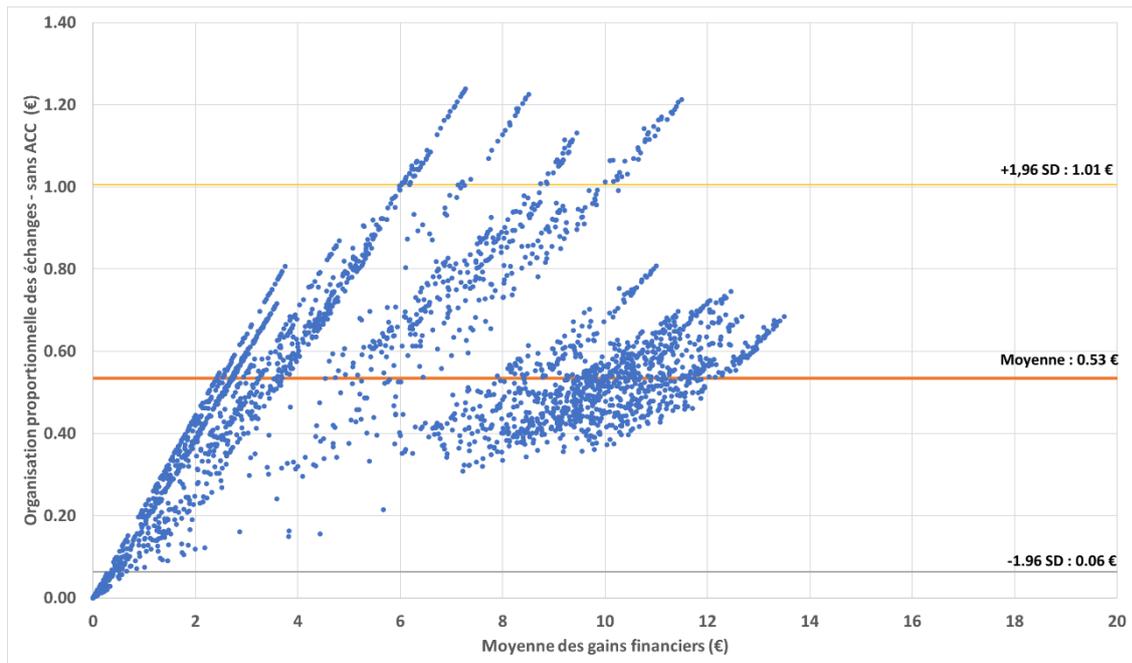


Figure 87 : Comparaison entre les gains financiers hebdomadaires sans ACC et avec une organisation proportionnelle des échanges

Dans le Tableau 7, nous avons porté les moyennes des écarts sans ACC et pour chaque organisation des échanges. Cela nous permet de voir une fois encore que les organisations des échanges proportionnelle et à taux fixe amènent à un gain moyen identique et plus élevé que dans le cadre d'une organisation concurrentielle des échanges.

	Organisation des échanges à taux fixe - sans ACC	Organisation proportionnelle des échanges - sans ACC	Organisation concurrentielle des échanges - sans ACC
Différence des moyennes	0,53 €	0,53 €	0,37 €

Tableau 7 : Différence des moyennes entre les gains financiers hebdomadaires sans ACC et pour chaque organisation des échanges

### 6.3.6. Synthèse

Les simulations réalisées ici ont clairement mis en évidence l'impact de l'ACC sur le groupement par rapport à l'ACI :

- Les échanges d'énergie entre les foyers permettent, à l'échelle du groupement, d'augmenter la quantité d'énergie autoconsommée et de diminuer la quantité d'énergie provenant ou renvoyée sur le réseau. Ainsi, dans le cadre de l'ACI i.e. sans échanges d'énergie, le groupement a un surplus d'énergie égal à **163 MWh** contre **107 MWh** dans une situation d'ACC ;

- Si l'on regarde les taux d'autoconsommation individuelle, les résultats montrent qu'il n'y a pas de différence notable entre l'ACI et l'ACC. Cela prouve que le passage de l'ACI à l'ACC ne résulte pas forcément en une autoconsommation individuelle plus élevée ;
- De plus, il a été observé des factures d'énergie et des gains financiers moins élevés avec une organisation concurrentielle des échanges par rapport aux deux autres organisations des échanges. Cela est dû à l'algorithme de construction des prix de l'énergie que nous avons implémenté dans le modèle.

## 6.4. ACC dans les groupements : impact d'un stockage d'énergie individuel pour une population représentative

L'objectif de ce cas d'étude est d'analyser l'impact d'un stockage d'énergie individuel dans le groupement. Pour ce faire, 50 foyers du groupement sont équipés des mêmes panneaux PV individuels que précédemment. Afin d'étudier l'impact du stockage individuel, nous avons également équipé ces foyers producteurs d'énergie d'une batterie individuelle. Il s'agit de batteries possédant une capacité de **14 kWh** et une puissance continue de **5000 W**. Ces caractéristiques sont celles d'une batterie résidentielle du commerce<sup>14</sup>. Pour rappel, l'ensemble des foyers équipés d'une batterie pratique une politique de décision liée au stockage individuel dite standard à savoir que la batterie est en mode de charge-décharge souple à tout instant.

### 6.4.1. Impact du stockage individuel à l'échelle du groupement

Dans un premier temps, nous regardons l'impact des batteries individuelles au niveau du groupement. Comme constaté précédemment (voir section 6.3.1), les organisations des échanges n'impactent que très peu les taux d'autoconsommation et d'autoproduction du groupement. C'est la raison pour laquelle nous ne présentons dans ce qui suit que les résultats obtenus avec une organisation des échanges et plus précisément l'organisation proportionnelle des échanges. Par contre, à l'échelle des foyers, nous considérons toujours les trois organisations des échanges en termes de taux d'autoproduction, des factures d'énergie et des gains financiers.

	Taux d'autoproduction	Taux d'autoconsommation
ACC sans batterie	23%	48%
ACC avec batterie individuelle	34%	70%

Tableau 8 : Taux d'autoproduction et d'autoconsommation annuels du groupement avec et sans système de stockage individuel d'énergie

L'analyse des valeurs portées dans le Tableau 8 montre que l'ajout d'un système de stockage individuel permet d'augmenter sensiblement les taux d'autoproduction et d'autoconsommation du groupement. En effet, l'ajout d'une batterie individuelle a pour résultat, au niveau du foyer, de consommer une plus grande part de l'énergie produite localement et donc de diminuer la consommation d'électricité provenant du réseau. La Figure 88 illustre ces résultats. Ainsi, l'utilisation de batteries individuelles, diminue la part

<sup>14</sup>

[https://www.tesla.com/sites/default/files/pdfs/powerwall/Powerwall%20AC Datasheet en northamerica.pdf](https://www.tesla.com/sites/default/files/pdfs/powerwall/Powerwall%20AC%20Datasheet%20en%20fran%20caise.pdf)

de l'énergie provenant du réseau de 10 % à savoir **77%** sans batteries et **67%** avec batteries respectivement.

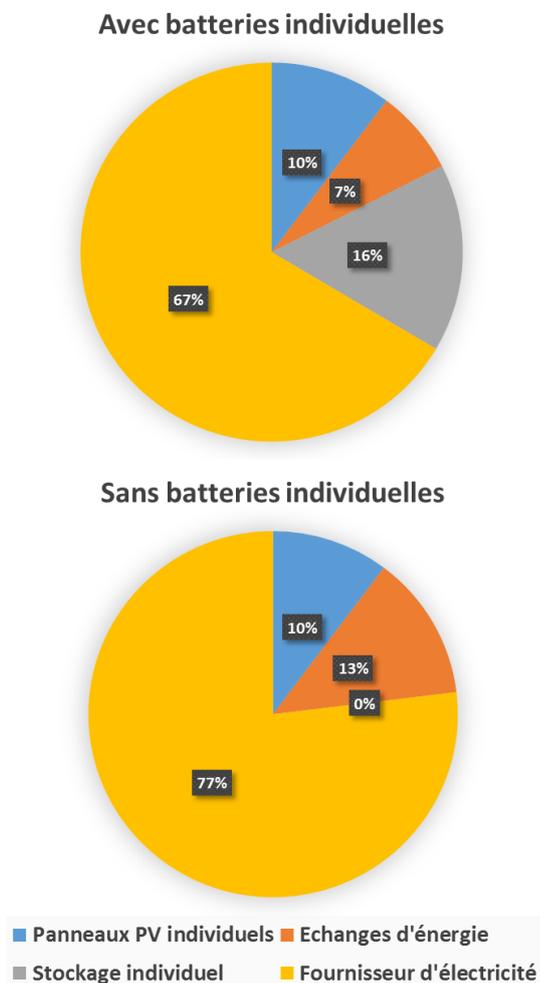


Figure 88 : Origine de l'électricité au niveau du groupement avec et sans batteries individuelles

La Figure 88 met également en évidence que l'utilisation de batteries individuelles impacte négativement la quantité d'énergie échangée dans le groupement. En effet, sans batteries individuelles, **13%** de l'énergie consommée provient des échanges contre seulement **7%** après l'installation de batteries individuelles. Cela va donc avoir un impact négatif sur le taux d'autoproduction des foyers ne possédant pas de panneaux PV.

#### 6.4.2. Impact sur les taux d'autoproduction des foyers du groupement

La Figure 89 présente les taux d'autoproduction annuels des foyers non équipés de panneaux PV. Ces taux d'autoproduction sont légèrement inférieurs à ceux observés sans système de stockage individuel (voir Figure 68).

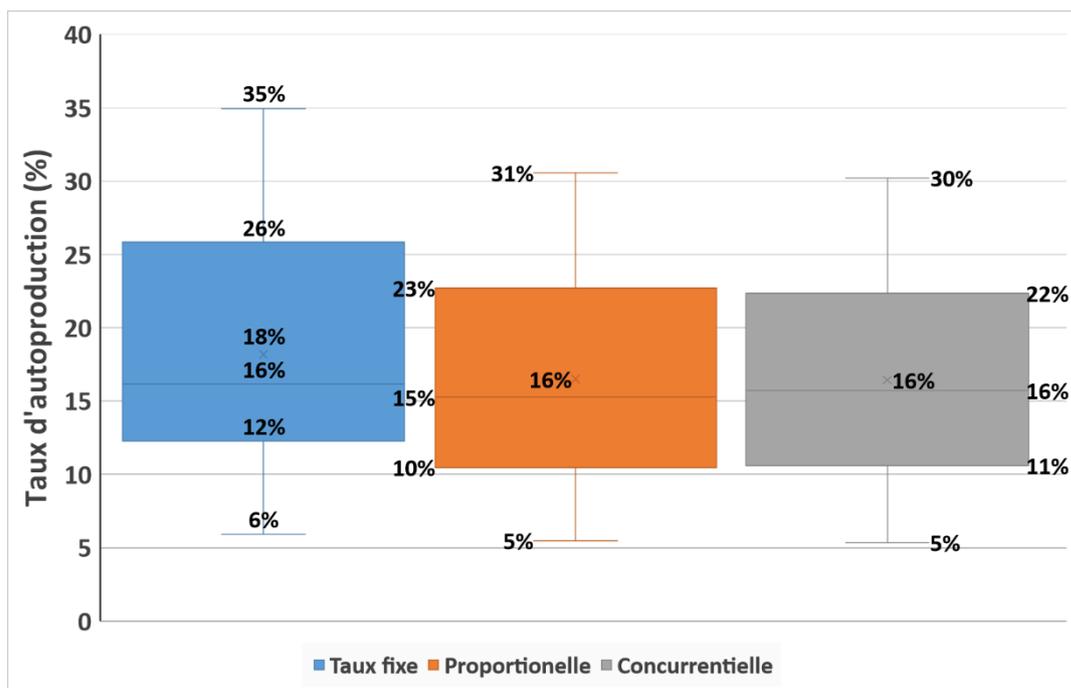


Figure 89 : Distribution des taux d'autoproduction annuels des foyers sans panneaux PV pour chaque organisation des échanges et pour un groupement avec batteries individuelles

Pour les foyers possédant des panneaux PV, l'ajout d'une batterie permet d'augmenter très fortement leur taux d'autoproduction annuel. Ainsi, sur la Figure 90, nous remarquons que, pour certains foyers, le taux d'autoproduction annuel est proche de **100%**. Cependant, il s'agit de foyers ne possédant ni chauffage ni production d'ECS électriques et donc avec une consommation d'électricité relativement basse.

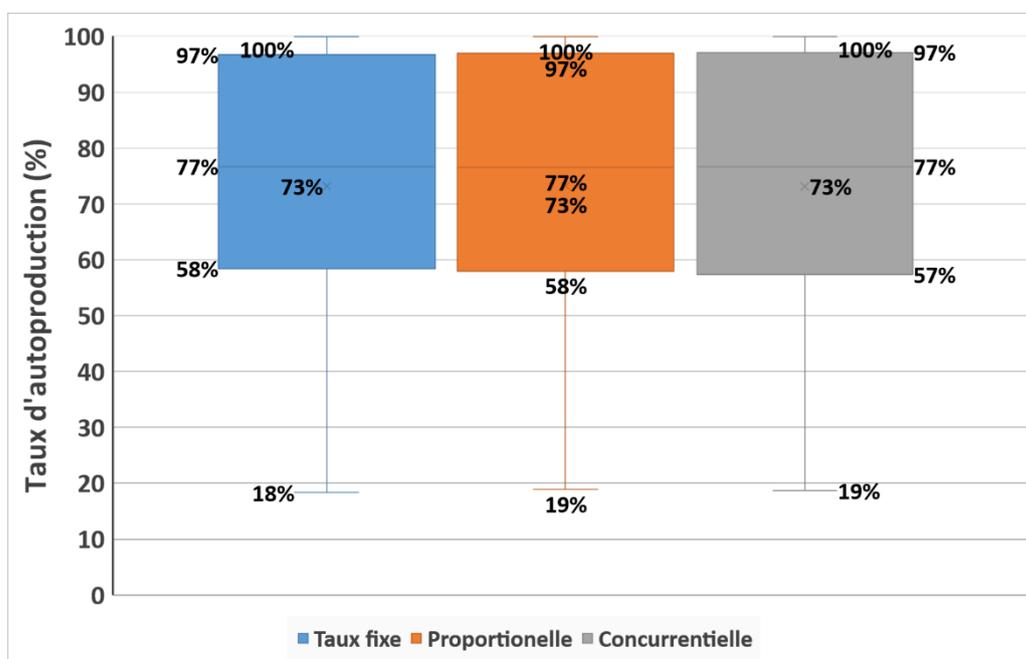


Figure 90 : Distribution des taux d'autoproduction annuels des foyers avec panneaux PV pour chaque organisation des échanges et pour un groupement avec batteries individuelles

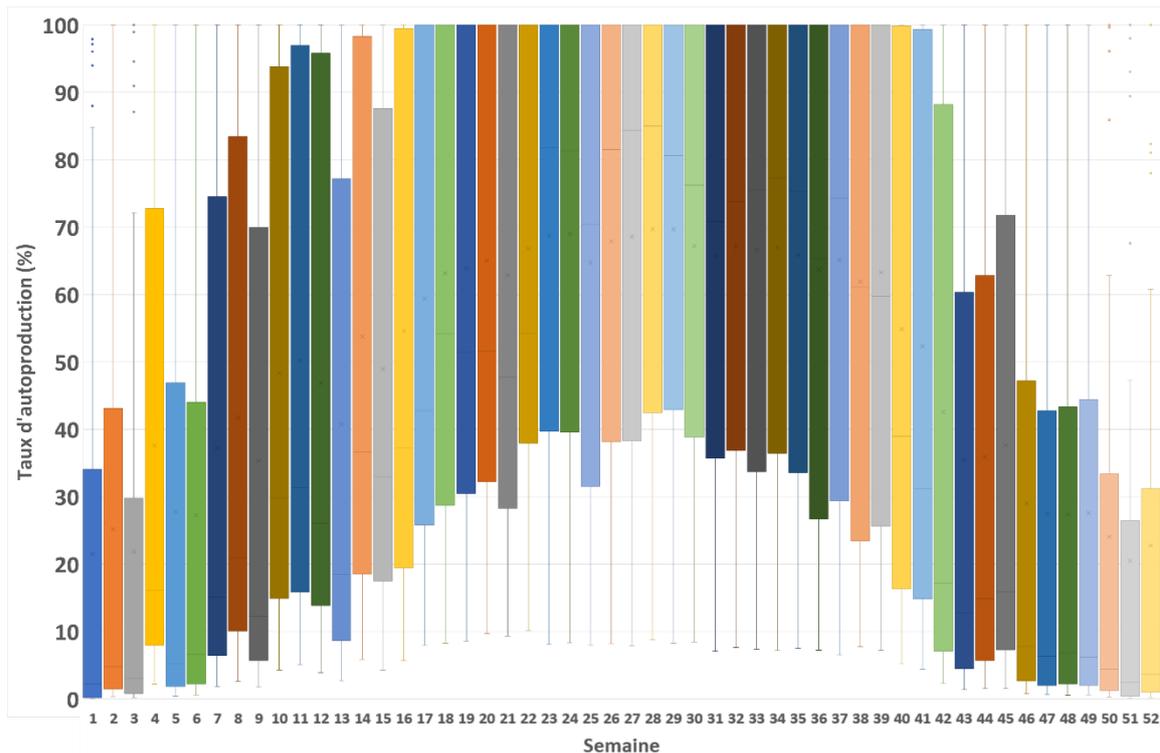


Figure 91 : Distribution des taux d'autoproduction hebdomadaires des foyers pour une organisation des échanges proportionnelle avec des systèmes de stockage individuels

La Figure 91 présente la distribution des taux d'autoproduction hebdomadaires des foyers du groupement. Des écarts importants sont obtenus entre les foyers du groupement car l'ajout d'un système de stockage individuel de l'énergie permet, aux foyers concernés, d'augmenter sensiblement leur taux d'autoproduction. Ceci résulte en une quantité d'énergie échangée dans le groupement beaucoup plus faible impactant négativement les taux d'autoproduction des foyers ne possédant ni panneaux PV ni batteries individuelles.

On constate également sur la Figure 91, un écart important entre la médiane et la moyenne des taux d'autoproduction hebdomadaires. Par exemple, pour la semaine 26, la médiane est égale à **68%** alors que la moyenne vaut **82%**. Pour analyser ce phénomène, nous avons tracé sur la Figure 92 et pour la semaine 26, les fréquences cumulées des taux d'autoproduction des foyers du groupement équipés d'un système de stockage individuel.

Il apparaît clairement qu'environ 50% des foyers ont un taux d'autoproduction compris entre 95% et 100%. De plus, nous observons un nombre constant de foyers avec un taux d'autoproduction compris entre 75% et 95%.

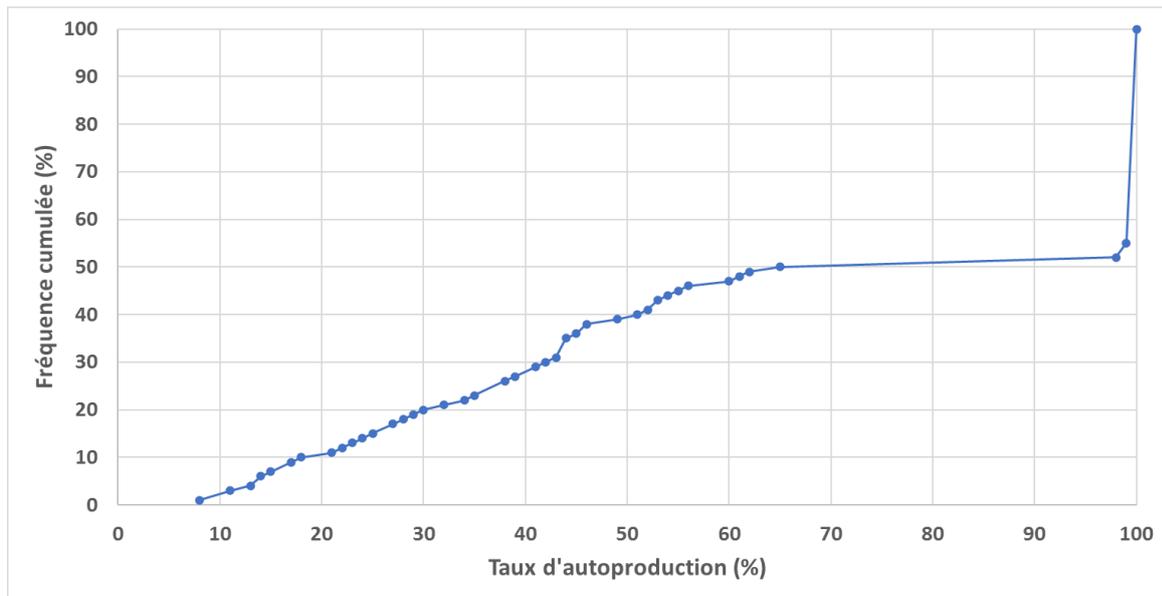


Figure 92 : Fréquence cumulée des taux d'autoproduction pour la semaine 26 et les foyers équipés d'un système de stockage individuel et avec une organisation proportionnelle des échanges

Afin de comparer l'impact des organisations des échanges sur les valeurs des taux d'autoproduction hebdomadaires, il faut examiner les valeurs portées dans le Tableau 9 qui donne les différences des moyennes entre chaque organisation des échanges que nous avons obtenues en traçant les graphiques de Bland-Altman. Une fois encore, on constate que globalement les organisations des échanges n'impactent que très peu les taux d'autoproduction des foyers du groupement. Pour tous les foyers du groupement et toutes les semaines de l'année, les différences moyennes entre les taux d'autoproduction sont inférieures à 1%.

	Organisation proportionnelle - organisation à taux fixe des échanges	Organisation proportionnelle - organisation concurrentielle des échanges	Organisation à taux fixe - organisation concurrentielle des échanges
Différence des moyennes	-0,87%	+0,02%	-0,88%

Tableau 9 : Différence des moyennes entre les taux hebdomadaires d'autoproduction en fonction des organisations des échanges et pour un groupement avec du stockage individuel

#### 6.4.3. Impact sur les taux d'autoconsommation des foyers du groupement

De même, l'ajout de batteries individuelles permet d'améliorer fortement les taux d'autoconsommation annuels des foyers possédant des panneaux PV. La Figure 93 quantifie ce résultat pour une organisation proportionnelle des échanges. Ainsi, le taux

d'autoconsommation annuel moyen de ces foyers passe de **21%** sans batteries à **55%** avec des batteries individuelles.

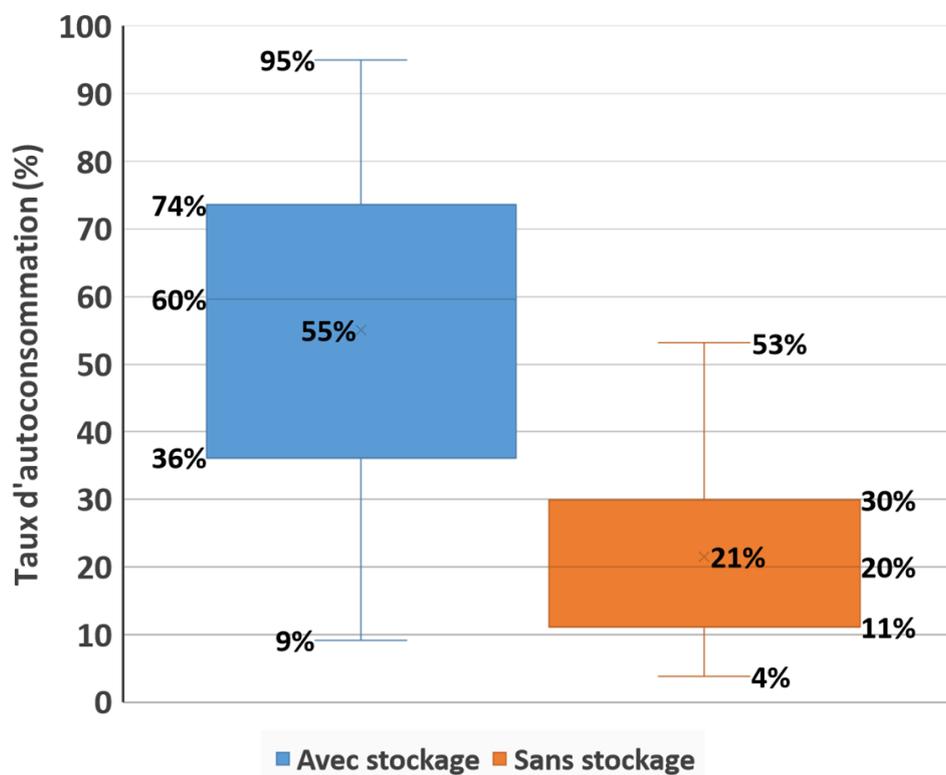


Figure 93 : Distribution des taux d'autoconsommation annuels des foyers équipés de panneaux PV avec et sans système de stockage individuel pour une organisation proportionnelle des échanges

Les tendances des valeurs hebdomadaires des indicateurs sont très similaires à celles observées pour les valeurs annuelles.

#### 6.4.4. Impact sur les factures d'énergie des foyers du groupement

D'un point de vue financier, l'ajout de batteries individuelles a pour résultat de diminuer la facture globale d'électricité des foyers. En comparant les valeurs portées sur les Figures 77 et 94, il apparaît une baisse moyenne d'environ **150 €** des factures due à la possibilité de stockage. Certains foyers ne paient pratiquement plus rien car leur taux d'autoproduction avoisine **100%**.

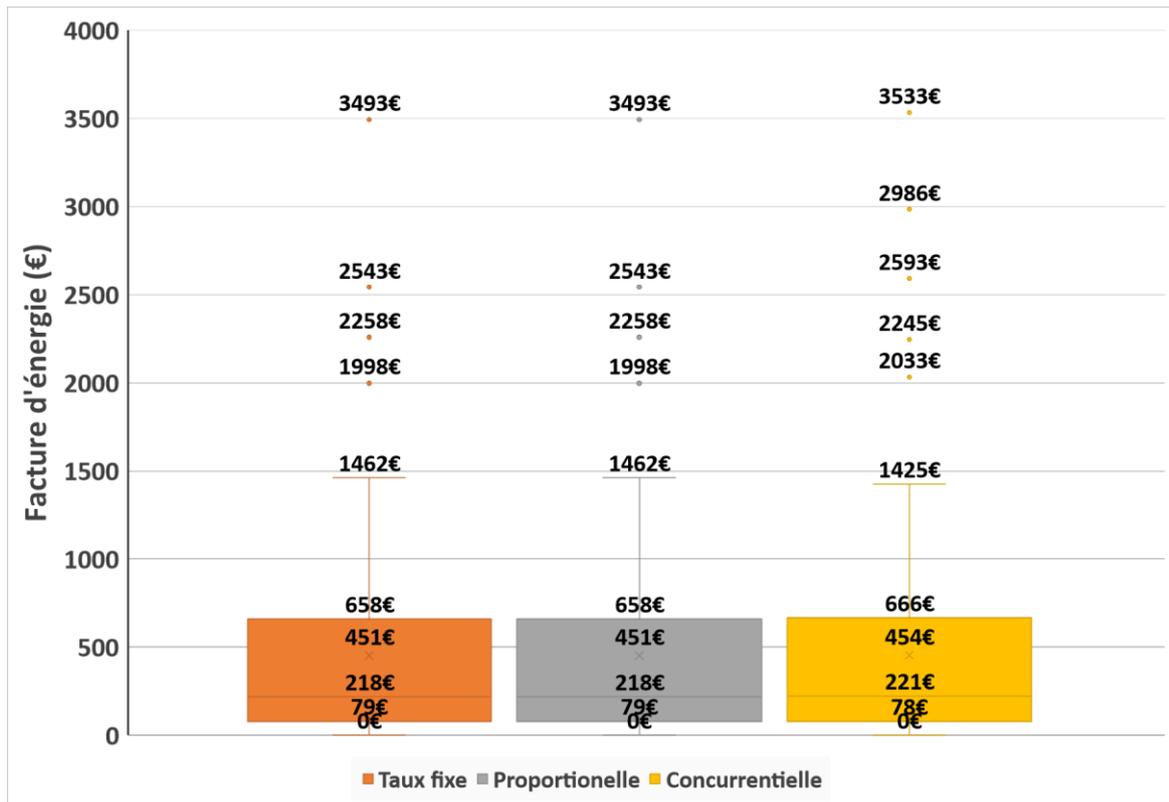


Figure 94 : Distribution des factures annuelles d'électricité des foyers équipés et non-équipés de batteries individuelles et pour les trois organisations des échanges

La Figure 95 présente la distribution des factures hebdomadaires d'énergie pour un groupement avec une organisation proportionnelle des échanges et des foyers équipés d'un système de stockage individuel.

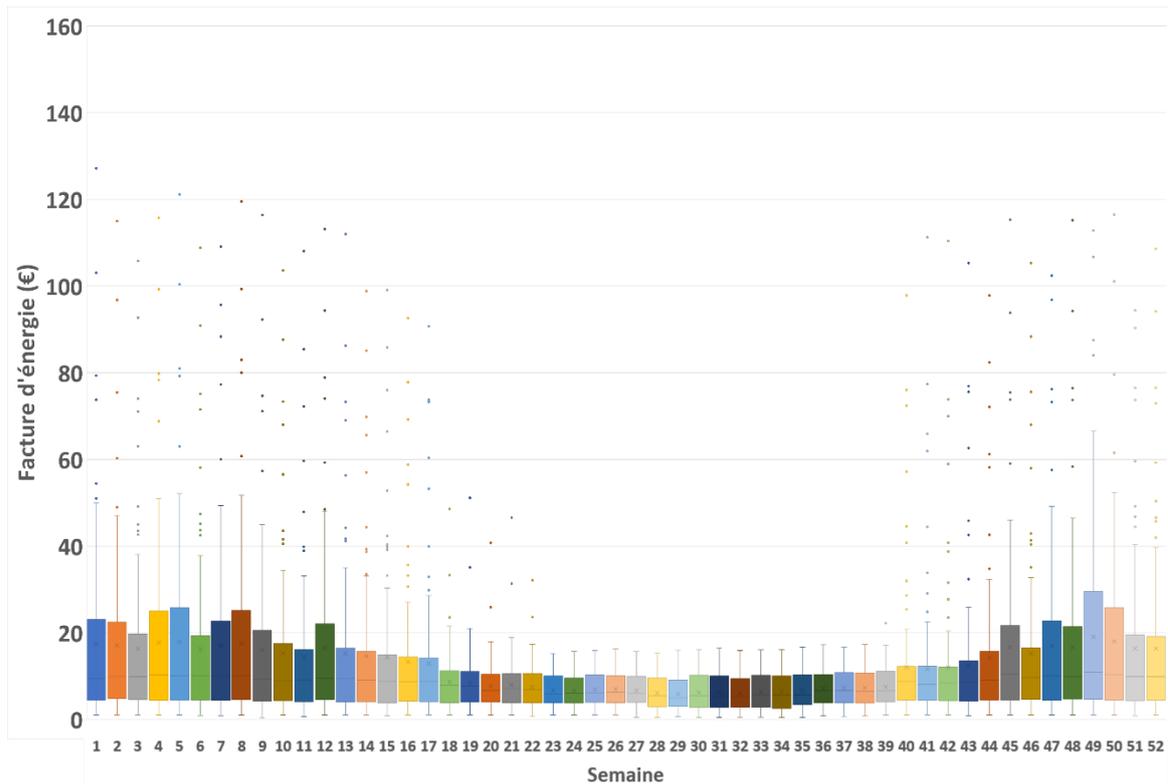


Figure 95 : Distribution des factures hebdomadaires d'énergie des foyers pour une organisation proportionnelle des échanges et des foyers équipés d'un système de stockage individuel

Les résultats montrent que la facture moyenne du groupement est toujours réduite par rapport à une situation sans système de stockage (voir Figure 80). Pour quantifier l'impact sur les factures hebdomadaires d'énergie de l'ajout des systèmes de stockage et des organisations des échanges, nous avons porté dans le Tableau 10 les valeurs issues des graphes de Bland-Altman correspondants.

	Organisation des échanges à taux fixe - Sans ACC	Organisation proportionnelle des échanges – sans ACC	Organisation concurrentielle des échanges – sans ACC
Différence des moyennes	-3,26 €	-3,26 €	-3,32 €

Tableau 10 : Différence des moyennes entre les factures hebdomadaires d'énergie sans ACC et pour chaque organisation des échanges avec des foyers équipés d'un système de stockage individuel

Les valeurs négatives du Tableau 10 indiquent que l'ajout de l'ACC permet, quelle que soit l'organisation des échanges, de diminuer la facture d'énergie des foyers du groupement. En moyenne, la diminution moyenne des factures d'énergie hebdomadaires des foyers du groupement est comprise entre **3,26 €** et **3,32 €**.

#### 6.4.5. Impact sur les gains financiers des foyers du groupement

La Figure 96 montre à l'échelle de l'année une diminution sensible des gains financiers réalisés par les foyers produisant de l'énergie et pratiquant l'ACC par rapport à des foyers sans échange d'énergie i.e. pratiquant l'ACI.

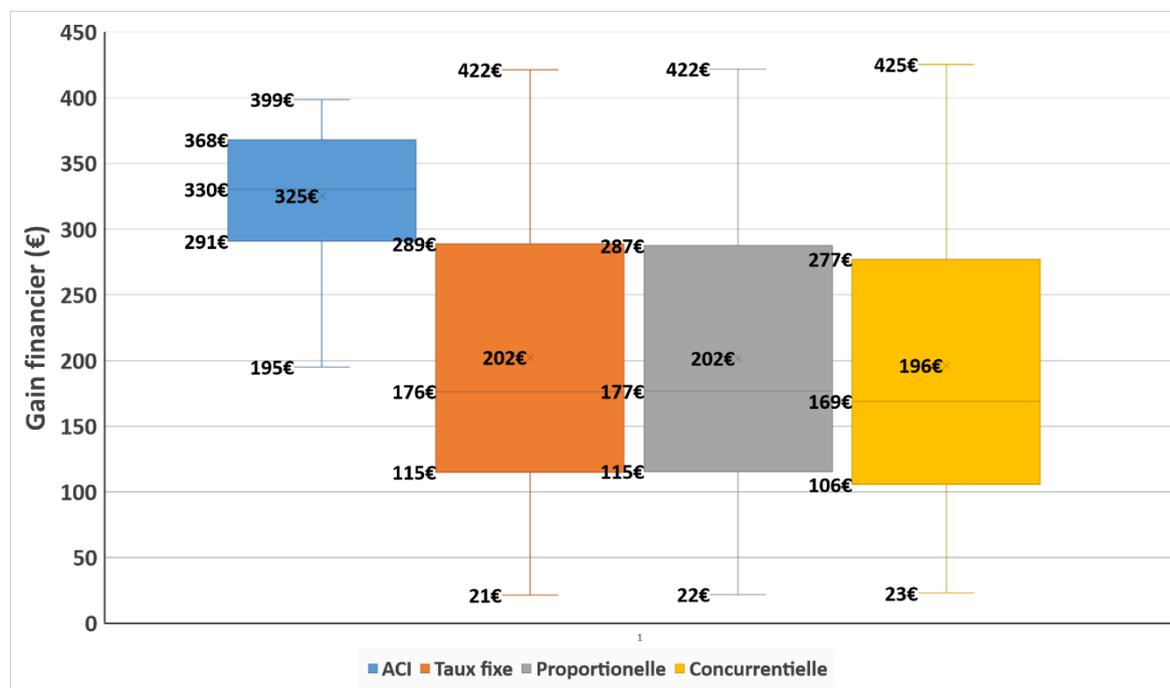


Figure 96 : Distribution des gains financiers annuels pour les foyers possédant des panneaux PV avec ACI et pour les trois organisations des échanges avec des foyers équipés d'un système de stockage individuel

En effet, l'énergie stockée ne peut être revendue aux autres foyers du groupement ou au réseau avec un éventuel bénéfice. Cependant, les factures d'énergie de ces foyers sont plus faibles. Des conclusions similaires ont été obtenues pour les valeurs saisonnières des indicateurs.

Les Figures 97 et 98 présentent les gains financiers hebdomadaires des foyers du groupement sans ACC et pour une organisation proportionnelle des échanges.

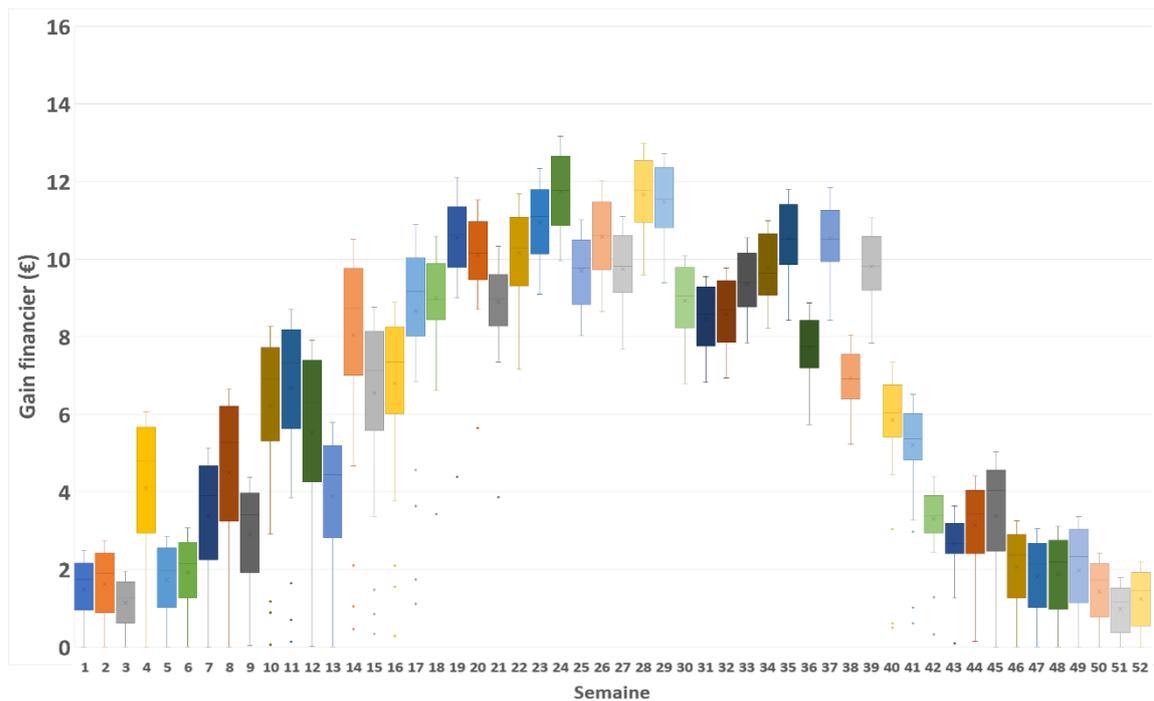


Figure 97 : Distribution des gains financiers hebdomadaires des foyers sans ACC et avec des foyers équipés d'un système de stockage individuel

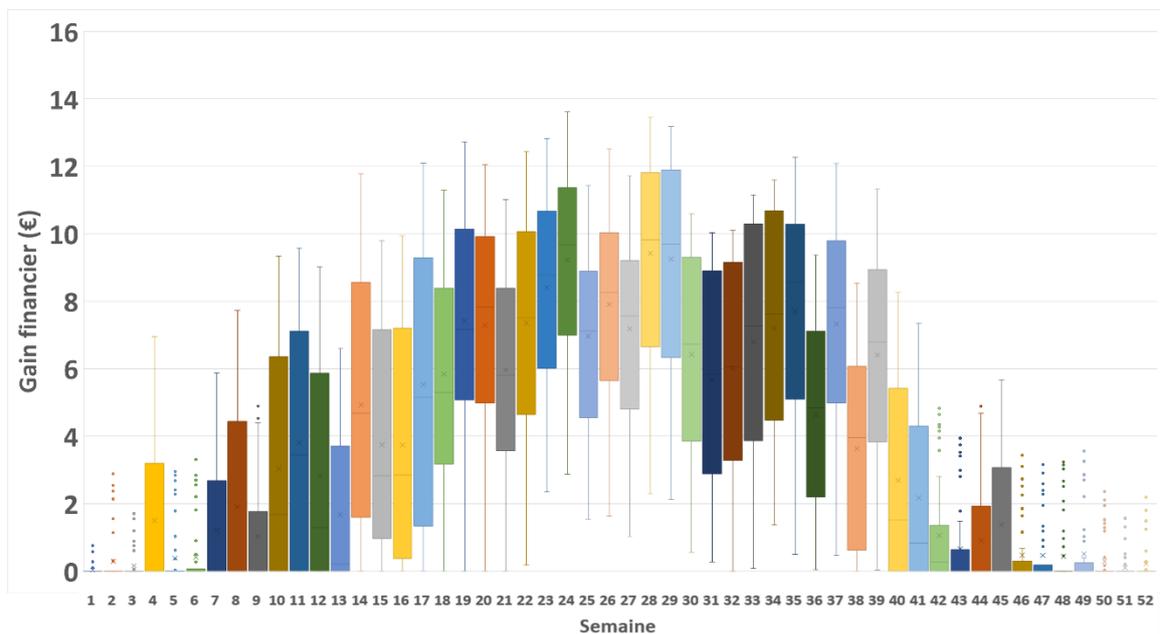


Figure 98 : Distribution des gains financiers hebdomadaires des foyers pour une organisation proportionnelle des échanges et avec des foyers équipés d'un système de stockage individuel

A l'instar des valeurs annuelles, l'introduction des échanges au sein du groupement se traduit par une diminution importante des gains financiers réalisés par les foyers. On constate même que pour certaines semaines d'hiver, par exemple les premières semaines de l'année, la majorité des foyers ne réalisent aucun gain financier. Il s'agit de foyers consommant toute l'énergie produite localement à l'aide des batteries.

Le Tableau 11 donne les valeurs des gains financiers issus des graphes de Bland-Altman correspondants.

	Organisation des échanges à taux fixe – sans ACC	Organisation proportionnelle des échanges – sans ACC	Organisation concurrentielle des échanges – sans ACC
Différence des moyennes	–2,36 €	–2,37 €	–2,48 €

*Tableau 11 : Différence des moyennes entre les gains financiers hebdomadaires sans ACC et pour chaque organisation des échanges avec des foyers équipés d'un système de stockage individuel*

Les valeurs reportées dans le Tableau 11 mettent bien en évidence une diminution moyenne des gains financiers hebdomadaires réalisés par les foyers possédant à la fois des panneaux PV et un système de stockage individuel. De plus, nous notons, une fois encore, que l'organisation des échanges n'a que peu d'impact sur les gains financiers des foyers du groupement.

#### 6.4.6. Synthèse

L'ajout d'un système de stockage individuel impacte le groupement car :

- Cela permet d'augmenter le taux d'autoconsommation et les taux d'autoproduction. Ainsi, il consomme moins d'énergie qui provient du fournisseur d'électricité. En même temps, les batteries individuelles permettent de diminuer le surplus d'énergie du groupement ;
- Cela permet d'augmenter le taux d'autoconsommation et le taux d'autoproduction des foyers qui possèdent des panneaux PV et une batterie individuelle. En effet, le surplus d'énergie est en partie stocké dans les batteries pour être réutilisé plus tard. Ainsi, ces foyers diminuent leur facture d'énergie, mais en conséquence, leur bénéfice ;
- Cela impacte négativement les échanges d'énergie. Ainsi, le taux d'autoproduction des foyers sans panneaux PV diminue et leur facture d'électricité augmente ;
- Cela augmente les disparités entre les valeurs des taux d'autoproduction des foyers dans le groupement. Les foyers possédant un système de stockage ont un taux d'autoproduction bien plus élevé que les foyers sans système de stockage.

## 6.5. ACC dans les groupements : impact d'un stockage d'énergie centralisé pour une population représentative

L'objectif de cette configuration est de comprendre l'impact que va avoir un stockage d'énergie centralisé. La production locale d'énergie du groupement est toujours assurée par 50 foyers équipés de panneaux PV individuels. Afin de tester l'impact d'un système de stockage collectif de l'énergie, nous avons également équipé le groupement d'une batterie collective d'une capacité égale aux 50 batteries individuelles mises en place dans la section précédente. Ainsi, la batterie collective a une capacité de  $14 * 50 = 700 \text{ kWh}$ . De même, la puissance continue maximale de la batterie est égale à  $50 * 5 = 250 \text{ kW}$ . Nous considérons également que le groupement applique une politique de décision liée au stockage collectif dite standard. De plus, les foyers producteurs d'énergie ne reçoivent aucune compensation financière pour l'énergie stockée par la batterie collective et les foyers du groupement reçoivent gratuitement l'énergie provenant de la batterie collective.

### 6.5.1. Impact du stockage collectif à l'échelle du groupement

Tout d'abord, nous analysons l'impact du stockage collectif sur les taux d'autoproduction et d'autoconsommation annuels du groupement. Le Tableau 12 donne les valeurs de ces taux pour une organisation proportionnelle des échanges.

	<i>Taux d'autoproduction</i>	<i>Taux d'autoconsommation</i>
<i>ACC avec batterie individuelle</i>	34%	70%
<i>ACC avec batterie collective</i>	43%	90%

Tableau 12 : Taux d'autoproduction et d'autoconsommation annuels du groupement avec un stockage collectif

On constate que pour une capacité et une puissance de charge et de décharge équivalentes, le stockage collectif produit un meilleur taux d'autoconsommation et d'autoproduction annuel. Cela s'explique par le fait que tous les foyers peuvent bénéficier du stockage d'énergie contrairement au stockage individuel où seulement 50 foyers y ont accès. La Figure 99 permet de visualiser l'origine de l'électricité consommée par le groupement. Ces valeurs sont à comparer avec celles de la Figure 88.

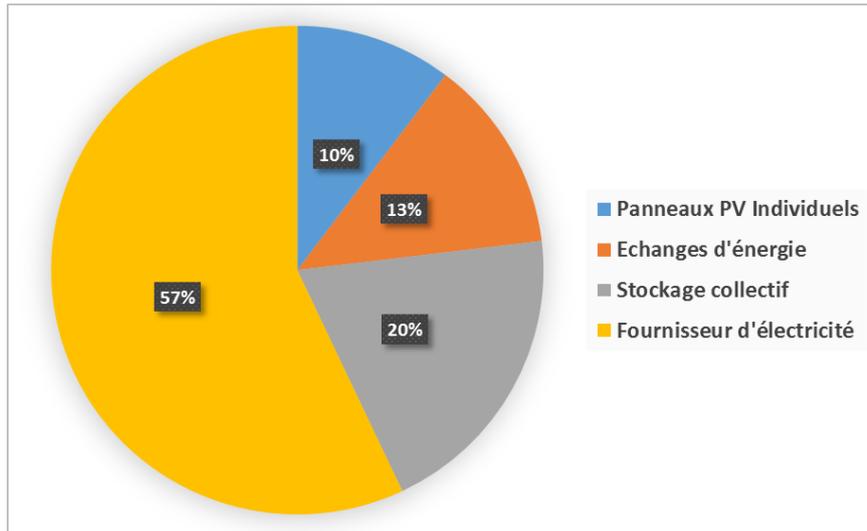


Figure 99: Origine de l'électricité consommée par le groupement avec une batterie collective

Par rapport au stockage individuel, le groupement consomme moins d'énergie provenant du fournisseur d'électricité. Ensuite, il consomme plus d'énergie stockée par la batterie collective par rapport à celle issue des batteries individuelles. Enfin, l'introduction d'une batterie collective n'impacte pas la quantité d'énergie qui est échangée dans le groupement. Avec ou sans batterie collective, **13%** de l'énergie consommée par le groupement provient toujours des échanges. Cela est dû au fait que la batterie charge uniquement l'énergie qui ne peut être échangée entre les foyers.

### 6.5.2. Impact sur les taux d'autoproduction des foyers du groupement

Les résultats prouvent également l'impact positif du stockage collectif sur les taux d'autoproduction annuels de tous les foyers du groupement. Pour les foyers ne possédant pas de panneaux PV, la Figure 100 montre une augmentation du taux d'autoproduction annuel. Par exemple, pour une organisation proportionnelle des échanges, le taux d'autoproduction moyen des foyers sans panneaux PV est de **51%** avec une batterie collective contre **16%** (voir Figure 89) avec des batteries individuelles et **26%** (voir Figure 68) pour un groupement sans système de stockage.

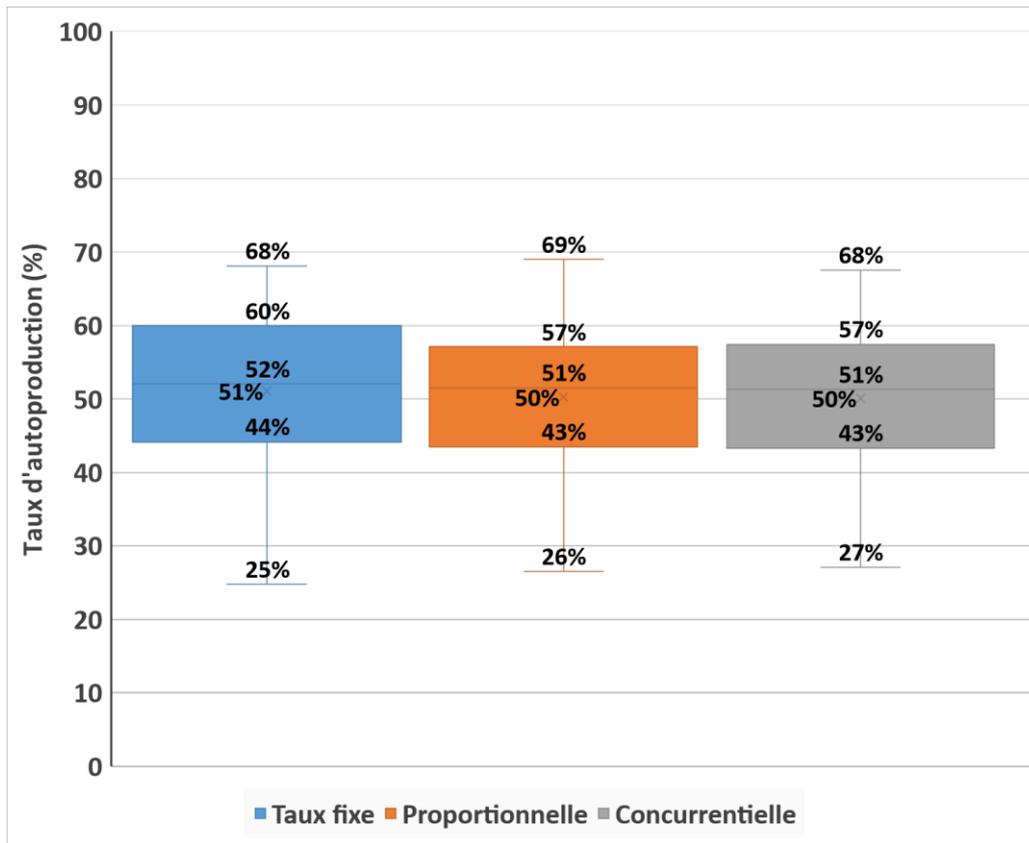


Figure 100 : Distribution des taux d'autoproduction des foyers sans panneaux PV pour les trois organisations des échanges et un groupement avec une batterie collective

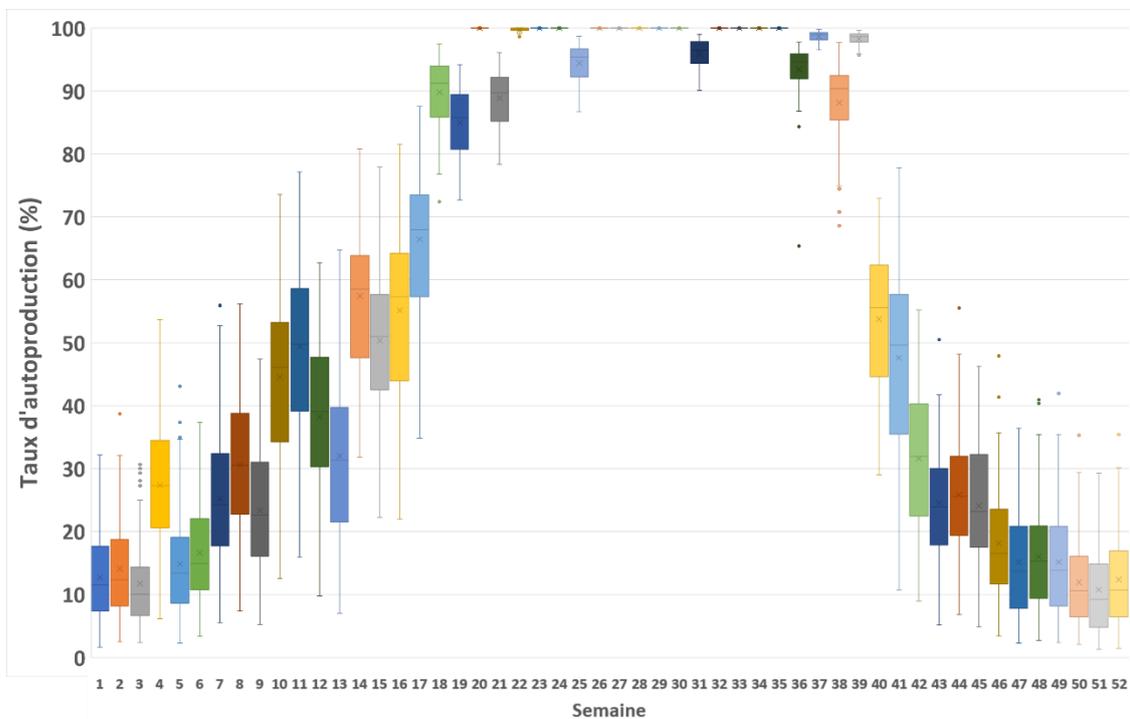


Figure 101 : Distribution des taux hebdomadaires d'autoproduction des foyers pour une organisation proportionnelle des échanges et un groupement avec un système de stockage collectif

Sur la Figure 101, on peut très clairement identifier l'impact du système de stockage collectif sur le taux d'autoproduction des foyers du groupement. Tout d'abord, le stockage collectif réduit grandement les écarts entre les taux d'autoproduction des foyers du groupement à la différence du stockage individuel (voir Figure 91) car l'ensemble des foyers du groupement peut bénéficier de l'énergie stockée par la batterie. De plus, l'été, il apparaît que le stockage collectif permet à la quasi-totalité des foyers du groupement de ne consommer que de l'énergie qui provient de la production locale du groupement.

L'analyse des valeurs portées dans le Tableau 13 montre que les organisations des échanges n'impactent que très peu les taux d'autoproduction des foyers du groupement.

	Organisation proportionnelle – organisation à taux fixe des échanges	Organisation proportionnelle - organisation concurrentielle des échanges	Organisation à taux fixe - organisation concurrentielle des échanges
Différence des moyennes	+0,80%	+0,27%	-1,07%

*Tableau 13 : Différence des moyennes entre les taux hebdomadaires d'autoproduction en fonction des organisations des échanges et pour un groupement avec un système de stockage collectif*

### 6.5.3. Impact sur les taux d'autoconsommation des foyers du groupement

Les résultats obtenus montrent que les taux d'autoconsommation des foyers possédant des panneaux PV ne sont pas impactés par le stockage collectif. En effet, cet indicateur considère uniquement l'énergie qui provient des systèmes individuels (batteries et panneaux PV) des foyers. Les valeurs des taux d'autoconsommation des foyers sont donc identiques à une configuration sans stockage collectif.

### 6.5.4. Impact sur les factures d'énergie des foyers du groupement

D'un point de vue financier, l'utilisation d'une batterie collective permet de diminuer les factures de l'ensemble des foyers du groupement. Cela est visible en observant la Figure 102. La facture moyenne des foyers baisse d'environ **30 €** par rapport à l'utilisation de batteries individuelles (voir Figure 94). Nos résultats montrent également qu'à la différence d'un groupement avec du stockage individuel (voir Figure 94), l'ensemble des factures du groupement diminue avec un stockage collectif.

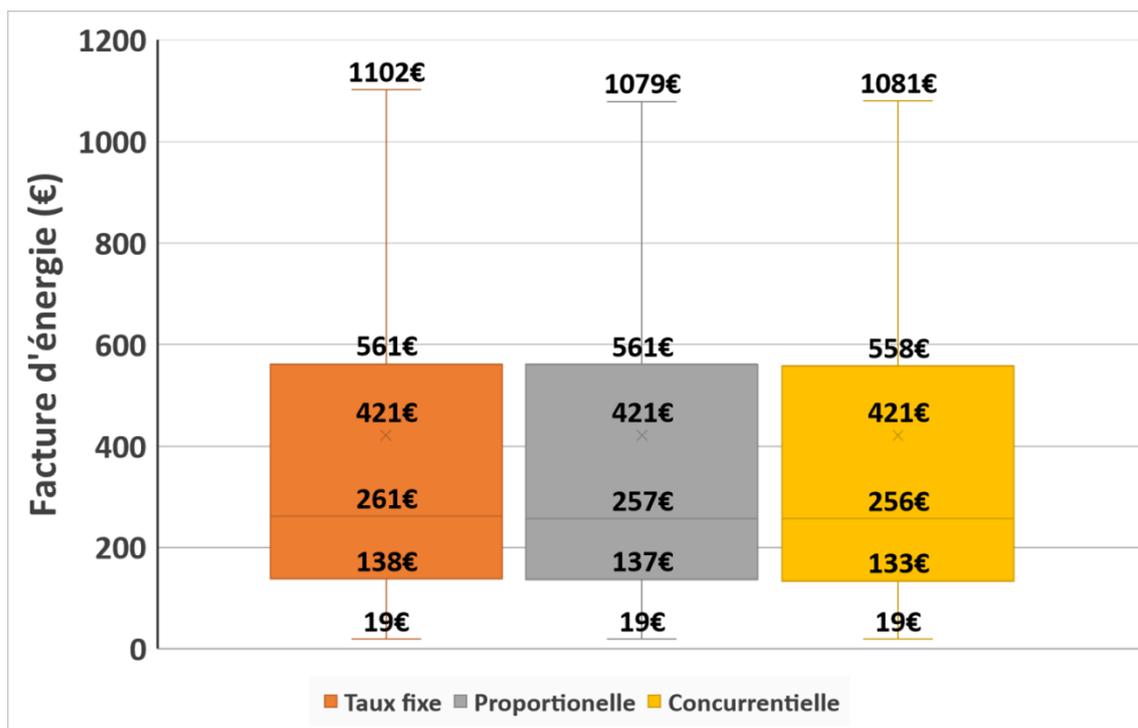


Figure 102 : Distribution des factures d'électricité annuelles des foyers pour un groupement avec une batterie collective pour les trois organisations des échanges

Les Figures 103 et 104 présentent la distribution des factures hebdomadaires d'énergie sans ACC et avec une organisation proportionnelle des échanges.

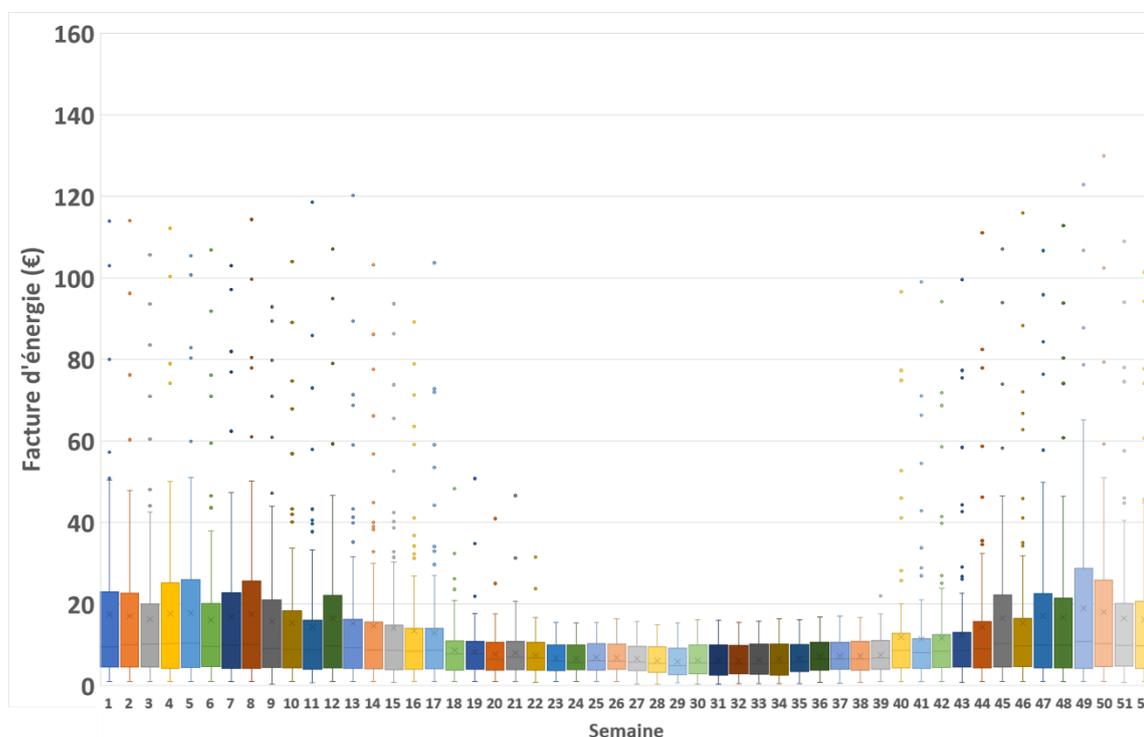


Figure 103 : Distribution des factures hebdomadaires des foyers sans ACC et pour un groupement avec un système de stockage collectif

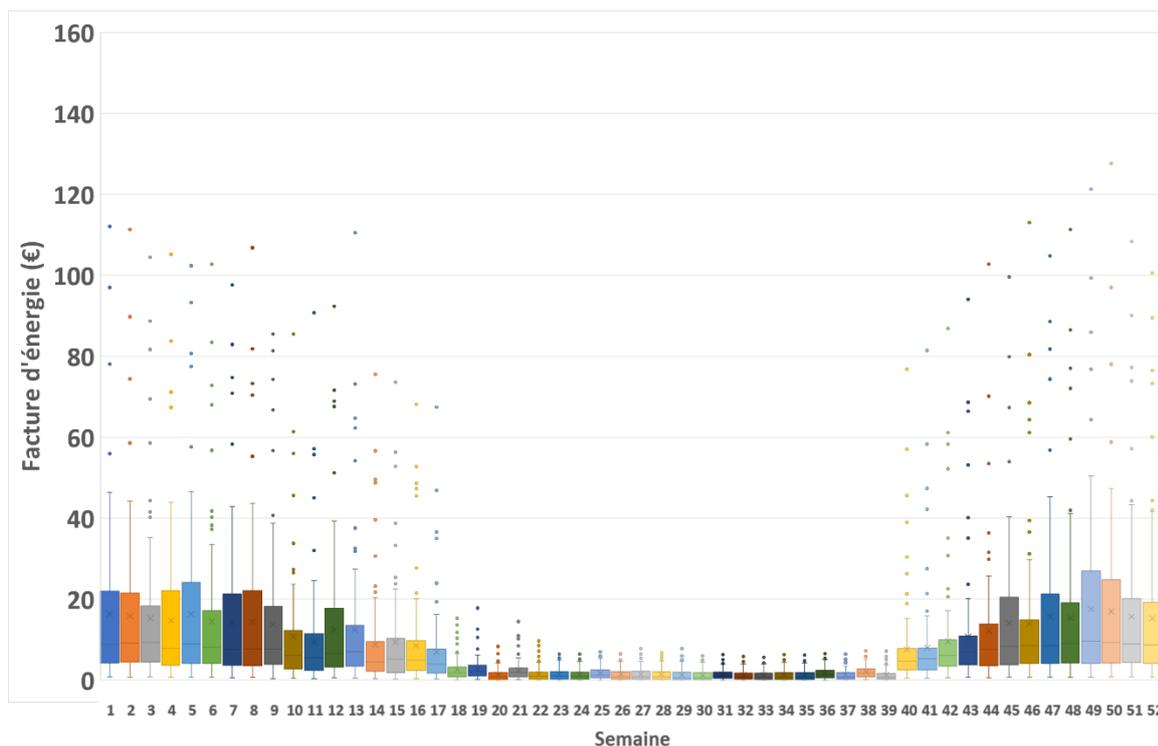


Figure 104 : Distribution des factures hebdomadaires des foyers avec une organisation proportionnelle des échanges et pour un groupement avec un système de stockage collectif

On constate pour la plupart des semaines de l'année une diminution de la facture d'énergie des foyers du groupement. Cette baisse est particulièrement visible en été lorsque la production d'énergie est forte. Cependant, pour certaines semaines d'hiver, l'utilisation du stockage collectif peut résulter en une facture hebdomadaire plus élevée par rapport au stockage individuel (voir Figure 95).

Cette baisse globale des factures hebdomadaires est également visible sur la Figure 105 où on observe clairement que le stockage collectif permet de diminuer l'ensemble des factures d'énergie des foyers du groupement.

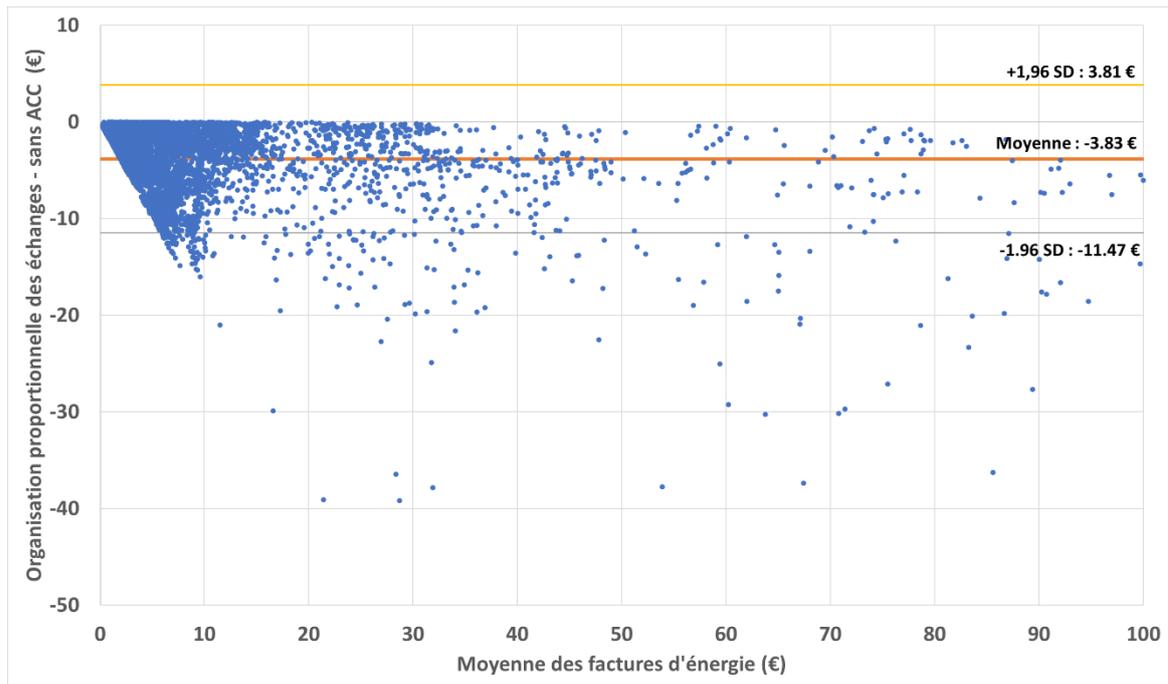


Figure 105 : Comparaison entre les factures hebdomadaires d'énergie sans ACC et avec une organisation proportionnelle des échanges pour un groupement avec un système de stockage collectif

Le Tableau 14 permet de comparer l'impact moyen des organisations des échanges sur les factures d'énergie.

	Organisation des échanges à taux fixe – sans ACC	Organisation proportionnelle des échanges – sans ACC	Organisation concurrentielle des échanges – sans ACC
Différence des moyennes	-3,83 €	-3,83 €	-3,91 €

Tableau 14 : Différence des moyennes entre les factures hebdomadaires d'énergie sans ACC et pour chaque organisation des échanges pour un groupement avec un système de stockage collectif

Les trois organisations des échanges d'énergie permettent de diminuer de manière équivalente les factures d'énergie des foyers du groupement par rapport au cas sans ACC. De plus, il apparaît que les gains effectués sont légèrement supérieurs à ceux obtenus grâce à une politique de stockage individuel (voir Tableau 11).

### 6.5.5. Impact sur les gains financiers des foyers du groupement

Les Figures 106 et 107 présentent la distribution des gains financiers hebdomadaires des foyers sans ACC puis avec une organisation proportionnelle de l'énergie et un système de stockage collectif. A cause de la politique financière adoptée pour la gestion de l'énergie stockée et déstockée par la batterie collective (voir en introduction de la section 6.5), il

apparaît globalement une baisse des gains financiers des foyers entre le cas sans ACC et celui avec stockage collectif.

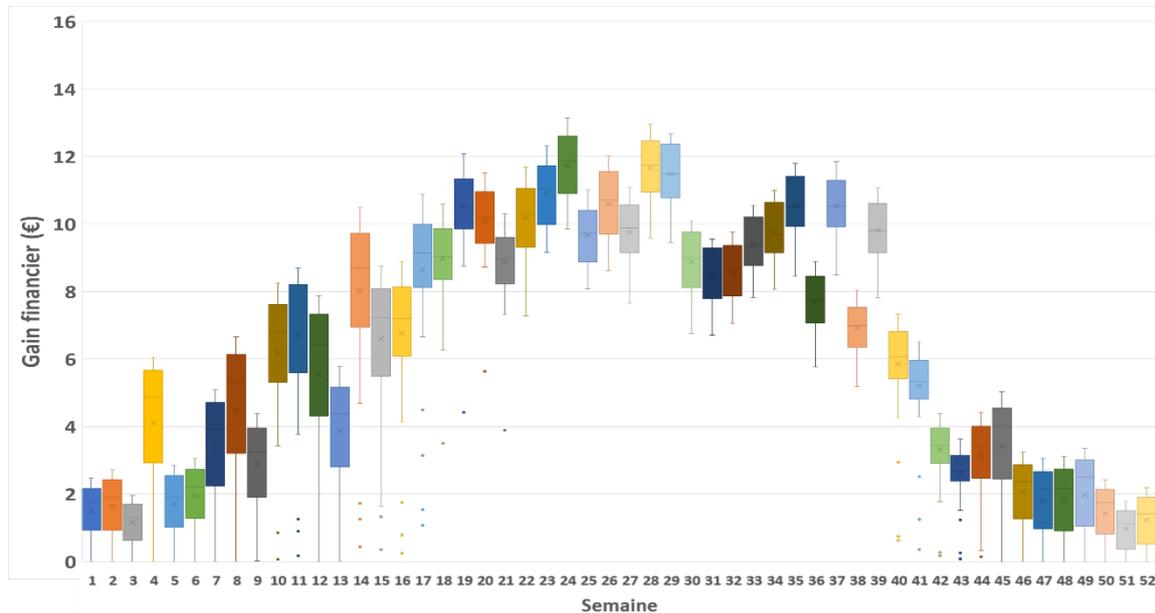


Figure 106 : Distribution des gains financiers hebdomadaires des foyers sans ACC

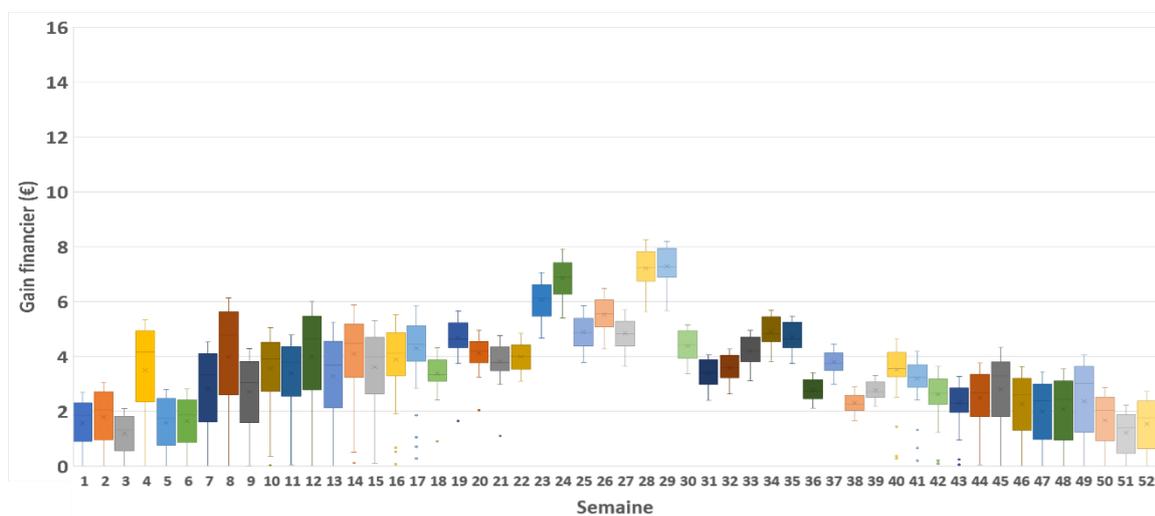


Figure 107 : Distribution des gains financiers hebdomadaires des foyers pour une organisation proportionnelle des échanges et avec un système de stockage collectif

La Figure 108 permet de visualiser les différences entre les gains financiers hebdomadaires pour les deux configurations. Il apparaît très majoritairement une baisse des gains financiers qui plus est en augmentation avec l'amplitude de ces derniers.

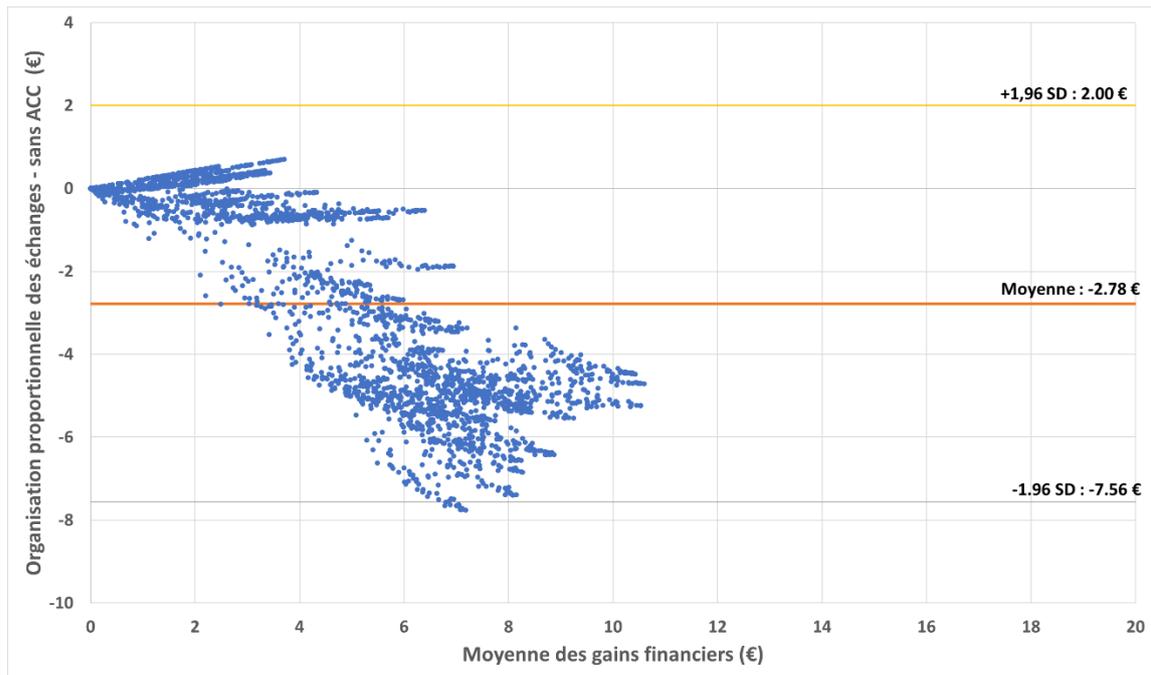


Figure 108 : Comparaison entre les gains financiers hebdomadaires sans ACC et avec une organisation proportionnelle des échanges pour un groupement avec un système de stockage collectif

En moyenne, la diminution des gains est égale à **2,78 €**. Nous obtenons des résultats très similaires pour les organisations des échanges à taux fixe et concurrentielle.

### 6.5.6. Synthèse

Cette configuration a permis de montrer l'impact d'un système de stockage collectif sur les indicateurs de l'ACC :

- A l'instar des systèmes de stockage individuels, le stockage collectif de l'énergie va permettre, à l'échelle du groupement, d'augmenter les taux d'autoproduction et d'autoconsommation par rapport à un groupement sans système de stockage
- À l'échelle des foyers, le stockage collectif va permettre d'augmenter les taux d'autoproduction de l'ensemble des foyers du groupement. Il en résulte également une réduction des écarts d'autoproduction entre les foyers du groupement ;
- Les factures d'énergie de tous les foyers du groupement sont fortement réduites grâce au stockage collectif de l'énergie.

Enfin, une conclusion essentielle est qu'un système de stockage collectif bénéficie à l'ensemble des foyers du groupement contrairement aux batteries individuelles.

## 6.6. Quartier performant et PV collectif

L'objectif de ce cas d'étude est de comprendre l'impact d'un quartier performant avec PV collectif sur la consommation et la facture d'énergie du groupement. Pour ce faire, nous définissons un quartier performant comme un quartier devant posséder au moins un système de production d'énergie renouvelable, ayant une consommation d'électricité faible et une empreinte carbone basse. Pour modéliser un tel quartier, nous avons modifié certains paramètres de la situation de référence à savoir :

1. L'ensemble des bâtiments sont conformes à la RT 2012 ;
2. Les systèmes de chauffage et les ballons d'ECS ne consomment pas d'électricité provenant du réseau. Ils utilisent une autre source d'énergie (bois ou gaz par exemple) qui n'est pas intégrée dans la consommation d'électricité simulée par notre modèle (les pompes à chaleur ne sont pas encore modélisées);
3. Le groupement est équipé d'un système de production collectif d'électricité d'une puissance de 100 kWc. Il s'agit de la puissance installée dans l'écoquartier LOGIS CÉVENOL et qui alimente un quartier composé de 100 appartements. Nous considérons que ces panneaux PV appartiennent à une entité tierce qui récupère l'ensemble des gains réalisés par ces derniers. C'est pour cela que nous n'étudions pas les gains financiers des foyers pour cette configuration.

De plus, nous avons uniquement simulé les organisations des échanges proportionnelle et à taux fixe. En effet, nous considérons que l'utilisation d'un système de stockage collectif est incompatible avec une organisation concurrentielle des échanges. Enfin, nous n'étudions pas les taux d'autoconsommation des foyers du groupement car ils sont impossibles à calculer pour chaque foyer avec une production collective d'énergie au niveau du groupement.

### 6.6.1. Impact d'un quartier performant et d'un PV collectif à l'échelle du groupement

Tout d'abord, les résultats des simulations mettent en avant l'impact positif de la performance du quartier sur la consommation électrique du groupement. En effet, les consommations annuelles de l'ensemble du quartier passent de **438 MWh** précédemment (voir section 6.3.1) à **164 MWh** avec une production annuelle d'électricité des panneaux PV égale à **120 MWh**.

	Taux d'autoproduction	Taux d'autoconsommation
Organisation proportionnelle des échanges	43%	46%
Organisation des échanges à taux fixe	43%	45%

Tableau 15 : Taux d'autoproduction et d'autoconsommation annuels pour un quartier performant équipé de panneaux PV collectifs

Le Tableau 15 donne les valeurs des taux d'autoconsommation et d'autoproduction annuels à l'échelle du groupement et pour les deux organisations considérées. On observe des valeurs très proches pour les deux indicateurs et les deux organisations des échanges de l'énergie. Les faibles écarts entre les deux organisations sont dus à la variabilité de l'activité.

### 6.6.2. Impact sur les taux d'autoproduction des foyers du groupement

La Figure 109 présente la distribution du taux d'autoproduction annuel de l'ensemble des foyers du groupement.

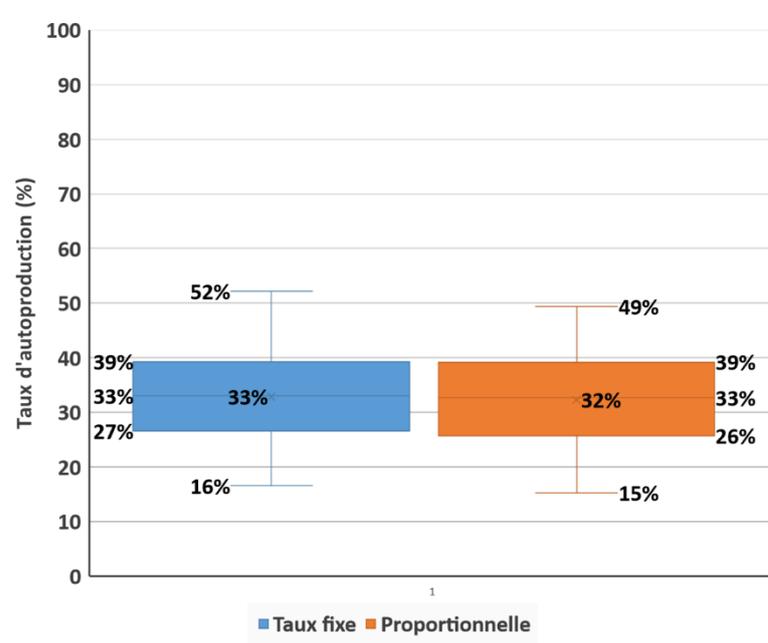
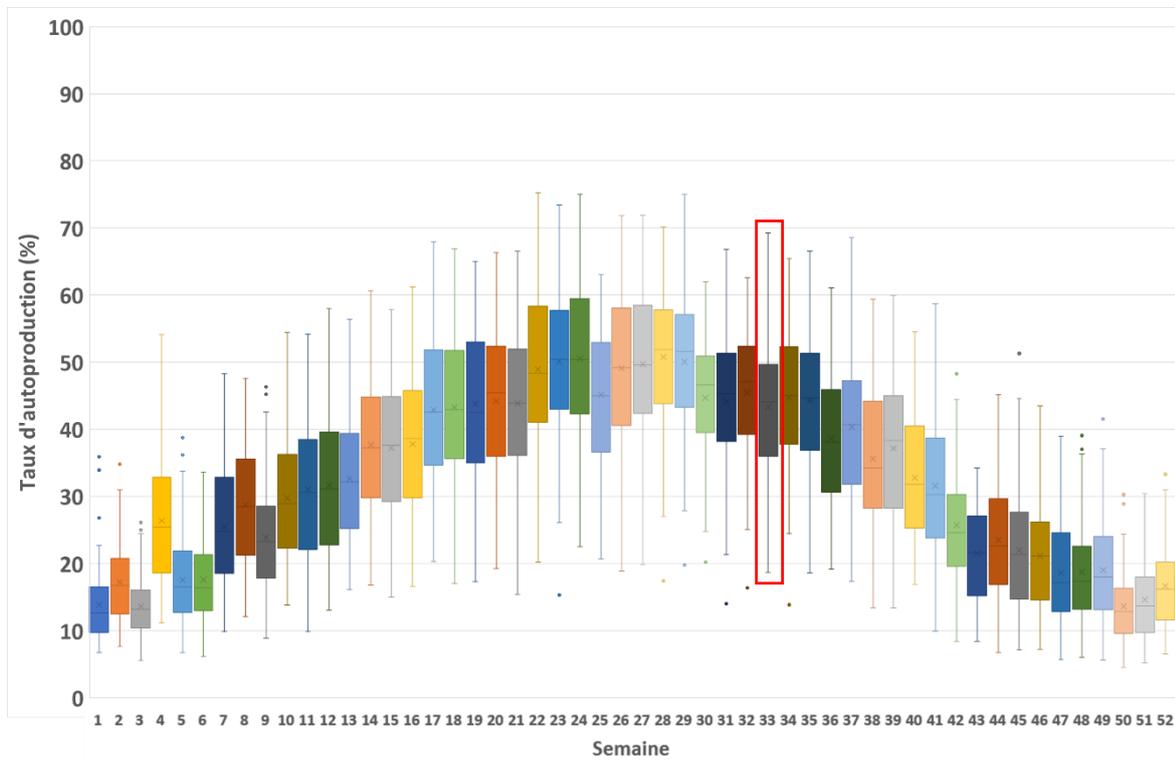


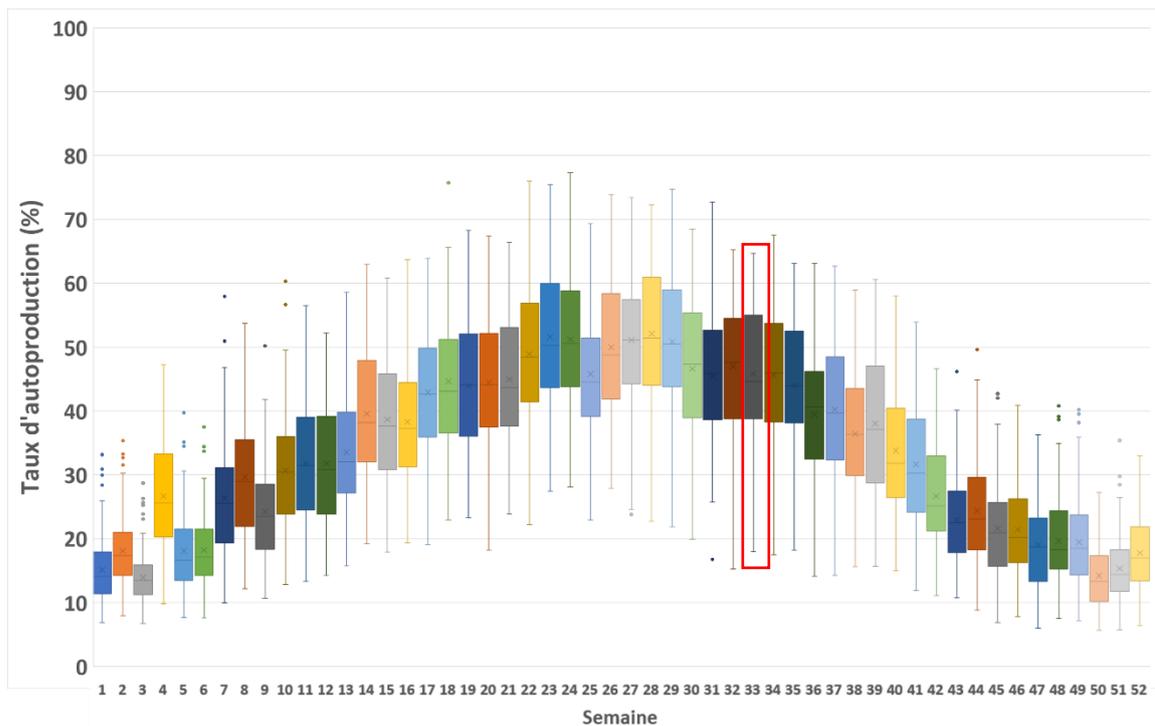
Figure 109 : Distribution des taux d'autoproduction annuels des foyers pour un quartier performant équipé de panneaux PV collectifs

Il apparaît que l'organisation des échanges n'influence que très peu la distribution des taux d'autoproduction annuels des foyers puisqu'une organisation des échanges à taux fixe permet d'obtenir un taux d'autoproduction moyen de **33%** à comparer à la valeur moyenne de **32%** obtenue avec une organisation proportionnelle des échanges.

Les Figures 110 et 111 présentent les distributions des taux hebdomadaires d'autoproduction des foyers du quartier pour une organisation des échanges proportionnelle et à taux fixe.



*Figure 110 : Distribution des taux hebdomadaires d'autoproduction des foyers pour une organisation proportionnelle des échanges et pour un quartier performant équipé de panneaux PV collectifs*



*Figure 111 : Distribution des taux hebdomadaires d'autoproduction des foyers pour une organisation des échanges à taux fixe et pour un quartier performant équipé de panneaux PV collectifs*

L'analyse des données des Figures 110 et 111 montre quelques différences entre les deux organisations des échanges, comme c'est le cas par exemple pour la semaine 33 (rectangle rouge). Pour cette semaine, il apparaît qu'une organisation à taux fixe résulte globalement en une augmentation du taux d'autoproduction des foyers du quartier

La Figure 112 permet de quantifier ces différences dont la moyenne est égale à **-0,77%** avec des valeurs hebdomadaires qui sont très peu dépendantes de l'amplitude du taux d'autoproduction.

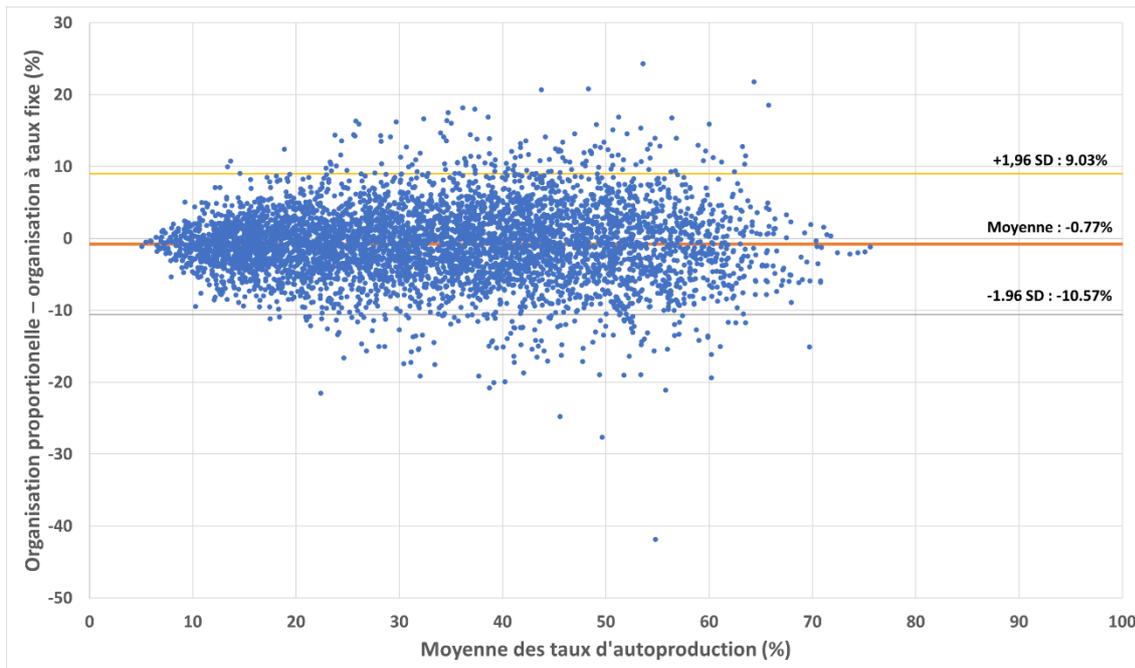


Figure 112 : Comparaison entre les taux hebdomadaires d'autoproduction pour des organisations proportionnelle et à taux fixe des échanges et pour un quartier performant équipé de panneaux PV collectifs

### 6.6.3. Impact sur les factures d'énergie des foyers du groupement

Comme nous pouvons le voir sur la Figure 113, l'organisation des échanges n'impacte que très peu les factures annuelles d'énergie des foyers. En effet, la production d'énergie étant suffisante pour subvenir aux besoins des foyers du quartier, peu de différences apparaissent entre les différentes organisations des échanges. Les résultats obtenus amènent à des conclusions très similaires si nous nous plaçons sur une échelle hebdomadaire.

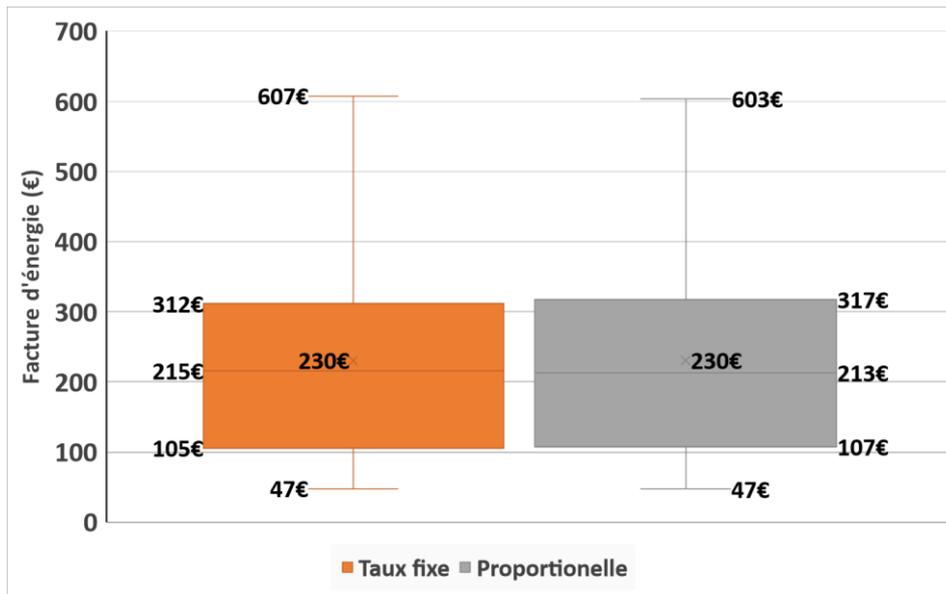


Figure 113 : Distribution des factures d'électricité annuelles des foyers pour un quartier performant équipé de panneaux PV collectifs

Cependant, afin de quantifier l'impact sur les factures hebdomadaires d'énergie des deux organisations des échanges comparativement au cas sans ACC, nous avons tracé sur les Figures 114 et 115 les différences concernées.

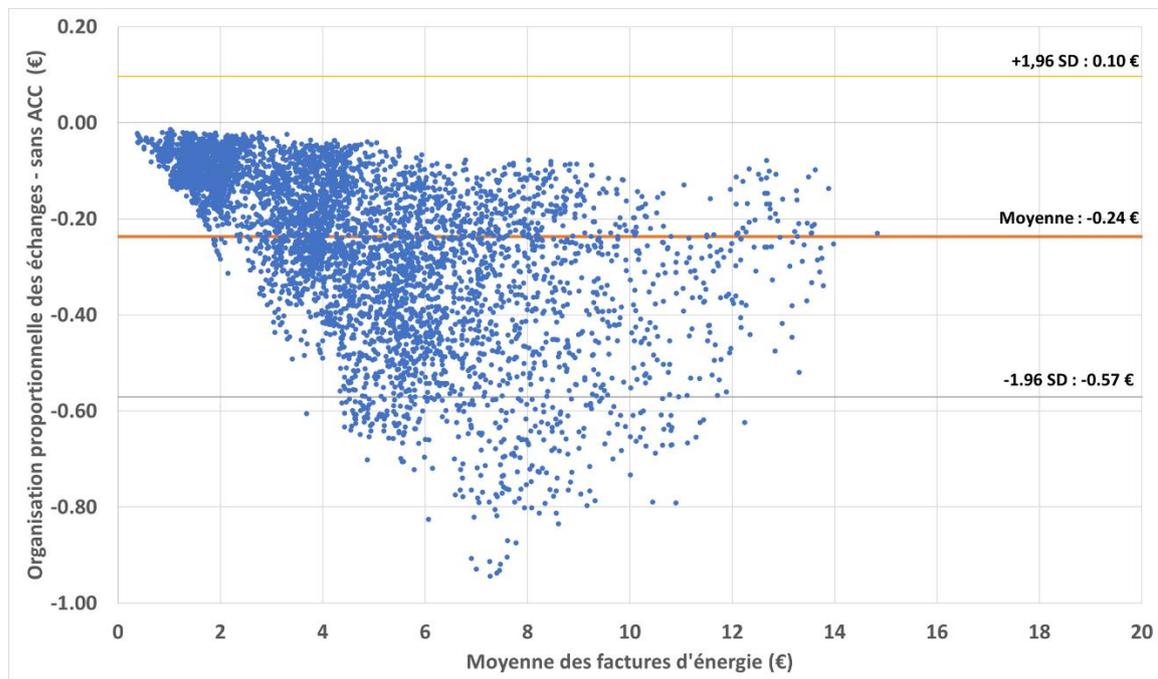


Figure 114 : Comparaison entre les factures hebdomadaires d'énergie sans ACC et avec une organisation proportionnelle des échanges à taux fixe pour un quartier performant équipé de panneaux PV collectifs

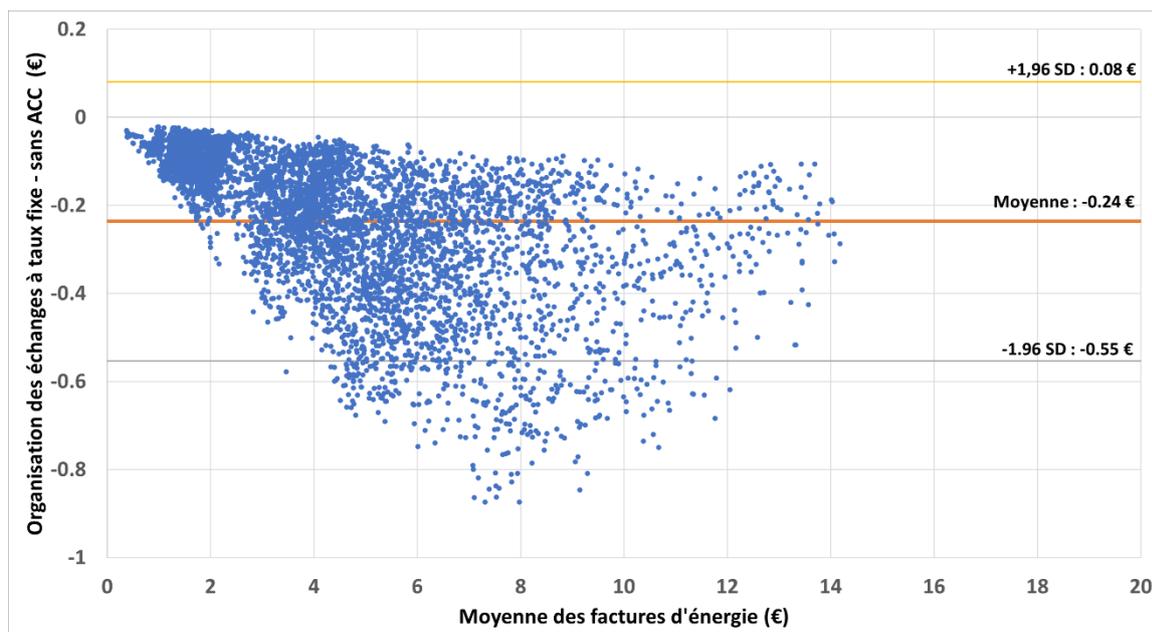


Figure 115 : Comparaison entre les factures hebdomadaires d'énergie sans ACC et avec une organisation des échanges à taux fixe pour un quartier performant équipé de panneaux PV collectifs

Il apparaît clairement des résultats très similaires entre le cas sans ACC et les deux organisations d'échange de l'énergie. Nous observons également une augmentation de la différence avec l'amplitude de la facture d'énergie pour une grande partie des foyers.

#### 6.6.4. Synthèse

Pour un quartier performant équipé de panneaux PV collectifs, il a été observé que :

- La consommation annuelle en énergie du quartier a fortement diminué par rapport à la situation de référence soit de 62% environ ;
- Les panneaux PV collectifs produisent une quantité d'énergie proche de la consommation totale du quartier. Cela se traduit par un taux d'autoconsommation global très élevé ;
- Les factures d'énergie du groupement sont moins élevées et avec une distribution plus resserrée entre les foyers.

## 6.7. ACC et prise de décision

### 6.7.1. Politique de décision sur le pilotage des équipements électriques

L'objectif de cette configuration est de comprendre l'impact du déplacement de l'enclenchement des équipements électriques sur les indicateurs de l'ACC que nous avons définis. Pour cela, nous avons créé un groupement similaire à celui utilisé dans la section 6.3.1 à savoir avec 50 foyers possédant une production individuelle d'énergie grâce à des panneaux PV. La puissance de ces derniers est de 3,5 kWc pour chaque foyer.

Nous appliquons une politique de décision pour le pilotage des équipements électriques des foyers.

**Au niveau des foyers** producteurs d'énergie, la politique de décision pour le pilotage des équipements électriques est basée sur le surplus d'énergie du foyer. Cette politique vise à impacter la production d'ECS, le lave-linge, le lave-vaisselle et le sèche-linge. Les entrées de la politique de décision sont :

- *nbAppareilsPrêts* : Nombre d'appareils prêts à l'emploi dont le démarrage est reportable ;
- *surplusEnergie* : Surplus d'énergie du foyer pour un pas de temps de comptage ;
- *seuilEnergieMax* : Quantité maximale d'énergie qu'un appareil dont le démarrage est reportable peut consommer sur un pas de temps de comptage ;
- *consommationECS* : Quantité d'énergie maximale que le chauffe-eau électrique d'un foyer (s'il en possède un) peut consommer sur un pas de temps de comptage.

La politique de décision fait ensuite deux vérifications à chaque pas de temps de comptage :

- Si  $surplusEnergie > consommationECS$  : Alors la politique de décision va enclencher le ballon d'eau chaude ;
- Si  $surplusEnergie > nbAppareilsPrêt * seuilEnergieMax$  : Alors la politique de décision va enclencher le lave-linge, le lave-vaisselle et le sèche-linge, s'ils sont prêts à l'emploi.

Cependant, cette politique de décision particulière a une limite. En effet, il peut arriver que le ballon d'eau chaude et d'autres appareils soient enclenchés en même temps. Cela peut amener le foyer à consommer plus d'énergie que son surplus et donc à devoir appeler de l'énergie depuis le groupement grâce aux échanges ou depuis le réseau.

**Au niveau du groupement**, une politique de décision de pilotage des appareils électriques a également été mise en œuvre. À chaque pas de temps de comptage et en fonction de

son surplus d'énergie, le groupement va prendre la décision d'envoyer ou non un signal aux foyers pour que ces derniers enclenchent leurs appareils électriques. Les entrées de cette politique sont :

- *nbAppareilsPrêtsGroupement* : Nombre d'appareils prêts à l'emploi dont le démarrage est reportable. Cela implique que les foyers indiquent au gestionnaire du groupement que l'enclenchement de certains de leurs appareils peut être reporté ;
- *surplusEnergieGroupement* : Surplus en énergie du groupement pour un pas de temps de comptage ;
- *seuilEnergieMax* : Quantité maximale d'énergie qu'un appareil dont le démarrage peut être reporté peut consommer sur un pas de temps de comptage ;
- *pourcentageFoyers* : Pourcentage de foyers auquel le groupement va envoyer le signal pour déclencher ses appareils.

Pour chaque pas de temps de comptage, la politique de décision au niveau du groupement comporte deux étapes qui sont :

1. Le groupement calcule  $seuilDéclenchement = \frac{nbAppareilsPrêts * seuilEnergieMax}{2}$  qui est le seuil du surplus autorisant à envoyer le signal de mise en marche des équipements électriques pour une partie des foyers ;
2. Si  $surplusEnergieGroupement > seuilDéclenchement$  alors le groupement envoie le signal de mise en marche des appareils à certains foyers du groupement en fonction de la valeur de *poucentageFoyers*.

La constante *pourcentageFoyers* a été fixée arbitrairement à 100%. Cela signifie que le groupement envoie le signal à l'ensemble des foyers si la production d'énergie est suffisante.

### 6.7.2. Résultats des simulations

Le groupement peut utiliser les trois organisations des échanges d'énergie implémentées.

	Taux d'autoproduction	Taux d'autoconsommation
Groupement sans politique de décision pour le pilotage des équipements électriques	23%	48%
Groupement avec politique de décision pour le pilotage des équipements électriques	24%	51%

Tableau 16 : Taux d'autoproduction et d'autoconsommation annuels du groupement avec une politique de décision sur le pilotage des équipements électriques pour une organisation des échanges proportionnelle

Le Tableau 16 montre un impact très modéré du pilotage des appareils électriques sur les valeurs des taux d'autoproduction et d'autoconsommation.

Au niveau des foyers, le Tableau 17, donne pour chacun des indicateurs, les valeurs des différences moyennes entre un groupement sans politique de décision sur le pilotage des appareils et un groupement pratiquant une politique de décision sur le pilotage pour chaque organisation des échanges.

Moyenne des différences	Organisation proportionnelle des échanges	Organisation des échanges à taux fixe	Organisation concurrentielle des échanges
Taux d'autoproduction	2,20%	2,10%	2,04%
Taux d'autoconsommation	2,04%	2,16%	2,11%
Factures d'énergie	-0,28€	-0,29€	-0,22€
Gains financiers	-0,18€	-0,19€	-0,18€

*Tableau 17 : Différence des moyennes entre les indicateurs pour un groupement sans politique de décision sur le pilotage des appareils électriques et un groupement avec une politique de décision sur le pilotage des appareils électriques*

Nous constatons que, même à l'échelle du foyer, la mise en place d'une politique de décision n'a qu'un impact très limité sur les indicateurs sélectionnés. De plus, cet effet est très similaire d'une organisation à une autre.

Ces conclusions sont la conséquence de deux facteurs :

- Le sèche-linge, le lave-linge et le lave-vaisselle ne représentent que 4% de la consommation énergétique totale du groupement ;
- Seuls 23 foyers sur 54 ont une production d'ECS électrique qu'ils vont enclencher en fonction de leur production individuelle d'énergie. Ainsi, même si la consommation électrique pour la production d'ECS représente 27% de la consommation d'énergie annuelle du groupement, une partie de cette consommation n'est pas déplacée lorsque la production locale d'énergie satisfait aux besoins.

On constate également qu'à l'échelle du groupement la politique de décision sur le pilotage a un impact plus faible sur le taux d'autoproduction. Cela veut dire que même si le groupement autoconsomme une plus grande quantité d'énergie, sa consommation d'énergie depuis le réseau diminue peu. Deux situations amènent à ce type de résultats :

1. La production d'énergie PV diminue fortement après que les habitants aient pris la décision de mettre en marche leurs lave-vaisselle, lave-linge ou sèche-linge ;

2. Les habitants d'un foyer se mettent à effectuer des activités consommatrices d'énergie après avoir pris la décision de mettre en marche leurs ECS, lave-linge, lave-vaisselle ou sèche-linge. Dans cette situation les foyers vont donc avoir une consommation électrique importante qui peut alors être supérieure à la quantité d'énergie produite localement et qui peut les amener à consommer de l'énergie depuis le réseau.

Dans ces deux situations, la consommation du foyer peut devenir supérieure à la quantité d'énergie qu'il produit ou qui est disponible au niveau du groupement. Il va alors consommer de l'énergie depuis son fournisseur d'électricité.

Ainsi, la politique de décision sur le pilotage des équipements électriques proposée ne permet pas d'impacter de manière significative les indicateurs du groupement ou de chaque foyer. Cependant, cette politique pourrait être plus efficace dans d'autres circonstances. Par exemple pour un groupement ou l'ensemble des foyers possèderaient une production d'ECS électrique associée à un contrat heures creuses. En effet, dans cette situation l'ensemble des foyers du groupement pourrait alors déplacer l'usage de leur ballon d'eau chaude en fonction de la disponibilité de l'énergie produite localement.

## 6.8. Inter-groupement

Dans cette section, nous souhaitons étudier l'impact des échanges d'énergie entre des groupements sur la consommation globale de ceux-ci. Pour ce faire, nous avons mis en place une configuration différente de celles étudiées précédemment. Ainsi, nous simulons 5 groupements de 20 foyers chacun. Chaque groupement pratique l'ACC mais échange aussi de l'énergie avec les autres groupements au travers d'une place centrale d'échange d'énergie. Chacun des groupements est caractérisé par des paramètres spécifiques afin de représenter des groupements différents dans leur manière de produire, consommer et de stocker l'énergie.

### 6.8.1. Configuration des groupements

Les cinq groupements sont générés à l'aide de la même configuration de base définie par :

- **Nombre de foyers** : 20 ;
- **Type de foyers** : Appartement ;
- **Performance thermique des foyers** : Répartition française ;
- **Chauffage et production d'ECS** : Répartition française entre équipements électriques et non électriques ;
- **Population** : Population représentative de la population française (statistique INSEE) ;
- **Localisation** : La Rochelle.

Cette configuration de base permet d'obtenir 5 groupements similaires en termes de population avec 20 foyers par groupement. Cela fait en tout 100 foyers qui seront simulés, ce qui est identique aux configurations déjà étudiées. Nous décrivons ensuite les éléments spécifiques de chacun des groupements que nous nommons groupement A, B, C, D et E respectivement.

**Le Groupement A** est équipé de panneaux PV individuels avec les caractéristiques suivantes :

- **Nombre de panneaux PV** : 10 foyers équipés de panneaux PV individuels ;
- **Puissance des panneaux PV** : 3,5 kWc pour chaque foyer.

**Le groupement B** est caractérisé par la présence de systèmes de stockage individuels en plus d'une production d'énergie liée à des panneaux PV individuels :

- **Nombre de panneaux PV** : 10 foyers équipés de panneaux PV individuels ;
- **Puissance des panneaux PV** : 3,5 kWc pour chaque foyer ;

- **Nombre de batteries individuelles** : 10 batteries pour les 10 foyers possédant des panneaux PV ;
- **Caractéristiques des batteries** : Capacité de 14 kWh et puissance continue de 5000 W chacune.

**Le groupement C** est caractérisé par la présence d'un système de stockage collectif associé à une production d'énergie liée à des panneaux PV individuels :

- **Nombre de panneaux PV** : 10 foyers équipés de panneaux PV individuels ;
- **Puissance des panneaux PV** : 3,5 kWc pour chaque foyer ;
- **Caractéristiques de la batterie collective** : Capacité de 140 kWh et puissance continue de 50000 W.

**Le groupement D** est un quartier performant en termes de consommation d'énergie avec des panneaux PV collectifs :

- **Performance thermique des foyers** : Conforme à la RT 2012 pour l'ensemble des foyers ;
- **Chauffage et production d'ECS** : Utilisation d'appareils non électriques pour tous les foyers ;
- **Puissance des panneaux PV collectifs** : 20 kWc.

**Le groupement E** est caractérisé par le fait qu'aucun équipement en lien avec l'autoconsommation d'énergie n'est présent. Ainsi, le groupement ne produit pas et ne stocke pas d'énergie.

Les échanges d'énergie au sein de ces groupements suivent tous une organisation proportionnelle de l'énergie. En effet, les résultats de la section 6.3.1 indiquent que les organisations des échanges implémentées ne vont pas impacter le surplus ou le besoin en énergie à l'échelle du groupement. Dans le cadre du groupement E cette organisation sert uniquement à répartir l'énergie provenant des échanges inter-groupements.

Concernant les échanges d'énergie inter-groupements et donc l'organisation des échanges d'énergie mise en œuvre par la place centrale d'échange, nous proposons également une organisation proportionnelle des échanges. En effet, les organisations des échanges concurrentielle et à taux fixe sont la source de problématiques nouvelles auxquelles il faudrait répondre, à savoir :

- **Organisation des échanges à taux fixe** : Sur quel critère base-t-on le taux d'énergie que va recevoir chaque groupement ?
- **Organisation des échanges concurrentielle** :
  - Sur quel critère un groupement se base-t-il pour fixer un prix de vente ou d'achat de l'énergie ?
  - Comment est répartie l'énergie ainsi achetée au sein du groupement ?

De plus, l'objectif principal de cette configuration n'est pas d'étudier l'impact des organisations des échanges entre les groupements, mais de mettre en avant les capacités du modèle d'ACC à simuler les échanges inter-groupements ainsi que leurs impacts pour une situation donnée.

## 6.8.2. Résultats des simulations

La Figure 116 présente l'origine de l'énergie consommée par les différents groupements simulés.

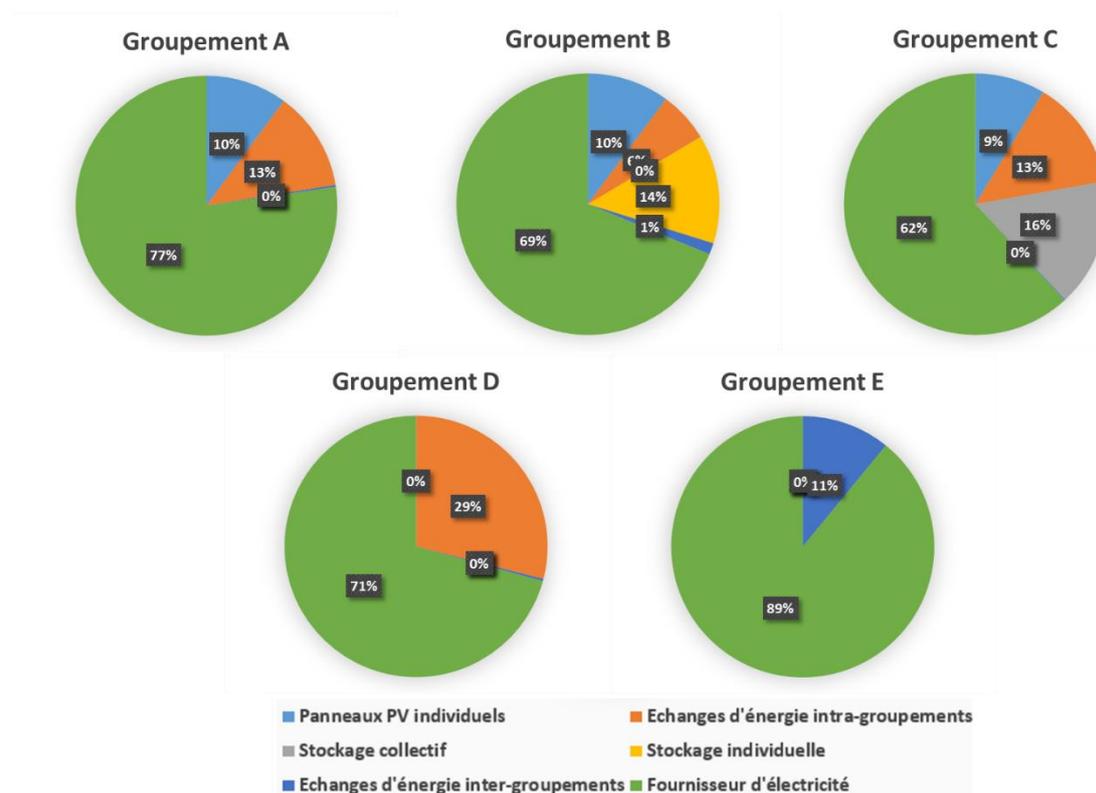


Figure 116 : Origine de l'énergie consommée par les cinq groupements

Tout d'abord, nous notons que les groupements A, B, C et D, qui produisent tous de l'énergie, ne reçoivent que peu d'énergie provenant des échanges inter-groupements. En effet, ces groupements produisent de l'énergie en même temps et vont donc vouloir échanger leur surplus concomitamment. Cependant, nous notons que le groupement B consomme légèrement plus d'énergie au travers des échanges inter-groupements que les groupements A, C et D. Cela est dû à la présence des batteries individuelles qui réduisent la quantité d'énergie potentiellement échangeable entre les foyers du groupement.

Le groupement E est le plus gros consommateur d'énergie provenant des échanges inter-groupements car il ne possède aucun moyen de production d'énergie. Les échanges inter-groupements lui permettent donc de diminuer sa consommation d'énergie provenant du

réseau. En tout, **11%** de l'énergie qu'il consomme vient de la production des autres groupements.

Le modèle d'ACC développé permet donc d'étudier les échanges d'énergie entre les groupements et donc la gestion des surplus et/ou des besoins d'énergie des groupements.

## 6.9. Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord présenté l'implémentation du modèle pour simuler l'ACC grâce à la plateforme SMACH. Elle a été réalisée avec le langage JAVA et elle est basée sur l'articulation entre deux pas de temps dits de simulation et de comptage respectivement. La structure mise en œuvre permet facilement et rapidement d'ajouter de nouvelles organisations des échanges ou politiques de décision. Ainsi, il est possible d'implémenter de nouvelles organisations des échanges ou des politiques de décision en fonction des besoins des experts du domaine de l'énergie et des hypothèses qu'ils souhaitent étudier. Nous avons ensuite présenté les résultats de plusieurs configurations qui permettent de répondre à des questions métiers en lien avec l'ACC. Pour cela, la simulation d'une situation de référence a d'abord été effectuée. L'objectif était de montrer que le modèle d'ACC est capable de modéliser de nombreuses configurations d'ACC que ce soit en termes de population, d'équipements ou encore d'organisations des échanges d'énergie entre les foyers. Ces différentes configurations ont permis d'étudier l'impact des échanges d'énergie, du stockage ou encore de politiques de décision sur la manière dont l'énergie est consommée au sein d'un groupement et sur les gains et dépenses des foyers. Le Tableau 18 donne les valeurs moyennes des indicateurs annuels pour les foyers d'un groupement avec une organisation proportionnelle des échanges d'énergie. Pour chaque indicateur, nous avons indiqué en vert les configurations permettant d'obtenir le meilleur résultat sachant que nous considérons que l'objectif est, pour les foyers de chaque groupement, de maximiser leur taux d'autoproduction, leur taux d'autoconsommation ainsi que leurs gains financiers et de minimiser leur facture d'énergie.

	Groupement avec des systèmes de production d'énergie individuels	Groupement avec des systèmes de production d'énergie individuels et des systèmes de stockage d'énergie individuel	Groupement avec des systèmes de production d'énergie individuels et un système de stockage d'énergie collectif	Quartier performant équipé d'un système de production d'énergie collectif	Groupement avec système de production d'énergie individuel et des foyers appliquant une politique de décision sur le pilotage des équipements électriques
Taux d'autoproduction	26%	30%	51 %	32%	29%
Taux d'autoconsommation	20%	55%	20%	X	23%
Facture d'énergie	374 €	217 €	256 €	230€	380 €
Gains financiers	360 €	202 €	180 €	X	344 €

Tableau 18 : Valeur moyenne annuelle des indicateurs pour les configurations étudiées avec une organisation proportionnelle des échanges de l'énergie

L'analyse des valeurs portées dans le Tableau 18 amènent plusieurs conclusions.

L'utilisation de systèmes de stockage d'énergie individuels permet à la fois d'obtenir le taux d'autoconsommation moyen le plus élevé et la facture moyenne la plus basse. Avec un système de stockage d'énergie collectif, le meilleur taux d'autoproduction est obtenu. Par ailleurs, un groupement uniquement équipé de systèmes de production d'énergie individuels a pour résultat, en moyenne, la facture la plus basse. Ce type d'étude a pour avantage d'avoir une première vision de la manière dont les indicateurs sont impactés par différentes variantes d'ACC. Cependant, de tels indicateurs moyens ne permettent pas d'avoir une vision précise des indicateurs dans le groupement. Par exemple même si l'utilisation de batteries individuelles permet d'obtenir la facture moyenne d'énergie la plus basse, nous avons montré que cela se fait aux dépens des foyers ne possédant pas de tels équipements, qui vont avoir une facture plus élevée que dans un groupement sans systèmes de stockage individuels. Ce type de résultats montre également l'importance de prendre en compte les objectifs des foyers lors de la mise en place de l'ACC dans un groupement. Pour un groupement où l'objectif des foyers serait uniquement d'augmenter leur taux d'autoconsommation individuel, l'utilisation de systèmes de stockage individuels est, d'après nos résultats, une solution à envisager. Par contre, dans le cadre d'un groupement recherchant une forme d'équité sur les factures et les taux d'autoproduction entre les foyers qui le compose, l'absence de systèmes de stockage individuels, l'utilisation d'un système de stockage collectif ou encore l'utilisation d'un système de production collectif de l'énergie sont, pour notre situation de référence, des solutions plus pertinentes.

# Conclusion et perspectives

*N'oublie jamais, celui qui croit savoir n'apprend plus*

Pierre Bottero

## 7.1. Conclusion

Dans cette thèse, nous avons proposé un modèle afin de simuler l'ACC du secteur résidentiel en lien avec l'activité humaine des habitants du foyer. Plus précisément, nous avons modélisé la couche contractuelle de l'ACC, responsable des échanges d'énergie sous la forme d'une opération de comptage. Notre travail s'inscrit dans l'évolution de la plateforme de simulation multi-agent SMACH, développée par la R&D d'EDF. Cette plateforme est centrée sur la reproduction de l'activité humaine, co-simulée avec un modèle de thermique du bâtiment afin de simuler la consommation électrique des foyers. Elle permet de produire des diagrammes d'activité et des courbes de charge par individu et par foyer qui sont représentatifs de la population française, cohérents avec les modèles de bâtiment, d'équipement et de composition du foyer, et munis d'une variabilité au cours du temps qui rend chaque exécution unique. Ainsi, l'originalité du modèle de simulation de l'ACC pour le secteur résidentiel repose sur une simulation réaliste de l'activité humaine et de la consommation électrique des foyers. Cette prise en compte de l'activité humaine afin de simuler l'ACC n'a pas encore été, à notre connaissance, intégrée dans par les différents travaux traitants de la simulation de l'ACC.

Dans un premier temps, nous avons proposé un modèle multi-agent et multi-niveau, fondé sur la notion de *groupement*, qui permet de simuler l'ACC. Ce modèle d'échange d'énergie repose sur l'utilisation d'une entité centrale, la place locale d'échange, responsable des échanges contractuels d'énergie entre producteurs et consommateurs. Ainsi, il permet de simuler une opération d'allocation centralisée de l'énergie entre différents niveaux. Les deux premiers niveaux simulent l'activité humaine individuelle ainsi que le foyer. Le troisième niveau représente le groupement de foyers pratiquant l'ACC. Enfin, le quatrième niveau modélise les échanges d'énergie entre des groupements.

Nous avons ensuite proposé plusieurs organisations des échanges. L'objectif de telles organisations est de représenter différentes formes de règles contractuelles que va pouvoir suivre une place locale d'échange pour gérer les échanges d'énergie entre les producteurs et consommateurs. Dans ce travail, nous proposons trois organisations des échanges à savoir à taux fixe, proportionnelle et concurrentielle. Cependant, d'autres manières d'échanger de l'énergie pourraient exister ou être imaginées et, dans ce cas, peuvent être implémentées dans le modèle. Nous avons également proposé dans ce

manuscrit la notion de politique de décision. Une politique de décision est un concept permettant de modéliser une prise de décision des habitants d'un foyer ou d'un groupement en relation avec l'autoconsommation individuelle ou collective d'énergie. Dans nos travaux, nous avons défini trois éléments en lien avec l'ACC sur lesquels des décisions peuvent être prises. Le premier porte sur la part maximale d'énergie qu'un foyer peut autoconsommer. Le second porte sur le fonctionnement des batteries individuelles ou collectives. Le troisième porte sur le pilotage des appareils électriques présents dans les foyers. Cette notion de politique de décision nous permet de faire le lien entre l'ACC et l'activité humaine et donc de pouvoir simuler différentes prises de décisions des habitants des foyers en lien avec l'ACC. La définition formelle et l'implémentation des organisations des échanges et des politiques de décision permettent de facilement implémenter de nouvelles manières d'échanger l'énergie ou de prendre des décisions à l'échelle des foyers ou du groupement.

Enfin, dans le dernier chapitre, nous avons mis en avant les possibilités offertes par le modèle d'ACC. Nous avons montré que la plateforme SMACH complétée par le modèle d'ACC permet de simuler de nombreuses configurations en termes de population, d'équipements techniques ou encore d'organisation des échanges. Nous avons ainsi montré que cet outil est capable de répondre à des questions d'intérêts métiers en lien avec l'ACC.

Dans cette thèse, nous nous sommes donc attachés à présenter un outil permettant de simuler l'ACC au sein du secteur résidentiel, tout en offrant une très grande liberté dans la définition des configurations qui peuvent être simulées. Cependant, nos discussions avec les experts de l'énergie sur l'ACC nous ont permis d'identifier plusieurs perspectives à ce travail en relation avec les besoins métiers autour de l'ACC. Nous présentons ci-après deux évolutions possibles de notre modèle pour prendre en compte le secteur tertiaire et le véhicule électrique. Ces questions feront l'objet de travaux à court ou moyen terme au sein de la R&D d'EDF. Nous discutons ensuite de la comparaison de nos résultats de simulation avec des infrastructures existantes. Enfin, nous présentons une réflexion à plus long terme sur l'impact de l'ACC sur la modélisation de l'activité.

## 7.2. Etude de l'ACC incluant le secteur tertiaire

En 2017, le secteur tertiaire était en France le second consommateur d'électricité avec 30% de la consommation électrique française<sup>15</sup>. La prise en compte du secteur tertiaire concomitamment avec le secteur résidentiel dans les simulations de l'ACC est un enjeu

---

<sup>15</sup> <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/le-developpement-durable/la-consommation-d-electricite-en-chiffres>

important pour les experts de l'énergie. Tout d'abord, la proximité géographique entre les bâtiments des secteurs résidentiel et tertiaire, en particulier en ville fait qu'ils vont participer ensemble à l'ACC. De plus, les commerces et bureaux qui composent la majorité du secteur tertiaire consomment, à la différence de beaucoup de foyers résidentiels, de l'électricité durant la journée et peuvent donc absorber le surplus de production de moyens de production situés au sein du secteur résidentiel. Le secteur tertiaire, en particulier les grandes surfaces, peut également être producteur d'énergie en installant, par exemple, des panneaux PV sur leurs toits ou parkings. Le surplus de cette production pourrait alors être échangé grâce à l'ACC avec d'autres bâtiments du secteur tertiaire ou des habitations. Afin de montrer que les capacités du modèle d'ACC développé nous permettent d'étudier également cette problématique, nous avons réalisé une simulation d'un groupement pratiquant l'ACC, composé de 50 foyers et d'un supermarché de 600 m<sup>2</sup>. Les données de consommations d'énergie du supermarché proviennent d'une étude réalisée par l'ADEME Picardie <sup>16</sup>. La Figure 117 présente la courbe de charge simplifiée d'une semaine à savoir du lundi 30 juillet au dimanche 06 août année 2018.

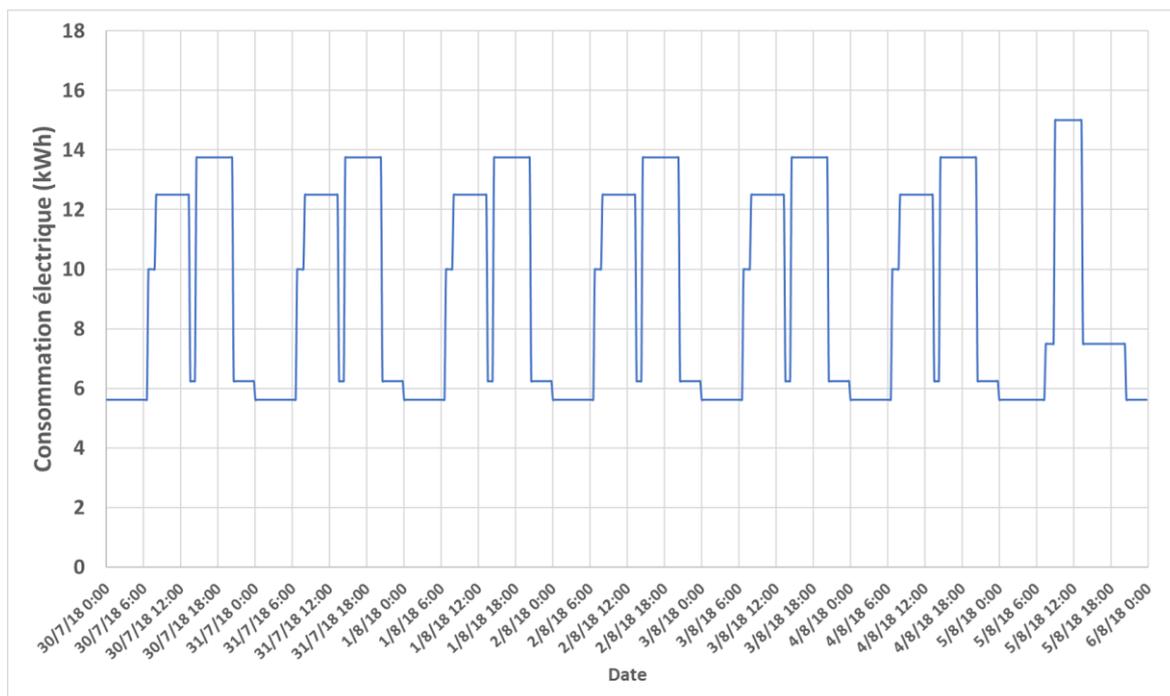


Figure 117 : Courbe de charge de la consommation électrique du supermarché du 30 juillet minuit au 06 août minuit <sup>17</sup>

<sup>16</sup> [https://sites.uclouvain.be/energie-plus/fileadmin/resources/04\\_technique/14\\_froid\\_alimentaire/Etudes/monitoring\\_supermache.pdf](https://sites.uclouvain.be/energie-plus/fileadmin/resources/04_technique/14_froid_alimentaire/Etudes/monitoring_supermache.pdf)

<sup>17</sup> Du lundi au samedi, le supermarché est ouvert de 8h00 à 13h30 et de 14h30 à 20h00. La pause méridienne entre 13h30 et 14h30 est visible du lundi au samedi sur le graphique et se traduit par une baisse importante de la consommation en milieu de journée. Le dimanche, le supermarché est ouvert de 9h00 à 13h00.

Les 50 foyers que nous simulons possèdent des caractéristiques similaires à celles de notre situation de référence présentée dans la section 6.2.3 du Chapitre 6.

La production dans le groupement est assurée par un ensemble de panneaux PV collectifs d'une puissance totale de 100 kWc. Afin de distribuer l'énergie, la place locale d'échange utilise une organisation proportionnelle des échanges.

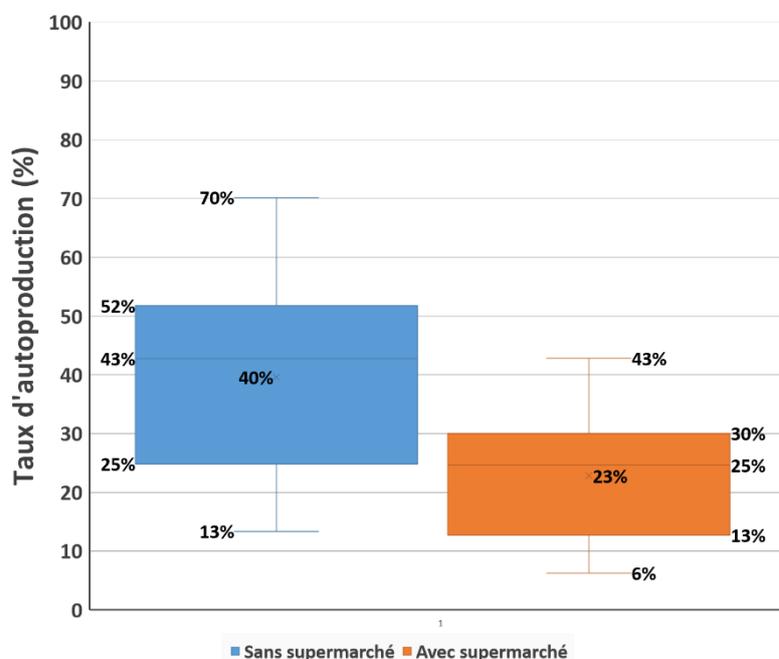


Figure 118 : Distribution des taux d'autoproduction pour une semaine de juillet des foyers dans un groupement sans et avec supermarché

La Figure 118 présente pour toute la durée de la simulation la répartition des taux d'autoconsommation des foyers. On constate que l'ajout du supermarché comme partenaire pour pratiquer l'ACC réduit nettement les taux d'autoproduction de l'ensemble des foyers du groupement. Par exemple, le taux d'autoproduction moyen des foyers du groupement passe de **43%** à **25%** lorsque le supermarché participe à l'ACC. Pour la configuration simulée, le supermarché a un taux d'autoproduction de **35%**. Cette diminution du taux d'autoproduction pour les foyers du groupement est due à l'utilisation d'une organisation proportionnelle des échanges. Avec une telle organisation, le supermarché va, à chaque pas de temps de comptage, récupérer une part importante de l'énergie produite. En effet, sur la semaine, **82%** de l'énergie échangée est consommée par le supermarché, tandis que les 50 foyers n'en consomment que **18%**.

Cependant, d'un point de vue global, l'ajout du supermarché va avoir des impacts différents sur les indicateurs à l'échelle du groupement. Le taux d'autoconsommation globale pour la semaine passe de **29%** sans le supermarché à **93%** quand le supermarché participe à l'ACC. Cette augmentation importante du taux d'autoconsommation du

groupement se traduit également par une baisse du surplus d'énergie du groupement qui doit être revendu au fournisseur d'énergie. En effet, ce surplus passe de **2,03 MWh** sans supermarché à **0,20 MWh** lorsque le supermarché participe à l'ACC. Cependant, le taux d'autoproduction du groupement va quant à lui diminuer de **36%** sans le supermarché à **31%**. Enfin, la présence du supermarché augmente fortement la consommation d'énergie totale du groupement en augmentant de **2,29 MWh** à **8,5 MWh**. Cette croissance importante de la consommation totale d'énergie va donc baisser le taux d'autoproduction du groupement alors que le taux d'autoconsommation augmente quant à lui fortement.

Cet exemple simple permet d'illustrer que l'outil développé peut être une solution adaptée pour d'étudier la pratique de l'ACC entre secteurs résidentiel et tertiaire. Pour cet exemple, l'ajout du secteur tertiaire associé à une organisation proportionnelle des échanges a pour conséquence de diminuer les taux d'autoproduction de tous les foyers du groupement. A l'aide de cet outil, les experts de l'énergie sont à même d'anticiper ce type de phénomène ou encore de tester différentes organisations des échanges d'énergie dans un groupement associant secteurs tertiaire et résidentiel. L'étude de cette complémentarité entre ces secteurs est une question importante que l'outil permet donc de traiter en considérant de nombreuses configurations. Cela devrait faire l'objet de travaux plus approfondis tout d'abord afin de formaliser et développer un modèle permettant de mettre en relation le secteur résidentiel avec plusieurs bâtiments issus du secteur résidentiel. Le développement de nouvelles organisations des échanges est également une question qui devra être abordée afin de simuler les échanges d'énergie dans de nouvelles configurations mêlant secteur tertiaire et secteur résidentiel.

### 7.3. Intégration des véhicules électriques

L'intégration des véhicules électriques dans le modèle d'ACC représente aussi une perspective importante d'un point de vue métier. En effet il s'agit non seulement d'un équipement électrique qui consomme de l'énergie, mais aussi d'un système que les habitants du foyer peuvent utiliser pour stocker de l'énergie. Les véhicules électriques vont donc impacter la consommation en électricité du foyer en fonction de l'usage qu'en font les habitants.

La première étape pour intégrer les véhicules électriques dans le modèle est nécessairement le développement d'un modèle des véhicules électriques en considérant sa capacité de stockage, sa consommation d'énergie pour la charge et la quantité d'énergie qu'il consomme lorsqu'il est utilisé. Ensuite, il est nécessaire de prendre en compte l'utilisation du véhicule électrique dans le modèle des activités des habitants. Par exemple, les heures d'utilisation et le nombre de kilomètres parcouru pour calculer la

quantité d'énergie consommée. Ce travail d'intégration des véhicules électriques est déjà en cours au sein de la plateforme SMACH.

La prise en compte des véhicules électriques pour des foyers pratiquant l'ACI ou l'ACC amène des problématiques spécifiques. En effet, les véhicules électriques peuvent être utilisés comme des batteries permettant de stocker ou de fournir de l'énergie au foyer. Cependant, il s'agit de batteries qui peuvent être absentes ou présentes au foyer en fonction de l'usage que font les habitants des véhicules. Ces derniers vont donc inciter les habitants à prendre des décisions :

- Sur la manière dont les véhicules vont être alimentés : Doivent-ils consommer de l'énergie provenant du réseau, des échanges au sein du groupement ou de la production individuelle du foyer ?
- Sur l'usage qu'ils vont faire de l'énergie issues des batteries des véhicules électriques : En effet, pour un foyer pratiquant l'ACI, l'énergie des batteries des véhicules électriques peut être utilisée par les véhicules eux-mêmes, pour alimenter les besoins en énergie du foyer ou être revendue au réseau. Pour un foyer pratiquant l'ACC, les habitants peuvent également prendre la décision d'échanger l'énergie des batteries des véhicules électriques avec leurs voisins.

La mise en place de ses prises de décision peut également impacter l'activité humaine au sein d'un foyer. Par exemple, si les véhicules électriques ne sont pas présents au foyer ou si leur niveau de charge est trop bas, les habitants du foyer peuvent s'interdire de réaliser certaines activités consommatrices d'électricité.

L'intégration des véhicules électriques nécessite donc une modification importante du modèle d'activité humaine et du modèle d'ACC que nous avons développé. En nous appuyant sur les politiques de décision présentées au chapitre 5, nous pensons que l'outil de d'ACC développé ici peut servir de base à l'étude de nouvelles pratiques et de nouveaux usages liés à l'utilisation des véhicules électriques.

## 7.4. Validation du modèle d'ACC

La validation d'un modèle de simulation tel que celui que nous avons développé ne peut pas se faire uniquement sur la base d'études de cas typiques simulés. En effet, une étape importante est la confrontation des résultats à des faits observés dans la littérature et à des pratiques et données observées sur le terrain. C'est une étape qu'il est encore nécessaire de réaliser.

Dans le chapitre 6, nous avons défini deux indicateurs importants en lien avec l'ACC et que nous pouvons calculer avec les résultats issus du modèle d'ACC à savoir les taux

d'autoproduction et d'autoconsommation. Le processus de validation que nous souhaitons mettre en place consisterait à simuler une situation réelle d'ACC pour ensuite comparer les taux d'autoconsommation et d'autoproduction simulés à ceux mesurés sur le terrain.

Pour mener à bien cette validation, il est nécessaire d'avoir accès tout d'abord aux données de consommation réelles des foyers participant l'ACC. À partir de ces données, il sera alors possible de comparer les taux d'autoproduction et d'autoconsommation mesurés aux valeurs prédites par le modèle d'ACC.

Afin de pouvoir simuler le groupement et les foyers qui le composent, nous avons également besoin de leurs caractéristiques. Pour chaque foyer, par exemple, il faut connaître le type d'habitation, les caractéristiques de ses habitants (nombre, âge, sexe, catégorie socioprofessionnelle...), les caractéristiques du bâtiment (surface, performance thermique...), les appareils électriques, le contrat d'électricité... mais aussi les équipements de production et/ou de stockage d'énergie que peuvent posséder les foyers. Pour le groupement, les caractéristiques des systèmes de production et/ou de stockage collectif ainsi que l'organisation des échanges utilisés sont les entrées dont nous aurons besoin. À partir de ces données, nous serons alors capables de simuler de manière précise le groupement, les foyers, les bâtiments, les appareils électriques, les systèmes de production et les systèmes de stockage.

Nous n'avons pas pu mettre en œuvre un tel processus de validation au cours de notre thèse. En effet, l'ACC reste aujourd'hui très peu développée, ce qui complique l'accès aux données nécessaires à la validation d'un modèle d'ACC. Cependant, l'ACC constitue une nouvelle manière de consommer de l'énergie qui est en plein essor et nous envisageons dans un futur proche de pouvoir avoir accès à des données non confidentielles permettant de réaliser la validation du modèle d'ACC développé dans le cadre de ce travail.

## 7.5. Développement d'un nouveau modèle d'activité humaine

Un point important à rappeler est que, tout au long de nos travaux, nous n'avons considéré que l'impact de l'activité humaine sur l'ACC. Or, l'ACC et l'activité humaine sont en réalité étroitement liées et vont s'influencer mutuellement. La notion de politique de décision développée dans le chapitre 5 est une première approche pour considérer l'impact que peut avoir l'ACC sur l'activité humaine. Cependant, cette notion ne permet aux habitants que de faire appliquer leurs prises de décision sur des points précis de leur activité comme la gestion des systèmes de stockage ou encore le pilotage de certains appareils électriques. Prendre en compte de manière précise l'impact de l'ACC et de l'ACI sur l'ensemble de l'activité humaine est une perspective importante pour parvenir à une

simulation réaliste de l'activité des habitants, de la consommation d'énergie des foyers et donc de l'ACC. Cela implique donc le développement d'un nouveau modèle d'activité humaine qui prendrait en compte les changements de comportement induits par l'ACC.

Cette perspective d'évolution de la plateforme SMACH permettrait de déterminer de quelle manière la production d'une énergie locale, la présence de systèmes de stockage et les échanges d'énergie entre les foyers vont impacter la manière de vivre des habitants et donc leurs activités. Lors du développement du modèle d'activité humaine actuellement utilisé par la plateforme SMACH, il a fallu répondre à de nombreuses questions pour créer un modèle d'activité humaine réaliste. Par exemple : Pourquoi et à quel moment un habitant prend-il la décision d'ouvrir une fenêtre ? Pourquoi et à quel moment un habitant va-t-il modifier la température de consigne d'une pièce ? Il devient alors nécessaire de se reposer toutes ou une partie de ces questions tout en considérant la production d'une énergie locale, le stockage de cette énergie et les échanges d'énergie. Une des pistes pour obtenir des réponses à ses questions serait de pouvoir observer en situation réelle l'activité humaine et les prises de décision des habitants, dans le cadre d'études ergonomiques terrain.

L'ACC est encore peu répandue dans le secteur résidentiel et observer l'activité humaine dans ces conditions est aujourd'hui complexe. Cependant, l'ACC se développe de plus en plus et la réalisation d'enquêtes à grande échelle similaires aux enquêtes emplois du temps déjà utilisées pour développer la plateforme SMACH pourrait être très utile.

Répondre à toutes ces questions et développer un nouveau modèle d'activité humaine en lien avec l'ACC est donc une perspective importante, c'est cela qui nous permet d'envisager des simulations de l'ACC de plus en plus réalistes. C'est cette même activité humaine qui donne un cadre à l'intégration des modules actuels et futurs (ACC, véhicule électrique, articulation tertiaire/résidentiel...) de la simulation des consommations d'énergies. Cependant, développer un modèle d'activité réaliste est un travail au long cours et qui nécessite une approche fortement pluridisciplinaire. Considérer cette perspective va faire intervenir des connaissances touchant à la fois au domaine de l'ergonomie, de l'énergétique des bâtiments, mais aussi de l'informatique.



## Références

- Abushakra, B., Haberl, J., & Claridge, D. (2004). Overview of existing literature on diversity factors and schedules for energy and cooling load calculations. *ASHRAE Transactions*, *110*, 164–176.
- Aknine, S., Pinson, S., & Shakun, M. F. (2004). An Extended Multi-Agent Negotiation Protocol. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, *8*(1), 5–45. <https://doi.org/10.1023/B:AGNT.0000009409.19387.f8>
- Amouroux, E., Hurau, T., Sempé, F., & Sabouret, N. (2013). SMACH: Simuler l'activité humaine pour limiter les pics de consommation électrique. *Journées Francophones Sur Les Systèmes Multi-Agents (JFSMA)*.
- Ayan, O., & Turkay, B. E. (2017). Smart home energy management technologies based on demand side management and a review of smart plugs with smart thermostats. *2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 1247–1252.
- Azar, E., & Menassa, C. C. (2012). Agent-Based Modeling of Occupants and Their Impact on Energy Use in Commercial Buildings. *Journal of Computing in Civil Engineering*, *26*(4), 506–518. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000158](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000158)
- Bacci, G., Lasaulce, S., Saad, W., & Sanguinetti, L. (2016). Game Theory for Networks: A tutorial on game-theoretic tools for emerging signal processing applications. *IEEE Signal Processing Magazine*, *33*(1), 94–119. <https://doi.org/10.1109/MSP.2015.2451994>
- Bahaj, A., & James, P. (2007). Urban energy generation: The added value of photovoltaics in social housing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *11*(9), 2121–2136. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.03.007>
- Bakaloglou, S., & Charlier, D. (2019). Energy Consumption in the French Residential Sector: How Much do Individual Preferences Matter? *The Energy Journal*, *40*(3). <https://doi.org/10.5547/01956574.40.3.sbak>
- Bellosta, M., Kornman, S., & Vanderpooten, D. (2006). An Agent-Based Mechanism for Autonomous Multiple Criteria Auctions. *2006 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology*, 587–594. <https://doi.org/10.1109/IAT.2006.32>
- Beynier, A., & Estivie, S. (2013). Optimizing distributed resource exchanges in multiagent systems under uncertainty. *Distributed and Multi-Agent Planning*, *8*.
- Bonnardot, Z., Haradji, Y., Salembier, P., Prieur, E., & Vial, S. (2020). Anticiper des interactions humaines par le design et l'ergonomie: Le partage d'énergies renouvelables entre voisins. *Actes Du 55ème Congrès de La SELF, L'activité et Ses Frontières. Penser et Agir Sur Les Transformations de Nos Sociétés*.
- Braun, M., Büdenbender, K., Magnor, D., & Jossen, A. (2009). *Photovoltaic self consumption in Germany using Li-ion storage to increase self-consumed PV energy*. 34. [https://www.researchgate.net/profile/Martin\\_Braun5/publication/43248782\\_Photovoltaiic\\_self-consumption\\_in\\_Germany\\_-\\_Using\\_lithium-ion\\_storage\\_to\\_increase\\_self-consumed\\_photovoltaiic\\_energy/links/53e44b590cf21cc29fc8f428/Photovoltaic-self-consumption-in-Germ](https://www.researchgate.net/profile/Martin_Braun5/publication/43248782_Photovoltaiic_self-consumption_in_Germany_-_Using_lithium-ion_storage_to_increase_self-consumed_photovoltaiic_energy/links/53e44b590cf21cc29fc8f428/Photovoltaic-self-consumption-in-Germ)

- Brooks, C. H., & Durfee, E. H. (2002). Congregating and market formation. *Proceedings of the First International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems: Part 1*, 96–103.
- Castillo-Cagigal, M., Gutiérrez, A., Monasterio-Huelin, F., Caamaño-Martín, E., Masa, D., & Jiménez-Leube, J. (2011). A semi-distributed electric demand-side management system with PV generation for self-consumption enhancement. *Energy Conversion and Management*, 52(7), 2659–2666. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.01.017>
- Chapman, J., Siebers, P.-O., & Robinson, D. (2018). On the multi-agent stochastic simulation of occupants in buildings. *Journal of Building Performance Simulation*, 11(5), 604–621. <https://doi.org/10.1080/19401493.2017.1417483>
- Chevaleyre, Y., Dunne, P. E., Endriss, U., Lang, J., Lemaitre, M., Maudet, N., Padget, J., Phelps, S., Rodriguez-Aguilar, J. A., & Sousa, P. (2006). Issues in Multiagent Resource Allocation. *Informatica*, 30, 3–31.
- Chwieduk, D. (2003). Towards sustainable-energy buildings. *Applied Energy*, 76(1–3), 211–217.
- Clevenger, C., & Haymaker, J. (2006). The impact of the occupant on building energy simulations. *Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering, Montreal, Canada*.
- Curtil, P., Laulan, F., Ryckbosch, J., & Jacquemart, F. (2020). *L'autoconsommation collective en pratique*. [https://www.assises-energie.net/fileadmin/Assises\\_energie/Actualites\\_stockage/Edition\\_2020\\_Bordeaux/l30\\_-\\_Autoconsommation\\_collective\\_en\\_pratique.pdf](https://www.assises-energie.net/fileadmin/Assises_energie/Actualites_stockage/Edition_2020_Bordeaux/l30_-_Autoconsommation_collective_en_pratique.pdf)
- Darakdjian, Q. (2017). *Prédiction des performances énergétiques des bâtiments avec prise en compte du comportement des usagers* [Phdthesis, Université de La Rochelle]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01753830>
- De Laroche Lambert, T. (2020). *La chaleur et le froid dans la transition énergétique*. <https://doi.org/10.25855/SFT2020-133>
- de Menezes, A. C. K., Cripps, A., Bouchlaghem, D., & Buswell, R. (2012). *Predicted vs. actual energy performance of non-domestic buildings: Using post-occupancy evaluation data to reduce the performance gap*. [https://repository.lboro.ac.uk/articles/Predicted\\_vs\\_actual\\_energy\\_performance\\_of\\_non-domestic\\_buildings\\_using\\_post-occupancy\\_evaluation\\_data\\_to\\_reduce\\_the\\_performance\\_gap/9452129](https://repository.lboro.ac.uk/articles/Predicted_vs_actual_energy_performance_of_non-domestic_buildings_using_post-occupancy_evaluation_data_to_reduce_the_performance_gap/9452129)
- de Vries, S., & Vohra, R. V. (2003). Combinatorial Auctions: A Survey. *INFORMS Journal on Computing*, 15(3), 284–309. <https://doi.org/10.1287/ijoc.15.3.284.16077>
- Decker, K., Lesser, V., Prasad, M. N., & Wagner, T. (1995). MACRON: an architecture for multi-agent cooperative information gathering. *Proceedings of the CIKM-95 Workshop on Intelligent Information Agents*, 13–80.
- Dellarocas, C., & Klein, M. (2000). Civil Agent Societies: Tools for Inventing Open Agent-Mediated Electronic Marketplaces. In A. Moukas, F. Ygge, & C. Sierra (Eds.), *Agent Mediated Electronic Commerce II* (Vol. 1788, pp. 24–39). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/10720026\\_2](https://doi.org/10.1007/10720026_2)
- Denholm, P., Ela, E., Kirby, B., & Milligan, M. (2010). The Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation. *Technical Report*, 61.

- Fang, Z., Li, N., Li, B., Luo, G., & Huang, Y. (2014). The effect of building envelope insulation on cooling energy consumption in summer. *Energy and Buildings*, 77, 197–205. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.030>
- Feldman, M. S., & Pentland, B. T. (2003). Reconceptualizing Organizational Routines as a Source of Flexibility and Change. *Administrative Science Quarterly*, 48(1), 94. <https://doi.org/10.2307/3556620>
- Femia, N., Toledo, D., & Zamboni, W. (2013). Storage unit and load management in photovoltaic inverters for residential application. *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 6800–6805. <https://doi.org/10.1109/IECON.2013.6700258>
- Ferber, Jacques. (1999). *Multi-agent systems: An introduction to distributed artificial intelligence*. Addison-Wesley. <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/4/2/reviews/rouchier.html>
- Ferreri, E. (2017). *Modélisation et simulation des comportements en lien avec les consommations électriques dans le secteur résidentiel*.
- Ferreri, E., Salotti, J. M., & Favier, P. A. (2015). Behavioural approach for the simulation of electrical consumption at the neighbourhood level. *International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology*, 16(3), 12.1-12.8. <https://doi.org/10.5013/IJSSST.a.16.03.12>
- Ferreri, E., Salotti, J.-M., & Favier, P.-A. (2017). *PREDICTION OF ELECTRICAL CONSUMPTIONS USING A BIO-INSPIRED BEHAVIORAL MODEL*.
- Fisher, K. (1999). Agent-based design of holonic manufacturing systems. *Robotics and Autonomous Systems*, 27(1–2), 3–13. [https://doi.org/10.1016/S0921-8890\(98\)00079-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8890(98)00079-7)
- Fiske, S. T., & Neuberg, S. L. (1989). Category-Based and Individuating Processes as a Function of Information and Motivation: Evidence from Our Laboratory. In D. Bar-Tal, C. F. Graumann, A. W. Kruglanski, & W. Stroebe (Eds.), *Stereotyping and Prejudice: Changing Conceptions* (pp. 83–103). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3582-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3582-8_4)
- Fréchet, M. M. (1906). Sur quelques points du calcul fonctionnel. *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*, 22(1), 1–72. <https://doi.org/10.1007/BF03018603>
- Gaetani, I., Hoes, P.-J., & Hensen, J. L. M. (2016). Occupant behavior in building energy simulation: Towards a fit-for-purpose modeling strategy. *Energy and Buildings*, 121, 188–204. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.038>
- Garrido-Lucero, F., Beaudé, O., & Wan, C. (2019). Analysis and design of a self-consumption community: A game-theoretic approach. *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2019.8783818>
- Ghiani, E., Giordano, A., Nieddu, A., Rosetti, L., & Pilo, F. (2019). Planning of a Smart Local Energy Community: The Case of Berchidda Municipality (Italy). *Energies*, 12(24), 4629. <https://doi.org/10.3390/en12244629>
- Gode, D. K., & Sunder, S. (1993). Allocative efficiency of markets with zero-intelligence traders: Market as a partial substitute for individual rationality. *Journal of Political Economy*, 101(1), 119–137.

- Gölcü, M., Dombayci, Ö., & Abali, S. (2006). The effect and results of the optimum insulation thickness on energy saving for denizli. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 21, 639–644.
- Grandjean, A. (2013). *Introduction de non linéarités et de non stationnarités dans les modèles de représentation de la demande électrique résidentielle* [Phdthesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris]. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00817969>
- Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat, Pachauri, R. K., & Meyer, L. A. (2014). *Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse : contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. GIEC.
- Happle, G., Fonseca, J. A., & Schlueter, A. (2017). Effects of air infiltration modeling approaches in urban building energy demand forecasts. *Energy Procedia*, 122, 283–288. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.323>
- Happle, G., Fonseca, J. A., & Schlueter, A. (2018). A review on occupant behavior in urban building energy models. *Energy and Buildings*, 174, 276–292. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.030>
- Haradji, Y., Guibourdenche, J., Reynaud, Q., Poizat, G., Sabouret, N., Sempé, F., Huraux, T., & Galbat, M. (2018). De la modélisation de l'activité humaine à la modélisation pour la simulation sociale: Entre réalisme et fécondité technologique. *Activités*, 15(15–1). <https://doi.org/10.4000/activites.3106>
- Haradji, Y., Poizat, G., & Sempé, F. (2012a). Human activity and social simulation. In *Advances in applied human modeling and simulation* (pp. 416–425). CRC Press.
- Haradji, Y., Poizat, G., & Sempé, F. (2012b). *L'activité humaine et la conception d'une plateforme de simulation sociale*. <https://doi.org/10.4000/activites.3106>
- Hinz, H. (2019). Comparison of Lithium-Ion Battery Models for Simulating Storage Systems in Distributed Power Generation. *Inventions*, 4(3), 41. <https://doi.org/10.3390/inventions4030041>
- Horling, B., & Lesser, V. (2005). A Survey of Multi-Agent Organizational Paradigms. *The Knowledge Engineering Review*, 281–316.
- Horling, B., Mailler, R., Shen, J., Vincent, R., & Lesser, V. (2003). Using Autonomy, Organizational Design and Negotiation in a Distributed Sensor Network. In V. Lesser, C. L. Ortiz, & M. Tambe (Eds.), *Distributed Sensor Networks: A Multiagent Perspective* (pp. 139–183). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0363-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0363-7_8)
- Huraux, T. (2015). *Simulation multi-agent d'un système complexe: Combiner des domaines d'expertise par une approche multi-niveau. Le cas de la consommation électrique résidentielle*. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01371571>
- Huraux, T., Sabouret, N., Haradji, Y., & Sempé, F. (2015). *Simulations multi-agents de l'activité humaine: Application dans le contexte énergétique résidentiel français*.
- Jacob, S. (2015). *Stochastic Modelling of Occupants' Activities and Related Behaviours*. The University of Nottingham.
- Janda, K. B. (2011). Buildings don't use energy: People do. *Architectural Science Review*, 54(1), 15–22.
- Jennings, N. R. (1995). Controlling cooperative problem solving in industrial multi-agent systems using joint intentions. *Artificial Intelligence*, 75(2), 195–240. [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(94\)00020-2](https://doi.org/10.1016/0004-3702(94)00020-2)

- Kashif, A., Hoa, X., Le, B., Dugdale, J., & Ploix, S. (2011). Agent Based Framework to simulate inhabitant's behavior in domestic settings for energy management. *Proceedings of the 3rd International Conference on Agents and Artificial Intelligence - Volume 1: ICAART*, 190–199. <https://doi.org/10.5220/0003150301900199>
- Kashif, A., Ploix, S., Dugdale, J., & Le, X. H. B. (2013). Simulating the dynamics of occupant behaviour for power management in residential buildings. *Energy and Buildings*, 56, 85–93. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2012.09.042>
- Keirstead, J. (2007). Behavioural responses to photovoltaic systems in the UK domestic sector. *Energy Policy*, 35(8), 4128–4141. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.02.019>
- Kim, J., & Moon, J. W. (2009). *Impact of Insulation on Building Energy Consumption*.
- Kim, Ren, S., Van Der Schaar, M., & Lee, J. W. (2013). Bidirectional energy trading for residential load scheduling and electric vehicles. *Proceedings - IEEE INFOCOM*, 31(7), 595–599. <https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2013.6566842>
- Küpper, G., Cavarretta, M. C., Ehrenmann, A., Naffah, E., Szilagyi, J., Guldentops, D., Rozain, N., & Charlier, L. (2018). *Format and procedures for electricity and gas data access and exchange in member States. Final Report* (p. 156). [https://asset-ec.eu/wp-content/uploads/2018/11/20180405-Data-Format-and-Procedures.Final-report.Tractebel.vf\\_corrected-format.pdf](https://asset-ec.eu/wp-content/uploads/2018/11/20180405-Data-Format-and-Procedures.Final-report.Tractebel.vf_corrected-format.pdf)
- Lacomme, L. (2011). Un modèle générique pour les organisations dynamiques en univers multi-agent [Thesis, Grenoble]. In [Http://www.theses.fr](http://www.theses.fr). <http://www.theses.fr/2011GREN067>
- Lampropoulos, I., Kling, W. L., Ribeiro, P. F., & Berg, J. van den. (2013). History of demand side management and classification of demand response control schemes. *2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. <https://doi.org/10.1109/PESMG.2013.6672715>
- Lee, W., Xiang, L., Schober, R., & Wong, V. W. S. (2014). Direct Electricity Trading in Smart Grid: A Coalitional Game Analysis. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 32(7), 1398–1411. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2014.2332112>
- LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte, 2015-992 (2015).
- Luque, A., & Hegedus, S. (Eds.). (2003). *Handbook of photovoltaic science and engineering*. Wiley.
- Luthander, R., Widén, J., Nilsson, D., & Palm, J. (2015). Photovoltaic self-consumption in buildings: A review. *Applied Energy*, 142, 80–94. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.028>
- Martin, N., & Ruiz, J. M. (2001). Calculation of the PV modules angular losses under field conditions by means of an analytical model. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 70(1), 25–38. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00408-6](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00408-6)
- Mengelkamp, E., Gärtner, J., Rock, K., Kessler, S., Orsini, L., & Weinhardt, C. (2018). Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid. *Applied Energy*, 210, 870–880. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.054>
- Morvan, G., Veremme, A., & Dupont, D. (2011). IRM4MLS: The influence reaction model for multi-level simulation. *ArXiv:1310.7951 [Cs]*, 6532, 16–27. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-18345-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-18345-4_2)

- Munkhammar, J., Grahn, P., & Widén, J. (2013). Quantifying self-consumption of on-site photovoltaic power generation in households with electric vehicle home charging. *Solar Energy*, 97, 208–216. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.08.015>
- Newsham, G. (1994). Manual control of window blinds and electric lighting: Implications for comfort and energy consumption. *Indoor Environment*, 3(3), 135–144.
- Nisan, N. (2000). Bidding and allocation in combinatorial auctions. *Proceedings of the 2nd ACM Conference on Electronic Commerce*, 1–12. <https://doi.org/10.1145/352871.352872>
- Nongaillard, A. (2009). An Agent-Based Approach for Distributed Resource Allocations [Thesis, Lille 1]. In [Http://www.theses.fr](http://www.theses.fr). <http://www.theses.fr/2009LIL10110>
- Norford, L., Socolow, R. H., Hsieh, E. S., & Spadaro, G. (1994). 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(2), 121–131.
- Ouyang, J., & Hokao, K. (2009). Energy-saving potential by improving occupants’ behavior in urban residential sector in Hangzhou City, China. *Energy and Buildings*, 41(7), 711–720. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.02.003>
- Palensky, P., & Dietrich, D. (2011). Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(3), 381–388. <https://doi.org/10.1109/TII.2011.2158841>
- Picault, S., & Mathieu, P. (2011). *An Interaction-Oriented Model for Multi-Scale Simulation*. 332–337. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00826401>
- Plessis, G., Amouroux, E., & Haradji, Y. (2014). Coupling occupant behaviour with a building energy model—A FMI application. *Modelica Conference 2014*, 321–326. <https://doi.org/10.3384/ECP14096321>
- Plessis, G., Kaemmerlen, A., & Lindsay, A. (2014). *BuildSysPro: A Modelica library for modelling buildings and energy systems*. <https://doi.org/10.3384/ECP140961161>
- Ramadesigan, V., Northrop, P. W. C., De, S., Santhanagopalan, S., Braatz, R. D., & Subramanian, V. R. (2012). Modeling and Simulation of Lithium-Ion Batteries from a Systems Engineering Perspective. *Journal of The Electrochemical Society*, 159(3), R31–R45. <https://doi.org/10.1149/2.018203jes>
- Reynaud, Q., Albouys-Perrois, J., Haradji, Y., Inard, C., Sabouret, N., Schumann, M., & Sempé, F. (2020). L’apport de la modélisation multi-agent dans la prédiction de la consommation d’énergie des bâtiments résidentiels. *IBPSA 2020 France*.
- Reynaud, Q., Haradji, Y., Sempé, F., & Sabouret, N. (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*, 67–77. <https://doi.org/10.5220/0006189100670077>
- Reynaud, Q., Sempé, F., Haradji, Y., & Sabouret, N. (2017). Simuler l’activité humaine en combinant un système multi-agent avec des approches statistiques basées sur les « enquêtes emploi du temps ». *Journées Francophones Sur Les Systèmes Multi-Agents (JFSMA 2017)*.
- RTE. (2019). *Panorama de l’électricité renouvelable au 31 décembre 2019* (p. 52). [https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-06/Panorama%20de%20l%27%C3%A9lectricit%C3%A9%20renouvelable%20au%2031%20d%C3%A9cembre%202019\\_0.pdf](https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-06/Panorama%20de%20l%27%C3%A9lectricit%C3%A9%20renouvelable%20au%2031%20d%C3%A9cembre%202019_0.pdf)

- Salembier, P., Dugdale, J., Frejus, M., & Haradji, Y. (2009). A descriptive model of contextual activities for the design of domestic situations. *ECCE*, 13.
- Saltelli, A. (2002). Sensitivity Analysis for Importance Assessment. *Risk Analysis*, 22(3), 579–590. <https://doi.org/10.1111/0272-4332.00040>
- Sandholm, T. (1993). An Implementation of the Contract Net Protocol Based on Marginal Cost Calculations. *AAAI*.
- Sandholm, T. (2002). Algorithm for optimal winner determination in combinatorial auctions. *Artificial Intelligence*, 135(1–2), 1–54. [https://doi.org/10.1016/S0004-3702\(01\)00159-X](https://doi.org/10.1016/S0004-3702(01)00159-X)
- Schyns, D., Tounquet, F., Ramaswamy, P. C., Bressinck, S., & Giordano, V. (2018). SIZING AND DISPATCHING OF LOCAL ENERGY COMMUNITIES TO ASSESS THEIR POTENTIAL ECONOMIC IMPACT THROUGH REGULATION AND COMMUNITY DESIGN. *CIREC Workshop*, 0375, 4.
- Shen, W., & Norrie, D. H. (1998). A hybrid agent-oriented infrastructure for modeling manufacturing enterprises. *Proceedings of the Knowledge Acquisition Workshop (KAW-98)*.
- Sierhuis, M., Clancey, W. J., & Hoof, R. J. J. V. (2007). Brahms: A multi-agent modelling environment for simulating work processes and practices. *International Journal of Simulation and Process Modelling*, 3(3), 134. <https://doi.org/10.1504/IJSPM.2007.015238>
- Smith, R. G. (1980). The contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver. *IEEE Transactions on Computers*, 12, 1104–1113. <https://doi.org/10.1109/TC.1980.1675516>
- Socolow, R. H. (1978). The twin rivers program on energy conservation in housing: Highlights and conclusions. *Energy and Buildings*, 1(3), 207–242. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(78\)90003-8](https://doi.org/10.1016/0378-7788(78)90003-8)
- Soebarto, V. I., & Williamson, T. J. (2001). Multi-criteria assessment of building performance: Theory and implementation. *Building and Environment*, 36(6), 681–690. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00068-8](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00068-8)
- Stephant, M., Hassam-Ouari, K., Abbes, D., Labrunie, A., & Robyns, B. (2018). A survey on energy management and blockchain for collective self-consumption. *2018 7th International Conference on Systems and Control (ICSC)*, 237–243. <https://doi.org/10.1109/ICoSC.2018.8587812>
- Tchappi, I. H., Galland, S., Mualla, Y., Kamla, V. C., Kamgang, J. C., & Najjar, A. (2019). *Modèle Multiniveau Dynamique basé sur la Densité: Application au Trafic Routier à Grande Échelle*. 10.
- Tijani, K., Kashif, A., Ngo, Q. D., Ploix, S., Haas, B., & Dugdale, J. (2014, May). Comparison between purely statistical and multi-agent based approaches for occupant behaviour modeling in buildings. *IBPSA 2014 France*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01212815>
- Tisseau, J. (2001). Réalité virtuelle: Autonomie in virtuo. *Habilitations Diriger Des Recherches, Université de Rennes*, 1.
- Tsvetovat, M., & Carley, K. M. (2004). Modeling complex socio-technical systems using multi-agent simulation methods. *KI*, 18(2), 23–28.
- Tushar, W., Yuen, C., Mohsenian-Rad, H., Saha, T., Poor, H. V., & Wood, K. L. (2018). Transforming energy networks via peer-to-peer energy trading: The potential of

- game-theoretic approaches. *IEEE Signal Processing Magazine*, 35(4), 90–111. <https://doi.org/10.1109/MSP.2018.2818327>
- Van Raaij, W. F., & Verhallen, T. M. M. (1983). A behavioral model of residential energy use. *Journal of Economic Psychology*, 3(1), 39–63. [https://doi.org/10.1016/0167-4870\(83\)90057-0](https://doi.org/10.1016/0167-4870(83)90057-0)
- Vinyals, M., Velay, M., & Sisinni, M. (2018). A multi-agent system for energy trading between prosumers. In S. Omatu, S. Rodríguez, G. Villarrubia, P. Faria, P. Sitek, & J. Prieto (Eds.), *Distributed Computing and Artificial Intelligence, 14th International Conference* (pp. 79–86). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-62410-5\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-62410-5_10)
- Vytelingum, P., Ramchurn, S. D., Voice, T. D., Rogers, A., & Jennings, N. R. (2010). Trading agents for the smart electricity grid. *9th International Conference on AAMAS 2010*, 897–904.
- Weniger, J., Tjaden, T., & Quaschnig, V. (2014). Sizing of Residential PV Battery Systems. *Energy Procedia*, 46, 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.160>
- Widén, J. (2014). Improved photovoltaic self-consumption with appliance scheduling in 200 single-family buildings. *Applied Energy*, 126, 199–212. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.008>
- Wilke, U., Haldi, F., Scartezzini, J.-L., & Robinson, D. (2013). A bottom-up stochastic model to predict building occupants' time-dependent activities. *Building and Environment*, 60, 254–264. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.10.021>
- Wu, Y., Tan, X., Qian, L., & Tsang, D. H. K. (2015). Optimal management of local energy trading in future smart microgrid via pricing. *Proceedings - IEEE INFOCOM, 2015-Augus(1)*, 570–575. <https://doi.org/10.1109/INFCOMW.2015.7179446>
- Yaagoubi, N., & Mouftah, H. T. (2017). Energy trading in the smart grid: A distributed game-theoretic approach. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 40(2), 57–65. <https://doi.org/10.1109/CJECE.2016.2583923>
- Yadgar, O., Kraus, S., & Ortiz, C. L. (2003). Scaling-up distributed sensor networks: Cooperative large-scale mobile-agent organizations. In *Distributed Sensor Networks* (pp. 185–217). Springer.
- Yeung, C. S. K., & Poon, A. S. Y. (1999). Game theoretical multi-agent modelling of coalition formation for multilateral trades. *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(3), 929–934. <https://doi.org/10.1109/59.780905>
- Yuan, L., Kang, Y., Wang, S., & Zhong, K. (2017). 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, 559–570. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.012>
- Zimmermann, J.-P., Evans, M., Jonathan, G., Nicola, K., Les, H., Penelope, R., & Chris, E. (2012). *Household Electricity Survey A study of domestic electrical product usage*.



## Simulation multi-agent de l'activité humaine en relation avec l'autoconsommation énergétique des bâtiments à l'échelle du quartier

Nous abordons dans cette thèse la modélisation de l'AutoConsommation Collective d'énergie (ACC) au sein du secteur résidentiel. Alors que l'ACC est vue aujourd'hui comme une nouvelle manière de consommer l'énergie produite localement, nous proposons une approche multi-agent et multi-niveau pour permettre la simulation et l'étude de l'ACC. Notre modèle est basé sur l'utilisation de la plateforme SMACH, une plateforme de simulation multi-agent des activités humaines couplée à un modèle d'énergétique du bâtiment qui permet de simuler la consommation électrique de foyers. En effet, afin d'obtenir une simulation précise de la consommation électrique des foyers, la littérature a montré l'importance de considérer l'activité humaine et le comportement thermique du bâtiment. Néanmoins, cette considération n'est pas prise en compte par les recherches actuelles portant sur la simulation de l'ACC. De plus, ces travaux ne font pas de différences entre les opérations physiques sur l'énergie (consommation, production, stockage...) et les échanges d'énergie entre les foyers qui sont, en réalité, des opérations contractuelles de comptage. Dans nos travaux, nous établissons une distinction claire entre ces deux univers (physique et contractuel) et nous nous concentrons sur la modélisation des échanges contractuels de l'énergie entre les foyers de telle sorte que notre modèle puisse être adapté à n'importe quelle manière de produire, de consommer ou de stocker l'énergie.

Nous proposons ainsi le modèle de groupement qui permet de simuler l'ACC et les échanges d'énergie entre les foyers. Notre modèle repose sur la mise en place d'une organisation collective des échanges d'énergie où une entité centralisée est responsable de l'allocation de l'énergie entre les foyers. Notre modèle permet également de modéliser des solutions techniques liées à l'autoconsommation d'énergie comme le stockage ou encore des prises de décision d'habitants à la suite de l'ajout de l'ACC. Notre modèle permet ainsi donc de simuler un grand nombre de configurations d'ACC d'énergie que ce soit en termes de population, d'équipement ou encore d'organisation des échanges de l'énergie. Afin d'illustrer ces possibilités, nous présentons les résultats de différents cas d'étude qui répondent à chaque fois à une question métier, en lien avec l'autoconsommation collective, pour des experts du domaine de l'énergie. Nous montrons pour chaque cas d'étude, l'impact de l'organisation des échanges d'énergie ou de différentes solutions techniques, comme le stockage, sur les échanges et la consommation d'énergie, mais aussi sur les factures d'électricité et les gains financiers au sein d'un groupement de foyers pratiquant l'ACC.

Mots clés : simulation multi-agent, simulation de l'activité humaine, consommation énergétique, autoconsommation collective,

## Multi-agent simulation of human activity in relation to energy self-consumption in buildings at the district scale

In this thesis we deal with energy Collective Self-Consumption (CSC) modelling in the residential sector. While CSC is today seen as a new way to consume locally produced energy, we propose a multi-agent and multi-level approach to simulate and study CSC. Our model is based on the use of the SMACH platform. This is a multi-agent simulation of the human activity combined with an energetic building model which enables to simulate the electricity consumption of households. Indeed, in order to obtain a precise simulation of the electricity consumption, the literature has already shown the necessity to consider the human activity of the inhabitants and the thermal behaviour of the building. However, this consideration is not taken into account by the current research on the CSC simulation. Moreover, these studies do not distinguish the physical operation on the electricity (consumption, production, storage...) and the energy exchanges between the households which are, in reality, contractual and counting operations. In our work, we clearly distinguish between these two domains (physical and contractual) and we focus on the modelling of the contractual energy exchanges between the households so that our model can be adapted to any way of producing, consuming or storing energy.

Therefore, we propose the association model which makes it possible to simulate the CSC and energy exchanges between households. Our model is based on the establishment of a collective organisation of energy exchanges in which a centralised entity is responsible for the allocation of energy between households. Our model also enables to model technical solutions related to energy self-consumption such as storage systems or decision-making by inhabitants following the addition of CSC. Thus, our model enables the simulation of a large number of CSC configurations, either in terms of population, equipment or energy exchange policies. In order to illustrate these possibilities, we expose the results of different case studies which answer important and related collective self-consumption questions for energy experts. For each case study, we illustrate the impact of the exchange policies or of different technical solutions, such as storage, on the exchanges and consumption of energy, but also on energy bills and financial gains within a group of households practising CSC.

Keywords : multi-agent simulation, human activity simulation, energy consumption, collective self-consumption



LaSIE (Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur  
pour l'Environnement)

Pôle Sciences et Technologie, Avenue Michel Crépeau  
17042 LA ROCHELLE CEDEX

