

# Modélisation Systémique de la Durabilité des Micro-réseaux: Approche Formelle de la Co-simulation de ces Systèmes

Antoine Boche, Luiz Fernando Lavado Villa, Clément Foucher  
LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, UPS, Toulouse, France

**RESUME** - Dans ce travail, nous explorons la durabilité des micro-réseaux en adoptant une approche tirée de la théorie de la modélisation et la simulation. Pour ce faire, nous avons créé un modèle systémique qui intègre les aspects énergétiques, d'information, financiers et sociaux pour une représentation complète des micro-réseaux. La méthodologie de co-simulation a été utilisée pour examiner les interconnexions entre les différents domaines et obtenir une vue d'ensemble du système modélisé. L'utilisation de PDEVS en tant que *wrapper* pour la co-simulation a permis de connecter des domaines avec des modèles temporels difficiles à connecter en temps normal.

**Mots-clés**— Micro-réseau, durabilité, modélisation, théorie de la modélisation et de la simulation

## 1. CONTEXTE

Les micro-réseaux peuvent offrir une solution pour fournir de l'énergie durable aux régions rurales, mais il est important de comprendre les défis liés à leur durabilité pour les mettre en œuvre correctement. Nous adoptons une méthodologie basée sur la théorie de la modélisation et la simulation pour représenter les micro-réseaux et leur durabilité [1].

Notre objectif est de développer un modèle intégrant les aspects énergétiques et communautaires des micro-réseaux. Nous définissons notre système de manière systémique pour montrer sa complexité et sa diversité, et proposons un formalisme adapté pour l'étude de ces systèmes. Nous combinons les différentes perspectives de la littérature sur les micro-réseaux pour étudier les domaines clés de l'énergie, de l'information, du financier et des aspects sociaux, comme décrits dans un précédemment article [2].

Notre modèle représente une compréhension systémique de la durabilité des micro-réseaux, en équilibrant les différents domaines et en représentant la complexité interne de chaque domaine. En utilisant une méthodologie de co-simulation, nous pouvons aborder les interdépendances entre les quatre domaines tout en maintenant une structure claire et propice à un travail multidisciplinaire.

## 2. COMBLER LE FOSSÉ ENTRE LES DOMAINES

Cette approche regroupe différents modèles avec des composants internes qui sont simulés par des simulateurs indépendants et couplés par des schémas d'interactions. La structure du modèle de co-simulation se compose de quatre domaines qui communiquent entre eux grâce à des entrées et des sorties représentées figure 1. Les avantages de cette

structure de modèle incluent une compréhension plus complète et holistique du système modélisé et une synchronisation des différents modèles grâce à l'utilisation de PDEVS.

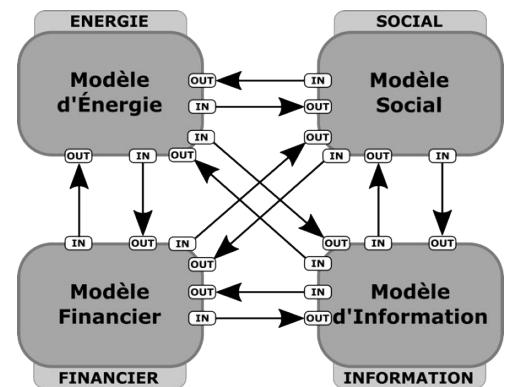


Figure 1. Modèle de micro-réseau systémique de co-simulation visé

À ce jour, plusieurs simulateurs ont été développés pour la modélisation des micro-réseaux et ont démontré leur efficacité. Cependant, ces simulateurs présentent une limitation importante : ils ne mettent généralement pas suffisamment en évidence l'interaction entre les différents domaines intrinsèques d'un micro-réseau [3]. Ils fonctionnent souvent comme des boîtes noires, où les états initiaux du micro-réseau sont fournis en entrée et une multitude de résultats en sont générés en sortie, sans fournir une compréhension approfondie des évolutions internes et des échanges au sein du système [4].

Il est donc nécessaire de développer un simulateur qui puisse représenter de manière systémique l'évolution d'un micro-réseau. Ce simulateur devrait prendre en compte les interactions entre les différents domaines tels que l'énergie, l'information, le financier et les aspects sociaux. Une approche intégrée permettrait de mieux comprendre le fonctionnement global du système, en identifiant les mécanismes d'influence et les interdépendances entre les domaines. Cela permettrait une meilleure compréhension des dynamiques internes et des échanges au sein des micro-réseaux, contribuant ainsi à une prise de décision éclairée pour améliorer leur performance et leur durabilité.

Les formalismes de la famille DEVS [5] (Discrete Event System Specification) définissent des modèles de composants atomiques comme base d'expression du comportement. Les composants couplés sont également définis comme

l'agrégation d'autres composants, eux-mêmes atomiques ou couplés.

Ce travail utilisera ensuite l'extension DEVS parallèle (PDEVS) qui apporte des avancées sur les problèmes de conflits lors de l'exécution de plusieurs modèles simultanément. Ce formalisme peut être utilisé pour interfaçer différents types de modèles, créant ainsi une méthode flexible pour la modélisation de systèmes multidisciplinaires, ce qui est le cas pour l'étude de la durabilité dans les micro-réseaux.

Le modèle de co-simulation développé dans ce travail comprend la modélisation des composantes énergétique, financière et sociale, tandis que le modèle théorique proposé comprend également une composante informationnelle. Les interactions entre les composantes modélisées représentées figure 2, telles que l'énergie vers le financier, le financier vers le social, l'énergie vers le social et le social vers l'énergie, ont été soigneusement étudiées et incluses dans le modèle. L'utilisation de PDEVS en tant que *wrapper* pour la co-simulation garantit la fluidité et la précision des résultats, bien qu'elle présente un défi pour la représentation précise du système complet. Malgré cela, le modèle développé permet une compréhension globale du système modélisé en considérant tous les domaines pertinents ensemble.

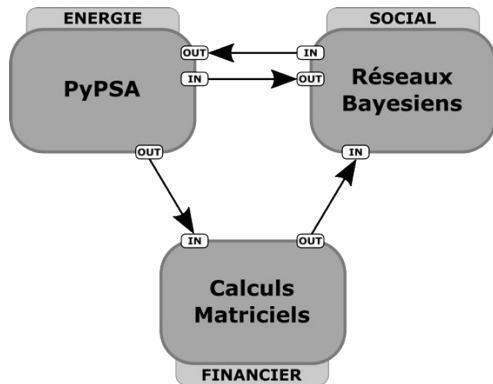


Figure 2. Modèle de co-simulation développé

Le modèle intégré dans le simulateur suit la même architecture que celle décrite dans la figure 3, avec des outils et des caractéristiques supplémentaires qui améliorent sa fonctionnalité. Afin d'assurer une exécution efficace du modèle, il est crucial d'établir une liaison avec le coordinateur de co-simulation, qui consolide l'ensemble des modèles atomiques en un modèle racine capable d'être exécuté par le moteur PyPDEVS, en prenant en compte les paramètres requis.

Dans le but d'améliorer l'expérience utilisateur, une interface utilisateur simple a été développée afin de faciliter la construction d'un micro-réseau destiné à des fins de simulation. Fondée sur une approche orientée objet, cette interface permet à l'utilisateur d'ajouter des composants électriques et énergétiques, de les interconnecter, ainsi que d'associer des agents (consommateurs ou producteurs) à chaque composant. L'utilisateur n'a qu'à spécifier trois paramètres pour lancer la simulation, toutes les autres connexions s'établissant de manière transparente.

Une fois la simulation achevée, un outil de visualisation des données a été intégré dans le but de faciliter l'extrapolation des informations pertinentes. L'intégration de fonctionnalités au modèle exécutable a été grandement facilitée par

l'utilisation de PyPDEVS. En outre, la bibliothèque Python *matplotlib* a été combinée à notre approche pour générer des graphiques facilement interprétables, complétant ainsi l'outil de visualisation des données.

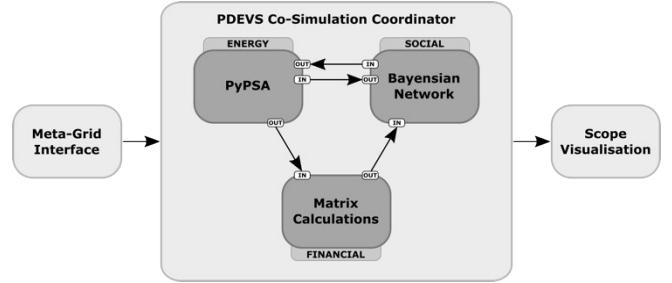


Figure 3. Architecture de l'outil de co-simulation de micro-réseaux

### 3. MODÈLE ÉNERGÉTIQUE : LE PAQUET PYPSA

PyPSA [6] a été choisi comme outil de simulation pour la modélisation du micro-réseau. Cet outil est compatible avec Python, il a la capacité à intégrer un grand nombre de composants électriques, à représenter toutes les formes d'architecture électrique, à modéliser la qualité ou le vieillissement du micro-réseau, à fournir des métriques de dimensionnement et à permettre la modélisation d'éléments de protection.

PyPSA est une bibliothèque open-source avec une approche modulaire et orientée objet de la modélisation des systèmes électriques, représenté figure 4, fournissant une modélisation précise et complète des flux d'énergie à travers une approche inspirée de la théorie des graphes et des équations de bilan énergétique. Les principaux composants du modèle de flux d'énergie PyPSA comprennent les bus, les générateurs, les charges et les lignes, chacun appliquant la conservation de l'énergie.

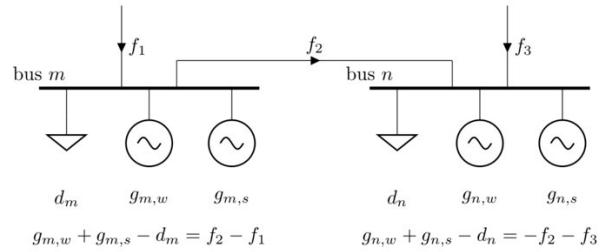


Figure 4. Le bus PyPSA

Dans notre étude, nous avons relié chaque nœud de bus à un individu unique pour la compatibilité avec les modèles de flux de trésorerie et d'acceptation sociale.

### 4. MODÈLE FINANCIER : CRÉER UN FLUX DE TRÉSORERIE

Un modèle de flux de trésorerie pour les micro-réseaux énergétiques est proposé pour simuler le comportement financier des individus dans le micro-réseau. La figure 5 montre comportement financier de quatre groupes d'individus dans le micro-réseau avec leurs revenus et dépenses, ainsi que les flux financiers entre eux.

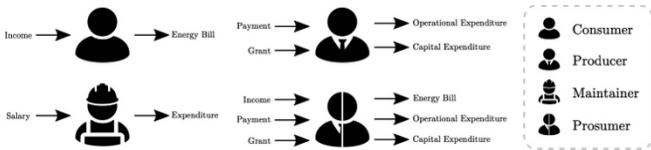


Figure 5. Les quatre groupes économiques d'un micro-réseau

Un modèle de flux financiers orienté objet est développé sur la base d'une classe unique d'agents économiques, représenté figure 6. Chaque agent est déclaré avec un solde initial, un revenu moyen, un coût externe moyen et un prix de l'énergie. Le modèle prend en compte des entrées telles que les prix de l'énergie active et réactive, les coûts externes et le revenu, ainsi qu'une fonction de variation pour ces coûts et ce revenu. Le modèle calcule le solde de chaque utilisateur à l'aide d'une équation.

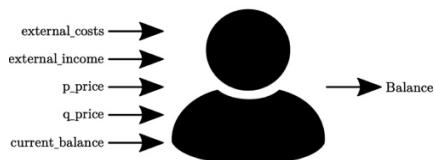


Figure 6. Le modèle économique d'individu utilisé pour l'étude

Le solde de chaque individu est envoyé au modèle social, où la flexibilité nécessaire est fournie pour créer des membres du micro-réseau avec différentes variables économiques. Cette classe unique exprime tous les types d'agents du micro-réseau et ne représente pas les aspects architecturaux du domaine financier.

## 5. MODÈLE SOCIAL : MODÈLE DE TAM

Le modèle d'acceptation sociale pour les systèmes de micro-réseaux utilise le modèle d'acceptation et d'utilisation de la technologie [7] (TAM) et les réseaux bayésiens. Le TAM se concentre sur la perception de l'utilité et de la facilité d'utilisation par l'utilisateur individuel, influencée par des facteurs externes et l'expérience de l'utilisateur. Les réseaux bayésiens modélisent les relations entre les variables, notamment l'utilité perçue, la facilité d'utilisation et l'expérience de l'utilisateur, et calculent la probabilité d'acceptation de l'utilisateur, comme montre la figure 7.

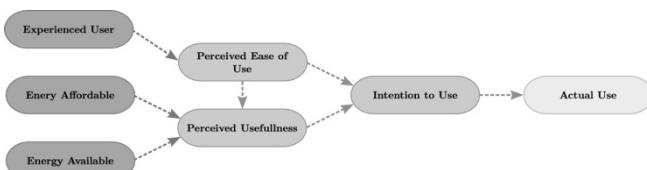


Figure 7. Le modèle TAM utilisé

Le modèle est implémenté en Python et permet une compréhension simple mais réaliste de l'acceptation des micro-réseaux communautaires par les utilisateurs. À l'avenir, il pourra être amélioré en intégrant des variables supplémentaires telles que l'acceptation sociale de la communauté et la confiance dans l'opérateur du micro-réseau.

## 6. MODÈLE D'INFORMATION : COUPLAGE DES FLUX

Pour faire face à la complexité de la modélisation des flux d'informations dans notre co-simulation, nous l'avons simplifiée en la rendant parfaite. Cela signifie que le composant de contrôle du réseau électrique est intégré au modèle électrique, et que les flux d'informations entre les

composants sont instantanés et transparents. Tous les composants disposent d'informations complètes sur le réseau pour leurs calculs, ce qui permet une co-simulation plus simple et plus efficace. Toutefois, cette approche ne tient pas compte des spécificités du flux d'informations, comme les retards ou les erreurs de communication.

## 7. RÉSULTATS DE SIMULATION

Le simulateur a été soumis à un test en utilisant une modélisation d'un micro-réseau simple comprenant deux entités, Alice et Bob. Alice était dotée d'une source d'énergie contrôlable d'une capacité maximale de 15 kW, tandis que Bob était le consommateur d'énergie, utilisant une charge résidentielle. La configuration du réseau électrique simulé était basique, avec deux bus : le bus zéro, relié à Alice et à sa source d'énergie, et le bus un, relié à Bob et à sa charge, représenté figure 7. Les résultats de la simulation de ce micro-réseau sont présentés dans la figure 8. Le modèle développé dans cet exemple est téléchargeable à l'adresse suivante : [https://gitlab.laas.fr/metagrid/metagrid-simulator/-/tree/simu\\_simple](https://gitlab.laas.fr/metagrid/metagrid-simulator/-/tree/simu_simple).

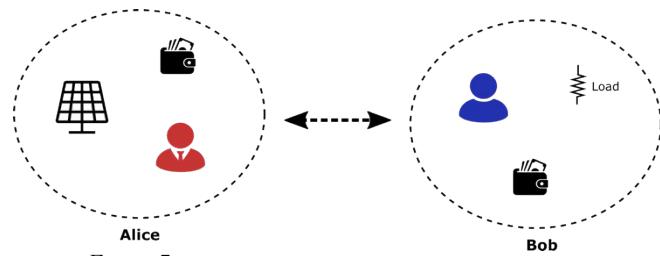


Figure 7. Représentation du micro-réseau simulé

Sur le plan financier, Bob a commencé la simulation avec un solde de compte bancaire de 200, tandis qu'Alice débutait à zéro. Bob recevait un petit salaire régulier, ajouté à son compte, tandis qu'Alice ne pouvait gagner de l'argent qu'en payant la consommation d'énergie de Bob.

La simulation a révélé une relation étroite entre la production et la consommation d'énergie. Lorsque la charge de Bob tentait de consommer plus de 15 kW, elle était déconnectée du réseau, interrompant ainsi la consommation jusqu'à ce que la demande de Bob passe en dessous de 15 kW, correspondant à la capacité maximale de la source d'Alice.

En ce qui concerne les transactions financières, le compte bancaire d'Alice augmentait progressivement à mesure que Bob consommait de l'énergie, tandis qu'il restait stagnant en l'absence de consommation. En revanche, le compte bancaire de Bob diminuait progressivement à mesure qu'il consommait de l'énergie, avec une baisse plus marquée lorsque sa consommation augmentait. Lorsque la charge de Bob était déconnectée du réseau, son compte bancaire se remplissait progressivement grâce à son salaire, tandis que le compte d'Alice restait stagnant en l'absence de paiements.

La simulation a également révélé qu'à la fin de celle-ci, Alice a cessé d'accepter de l'énergie, car le solde négatif du compte bancaire de Bob l'a amenée à considérer que l'énergie était trop coûteuse à ce stade. Les résultats de la simulation ont démontré une quasi-parfaite corrélation entre les comptes bancaires de Bob et d'Alice, le compte d'Alice restant stagnant lorsque Bob était déconnecté et le compte de Bob se remplissant grâce à son salaire lorsque sa charge était déconnectée.

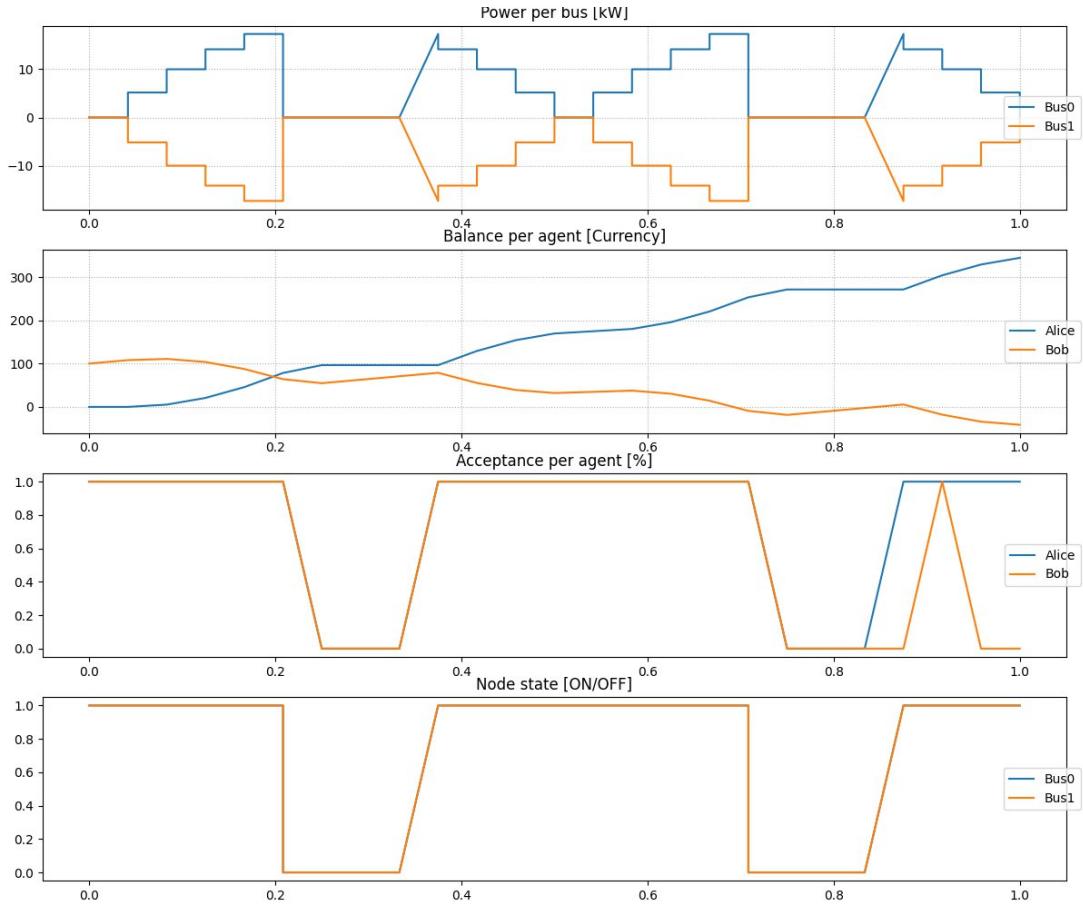


Figure 8. Simulation d'un modèle simple de micro-réseau entre deux utilisateurs

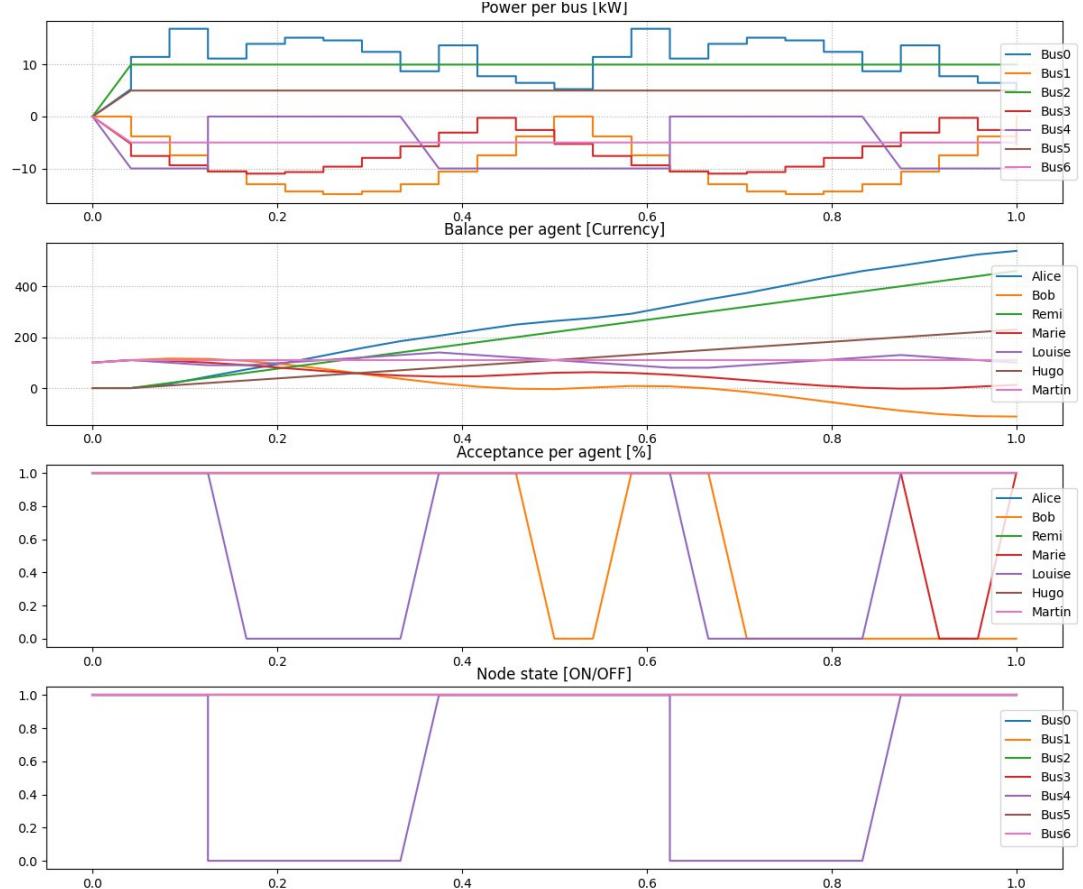


Figure 9. Simulation d'un modèle plus complexe de micro-réseau entre 7 utilisateurs

Dans le domaine de la modélisation des micro-réseaux, l'évolutivité revêt une importance primordiale pour permettre une représentation et une analyse efficaces du comportement d'un système dans des conditions diverses. Un modèle de simulation évolutif a la capacité d'accommoder un nombre croissant d'agents et de composants au sein du système, offrant ainsi une représentation complète et précise de celui-ci. Le modèle développé dans cet exemple, représenté figure 9, peut être téléchargé à l'adresse suivante : [https://gitlab.laas.fr/metagrid/metagrid-simulator/-/tree/simu\\_complex](https://gitlab.laas.fr/metagrid/metagrid-simulator/-/tree/simu_complex).

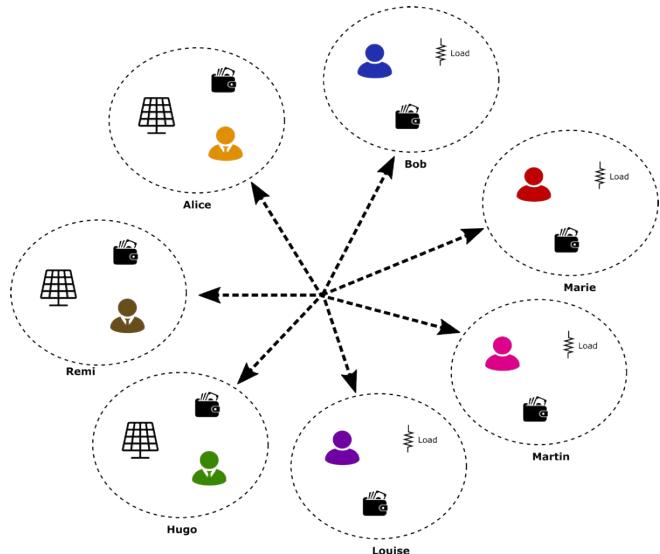


Figure 9. Représentation du micro-réseau simulé

La simulation présentée dans la figure 8 a pour objectif de démontrer l'extensibilité d'un modèle exécutable. Le scénario de simulation met en jeu sept agents différents, à la fois producteurs et consommateurs, tous connectés à un bus central permettant l'échange d'énergie. Trois sources d'énergie distinctes se trouvent aux bus 0, 2 et 5, la première source étant variable tandis que les autres sont constantes. Les quatre autres bus sont constitués de charges dont la dynamique est soit constante, soit sinusoïdale.

La fonction de délestage, qui procède à la déconnexion du bus en cas de demande excessive d'énergie de la part des consommateurs, fonctionne conformément aux attentes. L'acceptation de Louise, liée au bus, varie de manière appropriée en réponse aux fluctuations du système. De plus, les résultats de la simulation mettent en évidence le rôle crucial joué par le prix de l'énergie dans l'acceptation des agents.

Les résultats obtenus au cours de cette simulation sont très prometteurs pour le développement du modèle exécutable. La capacité du modèle à s'adapter aisément à l'augmentation du nombre d'agents et de composants au sein du système, comparativement au modèle antérieur, souligne la valeur de l'évolutivité dans les modèles de simulation. Cela revêt une importance particulière dans le contexte des micro-réseaux, où le comportement du système peut évoluer rapidement en réponse aux variations de la demande et de la production d'énergie, ce qui confère une importance accrue à la nécessité d'un modèle évolutif.

## 8. CONCLUSION ET TRAVAUX FUTURS

Cette étude propose un modèle en co-simulation pour l'étude systémique des micro-réseaux. Les trois modèles utilisés sont interconnectés à partir de PyPDEVS. Le défi des modèles systémiques est le couplage des flux et des échanges, que ce modèle aborde par une approche multi-composants.

La tâche essentielle et complexe consiste à finaliser l'interconnexion des quatre domaines dans le modèle de co-simulation. Cela implique l'ajout d'un modèle d'information pour gérer le contrôle et la gestion des données, ainsi que le développement de chaque modèle avec un grand nombre d'entrées et de sorties pour l'interconnexion. L'objectif est de construire un outil de co-simulation systémique capable de simuler la diversité des indicateurs de durabilité.

Une fois le modèle formalisé, des études de cas réels peuvent être utilisées pour identifier les problèmes internes des micro-réseaux qui affectent leur durabilité. Une étude de domaine sera réalisée pour valider et améliorer la notation systémique des facteurs de durabilité des micro-réseaux. Un questionnaire générique développé dans ce travail peut servir de base pour évaluer une étude de cas réelle ou surveiller la santé et l'évolution d'un micro-réseau.

Lorsque le modèle et la simulation seront suffisamment formalisés et validés, des recherches sur la durabilité des micro-réseaux pourront être menées. Des scénarios variés permettront d'identifier avec précision les points faibles du système ou les chaînes d'événements internes menant à sa défaillance. Des expériences hybrides, combinant des composants physiques et simulés, pourront également être réalisées grâce à la capacité du modèle de co-simulation à intégrer des domaines connectés de manière indépendante. Cette approche permettra

## 9. REFERENCES

- [1] A. Boche, C. Foucher, and L. F. L. Villa, "Understanding Microgrid Sustainability: A Sys-temic and Comprehensive Review," *Energies*, vol. 15, p. 2906, Jan. 2022.
- [2] A. Boche, C. Foucher, and L. F. L. Villa, "A systemic and multi-disciplinary diagnosis model for microgrids sustainability studies," in International Conference on Innovations in Energy Engineering & Cleaner Production (IEECP 2022), 2022.
- [3] M. A. Cuesta, T. Castillo-Calzadilla, and C. E. Borges, "A critical analysis on hybrid re-newable energy modeling tools: An emerging opportunity to include social indicators to op-timise systems in small communities," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 122, p. 109691, Apr. 2020.
- [4] Schmeling, L., et al. "Review of different software solutions for the holistic simulation of distributed hybrid energy systems for the commercial energy supply." Proceedings of the 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands. 2017.
- [5] B. P. Zeigler, A. Muzy, and E. Kofman, *Theory of modeling and simulation: discrete event & iterative system computational foundations*. Academic press, 2018.
- [6] T. Brown, J. Hörsch, and D. Schlachtberger, "Pypsa: Python for power system analysis,arXiv preprint, 2017
- [7] Marangunić, N., Granić, A. Technology acceptance model: a literature review from 1986 to 2013 *Univ Access Inf Soc*14, 81–95 (2015)