

Modélisation de l'activité humaine dans la simulation du partage d'énergie au sein d'une communauté renouvelable : prise en compte de profils de consommateurs.

Xaviera Calixte, Université de Liège (Belgique), xaviera.calixte@uliege.be
Raihana Allani, Université de Liège (Belgique), r.allani@uliege.be
Pierre Leclercq, Université de Liège (Belgique), pierre.leclercq@uliege.be

Mots clés : Analyse de l'activité, modélisation de l'activité, théorie de l'activité, CER, profils consommateur, Dynamique des Système Complexe

Résumé : L'optimisation du partage d'énergie renouvelable dans les Communautés d'Énergie Renouvelable (CER) repose sur la mutualisation des profils de consommation. Cependant, l'intégration des comportements humains dans les modèles de simulation reste un défi. Nous proposons un modèle théorique, le *Trèfle Serenity*, structurant ces dynamiques à travers quatre sous-systèmes : ressources, technique, économique et humain. En modélisant des profils variés (économe, écologiste, confortable), nous analysons une première approche de l'impact des décisions individuelles sur la viabilité énergétique et économique des CER. Nos résultats visualisent la surproduction estivale et montre que la rentabilité influence les choix d'investissement et d'adhésion. Elle expose aussi comment la gestion du surplus révèle des contradictions avec la sobriété énergétique.

1. Introduction

La nécessité d'améliorer notre consommation énergétique, que ce soit dans les habitations, les espaces publics ou les entreprises, n'est plus à démontrer. Parmi les solutions explorées les plus récentes (Debizet et Pappalardo, 2021), le partage d'énergies renouvelables au sein des Communautés d'Énergie Renouvelable (CER) émerge comme une piste prometteuse. Cette approche repose sur l'idée que la mutualisation des profils de consommation permettrait d'optimiser l'utilisation des surplus d'énergie photovoltaïque en les redistribuant aux consommateurs en déficit (Acosta et al., 2018).

Cependant, bien que porteuse, cette démarche rencontre plusieurs obstacles. Il est fréquent de mettre en avant les contraintes législatives qui encadrent le partage et la vente d'énergie (Reis et al., 2020). Toutefois, le défi central réside dans la compréhension fine et en temps réel des usages et besoins des membres de la communauté (Bonnardot et al., 2021). Dans ce contexte, un gestionnaire de CER doit non seulement maîtriser les différentes règles de distribution de l'énergie collective, mais aussi comprendre les dynamiques réelles des échanges de consommation pour gérer efficacement ces transferts d'énergie.

Pour répondre à ces enjeux, nous avons développé un modèle, appelé le *trèfle Serenity*, intégrant les critères de l'activité humaine. Ce modèle nous aide à structurer différents scénarios de communautés et à modéliser plusieurs CER avec des profils de comportements variés. L'objectif est de mettre en évidence les différentes stratégies adoptées par ces profils de consommateurs et de comprendre les implications de leurs choix dans le partage d'énergie.

Cette recherche s'inscrit dans le cadre du projet *Serenity*, soutenu par les chercheurs du LUCID-ULiège et d' INGI-UCL. L'un des objectifs du projet est de concevoir un modèle de simulation structurant les aspects techniques, économiques et humains au sein d'un Système Complexe Dynamique (Dynamic System Complex, DSC). Cette DSC intègre les principaux impacts des comportements des consommateurs sur la gestion énergétique des CER.

Cet article propose, dans un premier temps, un état de l'art, clarifiant les principaux enjeux liés à la gestion énergétique des CER et à la modélisation des comportements humains susceptibles d'influencer la simulation du partage d'énergie. Ensuite, il détaille les hypothèses adoptées ainsi que le développement du modèle DSC. Enfin, une discussion explore les implications de l'activité humaine sur la viabilité des CER et sur la gestion de l'énergie renouvelable.

2. Etat de l'art

L'Union européenne a adopté un ensemble de mesures législatives connues sous le nom de "Pacte vert pour l'Europe", visant à accélérer la transition énergétique en impliquant activement les citoyens et en favorisant la décentralisation de la production d'électricité (Commission Européenne, 2019). Parmi les initiatives encouragées, les Communautés d'Énergie Renouvelable (CER) constituent une approche collaborative qui permet à des acteurs locaux (citoyens, entreprises, collectivités) de produire, consommer et partager de l'énergie verte au sein d'un cadre juridique et organisationnel défini (Décret du Parlement Wallon, 2022).

L'objectif principal des CER est de maximiser l'autoconsommation collective, de réduire les coûts énergétiques et d'améliorer la durabilité écologique. Elles jouent également un rôle social en visant l'inclusion des populations en situation de précarité énergétique. Le gestionnaire d'une CER assure la coordination des flux énergétiques, la gestion de l'autoconsommation collective, ainsi que la gestion des règles de tarification et de répartition de l'énergie produite au sein de la CER.

Afin de maximiser l'autoconsommation collective, les gestionnaires de CER reposent sur la mise en place de stratégies de gestion de la production et des besoins en consommation de l'énergie permettant d'équilibrer la production décentralisée et intermittente avec la consommation (Rae et Bradley, 2012). Ces stratégies contribuent à réduire la pression sur le réseau, à améliorer la pénétration des énergies renouvelables et à optimiser l'utilisation des infrastructures existantes.

Cependant, la diversité des comportements et des attentes des membres d'une CER engendre une complexité supplémentaire dans la gestion des flux d'énergie (Amouroux et al, 2018). Chaque utilisateur possède des habitudes de consommation distinctes, influencées par des facteurs tels que les horaires de travail, les préférences personnelles et les capacités technologiques sans oublier les caractéristiques techniques du bâtiment : surface, typologie, isolation, etc. (Haradji et al, 2018). L'équilibre entre production et consommation repose ainsi sur des modèles et des outils de simulation avancés, permettant de comprendre l'influence des comportements humains sur le comportement global de la CER.

Pour modéliser ces comportements, différentes méthodes ont été utilisées pour offrir un cadre expérimental permettant d'analyser la prise de décision, les interactions sociales et la résolution de problèmes dans des contextes difficiles à observer en conditions réelles. Les *serious games*, par exemple, constituent un outil accessible et ludique pour explorer la complexité des systèmes énergétiques (Müller et al., 2017 ; Allani et al. , 2023). Les simulations immersives de la réalité, via les *serious games*, permettent d'observer les réactions des individus pour orienter les stratégies de gestion d'une CER en fonction de leurs objectifs individuels et collectifs (Luo et al., 2017). La modélisation multi-agents, qui repose sur la simulation d'entités autonomes interagissant dans un environnement défini (Reis et al., 2020 ; Phan & Amblard, 2007), peut s'avérer utile pour représenter des comportements individuels, mais elle tend à adopter une approche technocentrée qui ne prend pas toujours en compte la complexité des interactions sociales et managériales dans les CER.

La Dynamique des Systèmes Complexes (DSC) est une méthode de modélisation adoptant une approche systémique pour analyser des problématiques managériales, économiques et sociotechniques (Burneau, 2019). Cette approche permet d'obtenir une vision globale du partage d'énergie au sein des CER et d'identifier les interactions entre les différents acteurs. En s'appuyant

sur la démarche de Donnadiou et al. (2003), la méthode DSC est un outil pour modéliser et analyser le système de fonctionnement des CER en tenant compte des interactions entre facteurs techniques, économiques et sociaux en articulant structurellement la simulation avec l'activité humaine des membres de la CER. Ces activités de consommation résultent pour beaucoup de la dynamique de vie quotidienne en interaction avec l'environnement (appareils et bâtiments) (Haradji et Al, 2018). Cette méthode offre une meilleure compréhension des mécanismes managériaux et facilite le processus de prise de décision des membres et des gestionnaires des CER à travers une approche sociotechnique. Contrairement à d'autres approches de type prévisionnel sur base de calculs linéaires, la DSC permet une modélisation plus holistique en capturant les rétroactions dynamiques et les interdépendances entre les éléments du système. Elle offre ainsi un cadre plus adapté pour comprendre et anticiper les dynamiques collectives qui émergent dans ces systèmes énergétiques collaboratifs.

Étant donné que les paramètres sociaux sont des facteurs clés dans le fonctionnement d'une CER, il est essentiel de prendre en compte la diversité des profils des membres et d'intégrer leurs caractéristiques psycho-sociales dans la modélisation. Chaque individu adopte des comportements spécifiques en fonction de son statut (propriétaire, locataire, bailleur, etc.), de ses motivations, de ses habitudes et de son rapport à l'énergie (Kashif et al., 2011). Ces différences influencent directement la dynamique du système, tant au niveau des décisions individuelles que des interactions collectives.

Une modélisation réaliste des CER ne peut donc se limiter aux seuls usages énergétiques ; elle doit également intégrer les dimensions sociales, psychologiques et contextuelles des membres afin de mieux comprendre les mécanismes de coopération, d'adhésion ou de résistance au sein du système (Schelings, 2021). L'approche retenue vise ainsi à dépasser une vision strictement technique ou économique du partage d'énergie en tenant compte des facteurs comportementaux et des logiques décisionnelles propres à chaque profil. Cette prise en compte permet d'analyser différentes stratégies de gestion énergétique au sein d'une communauté et comment ces interactions façonnent l'évolution du système dans le temps.

Face à la diversité des profils d'acteurs et à la complexité de leurs interactions, une approche statique fondée sur des typologies rigides s'avère insuffisante. Il est donc nécessaire d'adopter une modélisation dynamique, capable de représenter l'évolution des comportements et des prises de décision en fonction du contexte et des relations entre les membres de la CER. Cette approche permet de mieux anticiper les réponses du système à différentes configurations et d'optimiser la gestion collective des ressources énergétiques.

3. Question de recherche et cas d'étude

L'analyse de l'état de l'art met en évidence une lacune majeure : très peu de modèles de simulation pour la gestion du partage d'énergie intègrent l'activité humaine dans les boucles des échanges. Cette omission peut conduire à des stratégies de distribution ou à des résultats de simulation inadaptés à la réalité du terrain.

L'une des principales difficultés réside dans l'imprévisibilité des comportements humains, rendant leur intégration dans une simulation complexe et délicate. En effet, codifier les prises de décision et anticiper les réactions en chaîne des différents acteurs d'un système est un processus laborieux, nécessitant la définition de nombreuses hypothèses en amont. Ces hypothèses doivent non seulement refléter une grande diversité de comportements, mais aussi prendre en compte leur caractère aléatoire.

Il est donc crucial d'examiner comment intégrer ces aspects aléatoires et les comportements individuels des consommateurs dans des modèles complexes de simulation, afin de renforcer l'efficacité des outils d'aide à la gestion énergétique.

Au regard de ce qui est soulevé précédemment, la question centrale que nous abordons dans cet article est la suivante :

Comment intégrer les comportements humains des consommateurs aux aspects techniques du partage de l'énergie au sein d'une CER ? Et quel est l'impact de cette intégration sur la gestion énergétique ?

3.1. Le contexte de l'étude et les profils étudiés

La problématique abordée dans cet article s'inscrit dans le projet de recherche *Serenity*, qui explore le transfert d'énergie au sein d'une CER en Wallonie, à travers divers scénarios prenant en compte le contexte de la CER ainsi que les comportements des acteurs de la communauté, appelés consommateurs. L'ensemble des hypothèses de consommation repose sur des moyennes de ménages wallons dans le climat liégeois.

Pour structurer nos hypothèses et affiner ces moyennes de consommation génériques, le LUCID-ULiège a animé plusieurs parties du *serious games* simulant le transfert d'énergie au sein d'une CER. Ces jeux permettaient aux acteurs/joueurs de prendre une série de décisions pour assurer leurs besoins énergétiques, leur confort et leur stabilité économique. Ces sessions ont permis de dégager différentes tendances comportementales, à partir desquelles nous avons structuré une première simulation autour de trois profils distincts (Allani et al., 2023). Afin d'analyser l'influence de certains comportements humains, nous avons défini trois profils types, utilisés dans nos simulations :

- L'économe : ce profil se concentre exclusivement sur les économies réalisées grâce à son intégration dans la CER, en cherchant à optimiser les coûts énergétiques. Si le contexte se révèle propice aux économies d'énergie, il investira volontiers dans des équipements tels que des panneaux photovoltaïques (PV), domotique et/ou une voiture électrique.
- L'écologiste : ce profil accorde une importance majeure à l'utilisation de sources d'énergie renouvelables. Par idéologie, il peut être moins regardant sur la rentabilité et accepter de payer un prix plus élevé (jusqu'à un seuil défini dans les hypothèses) pour une énergie issue de sources durables. Il est également plus enclin à investir dans des équipements afin de renforcer la durabilité de la CER.
- Le confortable : ce profil met son confort au premier plan, refusant tout compromis, même si cela implique une consommation énergétique plus élevée et des coûts supplémentaires. Peu enclin à investir, il ne souhaite pas s'occuper d'équipements tels que les PV.

Le degré d'implication des consommateurs dépend principalement du fait qu'ils possèdent ou non des PV. Ceux qui en possèdent deviennent alors des membres "actifs", dans le sens où ils injectent le surplus de leur énergie au profit des autres membres de la CER, qui peuvent en bénéficier selon leurs besoins.

Il est également intéressant de préciser que, bien qu'une probabilité d'agir et/ou d'investir soit associée à chaque profil dans différentes situations de la simulation, cela ne garantit pas que tous les membres d'un même profil agiront de la même manière. Cela introduit un caractère aléatoire dans la simulation globale.

Le tableau ci-dessous illustre explicitement le degré de probabilité associé à l'apparition de certains comportements en fonction de chaque profil.

Tableau 1 – paramètres factuels et comportementaux des profils de consommateur.

légende tableau : - - improbable ; - peu probable ; 0 neutre ; + probable ; ++ évident

	Profil consommateur	L'économe	L'écologiste	Le confortable
Paramètres factuels	Nbr. de pers. dans le ménage	1 à 7	1 à 7	1 à 7
	Installation PV	[0;+]	[+;++]	[--; 0]
	Voiture électrique	[0;+]	[+;++]	[--; 0]
Paramètres comportements	Facteur d'investissement PV	au profit d'économie ⁺	0 dans un but écologique	-
	Facteur d'investissement Voiture élec.	au profit d'économie ⁺	0 dans un but écologique	-
	Niveau d'amotivation	--	--	++
	Capacité à diminuer son confort	++ au profit d'économie	++ dans un but écologique	--
	Satisfaction économique	++	-	+

Afin de mieux comprendre le tableau ci-dessus, nous précisons quelques critères propres aux profils étudiés :

- Les paramètres d'investissement : en fonction des motivations des différents profils et dans certaines conditions, certains peuvent facilement investir ou non dans l'installation de panneaux photovoltaïques (PV) ou l'achat d'une voiture électrique (les deux seuls choix d'investissement retenus dans cet article).
- Le niveau d'amotivation : ce critère est lié à la domotique potentiellement présente dans le ménage. Si les consommateurs possèdent des PV, un système intelligent peut être prévu pour faire fonctionner le lave-vaisselle et la machine à laver lorsque la production d'énergie est abondante, à condition que les habitants aient pris le temps de les remplir le matin. Le niveau d'amotivation représente donc la probabilité, selon les profils et leurs motivations, que ces tâches aient été réalisées ou non.
- La satisfaction économique : il s'agit d'évaluer si l'intégration dans une CER est rentable ou non pour un ménage :
 - les profils économes quitteront la CER si leur bilan annuel n'est pas satisfaisant.
 - les profils écologistes peuvent considérer comme acceptable un certain surcoût si cela leur permet de bénéficier d'un système plus respectueux de l'environnement.

Parmi ces profils de consommateurs, nous incluons divers paramètres sociaux tels que des familles, des célibataires, des ménages avec ou sans grands besoins énergétiques, etc. Pour cette étude, nous avons défini un cadre précis :

- Type de membres : les différents scénarios de CER étudiés seront composés exclusivement de ménages, excluant les PME et autres entités professionnelles. Bien que cela soit peu réaliste dans un cadre réel, cette restriction permet, dans un premier temps, de comprendre l'influence de l'activité de consommation des ménages sur la répartition de l'énergie.
- Type d'habitation : seuls les logements (semi-)mitoyens et 4 façades sont pris en compte. Les appartements sont exclus, car les investissements et les choix de consommation y sont souvent limités (installation de PV ou rénovation collectives peu réalistes).
- Type d'énergie : seule l'électricité produite par des panneaux photovoltaïques est considérée comme énergie produite et transférable au sein de la CER.

4. Méthodologie

La méthodologie adoptée se structure en deux parties :

- Une précision épistémologique sur notre cadre théorique, nommé "*Trèfle Serenity*", qui modélise l'impact causal des comportements humains sur la consommation énergétique.
- La structure du modèle DSC et le choix de la méthode de simulation.

4.1. Le trèfle Serenity

Le modèle *Trèfle Serenity* (figure 1) repose sur l'interrelation de quatre sous-systèmes principaux influençant la gestion énergétique à l'échelle d'un ménage et, par extension, celle de la CER. Bien que certaines de ces dimensions soient détaillées dans l'état de l'art, elles sont synthétisées comme suit :

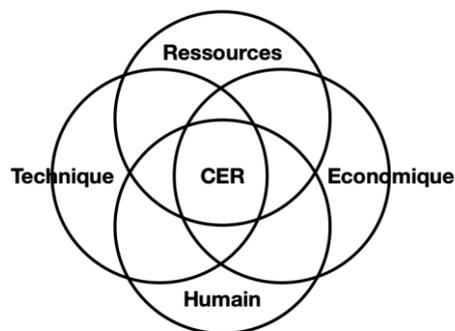


Fig. 1 – Le trèfle Serenity.

- Sous-système "Ressources": ce sous-système regroupe les paramètres externes influençant le système sans être influencés en retour. Par exemple, le gisement solaire détermine la production photovoltaïque, indépendamment des flux d'énergie au sein de la CER. Cette dimension inclut des facteurs environnementaux spécifiques, tels que la météo, l'ombrage sur les panneaux, etc.
- Sous-système "Technique": ce sous-système couvre les caractéristiques des installations techniques intervenant dans le flux énergétique, depuis la production jusqu'à la consommation, en passant par le stockage (batteries) ou la vente d'énergie. Il intègre des notions comme la puissance, le rendement et la fiabilité des équipements.
- Sous-système "Économique": bien que cet article ne soit pas motivé par une étude des fluctuations des prix de l'énergie ou des aides financières, il est évident que le pouvoir

d'achat influence directement les comportements de consommation. Cette dimension inclut donc les coûts de production et d'investissement dans les infrastructures énergétiques.

- Sous-système "Humain": cette dimension, cœur de l'originalité du Trèfle Anonyme, regroupe les paramètres propres à l'activité des consommateurs influençant la consommation d'énergie. Elle se divise en deux catégories :
 - les paramètres factuels et évolutifs : nombre de membres dans le ménage, horaires de consommation, exigences de confort (ex. température intérieure souhaitée).
 - les paramètres liés au profil du gestionnaire du ménage : conscience écologique, capacité d'anticipation (ex. programmation des appareils en heures de surplus énergétique), économes, etc.

Il est essentiel de noter que ces paramètres peuvent s'influencer mutuellement. Par exemple, un ménage de famille nombreuse mais économe consommera inévitablement plus d'énergie qu'un célibataire, malgré ses efforts pour diminuer sa consommation. Bien que ces situations puissent sembler caricaturales, elles illustrent des tendances plausibles.

L'intégration de ces quatre sous-systèmes dans le modèle permet une interconnexion innovante entre des paramètres sociaux, techniques et économiques. Par exemple : un profil écologique privilégiera l'utilisation d'énergie renouvelable, même si elle est plus coûteuse. Il pourrait investir dans des panneaux solaires ou une voiture électrique, sous réserve d'une stabilité économique suffisante.

Ces interactions permettent de structurer des comportements types, classifiés en trois profils principaux. Ces profils sont associés à des probabilités spécifiques, influençant les scénarios de répartition énergétique envisagés dans le cadre de la simulation (cf. contexte).

4.2. La structure de la DSC

Le choix de la simulation repose sur la Dynamique des Systèmes Complexes (DSC), en particulier via le logiciel Stella Architect. Cette approche permet d'étudier, comprendre et modéliser le comportement de systèmes composés d'un grand nombre d'éléments interconnectés, interagissant de manière non linéaire. Dans le cadre de la gestion du partage d'énergie au sein de la CER, la DSC constitue un cadre robuste pour modéliser les interactions entre les dimensions sociales, techniques, économiques et environnementales. Dans notre étude, cette approche présente plusieurs atouts :

- Codification des comportements globaux : elle permet de formaliser les comportements issus des paramètres factuels et des profils de consommateurs définis dans le contexte spécifique de la CER.
- Modélisation des réactions complexes et contre-intuitives : les interactions dynamiques du système peuvent engendrer des évolutions imprévues, rendant parfois les comportements difficiles à anticiper.
- Prise en compte d'une granularité fine et d'une puissance de calcul avancée : l'énergie ne pouvant être facilement stockée, elle doit être consommée ou réinjectée sur le réseau en temps réel. La DSC permet d'intégrer ces contraintes dans la modélisation.

Cette approche permet ainsi de mieux anticiper les stratégies de consommation et d'investissement, et d'optimiser la gestion énergétique des communautés. Le schéma suivant illustre la manière dont les données sont structurées au sein du modèle (figure 2) :

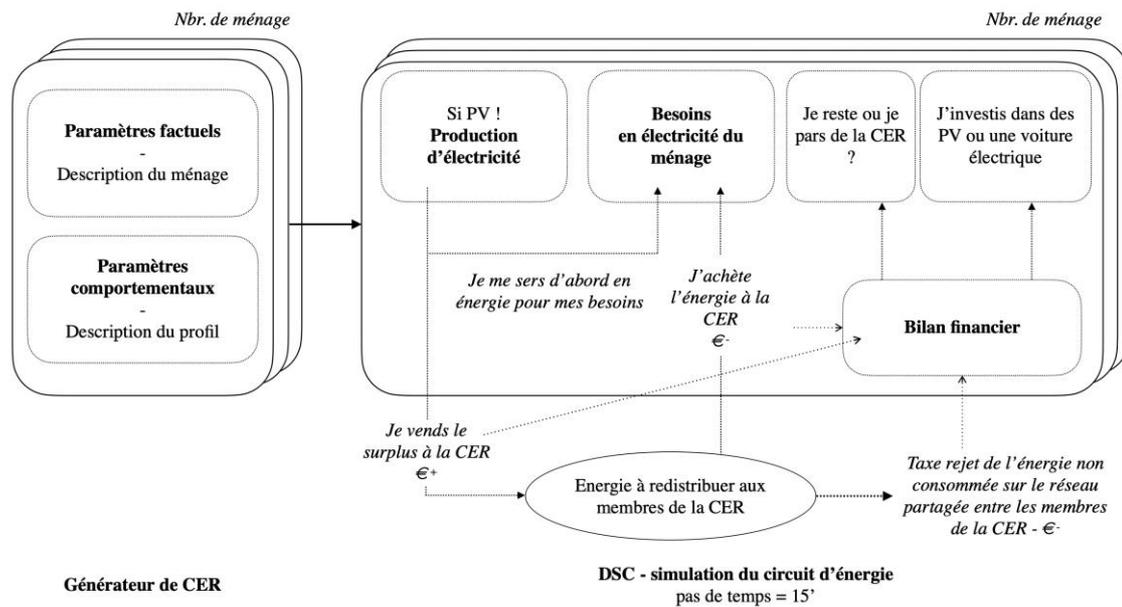


Fig. 2 – Structure générique de la DSC.

4.2.1. Simulation et exploitation des résultats

La simulation est réalisée sur une période de 3 ans, avec un pas de calcul de 15 minutes. Ce pas temporel permet une mise à jour régulière des données contextuelles, telles que la luminosité et la production photovoltaïque, les besoins énergétiques des ménages, les comportements des acteurs (utilisation des électroménagers, prise de douche, etc.)

Cette approche garantit une précision temporelle élevée, essentielle pour capter l'impact des variations d'usage et d'offre énergétique. Les données récupérées à l'issue de la simulation nous permettent d'évaluer :

- Le maintien ou le départ des acteurs dans la CER : ont-ils décidé de rester ou non dans la communauté ? Quel est le profil de ceux qui restent ou partent ?
- Les décisions d'investissement en équipements énergétiques : les conditions étaient-elles favorables pour inciter certains profils à investir ? Si oui, quels types de consommateurs ont investi dans les panneaux photovoltaïques ou une voiture électrique ?

Pour structurer notre simulation, nous avons défini plusieurs hypothèses initiales :

- Auto-consommation prioritaire : les ménages producteurs utilisent en priorité leur propre électricité avant de partager leur surplus avec la CER.
- Taux minimal de producteurs : au minimum 1/3 des ménages doivent être producteurs d'énergie pour que le partage d'énergie entre membres soit viable. Ici, nous simulons 9 membres, répartis équitablement entre les profils (3 économes, 3 écologiste, 3 confortables). Parmi eux, 3 possèdent des panneaux solaires, avec un équilibre entre les profils.
- Absence de véhicules électriques en début de simulation : aucun ménage ne possède initialement de voiture électrique.
- Aucun coût d'adhésion à la CER : il n'y a ni frais d'intégration, ni cotisation annuelle.
- Hypothèses de consommation simplifiées : les jours sont considérés identiques (pas de variation de besoins selon la saison). Pas de distinction entre jours de semaine et week-ends. Les vacances ne sont pas prises en compte.

- Répartition équitable de l'énergie : lorsque l'énergie est distribuée au sein de la CER, elle est partagée équitablement entre les membres en déficit énergétique.

5. Résultats et discussion

5.1. La gestion du surplus d'énergie électrique

Lorsque nous lançons la simulation, calibrée et expliquée au point précédent, le constat est sans appel. L'ensemble des profils non producteurs (6 ménages sur 9) se retrouvent en déficit économique. Les 4 profils économes et confortables quittent la CER déjà après un an, tandis que les 2 profils écologistes restent, car leur perte financière est jugée tolérable (moins de 25 €/mois de déficit sur la facture d'électricité) (Figure 3). Malgré l'achat à moindre coût du surplus d'énergie par la CER, la taxe de rejet sur l'énergie excédentaire produite en été par les trois ménages producteurs est répartie entre les 9 membres. Cette taxe est plus élevée que les gains d'énergie pour les non-producteurs.

Pour pallier ce rejet d'énergie, il est nécessaire d'identifier un besoin énergétique qui coïncide avec la surproduction des ménages. Dans une seconde simulation, nous ajoutons une piscine de 27 m³ chauffée électriquement à 25 °C durant l'été. Nous l'attribuons, à l'un des deux profils confortables non producteurs. Dans ce scénario, le surplus est compensé et l'énergie, n'étant plus taxée pour rejet sur le réseau, permet aux 9 membres de la CER de rester dans celle-ci durant les 3 ans et demi de simulation (Figure 4). On observe également que les conditions deviennent favorables pour les profils écologistes, qui investissent alors dans des panneaux photovoltaïques (PV) et des voitures électriques.

La piscine de 27 m³ (6 × 3 × 1,5 m) constitue une solution possible, mais peu probable, car seulement 5 % des 10 % de ménages wallons possédant une piscine choisissent de la chauffer à l'électricité. Dans ce type de simulation, la piscine est considérée comme idéale pour gérer le surplus. Toutefois, dans une simulation impliquant un plus grand nombre de ménages, on peut considérer que les chauffe-eaux d'eau sanitaire remplissent le même rôle.

Ainsi, pour un chauffe-eau de 270 L (0,27 m³), il faudrait, pour 3 ménages producteurs, que 10 ménages disposent d'un chauffe-eau équipé d'un système domotique capable d'absorber le surplus d'énergie en été. Une autre alternative consisterait à utiliser des batteries, qu'elles soient personnelles ou communes à la CER.

Dans ce cas, les comportements et les exigences propres aux différents profils conduisent à ajuster les paramètres techniques du modèle.

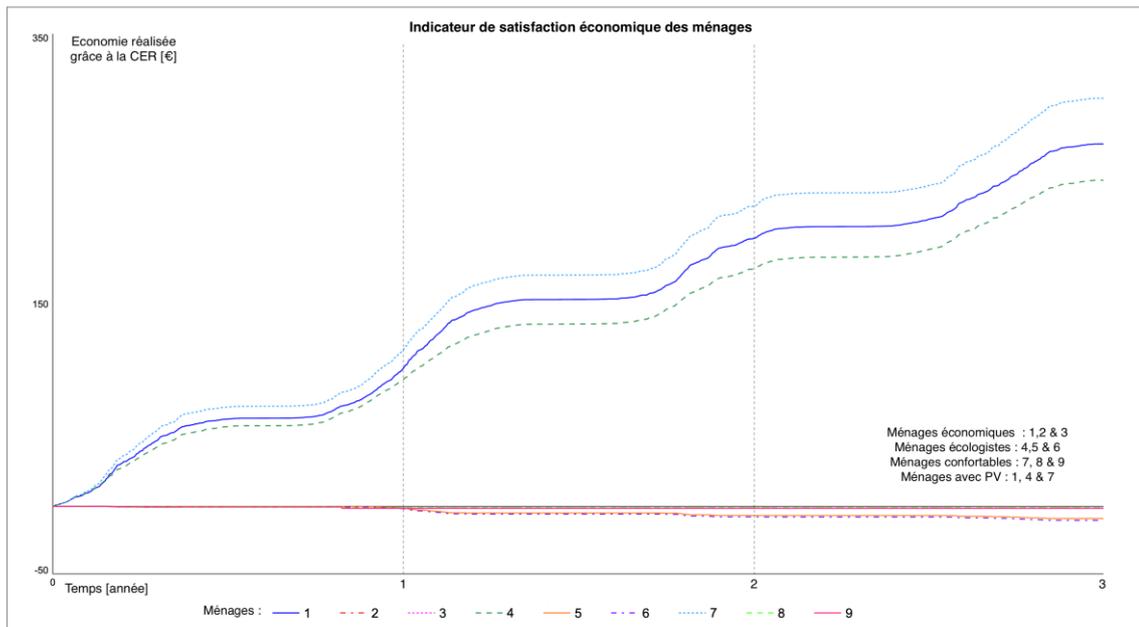


Fig. 3 – Niveau de satisfaction économique sans l'intégration de la piscine chauffée

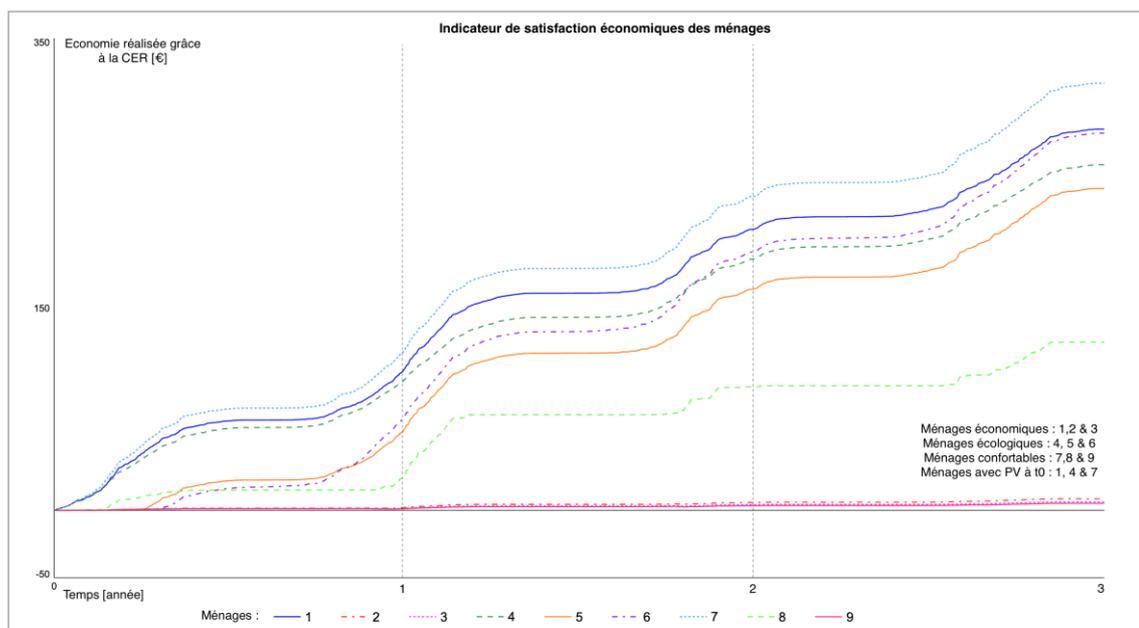


Fig. 4 – Niveau de satisfaction économique avec l'intégration de la piscine chauffée

5.2. La CER en opposition avec la sobriété énergétique

Une fois le surplus équilibré, nous simulons la CER avec un seul type de profil :

- 9 ménages économes ou confortables : aucun investissement en panneaux photovoltaïques (PV) pour les non-producteurs et aucun achat de voiture électrique.
- 9 ménages écologistes : tous les ménages disposent de PV et d'une voiture électrique à la fin de la période.

Dans ce dernier cas, les nouveaux producteurs améliorent leur satisfaction économique au sein de la CER, puisqu'ils deviennent eux aussi producteurs. Toutefois, dans une logique de valorisation de l'énergie verte, objectif partagé par la CER et favorisé par les profils écologistes,

ces derniers sont amenés à investir dans les deux équipements proposés dans le modèle de simulation. Cependant, en investissant dans les PV, ils augmentent le surplus d'énergie à consommer durant les mois d'été. Cette surproduction est partiellement compensée par l'achat de la voiture électrique, qui accroît leur consommation d'énergie grâce à la recharge du véhicule. Ce mécanisme est idéal en été, car la voiture peut également jouer le rôle de batterie. En hiver, en revanche, elle accentue le besoin en énergie des ménages.

Certes, la CER favorise les énergies renouvelables, ce qui correspond aux attentes de certains profils. Cependant, l'effet contre-intuitif est qu'à l'échelle individuelle, ce profil devient acheteur de technologies, ce qui accroît ses besoins en électricité. L'achat de ces équipements soulève ainsi des questions sur la notion de sobriété énergétique. Cette tendance, qui consiste à réduire son mode de vie pour limiter sa consommation globale d'énergie sans simplement transférer ses besoins d'une source à une autre, n'est pas intégrée dans notre modèle. Au contraire, le modèle tend à équilibrer la consommation d'énergie.

Cette dynamique a également été observée lors du *serious game*, ce qui soulève des questions sur l'impact environnemental réel de ce type de communauté. Un autre exemple de cette contradiction est l'utilisation paradoxale d'une piscine chauffée à l'électricité pour assurer la viabilité économique de la CER, comme détaillé au point précédent (5.1).

5.3. Les objectifs à long terme

La simulation ayant été volontairement réalisée sur une période relativement courte (3 ans et demi) afin de faciliter l'analyse des comportements, nous n'avons pas intégré les motivations à long terme des ménages.

Par exemple, nous avons arbitrairement décidé que le profil économique pouvait choisir de rester ou non dans la CER sur la base d'un bilan annuel. Toutefois, sur une période plus longue, il serait pertinent d'adapter le comportement des différents profils afin d'intégrer à la simulation des objectifs à long terme, tels que des règles de "retour sur investissement" ou un pourcentage minimal d'énergie verte produite. Cela permettrait d'affiner davantage les profils de consommateurs et d'obtenir une analyse plus réaliste de leur évolution au sein de la CER.

De plus, les profils écologistes, animés par leur volonté de partager et de consommer principalement de l'énergie durable, investissent en priorité dans les équipements photovoltaïques et les voitures électriques. Cela génère un surplus plus important en été (PV) tout en augmentant les besoins en énergie de ces ménages, notamment pour la recharge des voitures. Ainsi, les autres profils, comme les économes, n'évoluent pas suffisamment et ne sont pas encouragés à investir à leur tour dans ces équipements.

6. Conclusion

Notre étude vise à structurer et interconnecter les comportements humains des consommateurs avec les paramètres techniques et contextuels du partage d'énergie électrique au sein d'une CER. Le modèle Trèfle Serenity a pour objectif de mettre en évidence les paramètres des quatre sous-systèmes – Ressources, Technique, Économique et Humain – et de les interconnecter afin d'analyser leur influence réciproque. En particulier, nous étudions l'impact de certains paramètres sur les comportements et la prise de décision en fonction des différents profils associés au chef(e) de ménage. Pour illustrer notre modèle, nous avons défini, dans une simulation de 9 ménages, trois profils répartis équitablement : les économes, les écologistes et les confortables.

Pour modéliser le partage d'énergie au sein de la CER, nous avons utilisé une approche basée sur la Dynamique des Systèmes Complexes (DSC). Ce modèle nous permet :

- Une analyse approfondie des effets des décisions individuelles et collectives.
- Une gestion précise des flux énergétiques, avec un pas de temps de 15 minutes.
- Une évaluation détaillée de l'impact des comportements humains sur la performance globale de la CER.

Grâce aux visualisations, nous avons pu observer et analyser, d'une part, les dynamiques de consommation et de partage énergétique en fonction des profils et, d'autre part, l'évolution des stratégies d'investissement selon les conditions économiques et écologiques, notamment l'achat de panneaux photovoltaïques (PV) et/ou de voitures électriques. Ainsi nous obtenons une première réflexion sur l'impact des décisions collectives et individuelles sur la viabilité de la CER.

L'intégration des comportements humains sur un pas de temps réaliste, correspondant aux besoins énergétiques d'activités courantes (ex. une douche, un four à micro-ondes, l'impact du passage d'un nuage), permet de mettre en évidence des aspects cruciaux de la viabilité de la CER, au-delà du simple transfert global d'énergie.

L'analyse des résultats a révélé que la gestion du surplus d'énergie en été constitue un problème majeur. Il est impératif que certains profils aient des besoins énergétiques accrus durant ces périodes pour garantir l'équilibre de la CER. Dans notre simulation, nous avons compensé ce

surplus – lié à la présence de trois producteurs – en intégrant une piscine chauffée à l'électricité. Cette solution représente une consommation équivalente à dix chauffe-eau domestiques, qui pourraient jouer un rôle de tampon énergétique, comme une batterie, en adaptant les équipements avec un système hybride et de domotique. Un autre constat concerne les décisions d'investissement :

- les ménages *confortables* n'investissent pas, ce qui est cohérent avec leur profil.
- seuls ceux écologistes investissent dans les équipements proposés par la simulation (PV et voiture électrique).
- les ménages économes, faute de pouvoir observer un retour sur investissement à long terme, estiment que les gains annuels ne sont pas suffisants pour justifier un achat.

Le manque d'investissement dans les équipements de la part des économes est lié aux comportements des autres profils. En effet, les profils écologistes sont les premiers à investir dans les deux types équipements. L'installation de nouveaux panneaux photovoltaïques accroît le surplus énergétique en été, tandis que l'utilisation de leur voiture électrique augmente la demande en hiver. Bien que les profils économes réalisent certains gains, ceux-ci ne sont pas suffisants, compte tenu du comportement des profils écologistes, pour les inciter à investir à leur tour. Par ailleurs, bien que ceux-ci investissent dans des équipements favorisant une production d'énergie durable, leur consommation globale d'électricité augmente. Cette observation soulève un questionnement essentiel sur l'impact environnemental réel de la CER, qui, d'après notre simulation, semble aller à l'encontre des principes de sobriété énergétique.

L'objectif principal de cette étude est de démontrer que l'intégration des comportements humains influence la simulation du partage d'énergie au sein d'une CER. Cela se manifeste à plusieurs niveaux :

- D'un point de vue méthodologique, il est crucial d'utiliser un pas de temps fin (15 minutes) pour capturer les besoins réels des consommateurs et la disponibilité effective de l'énergie renouvelable.
- D'un point de vue systémique, les comportements individuels modifient les paramètres techniques et économiques, influençant à leur tour les décisions des autres ménages et la dynamique globale de la CER.

6.1. Limites et perspectives

Notre modèle présente certaines limites qui restreignent la représentation pleinement réaliste d'une Communauté Énergétique Renouvelable (CER). La diversité des comportements possibles est réduite par le nombre limité de ménages (neuf) et par les trois profils types définis. De plus, l'absence de PME dans notre simulation restreint la variété des besoins énergétiques et des interactions économiques, tandis que le manque de variations saisonnières et hebdomadaires (week-ends, vacances) empêche de capter certaines dynamiques de consommation. Malgré ces limites, notre objectif principal était de mettre en évidence les boucles d'influence entre comportements humains et paramètres techniques, tout en testant la pertinence d'un pas de temps de 15 minutes. Afin d'affiner notre approche, nous envisageons d'intégrer des comportements évolutifs, de prendre en compte des objectifs à long terme, notamment en matière d'investissement, en élargissant la simulation à une CER de 30 ménages et d'inclure des PME aux besoins énergétiques spécifiques. Ces améliorations permettront une analyse plus approfondie de la combinaison de différents profils et de leur impact sur la viabilité globale d'une CER.

Un autre élément qu'il serait intéressant de questionner concerne l'influence des comportements des membres les uns sur les autres. Ainsi, pour tendre vers un modèle plus complet, il conviendrait d'intégrer l'impact des gestes individuels sur le fonctionnement collectif.

7. Remerciement

Merci au soutien de la région Wallonne pour le financement de cette recherche.

8. Références

Acosta, C., Ortega, M., Bunsen, T., Prasad Koirala, B., & Ghorbani, A. (2018). Facilitating Energy Transition through Energy Commons: An Application of Socio-Ecological Systems Framework for Integrated Community Energy Systems. *Sustainability*, 10, 366. <https://doi.org/10.3390/su10020366>

Allani, R., Jeunejean, A., & Leclercq, P. (2023). Modeling social parameters in renewable energy sharing: Activity analysis in simulation game. ISAGA2023 - 54th International Simulation and Gaming Association, La Rochelle.

Amouroux, E., Huraux, T., Sempé, F., & Haradji, Y. (2013). Simulating Human Activities to Investigate Household Energy Consumption. In ICAART 2013 - Proceedings of the 5th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (Vol. 2).

Bonnardot, Z., Haradji, Y., Salembier, P., Prieur, E., & Vial, S. (2021). Anticiper des interactions humaines par le design et l'ergonomie : le partage d'énergies renouvelables entre voisins. 55ème congrès de la SELF, Paris, France.

Burneau, L. (2019). BIM et rénovation : Modélisation systémique de la transition numérgétique en gestion de patrimoine immobilier. Réhabilitation [Thèse de doctorat, Université de Lyon]. HAL. https://theses.hal.science/tel-02481081v1/file/Burneau_PhD_thesis_2019.pdf.

Debizet, G., & Pappalardo, M. (2021). Communautés énergétiques locales, coopératives citoyennes et autoconsommation collective : formes et trajectoires en France. *Flux*, 126(4), 1-13. <https://doi.org/10.3917/flux1.126.0001>

Donnadiou, G., Durand, D., Neel, D., Nunez, E., & Saint-Paul, L. (2003). L'Approche Systémique : de quoi s'agit-il ? (Synthèse des travaux du Groupe AFSCET "Diffusion de la pensée systémique"). AFSCET (Association Française de Science des Systèmes Cybernétiques Cognitifs Et Techniques).

European Commission. (2019). The European Green Deal. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019DC0640&from=FR>

Haradji, Yvon., 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* [En ligne], 15(1), mis en ligne le 15 avril 2018, consulté le 19 avril 2019.

Kashif, A., Le, X. H. B., Dugdale, J., & Ploix, S. (2011). Agent-based framework to simulate inhabitants' behaviour in domestic settings for energy management. In ICAART (2)'11 (pp. 190–199).

Luo, C., Gilbert, L., & Liu, A. (2017). Designing serious games for complex systems: A framework. https://www.researchgate.net/publication/314220021_Designing_Serious_Games_for_Complex_Systems_a_Framework

Müller, J., Kreuz, S., Höhl, W., & Lüdecke, V. (2017). A Process Full of Challenges: A Serious Game About the German Energy Transition. In ECGBL - 11th European Conference on Games Based Learning, Graz, Austria.

Phan, D. (2007). From networks of automata to agent-based models: Discrete choices with social influence. In D. Phan & F. Amblard (Éds.), *Agent-based modelling and simulation in the social and human sciences* (pp. 196–218). Éditions The Bardwell Press.

Rae, C., & Bradley, F. (2012). Energy autonomy in sustainable communities - a review of key issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(9), 6497-6506. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.08.002>

Reis, I. F. G., Gonçalves, I., Lopes, M. A. R., & Antunes, C. H. (2020). A multi-agent system approach to exploit demand-side flexibility in an energy community. *Utilities Policy*, 67, 101114. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2020.101114>

Schelings, C. (2021). *Renouveau des approches participatives pour la fabrique de la Smart City*. Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique, 376.

Service public de Wallonie. (2022). Décret modifiant diverses dispositions en matière d'énergie dans le cadre de la transposition partielle des directives 2019/944/UE du 5 juin 2019. <https://www.cwape.be/node/3338>. Consulté le 20 septembre 2024.