



HAL
open science

Approche hiérarchique de co-simulation pour l'étude des échanges d'énergie des micro-réseaux

Jean-Baptiste Wiart

► **To cite this version:**

Jean-Baptiste Wiart. Approche hiérarchique de co-simulation pour l'étude des échanges d'énergie des micro-réseaux. Modélisation et simulation. Université de Lorraine, 2023. Français. NNT : 2023LORR0026 . tel-04142176v2

HAL Id: tel-04142176

<https://hal.science/tel-04142176v2>

Submitted on 7 Sep 2023

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.

Approche hiérarchique de co-simulation pour l'étude des échanges d'énergie des micro-réseaux

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 13 janvier 2023

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Lorraine
(mention informatique)

par

WIART Jean-Baptiste

Composition du jury

<i>Rapporteurs :</i>	Stéphane GALLAND	Professeur, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Belfort
	Grégory ZACHAREWICZ	Professeur, IMT Mines Alès, Alès
<i>Examineurs :</i>	Nicolas SABOURET	Professeur, Université de Paris Saclay, Orsay
	Ammar OULAMARA	Professeur, Université de Lorraine, Nancy
<i>Directeur de thèse :</i>	Vincent CHEVRIER	Professeur, Université de Lorraine, Nancy
<i>Co-directeur :</i>	Denis NETTER	Professeur, Université de Lorraine, Nancy

Mis en page avec la classe thesul.

Remerciements

Chers lecteurs,

Le moment est venu de clore cette étape significative de ma vie académique, et je tiens à exprimer ma gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de cette thèse.

Tout d'abord, je tiens à remercier chaleureusement Vincent et Denis, mes directeurs de thèse. Leur accompagnement, leur soutien constant et leur expertise ont été inestimables tout au long de ce parcours académique exigeant.

Mes sincères remerciements vont également à Ammar OULAMMARA et Nicolas SABOURET, mes examinateurs, ainsi qu'à Stéphane GALLAND et Grégory ZACHAREWICZ, membres du jury de thèse, pour leur précieuse contribution à l'évaluation de mon travail de recherche.

Un grand merci à Laurent, Virgile, Ye-Qiong, Sylvain, Louis, Enrico, Virginie, Debashisha, Emmanuel, ainsi qu'aux stagiaires de Mecsyco, dont Victor, Marius, Benoit, et bien d'autres. Je n'oublie pas l'équipe de la cafétéria, Caroline, Floriane, Isabelle, Tarek, sans qui cette thèse aurait été bien différente.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers mes collègues de bureau au Loria et amis, Théo, Paul, Amaury, Thomas Paris qui ont partagé ce voyage avec moi et sans qui cette thèse aurait été différente.

Du côté du GREEN, je tiens à remercier chaleureusement les doctorants, notamment Maxime, Dominique, Baptiste, Thibaud, Adrien, Abderammane, Peyman, les enseignants, en particulier Julien, ainsi que notre secrétaire dévouée, Sylvie.

Mes pensées vont également à Thomas Barraco, Élise, Antoine, Maiween, Patrick, Adrien Hemmer, Loic, Thomas Lacour, Jonathan, Pierre-Olivier, Soline, Vincent Badreau, Catherine, Anil, Guillaume, Louis, Vincent, Clémence, et à tous ceux qui ont enrichi mon expérience au cours de cette période.

Enfin, je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers ma famille pour leur soutien constant et leur encouragement. Et à Marielle, ma conjointe, je ne saurais exprimer à quel point ta patience, ton soutien indéfectible et ton amour inconditionnel ont été essentiels pour me permettre de surmonter les défis de cette thèse.

Merci à tous pour avoir contribué à la réussite de cette thèse.

Avec toute ma gratitude,

À mes grands-parents.

TABLE DES MATIÈRES

Chapitre 1

Introduction

1

1.1	Contexte de la thèse	2
1.1.1	Transition énergétique : vers une gestion de l'énergie plus maîtrisée	2
1.1.2	Modélisation et simulation comme méthode d'analyse de systèmes	3
1.1.3	Défis de la construction des micro-réseaux par co-simulation	4
1.2	Problématique de thèse et contributions	4
1.3	Organisation du manuscrit	5

Chapitre 2

Modélisation et Simulation

2.1	Introduction	7
2.1.1	Activité de modélisation et simulation	8
2.1.2	Modélisation et simulation de systèmes complexes	9
2.2	Activité de Modélisation et Simulation	10
2.2.1	Détail de la démarche	10
2.2.2	Analyse des résultats	11
2.2.3	Outils dédiés à l'activité de M&S	12
2.2.4	Bilans	13
2.3	Modélisation et Simulation de systèmes complexes	14
2.3.1	Étude des systèmes complexes	14
2.3.2	Interopérabilité des formalismes et des logiciels	16
2.3.3	Outils dédiés à la co-simulation	19
2.4	Conclusion	22

Chapitre 3

Les micro-réseaux : des systèmes complexes

3.1	Introduction	25
3.2	Le concept de microréseau	26
3.2.1	Développement des microréseaux	27
3.2.2	Problématiques de développement	28
3.2.3	Bilan	30
3.3	Modélisation et simulation de microréseaux	31
3.3.1	Domaines de recherche spécifique	31
3.3.2	Nécessité de co-simulation des microréseaux	32
3.3.3	Approche de modélisation et de co-simulation de microréseaux	33
3.4	Conclusion	36

Chapitre 4

Positionnement

4.1	Introduction	37
4.2	Problématique	38
4.2.1	Détails et objectifs	38
4.2.2	Choix de l'intergiciel	38
4.2.3	MECSYCO pour l'étude des échanges d'énergie par co-simulation	39
4.2.4	Bilan	42
4.3	Proposition	43

Chapitre 5

Spécification de multi-modèles informationnels des microréseaux

5.1	Introduction	45
5.2	Descriptions et définitions des modèles informationnels	46
5.2.1	Conceptualisation et formalisation du composant informationnel	47
5.2.2	Changement de représentation : modèles physiques vers informationnels	48
5.2.3	Conceptualisation et formalisation de l'opérateur de couplage	49
5.3	Couplage de composants	51
5.3.1	Modèle couplé	51
5.3.2	Résolution du problème d'équilibrage lors d'une simulation	52
5.4	Hierarchisation de la démarche pour le passage à l'échelle	54

5.5 Conclusion	55
--------------------------	----

Chapitre 6 Expérimentations et illustration de la démarche proposée
--

6.1 Introduction	58
6.2 Contexte	58
6.2.1 Système cible	58
6.2.2 Liste de modèles	59
6.3 Des composants physiques vers des composants informationnels	62
6.3.1 Modèles physiques simples	62
6.3.2 Modèle thermique d'une pièce	62
6.4 Preuve de concept pour la construction de modèles de micro-réseaux	63
6.4.1 Objectifs et scénario	63
6.4.2 Expérimentations	66
6.4.3 Bilans et commentaires	66
6.5 Preuve de concepts pour l'itérativité et la modularité	68
6.5.1 Objectifs et scénario	68
6.5.2 Expérimentations	70
6.5.3 Bilans et commentaires	72
6.6 Preuve de concepts pour la construction hiérarchique de micro-réseaux	74
6.6.1 Objectifs et scénario	74
6.6.2 Expérimentations	75
6.6.3 Bilans et commentaires	76
6.7 Discussions	77
6.7.1 Modèles physiques et stratégie de gestion	77
6.7.2 Visualisation des résultats	78
6.8 Conclusion	78

Chapitre 7 Conclusion
--

7.1 Contexte et problématiques abordées	81
7.2 Contributions	82
7.3 Perspectives	82

Annexes

Annexe A

Description du multi-modèle de la maison autonome (ad-hoc)

Annexe B

Description du multi-modèle 6.6 (preuve de concept)

Annexe C

Description du multi-modèle 6.10 (itérativité)

Annexe D

Description du multi-modèle 6.11 (modularité)

Annexe E

Description du multi-modèle 6.18 (hiérarchisation)

Bibliographie

105

CHAPITRE 1

INTRODUCTION



IMPACT ULHyS



Université de Lorraine Hydrogène Sciences et
Technologies



WP3 - Micro-réseaux

Sommaire

1.1	Contexte de la thèse	2
1.1.1	Transition énergétique : vers une gestion de l'énergie plus maîtrisée	2
1.1.2	Modélisation et simulation comme méthode d'analyse de systèmes	3
1.1.3	Défis de la construction des micro-réseaux par co-simulation	4
1.2	Problématique de thèse et contributions	4
1.3	Organisation du manuscrit	5

Ce chapitre introduit la thèse. Il en donne le contexte et les conditions qui ont permis les présents travaux de voir le jour.

Nous commençons par faire un rapide point sur les méthodes de gestion d'énergie dans le cadre de la transition énergétique. Dans la suite, nous introduisons la notion de micro-réseaux, réponse à ces enjeux, qui permettent une gestion de l'énergie plus localisée et plus maîtrisée à l'aide de sources renouvelables. Nous abordons ensuite l'activité de modélisation et de simulation comme cadre d'étude des micro-réseaux et les enjeux que de tels systèmes impliquent. Nous terminons cette introduction par la présentation de l'organisation du manuscrit.

1.1 Contexte de la thèse

1.1.1 Transition énergétique : vers une gestion de l'énergie plus maîtrisée

Des suites des évolutions techniques et technologiques et d'une volonté de réduction des effets négatifs du secteur énergétique, de nouvelles méthodes de production et de consommation doivent être trouvées. La transition énergétique désigne cette volonté de modification des modes de production et de consommation de l'énergie¹. Diminuer notre consommation d'énergie fossile tout en augmentant la part d'énergie renouvelable est l'objectif de cette transition.

Toutefois l'énergie produite par les sources renouvelables comme les énergies solaires ou éoliennes est intermittente et difficilement transportable en raison du mode de fonctionnement de ces sources. Pour favoriser leur utilisation, la tendance porte sur une gestion décentralisée et locale du réseau énergétique. Les sources sont couplées avec des systèmes de stockage, comme les stockages à hydrogène, palliant le problème de l'intermittence. L'organisation des échanges d'énergie est assurée par un système de gestion intelligent, garantissant le fonctionnement des éléments du réseau. Ce type de réseaux est communément appelé micro-réseaux ou microgrid. Par exemple, le projet *RE8760*² montre les possibilités de cette approche. La maison, alimentée à l'aide de panneaux photovoltaïques et d'énergie éolienne, stocke l'énergie non utilisée, qui servira à produire de l'hydrogène réutilisable dans des piles à combustible.

Versions réduites et intelligentes d'un réseau énergétique, les micro-réseaux permettent d'assurer l'équilibre entre la consommation et la production en utilisant un système de gestion d'énergie autonome qui s'appuie sur les technologies de l'information. Les micro-réseaux, ne sont plus simplement

1. <https://www.ecologie.gouv.fr/vers-systeme-electrique-plus-flexible>
2. <https://nilssonenergy.com/products/>

des réseaux qui produisent de l'énergie et la transportent du producteur vers le consommateur, mais il s'agit de réseaux dont l'ensemble des éléments qui le composent sont des acteurs qui interagissent entre eux, produisent, consomment ou stockent de l'énergie [Albano et al., 2015]. Ils possèdent deux modes de fonctionnement : ilôtés, c'est-à-dire fonctionnant en autonomie, ou connectés au réseau général.

En plus d'un enjeu environnemental, les défis des micro-réseaux sont donc aussi techniques et économiques [Stadler et al., 2016]. La complexité des micro-réseaux, du fait de la diversité des technologies impliquées [Chowdhury et al., 2009], imposent de réaliser de nombreuses études sur leur modes de gestion, le choix, le dimensionnement et le placement des sources. En outre, dans les régions éloignées, des infrastructures de télécommunication spécifiques doivent être développées et peuvent constituer un inconvénient important³.

Par tous ces aspects techniques et technologiques, la modélisation et simulation (M&S) s'avère être un outil efficace pour l'étude de ces systèmes plutôt que de mettre en place des bancs d'essais, à échelle réduite ou réelle, qui peuvent être coûteux en temps et en argent.

1.1.2 Modélisation et simulation comme méthode d'analyse de systèmes

L'activité de modélisation et Simulation (M&S) permet l'étude de systèmes, naturels ou artificiels, dont l'objectif est de comprendre, analyser et parfois prévoir leur comportement [Ramat, 2006]. Son objectif est de fournir, par la simulation, une réponse à une question que nous nous posons sur le système étudié. Elle s'inscrit dans une démarche scientifique rigoureuse, s'attachant à valider différents critères : description non ambiguë de modèles, reproductibilité de l'expérience, validation des modèles. Les résultats de simulation ne sont influencés que par les choix de modélisation.

Cette démarche met en œuvre différents concepts liés à différentes étapes bien définies [José Manuel Galán, 2009]. Elle consiste d'abord à identifier l'objet d'étude en fonction d'un questionnement précis qui délimitera le système étudié. Cela conduit ensuite à la construction de modèles. Ces modèles sont une représentation abstraite de notre système cible et de son environnement et permettent de réaliser différentes expériences qui auraient été difficiles à mettre en place, sinon impossibles sur le système réel.

Avec le progrès de l'informatique, ces expériences sont de plus en plus réalisées à l'aide de logiciels spécialisés. Nous pouvons citer Modelica pour les systèmes continus [Fritzson and Engelson, 1998] ou encore OMNET++/Inet [Varga and Hornig, 2008a] pour les réseaux IP. Ces logiciels facilitent le travail de M&S, en proposant des fonctionnalités dédiées, comme par exemple l'automatisation de certaines tâches d'implémentation ou encore la vérification de la cohérence de certains aspects. Un modèle implémenté dans un outil dédié est par ailleurs facilement ré-exécutable, rendant la vérification et la validation du modèle plus aisées.

En revanche, pour le cas des micro-réseaux dans lesquels plusieurs domaines interagissent, un seul logiciel dédié ne suffit pas à représenter l'ensemble du système. Ces systèmes sont appelés systèmes complexes. Ils sont définis comme un système composé d'un grand nombre d'entités hétérogènes en interaction et dont le comportement émerge de l'interaction entre ces entités [Ramat, 2006]. La difficulté réside alors dans le fait de réconcilier les différents points de vue des experts, de manière

3. <https://www.smartgrids-cre.fr/encyclopedie/les-microgrids/le-concept-de-microreseau>

cohérente, au sein de la démarche de M&S. La démarche de modélisation et de simulation de systèmes complexes permettent de répondre en partie à certaines de ces problématiques multi-domaines comme les micro-réseaux. Cette démarche applique des principes liés à l'étude des systèmes complexes comme la multi-modélisation et la co-simulation [Gomes et al., 2018].

Il s'agit de coupler chacun des modèles dans un multi-modèle représentant le système global. Enfin un intergiciel s'assure de l'échange des données et de la synchronisation entre chaque simulateur de chaque modèle. La démarche de co-simulation s'intègre dans une démarche plus globale de M&S qui consiste à construire des modèles spécifiques à chaque domaine d'étude.

1.1.3 Défis de la construction des micro-réseaux par co-simulation

Le développement d'intergiciel de co-simulation robuste, sous-entendu fiable au niveau intégration formelle et suffisamment modulaire, devient un enjeu majeur pour ces systèmes. Les difficultés de développement se situent sur deux aspects :

- Garantir l'intégration et la synchronisation des logiciels dans une plateforme de co-simulation par des outils formels.
- Rendre l'outil suffisamment simple d'utilisation pour des personnes non initiées. Apparaissent alors des problématiques imputables aux domaines dans lesquelles la co-simulation va être réalisée.

Pour répondre aux problématiques d'intégration et de synchronisation des logiciels, nos travaux utilisent et font suite à ceux qui existent autour de l'intergiciel MECSYCO [Camus, 2015]. La plateforme de co-simulation propose des solutions pour intégrer et gérer dans une même structure des modèles hétérogènes. La plateforme utilise le méta-modèle AA4MM [Siebert, 2011] et le formalisme Discrete Event System specification (DEVS) [Zeigler et al., 2000] afin de garantir une co-simulation modulaire et hiérarchique rigoureuse.

Cependant pour le cas de la construction et de la représentation spécifique de multi-modèles de micro-réseaux, l'intergiciel se heurte à des problématiques plus spécifiques qui sont le sujet de notre recherche.

1.2 Problématique de thèse et contributions

La thèse fait partie de l'axe "micro-réseaux" du projet IMPACT ULHyS⁴ dans le cadre d'une recherche interdisciplinaire. Cet axe a pour but d'explorer de nouvelles méthodes de gestion de l'énergie dans le cadre de la transition énergétique.

C'est dans ce contexte multi-disciplinaire que nous nous plaçons. Plus spécifiquement, nos objectifs de thèse concernent la modélisation et la simulation des échanges d'énergie des micro-réseaux et les conditions nécessaires à leur co-simulation rigoureuse. La question de recherche n'est plus de représenter et de co-simuler les micro-réseaux, question résolue par MECSYCO, mais de faciliter la construction modulaire et hiérarchique de multi-modèles de micro-réseaux pour l'étude des échanges d'énergie.

4. <http://lue.univ-lorraine.fr/fr/wp3-micro-reseaux>

L'approche proposée dans la thèse s'appuie sur une vision informationnelle du réseau, dans laquelle des producteurs, consommateurs et systèmes de stockage échangent des informations et de l'énergie. Nous séparons les composants réalisant des opérations sur l'énergie d'un côté (consommer, produire, stocker) et le système de gestion de l'autre. Ce dernier joue le rôle d'opérateur de couplage, facilitant le couplage entre les composants du réseau tout en régulant les échanges d'énergie.

1.3 Organisation du manuscrit

Le chapitre 2 détaille l'activité de modélisation et de simulation des systèmes complexes, en reprenant les bases de l'approche. Nous y donnons les enjeux principaux en rapport avec notre travail. Les défis concernent notamment la description et l'intégration au niveau conceptuel d'éléments spécifiques dans une démarche scientifique de co-simulation.

Le chapitre 3 reprend la définition des micro-réseaux. Cette définition met en lumière les micro-réseaux en tant que système complexe et donne quelques approches d'études.

Le chapitre 4 détaille la problématique de thèse en donnant, à travers un exemple, les limites de l'intergiciel MECSYCO dans le cadre de l'étude par co-simulation des échanges d'énergie des micro-réseaux. Cet exemple reprend notamment celui illustré dans [Paris et al., 2019] pour la régulation thermique d'un bâtiment en déterminant les conditions nécessaires pour représenter dans une même co-simulation les échanges d'énergie d'un réseau..

Le chapitre 5 spécifie la contribution principale. Il découple le réseau en deux concepts qui permettent de représenter d'un côté les composants du réseau réalisant des opérations sur l'énergie et d'instancier la stratégie de gestion des échanges d'énergie. Nous y formalisons leur interface respective et présentons la dynamique du multi-modèle informationnel du réseau.

Le chapitre 6 illustre l'approche proposée à travers trois exemples, construits successivement autour du multi-modèle initial de la régulation thermique d'un bâtiment, utilisé précédemment.

Enfin le chapitre 7 conclut le travail de thèse. Il rappelle le contexte et la problématique abordée autour de la transition énergétique. Il termine par des réflexions sur le travail pouvant mener à des sujets de recherche autour de différents aspects abordés dans la thèse.

MODÉLISATION ET SIMULATION

Sommaire

2.1 Introduction	7
2.1.1 Activité de modélisation et simulation	8
2.1.2 Modélisation et simulation de systèmes complexes	9
2.2 Activité de Modélisation et Simulation	10
2.2.1 Détail de la démarche	10
2.2.2 Analyse des résultats	11
2.2.3 Outils dédiés à l'activité de M&S	12
2.2.4 Bilans	13
2.3 Modélisation et Simulation de systèmes complexes	14
2.3.1 Étude des systèmes complexes	14
2.3.2 Interopérabilité des formalismes et des logiciels	16
2.3.3 Outils dédiés à la co-simulation	19
2.4 Conclusion	22

Ce chapitre permet de comprendre les enjeux liés à l'activité de modélisation et de simulation (M&S), dans un cadre général d'abord puis par rapport aux systèmes complexes.

La première partie de ce chapitre s'intéresse à la définition de l'activité de la M&S. La seconde partie montre les spécificités des systèmes complexes et explique comment la théorie de la modélisation et simulation (TMS) aide à intégrer les hétérogénéités de ces systèmes.

2.1 Introduction

La démarche de M&S permet, à l'aide de concepts et d'outils spécifiques à des domaines d'études, de construire des représentations abstraites de systèmes réels ou virtuels, appelés modèles, permettant d'analyser et d'étudier leur comportement [Ramat, 2006]. L'activité est guidée par un ensemble d'entités. L'ensemble, composé par le *système source*, le *cadre expérimental*, le *modèle* et le *simulateur*, forme, avec les relations qui existent entre elles, le cadre pour la M&S [Zeigler et al., 2018] représenté

par la figure 2.1. Les définitions de ces entités, données en aval, introduisent le cadre de l'activité de M&S.

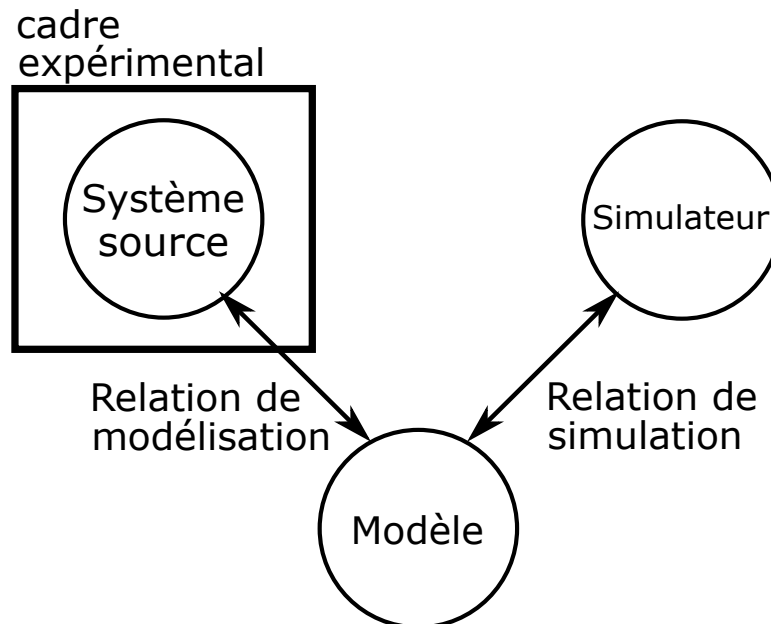


FIGURE 2.1 – Notions clés de la M&S : Système, Modèle, Simulation [Zeigler et al., 2018].

2.1.1 Activité de modélisation et simulation

Nous définissons ici les principes fondamentaux de l'activité de M&S donnés dans [Zeigler et al., 2000] en commençant par la notion de système.

Système :

Définition 1. Le système [source] est l'environnement réel ou virtuel que l'on souhaite modéliser. Il est vu comme une source de données observables, sous la forme d'une trajectoire de variables indexées dans le temps [Zeigler et al., 2000].

Cette première définition nous indique que le système est un ensemble délimité du monde réel ou virtuel sur lequel l'environnement agit et dont les stimuli influencent son comportement interne. Les données observables sont extraites ou générées dans des conditions spécifiques, identifiées comme le cadre expérimental. La représentation de ce système en un ensemble de spécifications, visant à générer des données de valeurs proches de celles observées, va mener au *modèle* à travers la relation de modélisation .

Modèle : Une définition de *modèle* peut être donnée par :

Définition 2. Pour un observateur B, un objet A* est un modèle d'un objet A dans la mesure où B peut utiliser A* pour répondre aux questions qu'il se pose sur A [Minsky, 1965].

Classiquement, un modèle est conçu comme un ensemble de règles (mathématiques, logiques...) permettant, à partir d'entrées acceptables représentant les stimuli de l'environnement, de produire un

ensemble de sorties correspondant aux réactions de ces stimuli. La relation de modélisation, entre le système réel et le modèle, définit les parties du système à représenter et comment elles le seront. Cette relation précise les hypothèses simplificatrices faites sur le système pour construire le modèle : choix du modélisateur, connaissance partielle du système, limitation de l’outil de modélisation [Zacharewicz, 2006]. La comparaison entre les données de sorties et les données observées sur le système réel donne lieu à une confirmation ou infirmation des hypothèses initiales. La génération des valeurs se fait à l’aide des simulateurs. La relation de simulation entre le modèle et le simulateur garantit l’exécution des instructions définies dans le modèle.

Simulateur :

Définition 3. Un simulateur est un système de calcul qui obéit à des instructions pour exécuter un modèle et en produire son comportement [Zeigler et al., 2000].

S’apparentant à un outil technique, le simulateur peut être un outil logiciel implémenté sur ordinateur ou encore un algorithme abstrait. En vérifiant que le simulateur reproduit un comportement spécifié à partir d’instructions définies dans un modèle, nous obtenons la relation de simulation.

La définition du système, la construction du modèle et sa simulation sont réalisées dans une suite d’étapes, la *conceptualisation*, la *formalisation*, la *spécification opérationnelle* et l’*implémentation* [Paris, 2019]. Lors de chacune de ces étapes, des hypothèses de construction sont émises. L’analyse des résultats de simulation, en comparaison avec les données observables sur le système, permet de valider ou d’invalider ces hypothèses. L’activité de modélisation et de simulation nous donne alors la possibilité de reconsidérer ces hypothèses dans une démarche itérative.

Ces étapes sont appropriées dès lors que le système à représenter n’utilise qu’un seul formalisme ou outil logiciel. Pour des systèmes où plusieurs domaines se croisent, dans lequel la nécessité d’utiliser plusieurs outils apparaît, l’activité est étendue à la démarche de modélisation et simulation de systèmes complexes qui a pour vocation de représenter chaque partie du système de la manière la plus adaptée.

2.1.2 Modélisation et simulation de systèmes complexes

Dans le cadre de la démarche de M&S, nous avons défini la notion de système (définition 2.1.1). Nous définissons maintenant la notion de *systèmes complexes* dans le cadre des systèmes multi-domaines :

Définition 4 (Système complexe). Un système complexe est un système composé d’un grand nombre d’entités hétérogènes en interaction et dont le comportement global émerge des interactions entre ses composants [Ramat, 2006].

Le système cible va être représenté comme un système de systèmes : un ensemble de systèmes hétérogènes en interactions. Les mouvements de foule, dont l’évolution va apparaître à la suite du mouvement de chaque individu, sont un exemple de systèmes complexes. Les micro-réseaux énergétiques, dont le comportement est déterminé par une diversité d’acteurs en interaction comme les sources de production intermittentes ou les habitations connectées, en sont un autre. En plus des nombreuses entités qui les composent, le comportement global d’un micro-réseau est régi par un ensemble de contraintes multi-domaines. L’hétérogénéité est alors le cœur du problème pour étudier ce type de

système.

Dans la première partie de ce chapitre, nous verrons comment l'activité de M&S est mise en œuvre dans un domaine spécifique. Dans la seconde partie, nous détaillerons la modélisation et la simulation de systèmes complexes et ses enjeux spécifiques.

2.2 Activité de Modélisation et Simulation

La M&S suit un processus clairement défini illustré à la figure 2.2. Utilisées dans le cadre de la modélisation et de la simulation multi-agent, ces étapes sont généralisables pour des activités de M&S liées à l'informatique [José Manuel Galán, 2009].

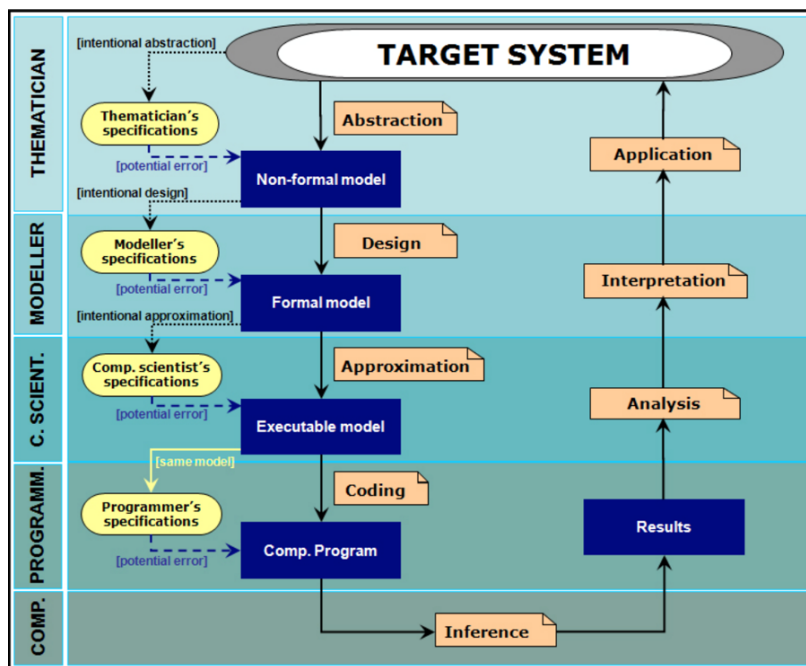


FIGURE 2.2 – Activité de modélisation et simulation [José Manuel Galán, 2009].

2.2.1 Détail de la démarche

Les étapes identifiées sont guidées par une interrogation que nous avons sur le système. De chacune de ces étapes résulte une représentation du système jusqu'à obtenir une version exécutable et simulable.

Conceptualisation : modélisation abstraite. Il s'agit de définir le système, en déterminant les éléments qui permettront de répondre à la question posée sur le système. Ces éléments sont identifiés en répondant à un ensemble d'interrogation : quelles sont les entrées et les sorties du système ? Comment les sorties sont-elles reliées aux entrées ? Les réponses à ces questions donnent des hypothèses que le modélisateur va utiliser pour faire des choix simplificateurs et abstraire le système. Cet ensemble de choix et d'hypothèses repose sur un cadre précis, appelé paradigme.

Définition 5 (Paradigme). Un paradigme est un cadre de pensée composé d'un ensemble d'hypothèses fondamentales, de lois et de moyens sur la base desquels les modèles peuvent se développer [Kuhn, 1972].

Pour exemple, le paradigme multi-agent consiste à décomposer notre système en de multiples entités autonomes en interaction évoluant dans un environnement selon des règles précises [Ferber, 1997]. Cet ensemble d'abstractions, d'hypothèses et de paradigmes définis le *modèle abstrait* et termine la conceptualisation.

Formalisation : modélisation formelle. La construction du modèle formel suit la conceptualisation. Le modèle abstrait, écrit généralement en langage commun est parfois ambigu sur la signification de certains termes. La formalisation a pour objectif de lever ces ambiguïtés en utilisant un formalisme.

Définition 6 (Formalisme). Un formalisme est un langage mathématique formel permettant de spécifier la structure et les comportements de modèles, associé à un algorithme permettant de les simuler [Sarjoughian, 2006].

Un formalisme comprend la structure mathématique qu'un modèle doit respecter et un ou plusieurs algorithmes permettant d'exécuter le modèle. La nature du système à modéliser impose le choix du formalisme : un système électrique sera généralement modélisé avec des équations différentielles, alors que le transfert de données sur un réseau d'information sera représenté à l'aide de la notion d'événements. La classification des formalismes de É. Ramat, figure 2.3, donne une façon de représenter les changements d'état, la temporalité et la spatialité d'un modèle en fonction des hypothèses et de l'objectif initial. Le *modèle formel* termine la formalisation et donne l'état du modèle, avec une description statique et une description dynamique.

Spécification opérationnelle et implémentation : modélisation numérique. Les modèles abstraits et formels contiennent l'ensemble des informations nécessaires à la réalisation de l'expérience. Ils permettent de passer à l'étape de spécification opérationnelle. La caractérisation des spécifications opérationnelles est ce qui va permettre de définir l'algorithme de simulation, c'est-à-dire le moyen de générer le comportement décrit par le modèle [Duboz et al., 2012], encore indépendant de toute programmation sur machine. Elles sont développées par l'informaticien, à partir des algorithmes fournis par le formalisme choisi. Enfin le programmeur se charge d'implémenter sur machine l'algorithme de simulation. Le *modèle numérique* est ce qui correspond à l'ensemble des spécifications opérationnelles et à l'implémentation.

La construction du modèle est le résultat d'hypothèses émises lors de chaque étape de la démarche de M&S. Ces étapes constituent une itération de la démarche de M&S et génèrent un ensemble de données de simulation. La validité du modèle, et donc des hypothèses, est liée à la comparaison de ces données de simulation avec les données observables, extraites du système réel. Cette comparaison constitue l'analyse des résultats, structurée par la démarche de Vérification et Validation (V&V).

2.2.2 Analyse des résultats

Le processus de Vérification et Validation (V&V) doit permettre de s'assurer que le modèle répond à l'objectif initial [Sargent, 2013]. En science expérimentale, la V&V est indispensable pour accroître la confiance dans le modèle qui n'est qu'une simple représentation du système cible [Zeigler and Sarjoughian, 2002].

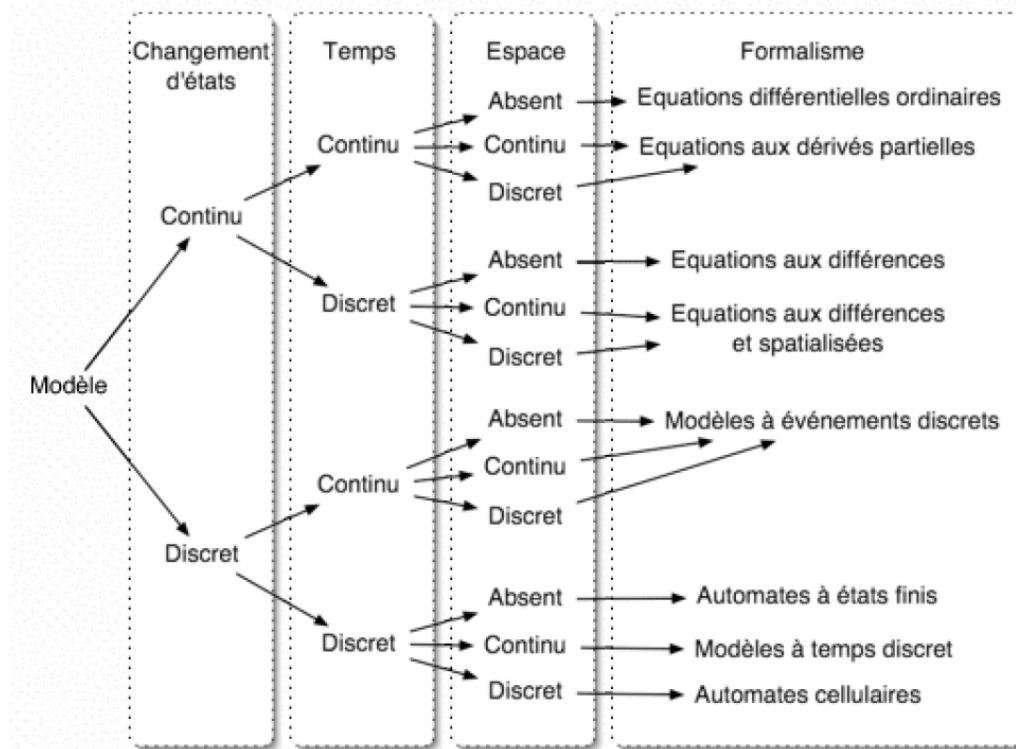


FIGURE 2.3 – Classification des formalismes [Ramat, 2006].

Définition 7 (Vérification). La vérification est le processus déterminant si le modèle implémenté et les données associées représentent bien la description conceptuelle et les spécifications formelles du modèle.

Définition 8 (Validation). La validation consiste à déterminer si le modèle et les données associées rendent bien une représentation fidèle du système réel dans le cadre d'expérimentation et d'utilisation du modèle.

La V&V est une activité qui s'effectue en parallèle de la M&S qui s'opère à chaque étape. En effet, différents niveaux de représentation du modèle sont réalisés pendant l'activité de M&S : conceptuel, formel, opérationnel, programme. Lors de la transition entre chacune de ces étapes, des erreurs peuvent être générées [José Manuel Galán, 2009]. Au fur et à mesure des travaux, le questionnement évolue, le système se précise et en pratique, il y a souvent des allers-retours entre les différents niveaux de l'activité de M&S. Tâche non triviale et longue, la conception et la validation d'un modèle passe en fait par plusieurs occurrences de la démarche de M&S. C'est pourquoi, l'un des enjeux actuels en M&S est le développement d'outils et de logiciels facilitant le développement des modèles, la réalisation des expériences virtuelles et l'analyse des résultats.

2.2.3 Outils dédiés à l'activité de M&S

Du fait qu'un même paradigme et un même formalisme peuvent être utilisés pour construire plusieurs modèles répondant à une famille de questions, un grand nombre de logiciels de M&S spécialisés ont pu être implémentés afin de faciliter le développement de modèles et limiter les coûts en temps

et en moyens de l'onerieuse activité de M&S. Le challenge, par rapport à ces outils, est de fournir un ensemble de fonctionnalités adaptées à la représentation du système selon le paradigme et le formalisme utilisés.

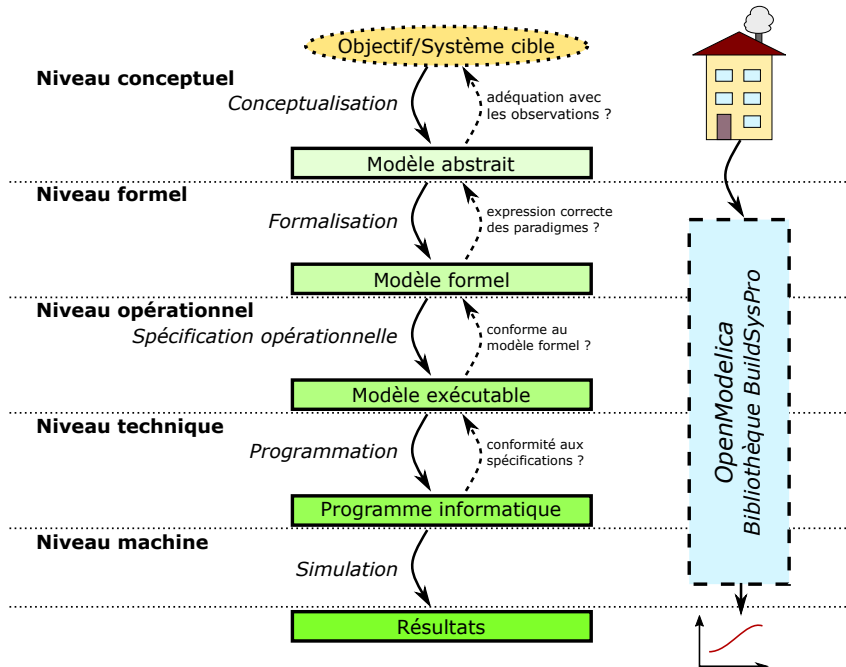


FIGURE 2.4 – Illustration de positionnement d'un logiciel de M&S dans l'activité de M&S de [Paris, 2019].

Pour un domaine d'étude spécifique, que ce soit par l'utilisation d'un formalisme particulier ou par l'analyse et la visualisation des résultats, un outil propose généralement des solutions à des besoins précis. Un outil de M&S peut aller de la bibliothèque logicielle proposant des éléments utiles pour la simulation à un environnement de développement complet doté de nombreuses fonctionnalités. En fonction des fonctionnalités offertes, les logiciels de M&S peuvent couvrir différents niveaux de l'activité de M&S. Par exemple, si nous nous plaçons dans le domaine de la thermique des bâtiments, l'environnement OpenModelica associé à la bibliothèque BuildSyspro [Plessis et al., 2014a] fournit un moyen de passer d'une écriture proche du modèle formel, à une simulation et aux résultats. Schématiquement, cela peut être représenté à la figure 2.4, extraite de [Paris, 2019].

Ces outils deviennent garants à la fois de la démarche de M&S et du processus de V&V.

2.2.4 Bilans

La démarche de M&S suit un processus défini par des concepts permettant la construction de modèles. Ces derniers représentent de manière abstraite un système, réel ou virtuel, que nous souhaitons étudier. L'analyse des résultats, qui passent par le processus de V&V, permet, par itération de la démarche de M&S, d'aboutir à des modèles valides.

La démarche en elle-même peut être réalisée par différentes personnes, ce qui peut générer des erreurs de modélisation. Une façon d'éviter cela est l'utilisation d'outils dédiés à des domaines parti-

culiers comme Modelica pour les systèmes équationnels ou Netlogo pour les systèmes multi-agents. Cela permet à un expert d'étudier les systèmes en concevant des modèles avec des formalismes qui leur sont adaptés sans se préoccuper des choix d'implémentation qui sont généralement fournis par l'outil. Plus un logiciel de M&S est spécialisé, plus celui-ci pourra proposer des fonctionnalités pertinentes et donc fait gagner du temps aux modélisateurs.

Cependant l'outil est aussi plus contraignant. Ces contraintes peuvent être une barrière pour le développement ou l'amélioration des modèles qui en résultent. L'utilisation d'un logiciel spécifique impose les hypothèses de modélisation. En conséquence la démarche seule ne suffit pas pour des systèmes dont les domaines se croisent. En effet, la représentation de chacun des domaines nécessitent des formalismes et des logiciels variés. Il peut alors être intéressant d'utiliser le couplage de modèles et de simulateurs. La suite de ce chapitre s'attarde sur l'utilisation de la démarche de la M&S dans le cadre des systèmes complexes.

2.3 Modélisation et Simulation de systèmes complexes

L'objectif de la modélisation et de la simulation de systèmes complexes est de rassembler au sein d'une seule représentation, un ensemble de modèles hétérogènes. Nous en donnons ici les principaux concepts et les enjeux associés.

2.3.1 Étude des systèmes complexes

La définition de systèmes complexes donnée en introduction nous explique que la description d'un système complexe est en fait un ensemble de sous-systèmes en interaction. Cette décomposition passe par une identification des sous-éléments, revenant à une décomposition de la question initialement posée au système global en un ensemble d'interrogations, chacune d'elles traitant un aspect particulier de l'étude.

Plusieurs décompositions sont en fait possibles pour un même système complexe, en raison de la multiplicité de points de vue. Nous pouvons par exemple décrire une ville comme un réseau de transport, un réseau électrique, une société ou encore une économie. Décrire un système complexe implique alors de prendre en compte ces différentes perspectives, chacune d'elles pouvant être relative à une discipline scientifique différente, et donc nécessitant une expertise spécifique [Camus, 2015]. La nécessité de combiner plusieurs points de vue pour les étudier apparaît.

La représentation des sous-systèmes, et donc la complexité des systèmes, va se propager dans les différentes étapes de la M&S. Elle concerne à la fois les formalismes utilisés et les logiciels implémentant les différentes entités. La M&S des systèmes complexes exige la mise en place d'un ensemble de solutions spécifiques permettant d'intégrer cette hétérogénéité dans un tout cohérent. Nous parlons de démarche de multi-modélisation.

À l'image d'une décomposition des points de vue, l'idée de la multi-modélisation est d'utiliser plusieurs modèles. Chaque modèle représente un aspect spécifique du système. La description du couplage entre ces modèles, c'est-à-dire les relier de façon à représenter les interactions qu'il y a entre les différents modèles impliqués et permettre l'échange d'informations, amène à la construction du multi-modèle. Il représente le système cible global. Il est alors possible d'étudier le système complexe dans son ensemble.

Définition 9 (Multi-modèle). Un multi-modèle est un modèle composé d'un ensemble de modèles en interactions qui, ensemble, décrivent l'évolution d'un système [Yilmaz and Ören, 2004].

Dans ce contexte, nous pouvons distinguer les modèles *atomiques* des modèles *couplés*. Les premiers sont exprimés dans un formalisme basique (équationnel, multi-agent...). Les seconds sont essentiellement exprimés à l'aide des informations sur les composants et les couplages [Zeigler et al., 2000].

De même qu'il n'y a pas qu'une seule représentation d'un système complexe, il n'y a pas qu'une seule façon de le multi-modéliser, selon le nombre de sous-modèles, s'ils sont simulés séquentiellement ou en même temps. Selon le type de représentation choisie, un multi-modèle présente des avantages différents [Camus, 2015] :

- *Approche par composant du système* : chaque composant étant un modèle, la représentation du système est modulaire. Il est aisé en théorie d'ajouter, retirer, remplacer des composants au sein du système. La question qui se pose concerne la manière d'organiser ces composants de façon à ce qu'un composant soit équivalent à un autre.
- *La séparation des points de vue* : chacun des sous-systèmes identifiés faisant généralement appel à un domaine d'expertise en particulier, la construction du multi-modèle va pouvoir se faire en deux temps [Müller and Diallo, 2012] :
 1. Construction et validation des modèles de chacun des sous-systèmes en utilisant le formalisme adéquat [Vangheluwe et al., 2002]. Pris les uns indépendamment des autres, chaque modèle pourra être construit par un expert du sous-domaine impliqué [Fishwick and Zeigler, 1992]
 2. Couplage des éléments et vérification de leur cohérence.
- *La réutilisation de modèles existants* : un nombre important de modèles peut être nécessaire pour la construction du multi-modèle [Taylor et al., 2013]. Selon l'objectif d'étude, la réutilisation de modèles existants pour la construction du multi-modèle, implémentés et validés est une option intéressante pour une démarche déjà longue.

La représentation des sous-modèles et de leurs interactions peut ensuite être traduite en un multi-modèle exécutable à l'aide de couplage de simulateurs. Nous parlons alors de co-simulation [Gomes et al., 2018].

Définition 10 (Co-simulation). La co-simulation consiste à permettre une simulation globale d'un système couplé, c'est-à-dire composé de plusieurs sous-systèmes, via le couplage de plusieurs simulateurs [Gomes et al., 2018].

Dans un multi-modèle, chaque sous-modèle identifié est spécifié dans le formalisme le plus adapté, ce qui signifie que les dynamiques de simulation des modèles vont probablement être différentes, i.e. qu'il faut utiliser des simulateurs différents pour les exécuter. Nous parlons ainsi de co-simulation d'un multi-modèle lorsque chaque modèle est simulé avec son propre simulateur et que ces simulateurs interagissent entre eux en cours de simulation.

La co-simulation se définit comme la capacité à assurer la synchronisation et l'échange de données entre les simulateurs pendant leur simulation. D'un point de vue logiciel, la co-simulation permet de réutiliser des modèles exécutables issus de différents logiciels de M&S et de les faire interagir. Pour

la modélisation d'un système complexe, composé d'entités de différents domaines comme les micro-réseaux, l'intérêt est de permettre à chaque expert de modéliser l'entité dont chacun est responsable en utilisant l'outil le plus adapté.

La multi-modélisation et la co-simulation impliquent que les modèles et les simulateurs puissent échanger de l'information entre eux de façon à ce que le multi-modèle représente le comportement du système global. Le problème ne se trouve pas seulement dans la capacité à échanger et utiliser de l'information, il faut aussi que cet échange ait un sens. Cette capacité à échanger de l'information de manière cohérente dans le cadre de la M&S fait référence à la notion d'interopérabilité.

Définition 11 (Interopérabilité). L'interopérabilité est la capacité pour différents simulateurs, connectés en un système de simulations, de collaborer de manière pertinente pour simuler un scénario commun ou un monde virtuel [Petty and Weisel, 2003].

2.3.2 Interopérabilité des formalismes et des logiciels

L'échelle LCIM (*Level of Conceptual Interoperability Model*), introduite dans [Tolk and Muguira, 2003] présente les différents niveaux d'interopérabilité atteignables entre deux systèmes.

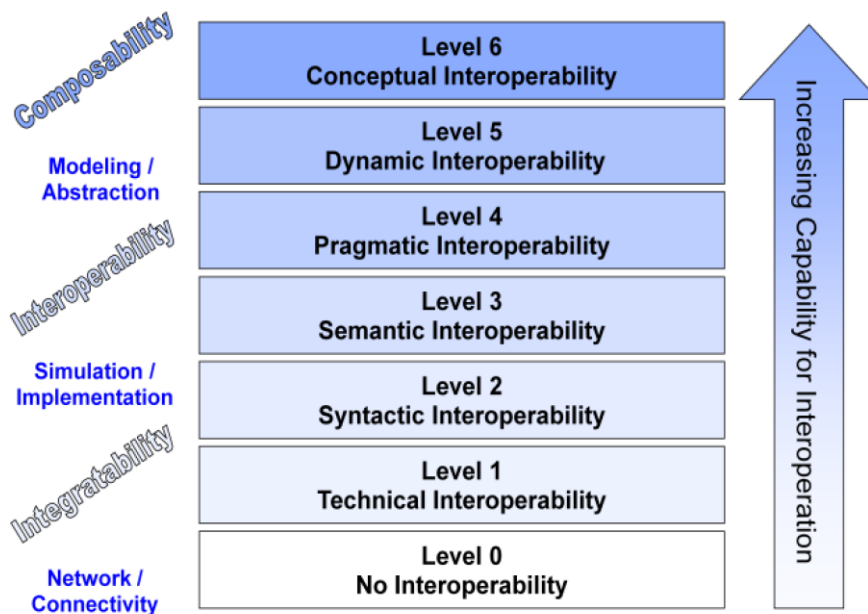


FIGURE 2.5 – Niveaux conceptuels d'interopérabilité de modèles [Tolk et al., 2007].

Cette échelle présente six niveaux :

0. **Pas d'interopérabilité** : Cela correspond à un système isolé ne possédant aucune capacité d'échange d'information.
1. **interopérabilité technique** : Elle correspond à l'établissement d'un protocole de communication sur une solution technique déterminée pour échanger des données.

2. **interopérabilité syntaxique** : À partir de ce niveau, les données sont structurées permettant à chaque système participant à l'échange de les traiter. Cela revient par exemple à déterminer le type des données échangées (réel, entiers...), la représentation de ces types est non ambiguë.
3. **interopérabilité sémantique** : En plus d'un format commun, les données échangées sont associées à un sens, une signification commune à chaque participant de l'échange. La signification du contenu des messages échangés est partagée.
4. **interopérabilité pragmatique** : Ce niveau ajoute la connaissance du contexte de l'échange de la donnée et de l'utilisation qui en sera faite (quelle méthode sera utilisée, sans connaissance de l'effet que cela produira). Chaque participant a la connaissance de l'interface (méthodes et procédures) du système avec lequel il interagit.
5. **interopérabilité dynamique** : Ajoute la connaissance de l'effet de l'échange. Les systèmes voient leur état interne évoluer au fur et à mesure des échanges successifs. L'utilisation du message et l'effet qu'il produira sur la structure interne du système recevant la donnée sont définis.
6. **interopérabilité conceptuelle** : Dernier niveau d'interopérabilité ajoutant la spécification des hypothèses et des contraintes liées à l'échange. En M&S, cela implique une parfaite documentation du modèle conceptuel.

Chaque participant élabore une solution partielle pour un système constitutif qui doit être intégré à toutes les autres solutions partielles. Plus l'intégration se fait tard dans le processus, moins elle est optimale [Gomes et al., 2018]. En effet la difficulté d'intégration est liée à la capacité pour deux modèles d'être interopérables. Rendre au moins deux modèles interopérables au sein d'un multi-modèle et d'une co-simulation nécessite de se poser plusieurs niveaux de questions [Tolk et al., 2007], relatives à l'activité de M&S :

- Conceptuel : quel est le sens de mon interaction ?
- Formel : quel type de données est échangé ?
- logiciel : comment ces données sont-elles traitées et échangées ?

En ayant en tête les différents niveaux d'interopérabilité, nous pouvons déterminer les différentes questions à se poser lors du développement de plusieurs modèles faisant partie intégrante d'un multi-modèle et pendant l'activité de multi-modélisation. La spécification opérationnelle et l'implémentation du modèle va mettre en lumière la problématique de l'interopérabilité *technique* et *syntactique*. Les niveaux d'interopérabilité *sémantique* et *pragmatique* peuvent être atteints au niveau de la formalisation du modèle. Enfin, pour mettre en place une interopérabilité *dynamique* et *conceptuelle* entre deux modèles, il faut s'intéresser à la première étape de l'activité de M&S, l'étape de conceptualisation où sont définis les événements pouvant influencer les modèles ainsi que les hypothèses et simplifications effectuées.

En identifiant les éléments qui vont nous permettre de rendre deux modèles interopérables, nous construisons un multi-modèle valide et exécutable. La condition de validation d'un multi-modèle est donnée par le plus haut niveau d'interopérabilité, appelée composition.

Composition

La notion de composition se retrouve au dernier niveau d'interopérabilité lors de la démarche de multi-modélisation. Elle donne une condition nécessaire pour la validation du multi-modèle : deux modèles interopérables au plus haut niveau sont composables. La composabilité correspond à la faculté à assembler des modèles pour former des multi-modèles valides.

Définition 12 (composabilité). La composabilité est la capacité à sélectionner et assembler des composants de simulation selon différentes combinaisons pour former un système de simulation valide qui satisfait les besoins spécifiques de l'utilisateur [Petty and Weisel, 2003].

Cette notion de validité du multi-modèle, qui résulte de la composition, ne dépend pas d'un seul modèle, mais d'un ensemble de modèles en interactions, chaque modèle représentant un aspect du système complexe cible. Intuitivement, cela impose que chaque modèle soit valide vis-à-vis de la partie qu'il représente. Mais il faut aussi étudier la validité des interactions entre modèles, leur cohérence par rapport au système réel.

Le système cible, le modèle et le cadre expérimental sont mis en jeu lors du processus de V&V (définition 8). Dans un multi-modèle, les cadres expérimentaux qui ont permis la construction de chaque modèle composant doivent aussi être cohérents entre eux. Il faut noter que même si nous considérons les modèles composants comme valides dans un cadre expérimental donné, il est très difficile d'affirmer qu'un multi-modèle sera valide a priori, c'est-à-dire avant sa simulation [Petty and Weisel, 2003]. Dès lors, nous pouvons nous poser la question de la réutilisation de modèles existants, développés dans des cadres différents, pour la construction hiérarchique de modèles couplés.

Réutilisation de modèles

Nous avons vu, partie 2.3.1, qu'un des avantages de la multi-modélisation était de pouvoir réutiliser des modèles existants. À l'image de cette pratique, la réutilisation des modèles couplés sous forme de hiérarchie est liée à la propriété de fermeture par couplage appelée aussi fermeture par composition.

Définition 13 (fermeture par couplage). Un formalisme F est clos par couplage si un modèle M , résultat d'un couplage de modèles issus de F , est bien défini et appartient lui-même à F [Zeigler et al., 2000].

Selon le point de vue, cela signifie :

- niveau spécification : la spécification de la structure d'un modèle couplé est équivalente à celle d'un modèle atomique.
- niveau utilisateur : il est possible d'utiliser un modèle couplé comme si c'était un modèle atomique, cela autorise la construction hiérarchique.
- niveau comportemental : nous pouvons écrire un modèle atomique dont le comportement dynamique est identique à celui du modèle couplé.

Pour résumer, la propriété de fermeture par couplage signifie qu'un modèle couplé est strictement équivalent à un modèle atomique.

Il y a une distinction entre la notion de composition au niveau des formalismes et la notion de composition de modèles au sens de la composabilité définie en 12. La composition au niveau formale signifie que le modèle en tant que composant doit être bien défini et appartenir au formalisme considéré. La composition de modèles ajoute en plus la notion de validité du modèle couplé, sémantiquement parlant.

La vérification de l'interopérabilité dans le processus de modélisation et de simulation de systèmes complexes peut s'avérer longue et coûteuse en temps, c'est pourquoi l'intégration des modèles doit se faire au plus tôt dans la démarche. De la même manière que nous avons des logiciels qui facilitent le développement et la vérification de modèles dans un ou des domaines dédiés, de nombreuses approches de co-simulation sont développées et proposent des outils facilitant l'intégration de modèles et garantissant à différents niveaux de l'activité l'interopérabilité des modèles [Gomes et al., 2018].

2.3.3 Outils dédiés à la co-simulation

Les approches de co-simulation ont pour objectif de regrouper, au sein d'une même représentation, un ensemble hétérogène de modèles. Le développement de l'approche de co-simulation dépend de choix de modélisation pour vérifier les différents degrés d'interopérabilité des modèles couplés. Nous distinguons deux types d'approches : les approches ad-hoc développées pour répondre à un problème précis et les approches plus génériques utilisant une interface de gestion commune appelé intergiciel. La figure 2.6 illustre les différences majeures.

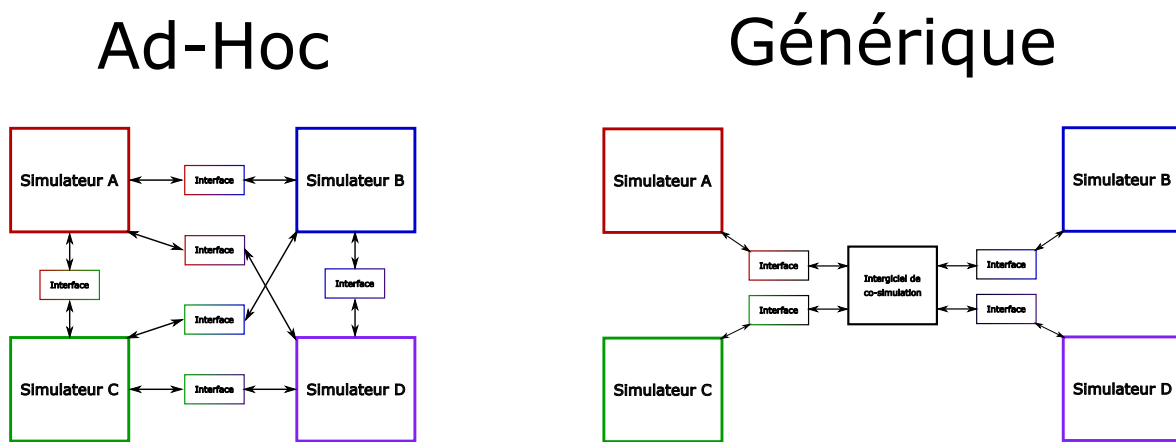


FIGURE 2.6 – Approche de co-simulation ad hoc et générique [Palensky et al., 2017]

Les approches ad-hoc, utilisées pour un problème en particulier, réalisent la plupart du temps une interface de co-simulation entre chacun des simulateurs impliqués. La réutilisation de ces approches, ou leurs adaptations par l'ajout d'un ou plusieurs simulateurs, est difficile ou au prix d'un effort d'implémentation important.

Notre intérêt se porte plus particulièrement sur les approches plus génériques, où l'utilisation d'une interface commune est préférée. Nous pouvons caractériser au moins deux aspects lors du développement d'intergiciel : développement de fonctionnalités liées au couplage logiciel et celles liées à l'utilisation de l'intergiciel.

Les plus grandes difficultés pour les approches de co-simulation sont de connecter, traiter et synchroniser les données et les interactions entre les simulateurs en utilisant leurs interfaces respectives [Mets et al., 2014].

Couplage de simulateurs

Plusieurs solutions sont déployées afin de garantir l'intégration de simulateurs au sein d'un intergiciel de co-simulation. Parmi celles-ci, nous trouvons celles qui se concentrent sur l'aspect technique, c'est-à-dire qui se focalisent sur l'aspect logiciel de l'intégration, et celles qui préfèrent une approche multi-formalisme, c'est-à-dire qui réfléchissent davantage sur les aspects formels de l'intégration de simulateurs hétérogènes et mettent les aspects techniques au second plan [Paris, 2019].

Approche logicielles

Les approches logicielles proposent des règles et des standards permettant de faciliter l'échange de données entre simulateurs.

Un des standards les plus notables est la norme *FMI (Functional Mockup Interface)* [Blochwitz et al., 2011], qui a gagné en popularité au cours des dernières années. Celui-ci permet l'exportation et le partage de modèles préexistants sous la forme de bibliothèques dynamiques (bibliothèques dynamiques C standard) avec une interface de simulateur commune et un standard de description de modèles sous forme de fichier XML. Ces composants, appelés FMU (Functional Mockup Unit), ont été développés pour faciliter la collaboration entre domaines. Ces FMU peuvent ensuite être utilisés pour la co-simulation où un algorithme maître est chargé de synchroniser leur exécution. Le composant peut être représenté comme une boîte composée d'une interface de connexion statique avec des entrées, des sorties, des paramètres et d'une interface dynamique pour interagir avec le composant.

Par exemple, *Into-CPS* [Larsen et al., 2016] utilise le standard FMI afin de modéliser et simuler des systèmes cyber-physiques. Cela lui permet, entre autres, d'avoir une approche modulaire de la co-simulation. L'approche identifie chaque étape de l'activité de M&S et propose un outil adapté de la conception du multi-modèle jusqu'à la co-simulation des composants.

Le *standard HLA (High Level Architecture)* [Dahmann, 1999] figure parmi les standards notables proposant une spécification d'architecture logicielle. Le standard propose de définir chaque élément de simulation, allant des différents modèles impliqués aux composants de visualisation ou encore des outils d'interaction, comme un *fédéré*. Le multi-modèle dans lequel les fédérés interagissent est alors représenté par une *fédération*. Les fédérés et les fédérations vont utiliser un standard commun de description, les *Object Model Template*, respectivement *Simulation Object Model* et *Federation Object Model*. Contrairement à la norme FMI qui propose des composants logiciels interopérables, le standard HLA propose une approche de coordination centralisée autour de la RTI (Run-Time Infrastructure) qui permet l'échange de données entre fédérés qui sera détaillé en aval de cette partie.

Pour résumer, les approches logicielles permettent d'obtenir des composants réutilisables et interopérables en associant la spécification des interfaces des simulateurs à leur documentation [Paris, 2019].

Approche multi-formalisme

L'approche multi-formalisme est une deuxième option pour coupler plusieurs simulateurs hétéro-

gènes entre eux. Ces approches basées sur l'étude des formalismes proposent des opérations comme la transformation ou l'encapsulation de formalisme.

Une première approche se base sur la transformation de formalisme ou *mapping*, c'est-à-dire trouver une équivalence entre deux formalismes. *AToM³*, proposé dans [Lara and Vangheluwe, 2002], fonde sa stratégie de transformation sur la méta-modélisation. Cela consiste à modéliser les langages de modélisations. Cette méthode permet de modéliser explicitement les formalismes et les transformations entre ces derniers. *AToM³* utilise UML (Unified Modeling Language) pour réaliser le méta-modèle, qui par la suite permet de générer automatiquement un outil de M&S graphique. Il en résulte une représentation homogène du système, qui peut être étudié avec des outils formels. Par ailleurs l'outil fournit une interface permettant de passer directement à la simulation. En revanche les modèles existant dans un formalisme ne peuvent pas être réutiliser directement et nécessitent une opération de transformation.

Une seconde approche est l'encapsulation ou *wrapping*. L'objectif du wrapping est de réaliser une interface fonctionnelle autour d'un modèle écrit dans un formalisme, constituée de fonctions d'encapsulation dont le but est d'appeler les fonctions du modèle encapsulé. Le formalisme événementiel *DEVS* [Zeigler et al., 2000], possède des propriétés d'encapsulation et de nombreuses extensions qui permettent de l'utiliser comme un formalisme pivot de la multi-modélisation multi-formalisme [Vangheluwe, 2000]. Parmi ces propriétés, nous pouvons relever les plus importantes [Zeigler et al., 2013] :

- Propriétés d'universalités : *DEVS* est capable de représenter tous les autres formalismes événementiels. Par ailleurs, cette propriété ne se limite pas au système événementiel, des extensions comme *DEV&DESS* venant compléter le formalisme en spécifiant l'interaction entre modèle discret et continu [Zeigler, 2006].
- Propriétés d'unicité : la représentation d'un système événementiel par un modèle *DEVS* est unique, i.e. il n'existe pas deux modèles *DEVS* spécifiant le même système événementiel.
- Représentation formelle de modèles atomiques et couplés : la réutilisation des modèles atomiques et couplés, à l'aide de la propriété de fermeture par couplage, permet de construire incrémentalement un multi-modèle de systèmes complexes.

Chaque logiciel basé sur *DEVS* propose des fonctionnalités de développement spécifiques qui dépendent, entre autre, de l'état d'avancement du projet. En raison des hétérogénéités logicielles et de l'absence de méthode de développement standard pour partager les modèles les différents logiciels de M&S basés sur *DEVS* ne sont pas interopérables et ne peuvent généralement pas être utilisés en collaboration au sein d'une co-simulation respectant *DEVS* [Wainer et al., 2011].

Traitement et synchronisation des données

L'approche utilisée pour coupler plusieurs simulateurs entre eux va déterminer la manière dont les données vont être traitées et synchronisées [Gomes et al., 2018]. Il existe trois grandes approches permettant de respecter le principe de causalité :

- *Co-simulation basée sur les événements discrets* : empruntés au domaine de la simulation de systèmes à événements discrets (comme les feux de signalisation), la représentation de l'évo-

lution d'un système se fait par l'intermédiaire d'évènements ponctuels. Ce système ne communique que par entrée et sortie. *DEVS*, basé sur les systèmes à évènement discret en est un exemple.

- *Co-simulation à temps continu* : le comportement et les hypothèses des orchestrateurs sont empruntés au domaine de la simulation de systèmes en temps continu. Une simulation en temps continu est supposée avoir un état qui évolue continuellement dans le temps.
- *Approche de co-simulation hybride* : il s'agit du couplage de modèles basés à la fois sur une évolution événementielle et une évolution continue. Deux approches existent, basées sur la création d'un wrapper autour des composants de simulation : soit par l'utilisation d'un wrapper à temps continu, soit par l'utilisation d'un wrapper à temps discret [Gomes et al., 2018].

Afin d'être utilisée le plus simplement possible, les approches de co-simulation proposent des outils conceptuels ou logiciels. Dans [Morse, 2004], plusieurs conseils sont donnés sur les fonctionnalités à associer à la composition de modèles. Ces fonctionnalités sont liées à la possibilité de modéliser les systèmes de manière hiérarchique grâce à la réutilisation de multi-modèles, au support des processus de vérification et validation grâce à l'automatisation de tâches. De la même manière qu'un logiciel dédié à la M&S se positionne sur la figure du processus de M&S (voir figure 2.2), un intergiciel de co-simulation pourra se positionner sur la démarche de multi-modélisation et co-simulation et proposer des fonctionnalités pour une ou des étapes de la multi-modélisation [Paris et al., 2019].

Un utilisateur de ces intergiciels utilisera les fonctionnalités proposées de manière transparente mais devra être conscient des hypothèses réalisées lors de la conception de l'intergiciel, concernant l'intégration et la synchronisation des éléments, lors de l'analyse des résultats de co-simulation.

Démarche de modélisation et simulation de systèmes complexes

La figure 2.7, reprise [Paris, 2019], propose une catégorisation d'approches de co-simulation selon les fonctionnalités proposées, associées au processus de multi-modélisation et co-simulation.

2.4 Conclusion

Nous avons défini l'activité de M&S. Elle suit une démarche clairement définie qui permet, à partir d'un système cible, de construire pas à pas un modèle exécutable, vérifiable et réutilisable. Les quatre étapes de cette démarche peuvent être résumées ainsi :

- Conceptualisation : produit le *modèle abstrait* (hypothèses et cadre théorique) à partir de la définition du système cible.
- Formalisation : réalisation du *modèle formel* à partir du modèle abstrait dans un format mathématique non ambigu.
- Spécification opérationnelle : aboutit au *modèle numérique* .
- Implémentation : *Modèle exécutable* permettant l'exécution de la simulation à partir des informations données par le modèle numérique.

Cette démarche est applicable pour n'importe quel domaine, de façon générique, sans préciser comment ces étapes sont effectuées dans un cadre particulier. Chaque étape de la démarche peut être effectuée par une personne différente. L'enjeu est alors de maintenir la cohérence entre chaque étape.

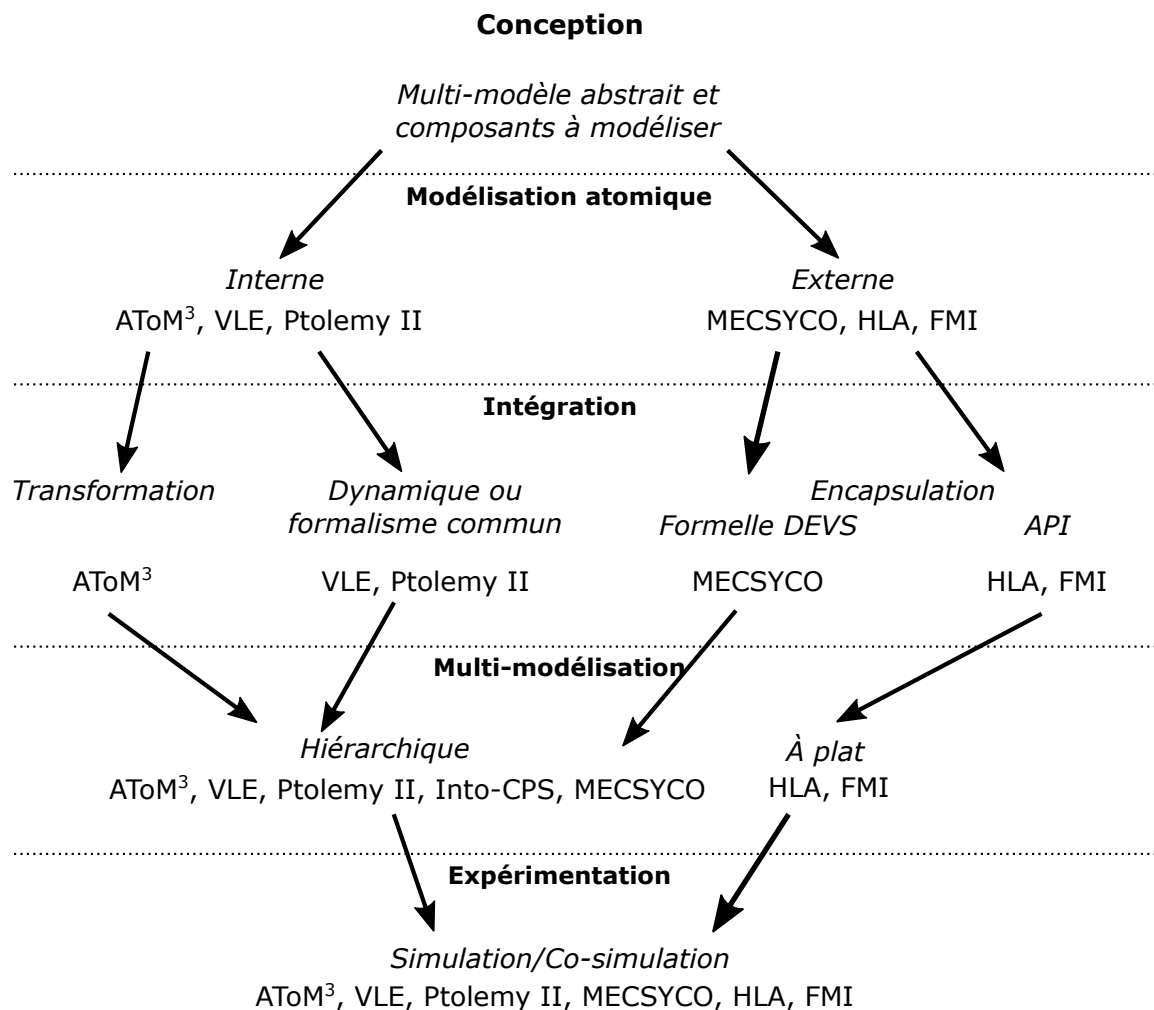


FIGURE 2.7 – Intergiciels placés selon leur approche de co-simulation utilisée, repris de [Paris, 2019]

Pour cela, des outils spécifiques apportent une aide pour le développement de modèles. Ils deviennent responsables de la vérification, de la reproductibilité et de la réutilisabilité.

Cependant cette utilisation peut être une barrière pour le développement ou l'amélioration des modèles qui en résultent. L'utilisation d'un logiciel spécifique implique des hypothèses de modélisation et de simulation qui ne sont pas nécessairement adaptées lors de la construction de modèles représentant des systèmes multi-domaines. En conséquence, cette contrainte est une barrière pour des systèmes comme les microréseaux ne s'attachant pas à un domaine en particulier mais à plusieurs. L'activité de multi-modélisation et co-simulation, définie dans un second temps de cette partie, apporte une solution aux problèmes multi-domaines.

La difficulté supplémentaire liée aux systèmes complexes, par rapport à l'activité de M&S, réside dans l'hétérogénéité du système. Celle-ci va être rencontrée à chaque étape de la démarche de M&S : elle concerne à la fois les représentations du système, les formalismes utilisés et les logiciels utilisés pour la co-simulation du multi-modèle. Pour surmonter ce problème, en plus des étapes de *conceptualisation*, de *formalisation*, de *spécification opérationnelle* et d'*implémentation* rencontrées lors de la M&S, un ou des niveaux d'interopérabilité doivent être vérifiés pour garantir la cohérence du multi-modèle. Le plus haut niveau d'interopérabilité, ou composition, donne une condition néces-

saire pour la validation du multi-modèle et détermine la capacité à assembler des modèles pour former des multi-modèles valides.

À l'aide des démarches de *M&S* et de *multi-modélisation et co-simulation*, nous avons pu voir comment construire un multi-modèle valide et exécutable. La capacité à composer des modèles dépend d'hypothèses faites à tous les niveaux de l'activité de M&S. Ces hypothèses, qui évoluent au cours de la démarche de M&S, remettent souvent en cause le couplage réalisé. En pratique nous allons donc également avoir des aller-retours aux différents niveaux de l'activité pour vérifier l'interopérabilité des modèles. En cela se différencie le problème de composition de logiciels, dont les services fournis sont généralement compartimentés, plus ou moins accessibles [Davis and Anderson, 2004]. En conséquence, le développement d'intergiciel de co-simulation devient nécessaire pour faciliter l'intégration logiciel et permettre la construction de multi-modèles valides et exécutables.

LES MICRO-RÉSEAUX : DES SYSTÈMES COMPLEXES

Sommaire

3.1	Introduction	25
3.2	Le concept de microréseau	26
3.2.1	Développement des microréseaux	27
3.2.2	Problématiques de développement	28
3.2.3	Bilan	30
3.3	Modélisation et simulation de microréseaux	31
3.3.1	Domaines de recherche spécifique	31
3.3.2	Nécessité de co-simulation des microréseaux	32
3.3.3	Approche de modélisation et de co-simulation de microréseaux	33
3.4	Conclusion	36

Ce chapitre aborde les micro-réseaux dans la transition énergétique. L'objectif est d'appréhender les notions essentielles des micro-réseaux qui font d'eux des systèmes complexes.

Pour cela, nous montrons en premier lieu les intérêts de ces systèmes. Nous verrons ensuite les problématiques technologiques, techniques et politiques qu'ils apportent. Nous détaillons enfin des pistes de recherche, centrées sur la modélisation et la simulation des systèmes complexes, pour le développement de telles structures.

3.1 Introduction

Lorsque nous parlons de réseau électrique, nous parlons à la fois de production et de transport de l'énergie. L'énergie est acheminée vers les consommateurs par l'intermédiaire d'une grille électrique dont les nœuds sont connectés par un système de lignes de transmission dans lequel les transformateurs permettent de réduire ou augmenter la tension selon une situation de production ou de distribution donnée. Cette grille est considérée comme un monopole naturel de longue date, qui en fait une infrastructure vieillissante, coûteuse à remplacer [Guérard, 2014].

Malgré tout, les changements climatiques importants imposent de se tourner vers des solutions plus durables et écologiques. Pour cela, la transition énergétique apporte un ensemble de réponses pouvant améliorer notre production et notre consommation d'énergie. Elle propose un changement de politique de gestion pour une énergie plus propre et mieux maîtrisée [Guérard, 2014]. Celle-ci se base sur des systèmes de productions renouvelables et des systèmes de stockage.

L'émergence de ces nouvelles technologies exige le développement de nouvelles méthodes d'intégration et de gestion. Les énergies renouvelables, majoritairement intermittentes et difficilement transportables, rendent la production difficile à prévoir. Par ailleurs, les sources de production n'appartiennent plus seulement aux fournisseurs d'énergie, mais également aux particuliers pouvant, au besoin, utiliser pour usage personnel l'énergie produite ou la revendre sur la grille. En outre, l'augmentation de la population impacte fortement la prévision de la demande en apportant une variabilité supplémentaire. L'ensemble des activités humaines, individuelle et collective, est en constante évolution. Une mauvaise gestion peut provoquer de nombreuses défaillances du système telles que des blackouts ou des ruptures de lignes du réseau. Ces fluctuations dans le réseau contraignent de se tourner vers des solutions plus interactives, avec un ensemble de capteurs et compteurs intelligents pour une gestion améliorée. Le système évolue pour devenir non plus un système unidirectionnel et centralisée comme l'est aujourd'hui le réseau électrique global mais un système plus local dans lequel chacun des composants de la grille est acteur du réseau, communique et répond à des consignes en temps réel.

Cette vision de système communiquant réunit un ensemble de fonctionnalités centrées autour de la stabilité du réseau avec une production locale distribuée [Momoh, 2009]. Ces réseaux intelligents, appelés smart-grids, intègrent un ensemble d'outils garantissant la fiabilité du réseau à travers le diagnostic des défauts et la gestion des échanges d'énergie entre producteurs, consommateurs et systèmes de stockage.

Le développement de ces réseaux se fait en plusieurs phases [Faschang et al., 2013] nécessitant une étude spécifique. Parmi elles, l'étude du comportement est essentielle pour garantir l'équilibre entre la production et la consommation et ainsi éviter une défaillance du système. En raison du difficile accès aux lignes électriques pour la réalisation d'essais, le choix est porté sur la modélisation et simulation, plus modulaire et adaptée à l'étude des réseaux. Plus particulièrement, la multi-modélisation et la co-simulation est un outil de choix pour ces systèmes inter-disciplinaires [Palensky et al., 2017].

Dans ce chapitre, nous abordons les notions essentielles des microréseaux et les problématiques liées à leur développement. Nous voyons en quoi il s'agit de systèmes complexes et discutons des pistes de recherche existantes centrées sur la modélisation et simulation de systèmes complexes.

3.2 Le concept de microréseau

Pour faciliter l'intégration et la gestion (physique et économique) des énergies renouvelables au niveau local les microréseaux ont été proposés comme un élément clé de la vision du réseau intelligent [Kounev et al., 2015]. La définition de ces systèmes, donnée par la CRE [CRE, 2021], fixe le cadre général :

Définition 14 (Micro-réseau). Les microgrids, ou microréseaux, sont des réseaux électriques de petite taille, conçus pour fournir un approvisionnement électrique fiable à un petit nombre de consommateurs. Ils agrègent de multiples installations de production locales et diffuses (micro-turbines, piles à

combustible, petits générateurs diesel, panneaux photovoltaïques, mini-éoliennes, petite hydraulique), des installations de consommation, des installations de stockage et des outils de supervision et de gestion de la demande. Ils peuvent être raccordés directement à un réseau de distribution ou fonctionner déconnectés du réseau (îlotage).

Dans cette définition, nous retrouvons des éléments de différents domaines :

- Domaine électrique : de multiples sources et charges sont au sein d'un même réseau électrique qu'il faut réguler.
- Domaine de l'information et de la télécommunication : les outils de supervision font partie d'un réseau d'informations communiquant permettant de réguler le réseau.

L'intégration des systèmes électriques, des dispositifs automatisés et des technologies de l'information et de la communication (TIC) donne aux réseaux électriques intelligents le caractère d'un système cyberphysique (CPS).

3.2.1 Développement des microréseaux

La transformation du réseau électrique actuel pour une énergie plus propre, à l'aide de technologies relativement nouvelles, nécessite une réflexion sur le concept des microréseaux, pour satisfaire les objectifs de la transition énergétique. Leur développement peut être décrit grossièrement en quatre phases [Faschang et al., 2013]

- Première phase : la question directrice est de développer des concepts pour les futurs systèmes d'énergie électrique. Les idées de base telles que les algorithmes pour la gestion de la demande, le contrôle actif des générateurs distribués, l'intégration des systèmes de stockage et autres ont été formulées.
- Seconde phase : la question dans cette phase est de savoir comment les parties prenantes concernées, comme les opérateurs de réseaux électriques, l'industrie, les utilisateurs finaux et les chercheurs peuvent collaborer efficacement pour relever les défis de l'intégration des énergies renouvelables et du vieillissement des infrastructures. Différents types d'organisations qui favorisent l'interaction entre les parties prenantes ont vu le jour, telles que l'alliance GridWise⁵ aux États-Unis ou la Plateforme technologique européenne Smart Grids⁶.
- Troisième phase : la question est de savoir à quoi peut ressembler un réseau intelligent dans le monde réel. Il s'agit de la phase en cours. Elle se concentre sur un certain nombre de démonstrations de réseaux intelligents dans de nombreux pays du monde.
- Quatrième phase : à venir, cette phase s'interroge sur la commercialisation et l'industrialisation des composants des prototypes de démonstration des systèmes de smart-grid.

Les réponses de la phase trois donnent une représentation de ce que peut être un micro-réseau dans le monde réel. Ces caractéristiques principales se résument ainsi :

- Les microréseaux sont composés d'un ensemble de charges, de sources et de systèmes de stockage utilisés pour les besoins d'une localité, réalisant des opérations sur l'énergie (consommer, produire, stocker ou déstocker).

5. <http://www.gridwise.org/>

6. <http://www.smartgrids.eu/>

- Ils possèdent un système de gestion et de contrôle de l'énergie entre les différents éléments physiques couplés à des installations de mesure comme des capteurs.
- Ils ont deux modes de fonctionnement : îlotés ou connectés au réseau traditionnel

En cours d'étude, la phase actuelle souhaite développer des composants fiables pour un réseau tout aussi fiable. Nous allons voir dans la suite quelles sont les problématiques associées.

3.2.2 Problématiques de développement

Les réflexions de la troisième phase de développement portent sur la construction d'un réseau énergétique fiable et sécurisé, à l'aide d'éléments qui vont assurer l'équilibre entre la quantité d'énergie injectée, la quantité soutirée et la quantité stockée. Cet équilibre donne la condition de faisabilité de la micro-grille. Plusieurs difficultés sont à soulever lors de cette phase de développement, relatives à la construction du micro-réseau.

Première difficulté : mise en place de systèmes de mesure de production et de consommation fiable.

Les consommateurs vont avoir une utilisation de l'énergie plus ou moins régulière. Les secteurs résidentiels vont avoir une consommation aléatoire, expliquée par les prix de l'énergie, les préférences individuelles des foyers et les saisons [Grandjean, 2013]. Les secteurs industriels et tertiaires, à contrario, vont avoir une consommation énergétique plus régulière, en raison des activités qu'ils réalisent [Huraux, 2015].

Les sources de productions, issues des énergies renouvelables, en nette augmentation depuis quelques années [Post, 2021], permettent de fournir de l'électricité aux sites isolés et d'éviter la création de nouvelles lignes et de répondre aux attentes de la transition énergétique en limitant l'impact environnemental. Le cadre extérieur va fortement influencer, pour ne pas dire imposer la technologie de production qui sera utilisée par le micro-réseau : éolien, panneau photovoltaïque, ou encore hydraulique... Ces sources de production sont soumises, la plupart du temps, aux aléas de la météo et ne produisent qu'à des périodes données difficilement prévisibles. En général, il n'y a pas qu'un seul type de production dans un réseau, plusieurs sont utilisés (éolien, photovoltaïque, ...). Par ailleurs, ces sources d'énergies n'appartiennent pas seulement au fournisseur d'énergie mais peuvent aussi appartenir à des particuliers, pouvant désormais vendre leur énergie sur le réseau traditionnel [Albouys-Perrois, 2021], nous parlons alors de consommacteurs.

En raison des nombreuses irrégularités qu'il peut y avoir dans le système, tant au niveau de la production que de la consommation, le système nécessite une planification et une centralisation des informations de consommation et de production afin de réaliser un partage adéquat de l'énergie. Deux aspects sont à distinguer :

- La planification en amont, prévue sur une semaine, un mois ou un an à partir des conditions météorologiques, sociales ou économiques ainsi que des niveaux de consommation des périodes précédentes. Cette planification a deux objectifs [Guérard, 2014] : le premier étant de prévoir la production en fonction de la demande et éviter les pics, le deuxième étant de fixer les prix du marché.
- L'équilibrage en temps réel, qui est assuré, dans les microréseaux, par les technologies de l'information et de la communication (TIC).

Dans le cadre de l'équilibrage en temps réel, la mise en place des TIC est influencée par de multiples contraintes. D'une part, les caractéristiques spécifiques aux TIC, telles que la topologie des réseaux de communication, les protocoles, la latence des communications, la sécurité des informations affectent intrinsèquement le comportement du réseau électrique. D'autre part, le système électrique et ses caractéristiques ont également un impact sur l'infrastructure TIC correspondante [López et al., 2019].

Les spécifications de ces outils, jugés hautement critiques, demandent une étude dédiée pour chacun d'eux afin de les rendre suffisamment efficaces pour éviter toute défaillance dans le système [Docquier, 2021].

Deuxième difficulté : intégration de systèmes de stockage.

Les sources renouvelables, intermittentes, ne suffisent pas à elles-seules à satisfaire les besoins énergétiques. Les systèmes de stockage deviennent une nécessité absolue dans le cadre des microréseaux. De nombreuses études ont permis le développement de technologies de stockage. La technologie des systèmes de stockage va être choisie en définissant les besoins énergétiques du réseau. Entre autres, les critères de base sont la capacité de stockage que l'on souhaite obtenir et la dynamique de stockage, c'est-à-dire la vitesse de charge et de décharge du système de stockage. Pour les microréseaux, les systèmes de stockage vont avoir pour objectif, entre autres, d'alimenter le réseau en cas de fonctionnement autonome. Les systèmes de stockage électro-chimique comme les piles à hydrogène sont prometteuses [Paul et al., 2010], permettant une autonomie accrue par rapport aux différentes technologies présentées.

Cependant le stockage des ressources est souvent difficile à mettre en place et ne permet pas encore de redonner la totalité de l'énergie produite initialement, en raison du peu de maturité des technologies employées. Ainsi un stockage à hydrogène ne permet à l'heure actuelle qu'un rendement électrique maximum de 40%. À l'heure actuelle, de nombreuses recherches sur le sujet sont encore en cours [Sdanghi, 2019, Guilbert and Scipioni, 2018].

Troisième difficulté : mise en place de systèmes de gestion efficaces.

Les systèmes de gestion vont s'aligner sur plusieurs objectifs : économique, environnemental, technique ou combiné. Le premier vise à minimiser les coûts d'exploitation des sources d'énergie. Le second a pour objectif de minimiser les émissions de gaz à effet de serre. La troisième cible la perte de puissance. En règle générale les systèmes de gestion sont une combinaison des trois aspects. Ceux-ci sont en fait sur plusieurs niveaux du micro-réseau [Luu, 2014]. La figure 3.1 résume les niveaux de ces contrôles. Le contrôle primaire et secondaire vise à réguler le réseau en terme de tension et de fréquence tandis que le troisième niveau s'occupe du contrôle du flux d'énergie entre le micro-réseau et le réseau.

Pour terminer sur les systèmes de gestion, nous avons vu plus haut qu'il pouvait y avoir des *consommacteurs*. La mise en place de systèmes de gestion spécifique va donc permettre les échanges d'énergie entre différents niveaux de réseau : entre plusieurs habitations d'un éco-quartier ou d'une ville par exemple. Cet ensemble peut prendre plusieurs formes, dont l'une d'elles a pour stratégie l'autoconsommation collective [Albouys-Perrois, 2021].

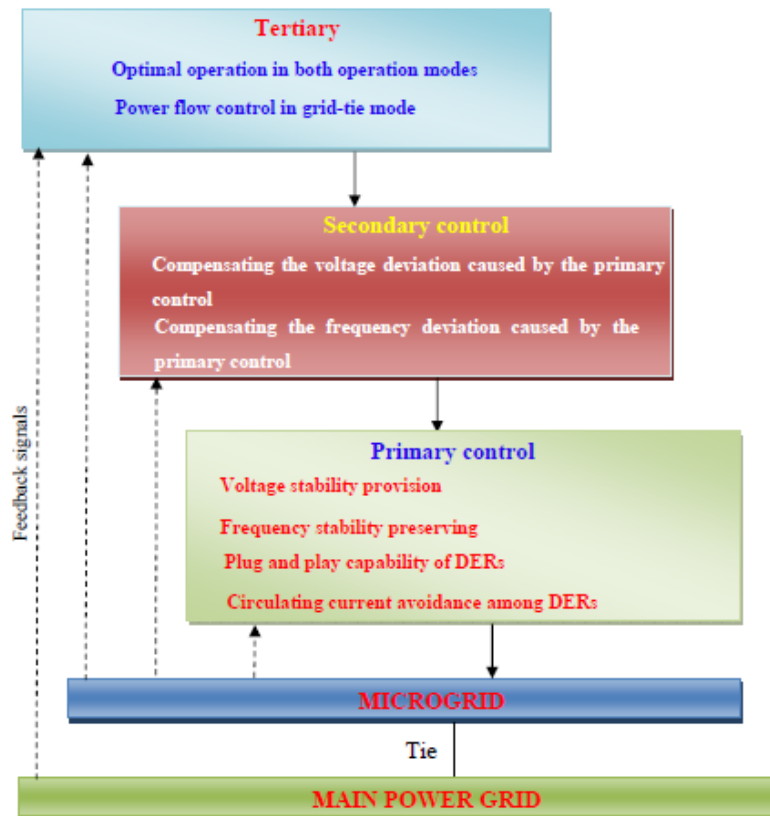


FIGURE 3.1 – Contrôle hiérarchique des microgrids [Luu, 2014]

3.2.3 Bilan

En résumé ces structures, avec l'intégration des nouvelles technologies de production et de stockage et la variabilité de consommation, sont des systèmes complexes difficiles à déployer. L'installation et l'expansion d'un micro-réseau vont être décomposées selon des thématiques précises relatives aux problématiques associées, allant de la gestion de la transmission, de la distribution et de la consommation, de la communication en passant par le contrôle des spécificités des parties physiques et numériques [Schloegl et al., 2015].

Comprendre le fonctionnement du réseau implique de connaître les éléments interagissant dans le réseau et de comprendre les enjeux de ces interactions. Les études pour le développement des micro-réseaux portent alors sur l'intégration de ces nouvelles technologies, leur synchronisation et sur l'étude des marchés financiers. Aujourd'hui, il n'existe pas de systèmes de tests largement utilisés pour le développement des commandes de réseaux comme dans d'autres domaines techniques telles que l'industrie automobile ou les machines industrielles. Comme le réseau électrique lui-même doit être hautement disponible, il n'est pas possible d'utiliser des segments de réseau réel comme environnement de développement.

En raison de la disponibilité accrue de la démarche, et des questions inter-disciplinaires que ces systèmes soulèvent, la multi-modélisation et la co-simulation constitue une approche d'analyse effi-

ce. L'objectif dans la suite du chapitre est d'appréhender les microréseaux dans la modélisation et la simulation des systèmes complexes.

3.3 Modélisation et simulation de microréseaux

Nous allons montrer comment la modélisation et la simulation de systèmes complexes aborde les problématiques liées au développement des microréseaux.

3.3.1 Domaines de recherche spécifique

Les domaines de recherche, associés à une difficulté de développement des microréseaux, sont nombreux. Chacune des problématiques des microréseaux va être étudiée avec l'outil qui lui est adapté. Nous allons donner quelques exemples d'approches relatives aux problématiques décrites plus haut, abordées dans la modélisation et la simulation.

Étude de la production, de la consommation et des systèmes de stockage

La première problématique concerne la planification de la production, de la consommation et la capacité de stockage du réseau.

consommation : la littérature prend en compte en particulier la thermique des bâtiments et l'activité humaine pour déterminer la consommation énergétique des habitations. Les activités humaines sont fonctions de plusieurs facteurs et utilisent différentes approches [Albouys-Perrois, 2021] : les modèles déterministes, stochastiques ou encore multi-agent. Les modèles continus équationnels sont la majorité des modélisations thermiques avec par exemple Modelica [Fritzson and Engelson, 1998].

Production : en raison de la nature imprévisible de ces sources propres, l'utilisation des sources d'énergie renouvelable est peu fiable. Cependant, grâce aux récents progrès de la science et des technologies d'énergie propre, le coût de construction et de mise en œuvre de systèmes de production d'électricité à partir de sources propres est plus faible et plus économique que les années précédentes [Kiehadrouinezhad et al., 2022]. Les recherches se concentrent sur le dimensionnement et le contrôle de sources de production renouvelable [Polleux et al., 2022, Benahmed, 2021]. Ces dernières sont montées en flèche ces dernières décennies [Albouys-Perrois, 2021].

Stockage : les systèmes de stockage sont le centre de plusieurs domaines de recherches de différentes natures, selon l'utilisation qui en sera faite : électro-chimique, thermodynamique ou cinétique. Pour les microréseaux, les systèmes électro-chimiques sont favorisés. Les approches, encore une fois nombreuses, se portent sur la production par électrolyse d'un combustible [Guilbert and Scipioni, 2018], le stockage de ce combustible [Sdanghi, 2019] et enfin par la transformation de celui-ci en énergie [Singla et al., 2021]. Ces technologies se basent en majorité sur l'énergie hydrogène [Singh et al., 2021].

Pour résumer, les approches permettant d'analyser le comportement des systèmes de production et de stockage et de prévoir la consommation énergétique ne manquent pas. Leur intégration dans une démarche de co-simulation nécessite de prendre en compte toutes les hétérogénéités : conceptuelles, formelles et logicielles.

Étude des échanges et de la gestion d'énergie dans les microréseaux

Les systèmes de gestion d'énergie (SGE) sont développés pour résoudre les difficultés générées par l'intermittence des sources renouvelables en déterminant le mode de fonctionnement (ilôté ou non) ou encore déterminer l'utilisation des systèmes de stockage [Li et al., 2019]. Deux catégories d'échange et de systèmes de gestion sont généralement distinguées pour les simulations : les échanges d'énergie distribués et les échanges d'énergie centralisés [Guérard, 2014]. La littérature, abondante sur le sujet, donne quelques éléments pour aborder ces problématiques. Dans le mode centralisé, le contrôleur central vise à optimiser la puissance du micro-réseau échangée en fonction des prix du marché et des contraintes de sécurité. Dans le mode décentralisé, les sources distribuées et les charges contrôlables ont plus de degrés de liberté.

Les systèmes de gestion centralisée des microréseaux reposent en général sur des méthodes d'optimisation [Shayeghi et al., 2019]. La formulation du problème d'optimisation peut prendre différentes formes selon le type de composants, la flexibilité (comme le déplacement de charges) ou la possibilité d'utilisation de système de stockage dans le réseau. Sa résolution peut aller de l'approche mathématique avec une fonction ou des fonctions objectifs en respectant certaines contraintes aux approches heuristiques. Les approches centralisées sur les échanges d'énergie ne prennent souvent en compte que l'aspect contractuel des échanges [Albouys-Perrois, 2021].

Pour le cas des systèmes décentralisés, les échanges d'information se font sans intermédiaire entre les différents acteurs du réseau [Albouys-Perrois, 2021]. Par exemple, la théorie des jeux, outils mathématiques, permet de modéliser et d'analyser les décisions entre les différents acteurs. Un jeu est une situation dans laquelle le coût ou le bénéfice obtenu par chaque joueur dépend non seulement de ses décisions, mais aussi de celles des autres joueurs [Bacci et al., 2016]. Dans les approches décentralisées, il est difficile d'identifier sur quoi porte le système de gestion, la dimension physique ou la dimension informationnelle de l'échange d'énergie [Albouys-Perrois, 2021].

La littérature donne de nombreux moyens de répartir et gérer l'énergie dans un microréseau. Les microréseaux, qui s'orientent soit vers les collectivités avec l'autoconsommation collective, soit vers des systèmes isolés, sont actuellement expérimentés avec des systèmes centralisés du marché de l'énergie et décentralisée pour l'échange physique de l'énergie [Mengelkamp et al., 2018]. Ces systèmes de gestion sont testés sur des microréseaux comprenant plusieurs composants et se concentrent sur la répartition de l'énergie de façon optimisée pour atteindre l'équilibre attendu.

3.3.2 Nécessité de co-simulation des microréseaux

Les microréseaux, constitués d'un certain nombre de composants hétérogènes connectés, construits et fournis par différents experts de domaines différents, apportent un premier défi qui concerne l'interopérabilité des éléments [Salameh et al., 2015].

Malgré les différences d'objectifs et de protocoles de ces experts, les composants des microréseaux doivent assurer les échanges d'informations permettant son bon fonctionnement. De nouvelles approches de formalisation de données doivent être développées pour le partage adéquat des informations. Cela est d'autant plus vrai que les systèmes de gestion utilisés nécessitent de nouvelles technologies de représentation et d'échange de données. Les SGE doivent échanger, extraire des informations et prendre des décisions à partir de grands volumes de données énergétiques collectées à des taux élevés et, dans la plupart des cas, en temps réel [Cuenca et al., 2017].

L'hétérogénéité des composants complexifie leur représentation au sein d'un multi-modèle, rendant sa validation difficile. Dans le cadre de la modélisation et de la simulation des systèmes complexes, le couplage de ces systèmes de gestion avec des modèles de production ou de consommation reste un défi majeur. Les systèmes multi-agent, comme dans [Albouys-Perrois, 2021], permettent de représenter des éléments hétérogènes tels que des éléments de production ou des comportements humains, avec l'utilisation de la plateforme SMACH [Huraux et al., 2015, Reynaud et al., 2017]. Toutefois, nous pouvons noter que même si une approche de co-simulation est proposée entre le système multi-agent et un modèle thermique, les configurations sont limitées et l'intégration de plusieurs systèmes hétérogènes semble difficile.

Une représentation unifiée de modélisation et simulation de microréseaux pourraient permettre l'étude des microréseaux par l'intermédiaire d'approches de simulation multi-domaines. Il s'agit de trouver un compromis entre une représentation simple au risque d'une perte d'informations sur le système et une représentation plus précise mais plus complexe, difficile d'utilisation. Nous nous attardons dans la suite sur différentes approches adressant les problématiques par co-simulation.

3.3.3 Approche de modélisation et de co-simulation de microréseaux

L'étude de la variabilité de la production et de la consommation, des technologies de stockage et de la mise en place de systèmes de gestion sont abordées dans la théorie de la modélisation et de la simulation par des méthodes et outils variés. L'objectif, afin d'étudier le système dans son ensemble, est de rassembler dans une même structure de co-simulation ces solutions. La littérature existante sur le sujet est riche, de même que les orientations de recherche. Les sujets portent majoritairement sur les défis de la conceptions, sur les exigences et la mise en œuvre de la simulation, ainsi que sur la validation et la vérification des résultats pour garantir les propriétés essentielles. Malgré les efforts considérables des communautés de recherche concernées, le degré souhaité d'intégration des domaines n'est pas atteint [Bliudze et al., 2019]. Une des difficultés majeures va se situer dans la manière d'intégrer les hétérogénéités des microréseaux au sein d'une même représentation. Tant par le nombre de sources, charges ou systèmes de stockage que par les domaines impliqués, une seule approche n'est pas possible et va dépendre de l'étude. Nous allons en présenter ici les principaux éléments, les analyser et les discuter.

Représentation multi-domaine

La représentation la plus souvent utilisée en modélisation est une approche par domaines, donnée par [Hammad et al., 2019], figure 3.2.

Cette représentation donne une vision du réseau intelligent en trois parties : les systèmes électriques, la communication et les technologies de l'information. Cette vision possède l'avantage de pouvoir travailler sur des modèles séparés pouvant ensuite être couplés. Chaque expert peut écrire son modèle avec l'outil qui lui sied le mieux. Dans l'objectif d'une construction séparée et indépendante des sous-systèmes du modèle, la sémantique de ces systèmes doit être modulaire. Elle doit être indépendante des paramètres de simulation comme la précision des pas de simulation qui sont spécifiques aux simulateurs mais pas aux processus physiques sous-jacents. Assurer une abstraction et une modularité correcte n'est déjà pas trivial pour les systèmes purement logiciels, cela devient un défi majeur dans le contexte des systèmes cyber-physiques, où les systèmes continus (modélisant gé-

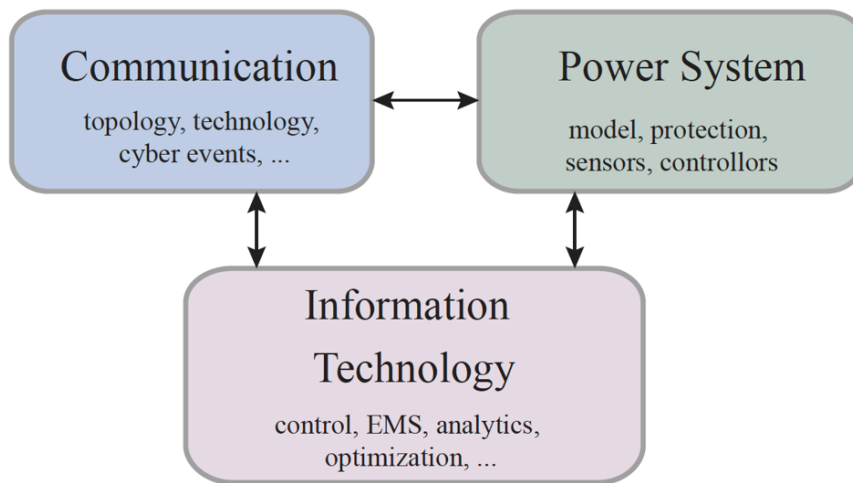


FIGURE 3.2 – Représentation des microgrids dans la M&S [Hammad et al., 2019]

néralement des processus physiques) sont combinées avec des systèmes évènementiels (comme des contrôleurs numériques générant des décisions ou des actions de l'utilisateur) [Bliudze et al., 2019].

Cette définition donne une vision du réseau dont les différentes parties interagissent entre elles et s'influencent les unes les autres. Cette modélisation en trois parties est efficace pour étudier l'impact des différents réseaux sur les autres [Bliudze et al., 2019]. Par exemple, nous pouvons étudier l'interdépendance entre le réseau électrique et le réseau de communication, afin d'étudier l'impact des catastrophes naturelle et la gestion des urgences [Tong et al., 2017] ou encore étudier les interactions entre le réseau de communication et le réseau électrique. Ces études sont plutôt centrées sur les impacts des erreurs du réseau de communication sur le réseau électrique.

Approches générales de co-simulation utilisant la représentation multi-domaines : Pour reprendre la description de [Rehtanz and Guillaud, 2016], la co-simulation est décrite comme "des modèles de simulation hybrides et différentes représentations qui sont exécutés dans des environnements d'exécution individuels", avec un défi particulier pour synchroniser cette configuration complexe. Il est impossible d'être exhaustif concernant les intergiciels développés. Plusieurs tentatives de paysages bibliographiques ont été tentées [Mets et al., 2014, Palensky et al., 2017, Vogt et al., 2018]. Les conclusions se tournent vers des solutions hybrides de deux ou trois simulateurs. Chacun représente un domaine de la représentation en trois parties et sont synchronisés à l'aide d'ordonnanceur continu, discret et la plupart du temps hybride. Par ailleurs, Ces approches se concentrent sur les aspects physiques et techniques des microréseaux avec des logiciels ou bibliothèques populaires comme MODELICA [Fritzson and Engelson, 1998] couplés avec la bibliothèque BUILDSYSRO [Plessis et al., 2014b] pour la thermique des bâtiments dont l'avantage est la génération de *FMU*, l'utilité a été vue dans la première partie de ce manuscrit, ou encore le logiciel *Omnet++* [Varga and Hornig, 2008b] pour la simulation de réseau de communication.

Quelques exemples d'approches plus génériques : Dans de rare cas, les approches de co-simulation

permettent le couplage de plus de deux ou trois simulateurs et permettent de mieux répondre au besoin de réutilisation de la co-simulation. C'est le cas par exemple des approches suivantes :

- *MOSAİK* [Schütte et al., 2011] : Mosaik est un intergiciel de co-simulation dédié à la co-simulation de smart grids. L'approche repose sur une architecture logicielle composée d'un « coeur » logiciel composé de deux entités permettant l'échange et la synchronisation de données. D'un côté le Sim-Manager est responsable des connexions entre les différents simulateurs à l'aide d'échanges basés sur des sockets TCP/IP. D'un autre côté, le scheduler synchronise les échanges entre simulateurs à l'aide un mécanisme par « pas de temps ». L'intégration de composants se fait par l'intermédiaire de deux API, Component API et Scenario API, responsables respectivement de l'interfaçage entre le simulateur et Mosaik en spécifiant notamment le format des données et de la spécification de scénarios de co-simulation comme le couplage des simulateurs et les paramètres de simulation.

Le framework recherche l'utilisabilité et la flexibilité, i.e., la mise en place d'une co-simulation intégrant aisément de nombreux composants [Steinbrink et al., 2018]. Toutefois, un inconvénient est à souligner. La synchronisation, gérée par pas de temps, cohérent avec les systèmes continus, ne permet la prise en compte d'évènements, générés entre deux pas de temps par des systèmes discret, que de façon différée, pouvant amener à des biais de simulation importants.

- *Mecsyco* [Vaubourg et al., 2015] : MECSYCO (Multi-agent Environnement for Complex Systems Co-simulation) est un intergiciel de co-simulation dédié à l'étude des systèmes cyber-physiques, développé au sein du LORIA/Inria et qui a fait l'objet d'un partenariat avec EDF R&D pour la M&S de réseaux électriques intelligents. Celui-ci repose sur le formalisme DEVS. Le framework se concentre sur l'intégration formelle avec une stratégie de Wrapping DEVS. Ceci permet, à l'aide de cinq primitives standards reposant sur le formalisme DEVS, d'encapsuler et d'utiliser tout modèle ou simulateurs comme un modèle DEVS. *Mecsyco* intègre en particulier les simulateurs et composants suivants : FMU, Netglogo, Omnet++, SQL Database, Matlab/Simulink. Le système de ports du formalisme DEVS permet la description d'un modèle par une interface standard utilisable en mode "boite noire" avec un ensemble d'informations comme le nom du port et le type de données échangées. Cela permet une description du couplage entre modèles par une connexion entre une sortie et une entrée. L'algorithme de synchronisation utilisé, Chandy-Misra-Bryant [Chandy and Misra, 1979, Bryant, 1979], décentralisé garantit la synchronisation des données échangées entre les simulateurs. Enfin, la propriété de fermeture par couplage apportée par le formalisme est une propriété remarquable dans l'intergiciel. Un modèle couplé, formé de plusieurs modèles atomiques agrégés, possède les mêmes caractéristiques qu'un modèle atomique et peut-être réutilisé dans un multi-modèle.

Ces deux approches ne reprennent pas explicitement l'approche en trois parties mais l'utilisent et décomposent les différents sous-systèmes de chaque domaine selon l'étude réalisée. Cela peut-être différentes parties du réseau physique par exemple. L'avantage est la capacité d'intégration de plusieurs éléments hétérogènes. Toutes ces approches ont cependant le même point commun : bien qu'adressant avec brio les problématiques de co-simulation en permettant la réutilisation de modèles tout en garantissant la synchronisation des données à un certain degré, elles se concentrent sur les aspect techniques et physiques des microréseaux. Les systèmes de gestion physique ou information-

nelle sont en général implicites et propres aux multi-modèles simulés. Un changement de système de gestion implique généralement une réécriture partielle ou totale du multi-modèle co-simulé.

3.4 Conclusion

Les larges possibilités de technologies des microréseaux en ont fait un élément de choix pour la transition énergétique : intégration de sources renouvelables, nouvelles technologies de stockages, consommateurs responsables et actifs du réseau et des services de mesures et de gestion numériques qui garantissent une fiabilité du réseau. Cette énergie produite localement donne de nouveaux modes de gestions et apparaît sous la forme de l'auto-consommation collective où l'énergie est à la fois produite et consommée par une collectivité. Cependant cette panoplie de technologies est aussi un enjeu de taille pour leur étude et leur développement. Leurs intégrations dans le réseau existant engendrent des problématiques tant technique qu'économique qui sont une barrière pour leur essor.

L'étude des microréseaux doit passer par l'utilisation de la multi-modélisation et de la co-simulation. À l'instar de ces objectifs et de ces technologies mises en œuvre, leur modélisation est décomposée comme un ensemble de sous-systèmes. Les représentations qui en sont faites sont aussi nombreuses que le sont les études réalisées. L'étude du comportement d'un réseau énergétique local se fait généralement par l'ajout, le retrait ou la modification de composant. Les échanges d'énergie, sa distribution et sa régulation sont soumis à différentes contraintes selon un objectif donné, économique, technique, environnementale, ou une combinaison de ces objectifs. L'importance d'une représentation unifiée et d'outils de co-simulation apparaît pour l'interopérabilité et la réutilisation des modèles construits.

Pourtant les approches de co-simulation de micro-réseau actuelles sont généralement basées sur des technologies spécifiques, limitant l'évolution des modèles proposés. Ces solutions intègrent deux ou trois simulateurs, sans possibilité d'ajout [Mets et al., 2014]. Chaque simulateur représente en fait une partie du système, entre le réseau énergétique et le réseau de télécommunication. Les simulateurs couplés choisis, bien qu'en général populaires et très utilisés limitent la réutilisation en mode "boîte noire" des modèles, c'est-à-dire en ne connaissant que la fonction du modèle et son interface [Schloegl et al., 2015]. Par ailleurs, ces solutions, bien que pouvant décrire partiellement ou totalement un micro-réseau dans son aspect physique, sont des systèmes fermés ne pouvant prendre en compte le comportement humain ou encore des systèmes décisionnels différents. Enfin il n'est possible de réfléchir et d'étudier qu'un seul niveau du réseau et ces approches ne permettent pas la composition sémantique.

Notre travail va donc s'orienter sur une approche de co-simulation pour la représentation des échanges d'énergie et leur équilibrage dans les microréseaux. La question qui se pose est déterminer une méthode pour co-simuler rigoureusement ces échanges d'énergie, dans une démarche modulaire et hiérarchique. Dans la suite du manuscrit, nous détaillerons la problématique étudiée, en réalisant une étude de cas.

POSITIONNEMENT

Sommaire

4.1 Introduction	37
4.2 Problématique	38
4.2.1 Détails et objectifs	38
4.2.2 Choix de l'intergiciel	38
4.2.3 MECSYCO pour l'étude des échanges d'énergie par co-simulation	39
4.2.4 Bilan	42
4.3 Proposition	43

L'objectif de ce chapitre est de positionner les contributions de la thèse par rapport aux enjeux des micro-réseaux. Nous détaillons la problématique abordée en rapport avec le travail bibliographique réalisé jusqu'à maintenant, à travers une étude de cas réalisée sur l'intergiciel MECSYCO. À l'aide de cette étude, nous avons pu dégager des hypothèses pour répondre à la problématique que nous précisons ici.

4.1 Introduction

Nous rappelons la question générale qui anime ce manuscrit : *comment co-simuler rigoureusement les échanges d'énergie d'un micro-réseau ?*

Cette problématique a pu être détaillée dans les précédents chapitres. Le chapitre 2 introduit l'activité de M&S des systèmes complexes. Nous avons pu établir que le modèle d'un système complexe est représenté par un multi-modèle, formé d'un ensemble de sous-modèles hétérogènes (aux niveaux conceptuel, formel et logiciel) en interaction. Nous avons souligné l'importance du développement d'approches de co-simulation pour faciliter, dans une certaine mesure, la construction de multi-modèles. Cela passe par l'intégration modulaire et hiérarchique des hétérogénéités du multi-modèle, permettant ainsi la modification rapide et aisée du multi-modèle. Cela garantit, de fait, la démarche expérimentale liée à l'activité de M&S.

Le chapitre 3 détaille les enjeux des micro-réseaux dans le cadre de la transition énergétique. L'intégration de nouvelles méthodes de production renouvelable et des systèmes de stockage dans un

réseau déjà en place est le principal défi des micro-réseaux : l’intermittence des sources et le développement de nouvelles techniques de gestion donnent naissance à des échanges d’énergie difficilement prévisibles du fait de facteurs humains et météorologiques [Albouys-Perrois, 2021], mettant à mal la stabilité du réseau. Nous avons distingué l’aspect physique de l’aspect informationnel des échanges d’énergie. D’un côté, l’aspect physique se concentre sur la régulation en tension et fréquence du réseau à l’aide des réseaux de télécommunication et d’information. D’un autre côté, l’aspect informationnel s’attarde sur l’équilibre entre la quantité d’énergie produite et la quantité d’énergie consommée dans le réseau. Pour garantir la fiabilité du réseau, chacun des aspects est analysé à l’aide d’outils et de logiciels spécifiques. Conçus depuis des domaines dont les objectifs d’étude diffèrent, ces outils font de l’étude par co-simulation une approche incontournable pour intégrer dans une même structure cet ensemble varié d’éléments et ainsi représenter l’ensemble du système.

À partir de ces deux chapitres, nous émettons les hypothèses suivantes concernant l’étude par co-simulation des échanges d’énergie dans un micro-réseau :

- **Le système est vu comme un ensemble de composants** (sources, charges, systèmes de stockage) qui échangent de l’énergie et des informations.
- **Nous étudions le réseau dans son aspect informationnel** et nous nous concentrons sur la quantité d’énergie échangée par les composants.
- Ces composants sont **représentés par des modèles hétérogènes** (conceptuels, formalismes ou logiciel).

4.2 Problématique

4.2.1 Détails et objectifs

Notre objectif est de construire des multi-modèles dans un cadre scientifique et rigoureux, dans lequel des représentations de sources, charges et systèmes de stockage échangent de l’énergie dans le but de répondre à une demande en énergie de manière équilibrée. Pour cela, l’approche que nous développerons doit atteindre les objectifs suivants :

- Intégration des hétérogénéités aux niveaux conceptuels, formels et logiciels pour représenter l’ensemble des composants d’un réseau
- L’interopérabilité des composants doit être vérifiée à tous les niveaux de la démarche de co-simulation (voir chapitre 2).
- Les composants doivent être interchangeables de façon à pouvoir passer d’un composant à un autre sans modification importante du multi-modèle.

Ces objectifs nous assurent, d’une part, que l’intégration n’est pas ad-hoc et, d’autre part, que l’approche est suffisamment modulaire pour l’analyse rapide de plusieurs architectures de réseau.

4.2.2 Choix de l’intergiciel

Nous souhaitons utiliser une approche de co-simulation pour réaliser la construction modulaire et hiérarchique de multi-modèles de micro-réseaux. Nous devons pouvoir intégrer et coupler des mo-

dèles hétérogènes issus de logiciels de M&S différents dans un cadre rigoureux de co-simulation.

Le chapitre 3 a permis d'introduire quelques approches de co-simulation. D'après les lectures réalisées, et sans parler des approches ad-hoc difficilement réutilisables, ces plateformes sont majoritairement axées sur l'étude de l'influence des réseaux de télécommunication sur le réseau physique, et sur le contrôle du réseau physique. Ces études des micro-réseaux utilisent une représentation du système en sous-domaines. Cette représentation est efficace pour étudier l'impact du réseau de télécommunication sur le réseau électrique et inversement. Cependant cette représentation impose l'utilisation d'un simulateur par domaine. Par conséquent, la modularité et la hiérarchisation lors de la construction de multi-modèles que nous recherchons semblent compliquées avec cette représentation.

MECSYCO, plateforme de co-simulation propose une intégration rigoureuse de composants hétérogènes en garantissant une interopérabilité aux niveaux formel et logiciel. Par le passé, la plateforme de co-simulation a fait ses preuves sur l'étude de smartgrid [Vaubourg et al., , Docquier et al., 2019]. La construction hiérarchique de modèles est également permise au niveau formel. Pour ses attraits, nous allons nous appuyer sur ses fonctionnalités pour notre démarche. En utilisant cet intergiciel, nous donnons des contraintes sur la construction et la résolution de nos modèles. Chacun de nos modèles et multi-modèles doit respecter les points suivants :

Représentation des modèles basés ports : L'intégration des modèles dans MECSYCO se fait à l'aide d'un wrapper issu du formalisme DEVS. Par conséquent, les modèles que nous construirons doivent posséder une interface composée d'un ensemble d'entrées, sorties et de paramètres de simulations pour être utilisable dans l'intergiciel.

Représentation discrète de la simulation : Le formalisme DEVS impose une représentation de la simulation par évènement. Nos modèles, continus ou événementiels, doivent générer des événements (par discrétisation par exemple) de façon à ce que la simulation se déroule sans encombre.

L'aspect sémantique, qui concerne notamment la conceptualisation des données échangées, n'est, en revanche, pas traité. Nous allons voir dans quelle mesure la construction de multi-modèles en est impactée.

4.2.3 MECSYCO pour l'étude des échanges d'énergie par co-simulation

L'objectif de cette partie est de montrer les limites de l'intergiciel MECSYCO pour l'étude des échanges d'énergie dans les micro-réseaux. L'intégration de modèles spécifiques à un domaine, ici les micro-réseaux, dans une démarche de co-simulation peut vite s'avérer lourde sans règles dédiées. Pour illustrer cette problématique, nous donnons à travers un exemple les limites de l'intergiciel.

Notre point de départ est une micro-structure représentée par une habitation que nous souhaitons rendre autonome en énergie. Son multi-modèle, donné figure 4.1, calcule par simulation la puissance nécessaire pour climatiser l'habitation. Il est constitué de deux éléments : le modèle thermique du bâtiment et un contrôleur donnant la puissance de fonctionnement du climatiseur. La température intérieure de la maison (T_{in}) évolue en fonction d'une température donnée en entrée ($T_{weather}$). Lorsque la température de la pièce dépasse une limite arbitraire, le contrôleur active le climatiseur pour refroidir l'habitation sous la forme d'une puissance de fonctionnement (p_{Clim}). La base de données météo est une base de données CSV, donnant la température extérieure, la vitesse du vent et la radance

solaire sur la période Juillet-Aout 2018. Ces données proviennent d'une station météo, à la suite d'un travail en collaboration avec l'Apheen⁷, dans le cadre de la rénovation de leur bâtiment.

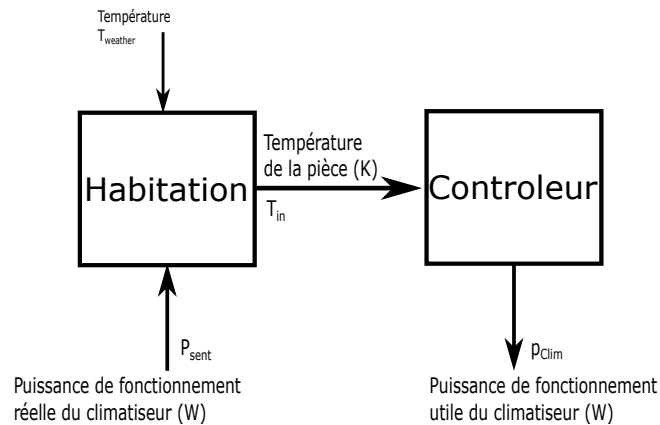


FIGURE 4.1 – Multi-modèle de régulation thermique d'une habitation.

Nous souhaitons ajouter dans notre système des sources de production renouvelable et des systèmes de stockage pour dimensionner et rendre autonome en énergie l'habitation. En réalisant cette étude pas à pas, nous souhaitons montrer les problématiques domaines qui apparaissent et les contraintes que les multi-modèles imposent à l'intergiciel pour une construction itérative de multi-modèles.

Le premier multi-modèle construit consiste à ajouter au multi-modèle initial une source de production. Celle-ci est représentée par un modèle continu de production éolienne, sous la forme d'un composant FMU prenant en entrée la vitesse du vent et donnant en sortie la puissance générée.

La quantité d'énergie consommée et produite dans le réseau, dépendante de la météo, ne permet pas à chaque instant l'équilibre énergétique. Pour satisfaire l'équilibre entre la production et la consommation, nous utilisons un comparateur pour déterminer le surplus ou le déficit d'énergie. Illustré figure 4.2, le schéma de co-simulation modélise le système étudié.

Ce premier cas nous montre que l'ajout d'un seul composant (ici la source de production) dans le réseau nécessite l'implémentation d'un nouvel élément de calcul, qui retourne la valeur minimale de puissance entre celle produite par l'éolienne et celle nécessaire au fonctionnement du climatiseur lorsque la puissance produite est suffisante. Nous pouvons dès lors remarquer que la puissance produite en surplus est perdue, et que ce cas n'est par conséquent pas traitée dans cette première itération.

À la deuxième itération, nous ajoutons un modèle de système de stockage afin de gérer l'énergie en surplus ou fournir de l'énergie en cas de déficit de production. Le système de stockage est représenté par un modèle continu, prenant en entrée le delta de puissance généré par la production et la consommation. En retour, il fournit la puissance manquante ou stocke selon le besoin. Il s'agit d'un système de stockage idéal sans limite, afin de répondre à la question sur la quantité d'énergie devant être soutirée au système de stockage.

Le multi-modèle 4.3 illustre les éléments supplémentaires qui sont nécessaires pour équilibrer le système. Le comparateur est adapté pour fournir le delta de puissance au système de stockage. Nous

7. Association pour l'Hébergement des Étudiants et Enseignants de Nancy

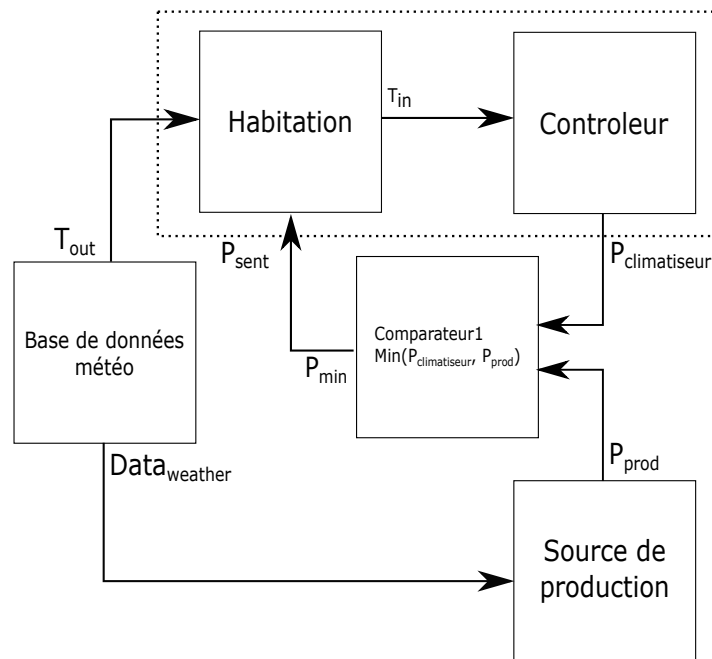


FIGURE 4.2 – Première itération : ajout de la météo et d'une source de production à l'habitation.

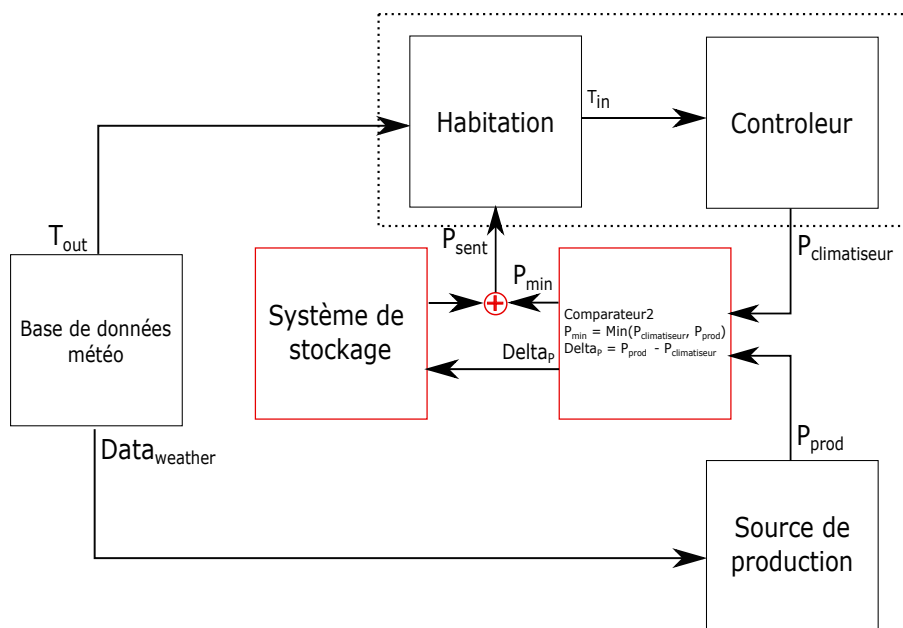


FIGURE 4.3 – Seconde itération : ajout d'un système de stockage.

ajoutons un agrégateur qui a pour rôle de fournir à l'habitation le résultat de la somme des puissances produites par le système de stockage et par l'éolienne.

Ce second multi-modèle nous montre qu'un ajout supplémentaire a nécessité, encore une fois, l'ajout d'éléments pour satisfaire la condition d'équilibre du système.

À l'aide de MECASYCO, l'intégration formelle des modèles ne pose pas de problème. En revanche,

le couplage des modèles existants pour la construction du multi-modèle est relatif à la résolution du problème de l'équilibrage des flux d'énergie. Le principe sous-jacent utilisé pour le résoudre, illustré dans les deux cas de figures, est d'ajouter au multi-modèle des flux d'informations et des calculs, sous la forme d'agrégateurs et comparateurs pour déterminer les flux et leurs valeurs garantissant un équilibre. Ces agrégateurs et comparateurs sont des outils spécifiques de MECSYCO [Paris, 2019] qui permet la connexion de plusieurs ports de sortie sur un même port d'entrée, autorisant l'agrégation de données issues de plusieurs ports et la gestion des événements simultanées sur un même port.

Cette façon de faire ad-hoc a permis des co-simulations fonctionnelles mais uniquement sur des sous-ensembles de cas limités. Elle demande à revoir le schéma de co-simulation pour chaque cas non encore traité. Par ailleurs elles mélangent les échanges physiques et informationnels : le système de stockage reçoit une donnée (DeltaP) qui peut être confondue avec une puissance physique. Cette confusion physique et informationnel peut mener à des erreurs comme le non respect de lois physiques comme la loi de la conservation de l'énergie.

Des experts en énergie, capables de construire des schémas de co-simulation avec des grandeurs physiques seront incapables, sans connaissances avancées de l'outil, de produire des multi-modèles plus complexes avec des sources et des systèmes de stockage plus nombreux. Le passage à l'échelle, avec un nombre de composants conséquent, est rendu difficile puisqu'à chaque ajout de composants, l'implémentation d'un nouveau programme qui traite le cas de déséquilibre est nécessaire. Le changement de stratégie est par conséquent impossible avec cette méthode de résolution.

4.2.4 Bilan

Chaque multi-modèle représente une situation d'échanges d'énergie ou d'informations précise. Il s'agit donc d'une représentation statique de la structure du réseau à un instant donné. Par conséquent, chaque ajout ou déconnexion de composants dans le multi-modèle nécessite l'implémentation d'un nouvel élément spécifique propre à l'intergiciel traitant le nouveau problème d'équilibrage. Le fonctionnement et la gestion du réseau du réseau est dynamique et nécessite un re-calcule de la répartition des flux d'énergie changeant faisant évoluer le multi-modèle. Souvent une modification du multi-modèle, même mineure, implique une réécriture partielle ou totale du multi-modèle coûteuse en temps et parfois lourd dans l'implémentation. Celle-ci peut potentiellement être source d'erreurs comme le cas d'un mauvais couplage de composants.

De plus nous devons distinguer les échanges physiques des échanges informationnels. Les premiers sont les échanges réels ayant lieu entre les composants constituant la grille et vérifiant des lois physiques propres comme les lois de Kirchhoff. Les seconds sont les mesures sur ces mêmes composants et les décisions prises permettant de connaître en tout temps l'état de la grille et de garantir, par l'intermédiaire de consignes, l'équilibre entre l'énergie produite et consommée.

En résumé, l'approche ad-hoc qui a été réalisée fait appel à des connaissances des outils mis à disposition par MECSYCO comme l'agrégateur ou le comparateur. Par conséquent cela devient vite incompréhensible si l'outil n'est pas maîtrisé. Les figures 4.2 et 4.3 en sont des bons exemples. La stratégie de gestion du réseau est implémentée avec ces mêmes outils et par conséquent rend difficile toute vérification ou modification. Enfin cette construction n'est utilisable que si la structure

du schéma n'évolue pas, auquel cas il faut tout refaire. La difficulté n'est pas la faisabilité de la co-simulation mais plutôt la manière dont elle est construite. Le problème se situe au niveau de l'intégration sémantique des éléments. L'utilisation d'approches adaptées pour faciliter la construction du multi-modèle s'avère nécessaire.

4.3 Proposition

Nous travaillons dans un contexte de co-simulation : représenter et simuler une grille comme un ensemble de composants en interaction où les producteurs, les consommateurs et les systèmes de stockage échangent de l'énergie sur un réseau. L'un des objectifs est de maintenir l'équilibre énergétique. La question est de savoir comment co-simuler rigoureusement leurs échanges. Cela passe par l'intégration des éléments aux niveaux conceptuel, formel et logiciel dans une démarche de co-simulation et par l'anticipation des couplages qu'il y aura entre les différents modèles.

Pour l'intergiciel MECASYCO, l'intégration aux niveaux formel et logiciel est présent. En revanche l'intégration conceptuel fait défaut. La définition de règles de couplage spécifique à un domaine pour construire de façon modulaire et hiérarchique une co-simulation devient une nécessité. Notre objectif est d'enrichir les fonctionnalités en nous concentrant sur l'aspect sémantique des composants.

Les contributions de cette thèse se focalisent sur la définition de composants spécifiques aux micro-réseaux, dédiés à l'étude des échanges d'énergie, garantissant l'interopérabilité au niveau sémantique, s'intégrant à une démarche de co-simulation rigoureuse. **Notre contribution propose une vision informationnelle du réseau et consiste en la définition de deux concepts :**

- *le composant informationnel* : il représente les composants du réseau, dans leur aspect informationnel
- *l'opérateur de couplage* : Il modélise la stratégie de gestion.

Leur définition garantit l'intégration de composants issus de différents domaines relatifs aux micro-réseaux dans une approche itérative et hiérarchique de co-simulation. Le chapitre suivant détaille leur définitions.

SPÉCIFICATION DE MULTI-MODÈLES INFORMATIONNELS DES MICRORÉSEAUX

Sommaire

5.1	Introduction	45
5.2	Descriptions et définitions des modèles informationnels	46
5.2.1	Conceptualisation et formalisation du composant informationnel	47
5.2.2	Changement de représentation : modèles physiques vers informationnels	48
5.2.3	Conceptualisation et formalisation de l'opérateur de couplage	49
5.3	Couplage de composants	51
5.3.1	Modèle couplé	51
5.3.2	Résolution du problème d'équilibrage lors d'une simulation	52
5.4	Hierarchisation de la démarche pour le passage à l'échelle	54
5.5	Conclusion	55

Ce chapitre présente les contributions de la thèse. Nous définissons deux concepts pour l'intégration des hétérogénéités spécifiques des microréseaux dans une approche de co-simulation modulaire et hiérarchique.

5.1 Introduction

Le défi auquel nous nous attaquons est celui de l'intégration des hétérogénéités spécifiques des microréseaux dans une approche de co-simulation modulaire et hiérarchique. Nous souhaitons construire des multi-modèles qui représentent les nombreuses technologies que nous retrouvons au sein d'un micro-réseau. Leur simulation doit permettre l'analyse des échanges d'énergie entre composants à des fins de dimensionnement ou de gestion du réseau.

Les difficultés, identifiées à partir de l'analyse des approches existantes et des expériences réalisées sur MECSYCO aux chapitre 3 et 4, sont situées en particulier au niveau sémantique de la modélisation et simulation des systèmes complexes.

Afin de proposer une démarche de multi-modélisation et co-simulation suffisamment modulaire et hiérarchique pour les microréseaux, il est donc nécessaire de définir des concepts et des règles de couplages spécifique aux microréseaux.

Notre proposition se base sur une identification du réseau comme un ensemble de composants, produisant, consommant ou stockant de l'énergie au besoin, vu sous leur angle informationnel et échangeant de l'énergie. La régulation de ces échanges se fait par l'intermédiaire d'un système de gestion, responsable de l'équilibre énergétique. Nous avons pu voir au chapitre 3 que la modélisation de ces éléments reflète la complexité du système. Ainsi, pour construire des multi-modèles à partir de modèles hétérogènes, plusieurs vérifications sont à réaliser. Le premier point à vérifier est l'interopérabilité des modèles couplés. Le deuxième élément important est de comprendre les interactions entre les sous-modèles, et de proposer une dynamique de résolution. Pour satisfaire ces deux objectifs, nous proposons dans cette thèse la définition de deux concepts :

- *le composant informationnel* : il modélise l'aspect informationnel des composants physiques définis par leur rôle dans le réseau (consommateurs, producteurs ou systèmes de stockage) .
- *l'opérateur de couplage* : il s'agit de l'objet de réification de la stratégie de gestion. Il gère la répartition des flux à partir des informations reçues, en déterminant un nouvel état d'équilibre informationnel, vers lequel le système physique doit tendre.

La définition et la formalisation des interfaces de nos composants vont venir garantir les multiples niveaux d'interopérabilité de la démarche de M&S de systèmes complexes. Le couplage et la dynamique du multi-modèle vont être donnés par la conceptualisation des objets.

À travers la mise en place de composants dédiés et de règles de couplages précises, nous souhaitons fournir à MECSYCO la capacité d'intégrer au niveau conceptuel les hétérogénéités spécifiques des microréseaux dans la démarche de modélisation et simulation de systèmes complexes proposée dans [Paris, 2019]. Le chapitre commence par donner les spécifications du composant informationnel et de l'opérateur de couplage, ainsi que les outils pour permettre le changement de représentation de composants physiques existants. Nous précisons ensuite la description des couplages et la dynamique du multi-modèle construit.

5.2 Descriptions et définitions des modèles informationnels

Dans notre système informationnel, nous distinguons deux ensembles de tâches : la mesure des opérations sur l'énergie (consommer, produire et stocker) et le calcul, à partir des informations mesurées, d'une répartition des échanges d'énergie garantissant l'équilibre informationnel entre production et consommation.

Nous modélisons ces deux ensembles par des concepts distincts. Ces deux concepts modélisent une partie du système et permettent de séparer les tâches entre deux types de modèle : d'un côté les composants informationnels qui mesurent et renvoient les informations des composants physiques et d'un autre côté le système de gestion qui s'occupe de collecter les données et de calculer la répartition des flux de référence.

Leur spécification est détaillée dans la suite. Chacun des deux concepts va posséder des comportements et fonctionnalités propres qui visent à stabiliser le réseau, qui devront être représentés pour

l'étude par co-simulation.

5.2.1 Conceptualisation et formalisation du composant informationnel

Notre objectif est de modéliser la partie informationnelle des composants du réseau consommant, produisant et stockant physiquement de l'énergie. Il faut donc déterminer les principales fonctions.

Dans un micro-réseau, les composants qui produisent, consomment et stockent de l'énergie possèdent leurs propres capteurs et algorithmes dans le but de fournir un diagnostic en temps réel de leur état. Il s'agit de la part informationnelle des composants physiques. Toutes les informations collectées sont au service du réseau afin de garantir son bon fonctionnement. Ces données concernent entre autre la puissance consommable ou celle pouvant être générée. Dans le cadre des microréseaux, ces données peuvent également être des valeurs d'ajustement que le composant peut prendre à un instant donné.

Les données sont des informations qui peuvent être communiquées [Guérard, 2014] à un système de gestion dont le but est de réguler les échanges d'énergie garantissant l'équilibre du système. La communication est bidirectionnelle. Cela signifie que les technologies proposées envoient et reçoivent les informations nécessaires au fonctionnement du réseau. Cela signifie également que l'adaptation ne se fait pas uniquement du côté de la production mais que le consommateur peut, de son côté, réguler sa consommation (par un déplacement de tâche non essentielle par exemple).

Nous nommons *composant informationnel* le modèle permettant de représenter la part informationnelle des éléments physiques du réseau. Ses fonctionnalités se résument ainsi :

- Déterminer les valeurs d'ajustement possibles qui peuvent représenter des déplacements de charges ou des modifications du paramétrage de la production par exemple.
- Transmettre les informations mesurées sur la partie physique : les puissances consommables, pouvant être produites, l'état de charge pour les systèmes de stockage et les valeurs d'ajustement acceptables ou degrés de liberté du composant, provenant du diagnostic en temps réel.
- Réceptionner les consignes d'ajustement et les appliquer sur la partie physique
- Conserver les informations concernant les données échangées (quelles données ont été envoyées ou reçues par exemple).

Le modèle s'appuie sur un comportement événementiel, relatif au changement de puissance produite ou consommée ou à la réception de consignes. De cette façon, le composant informationnel possède plusieurs comportements distincts selon s'il génère un événement ou s'il en reçoit un.

Génération d'événements : Tout changement d'état vis à vis de la puissance correspond à la génération d'un événement d'information à destination du système de gestion. Il s'agit de la puissance consommable ou pouvant être produite par celui-ci à un instant donné et des valeurs d'ajustement acceptables.

Réception d'événements : Le composant réceptionne une valeur d'ajustement sur sa consommation/production. La consigne de base est la possibilité de déconnexion physique : un composant physique n'ayant aucun degré de liberté possède tout de même la possibilité de se déconnecter du réseau.

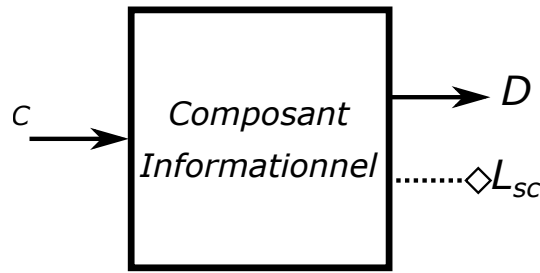


FIGURE 5.1 – Interface d'un composant informationnel

Les spécifications de l'interface du modèle sont données par le comportement du composant précédemment défini. Celles-ci se basent sur le formalisme DEVS, pour utiliser les propriétés de wrapping utiliser par MECSYCO. Nous notons S_c la structure de l'interface d'un composant informationnel, illustrée figure 5.1. Sa structure est spécifiée ainsi :

$$S_c = (C, D, L_c)$$

où :

Entrée :

- $C \in \mathbb{R}$: Valeur de la consigne d'ajustement reçue. Il s'agit d'une puissance de référence vers lequel le système physique doit tendre.

Sortie :

- $D = [P_o \times P_p]$: Couple [puissance, valeurs d'ajustement acceptables] du composant informationnel où $P_o \in \mathbb{R}$ et $P_p \in \mathbb{R}^N$. Une puissance positive correspond à une production d'énergie. Inversement, une puissance négative correspond à une consommation d'énergie. Une valeur nulle signifie la déconnexion physique du composant.

Éléments d'observation :

- L_c : Non présent sur le formalisme DEVS, nous ajoutons ce port d'observation. Il ne peut pas être couplé à un autre modèle⁸. Notre composant informationnel propose un port sur lequel un ensemble d'événements est enregistré avec une estampille temporelle et observable. Ces événements ont pour vocation de représenter les informations transmises ou reçues par le composant : la valeur de consigne d'ajustement reçue par exemple.

5.2.2 Changement de représentation : modèles physiques vers informationnels

Notre objectif est de pouvoir réutiliser les modèles physiques existants de la littérature dans une démarche de co-simulation de microréseaux pris sous un angle informationnel. Cette étape essentielle permet d'intégrer dans notre démarche des modèles physiques éprouvés, validés par simulation, sans les modifier.

Les modèles physiques, quels qu'ils soient, n'ont que la possibilité de donner en sortie la puissance consommée ou produite, soit de manière continue, soit de manière événementielle selon le formalisme utilisé. Ils ne possèdent pas de degrés de liberté hormis la déconnexion physique, qui est

8. Lors de la construction ultérieure de multi-modèle, ce port ne sera pas affiché.

toujours possible, ou ils ne sont pas renseignés. Il peut en revanche recevoir en entrée une puissance physique influençant son comportement. L'idée est donc de passer d'une représentation physique à une représentation informationnelle afin d'intégrer les modèles à notre démarche de co-simulation de microréseaux.

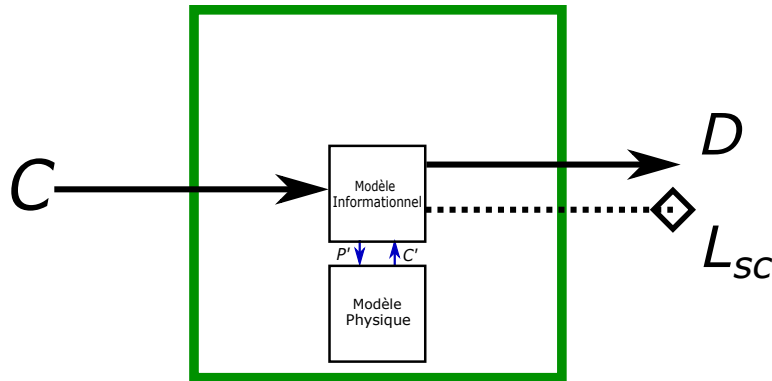


FIGURE 5.2 – Illustration du passage du modèle physique vers celui informationnel.

Pour réaliser ce changement de représentation, nous couplons un modèle informationnel au modèle physique, comme illustré figure 5.2. Il joue le rôle d'intermédiaire entre le modèle physique et le réseau informationnel. Il est responsable du changement de la représentation, physique vers informationnelle en réalisant différentes opérations :

- Réceptionner les mesures de la partie physique (notées P'). En réaction, le modèle informationnel détermine les degrés de liberté du composant et envoie les informations au système de gestion. Le degré de liberté minimal est la déconnexion de telle sorte qu'il soit connecté ou déconnecté.
- Réceptionner les valeurs des consignes de régulation de puissance. En réaction, le modèle informationnel applique cette consigne sur le modèle physique (noté C').

Le composant informationnel, à travers le modèle informationnel couplé au modèle physique, permet de reprendre en grande partie les modèles physiques existants des microréseaux, produisant, consommant ou stockant de l'énergie. Ces composants échangent de l'énergie, régulée à l'aide d'un système de gestion.

L'objet de la réification de la stratégie de gestion est modélisé par le second concept que nous proposons : l'opérateur de couplage.

5.2.3 Conceptualisation et formalisation de l'opérateur de couplage

Les différents éléments du réseaux produisent et consomment de l'énergie par intermittence. En conséquence, les échanges d'énergie deviennent difficilement prévisibles et mettent en péril l'équilibre du réseau. L'automatisation de la gestion en temps réel devient donc essentielle.

Cette automatisation se fait dans une structure adaptée, appelée système de gestion, qui centralise les données concernant le taux d'utilisation des sources d'énergie, la demande instantanée en énergie, l'état du système de distribution, le coût de production de chaque source d'énergie et les données

météorologiques. Le système de gestion détermine en temps réel, à l'aide des données reçues, les priorités d'utilisation et la répartition de la ressource commune. Ce système de gestion peut également fournir à court terme des prévisions sur la consommation et la production pour aider à plus grande échelle les fournisseurs d'énergie et les gestionnaires de réseau.

Nous définissons **l'opérateur de couplage** le modèle qui représente ce système de gestion. Nous en donnons les principaux objectifs :

- Collecter les données relatives de production, de consommation et d'état de charge des systèmes de stockage.
- Gérer en maintenant l'équilibre entre l'offre et la demande les échanges d'énergie qui ont lieu au sein du réseau.
- Transmettre les consignes d'ajustement aux différents composants, sous la forme d'une valeur de puissance.
- Conserver les données de gestion comme les décisions prises pour réguler le système (quel composant doit être déconnecté par exemple).

L'opérateur de couplage se base sur un comportement événementiel, et réagit à des événements selon le comportement suivant :

Réception d'événements : L'opérateur de couplage collecte les informations provenant des composants informationnels du réseau. Cela correspond au couple [Puissance, valeurs d'ajustement acceptables]. La réaction, qui engendre généralement une rupture de l'équilibre informationnel, est d'établir une nouvelle répartition des échanges d'énergie selon la stratégie implémentée.

Génération d'événements : Le calcul de la régulation des échanges provoque un événement à destination des composants informationnels. L'opérateur de couplage transmet la valeur d'ajustement aux composants couplés afin de réguler le réseau. Cela se traduit par une valeur d'ajustement parmi celles acceptables pour chaque composant.

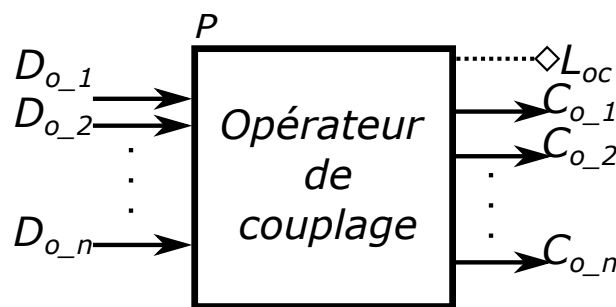


FIGURE 5.3 – Opérateur de couplage.

De même que pour le composant informationnel, le comportement du modèle qui représente le système de gestion spécifie son interface. Nous notons O_c la structure de son interface. Celle-ci est spécifiée de la façon suivante :

$$O_c = (D_o, C_o, L_{oc})$$

Entrée :

- $D_o = [P_o \times P_p]^n$: Ensemble des couples [puissance, degré de liberté] des $n \in \mathbb{N}$ composants informationnels couplés où $P_o \in \mathbb{R}$ et $P_p \in \mathbb{R}^N$

Sortie :

- $C_o \in \mathbb{R}^n$: Ensemble des consignes envoyées aux n composants. Chacune des consignes représente une valeur de puissance. Une valeur de puissance nulle correspond à la déconnexion du composant. Une valeur négative modélise une consommation et une valeur positive une production d'énergie.

Éléments d'observation :

- L_{oc} : Ensemble d'événements observables. Comme pour le composant informationnel, ce port d'observation fournit des données diagnostiques comme les décisions prises pour la régulation ou enregistre les informations de changements d'état provenant des composants informationnels.

Paramètres :

- $P : D_o \rightarrow C_o$: La stratégie de gestion. L'opérateur de couplage calcule une répartition des flux en fonction d'objectifs, modélisés par la stratégie, décidés en amont de la simulation. Cela peut-être la minimisation des coûts de production, favoriser le stockage en produisant le plus possible... Par exemple la stratégie peut choisir, sous la forme d'une équation d'optimisation, de maximiser le stockage d'énergie.

Par l'opérateur de couplage, nous modélisons le système de gestion des microréseaux. Ses ports de sorties et d'entrées sont inversés par rapport au composant informationnel. Il réagit à une rupture d'équilibre informationnelle en déterminant un nouvel état d'équilibre, et en envoyant des consignes de régulation aux composants.

Notre objectif est maintenant de réaliser le couplage des différents modèles proposés pour construire un multi-modèle cohérent, dans une démarche modulaire et itérative de co-simulation.

5.3 Couplage de composants

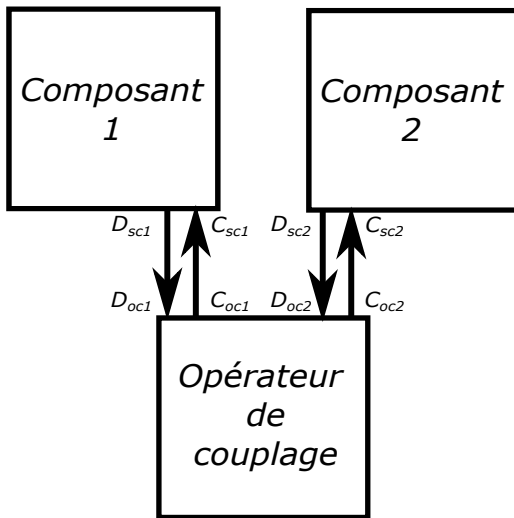
Nous avons défini deux composants représentant les éléments du système. Notre objectif suivant est de pouvoir construire des modèles couplés co-simulables.

5.3.1 Modèle couplé

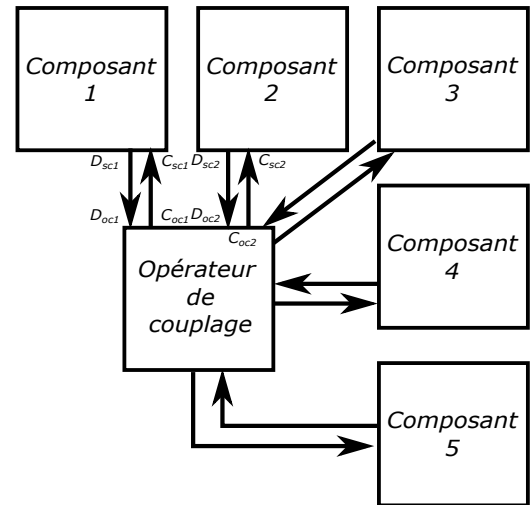
La définition des couplages du multi-modèle est donnée par l'interface et le comportement des composants informationnels et de l'opérateur de couplage. Ils communiquent de manière bi-directionnelle de la façon suivante :

- Les informations des puissances et des degrés de liberté des composants sont transmises à l'opérateur de couplage.
- Les consignes vont de l'opérateur de couplage vers les composants associés.

La définition de l'opérateur de couplage permet de coupler autant de composants informationnels que l'exige l'étude par co-simulation. Illustré figures 5.4, l'ajout ou le retrait d'un ou plusieurs composants se fait par l'intermédiaire de l'opérateur de couplage. La dynamique de résolution du



(a) Multi-modèle avec deux composants informationnels régulés.



(b) Cinq composants informationnels.

FIGURE 5.4 – Multi-modèle avec cinq composants informationnels régulés

multi-modèle, c'est-à-dire la façon dont les échanges d'informations se déroulent, va ensuite nous permettre de rendre le multi-modèle co-simulable.

5.3.2 Résolution du problème d'équilibrage lors d'une simulation

Dans cette partie, nous définissons les éléments nécessaires à la réalisation d'une expérience, matérialisée par l'exécution d'une simulation : initialisation du système, déterminer le comportement relatif au multi-modèle dans son ensemble et enfin déterminer la condition de fin de simulation. La figure 5.5 illustre la dynamique de simulation pour un modèle couplé de réseau énergétique.

Initialisation du système : Nous supposons que le système part d'un état d'équilibre. À l'initialisation, les composants informationnels couplés transmettent à l'opérateur de couplage leurs valeurs d'ajustement acceptables respectives.

Comportement du multi-modèle : L'évolution des variables d'état d'un composant informationnel provoque la génération d'un événement à destination de l'opérateur de couplage. À la réception de l'information, l'opérateur de couplage est chargé de déterminer le défaut de balance énergétique s'il y a lieu et de calculer une nouvelle répartition de l'énergie permettant le retour à une situation d'équilibre informationnel du réseau. Une fois la nouvelle répartition déterminée, l'opérateur de couplage envoie aux composants les valeurs de consignes adéquates. Nous modélisons le temps de calcul de la nouvelle répartition par une valeur à spécifier qui représente le temps de procéder à la recherche de solution du problème d'équilibrage. Cette valeur va se répercuter dans l'ensemble de la co-simulation.

Fin de l'expérience : Deux solutions sont possibles :

- Le scénario de simulation ne possède plus de changement d'état
- La simulation a atteint le temps de fin de simulation paramétré par l'utilisateur

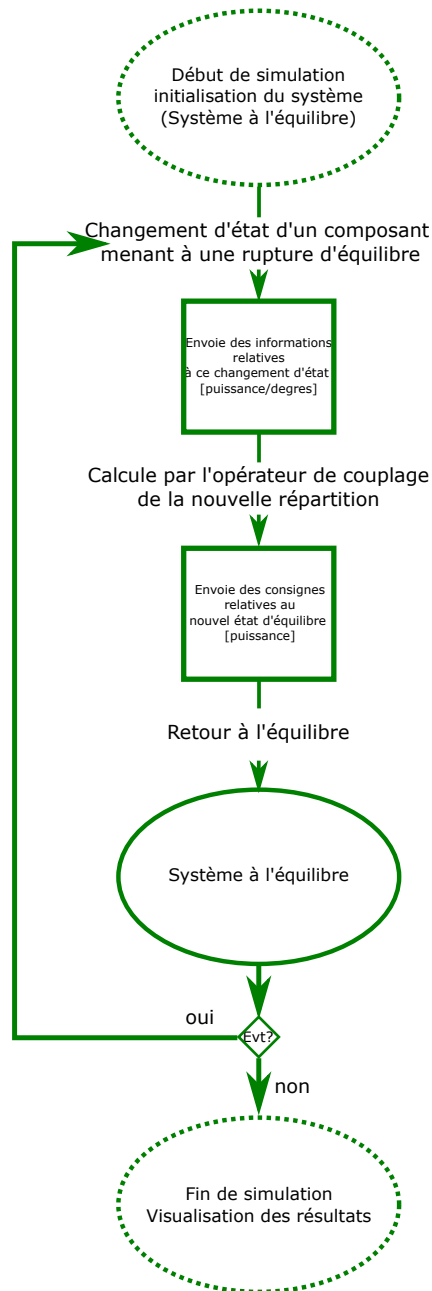


FIGURE 5.5 – Résolution du problème de l'équilibrage d'énergie dans une co-simulation.

À l'aide de ce couplage, nous pouvons modéliser un système avec autant de composants que nous le souhaitons. Le retrait, l'ajout ou la modification de composants se fait simplement avec l'opérateur de couplage. Cependant cela ne nous permet pas de représenter le réseau à différentes échelles, pouvant par exemple représenter une maison intégrée à un éco-quartier dans le cadre de l'auto-consommation d'énergie, dans une même co-simulation. Pour cela nous allons nous intéresser à la notion de fermeture par couplage, définie par le formalisme DEVS, dont les propriétés se retrouvent aux niveaux formel et logiciel dans MECASYCO.

5.4 Hiérarchisation de la démarche pour le passage à l'échelle

Notre objectif est de réutiliser dans MECASYCO des modèles couplés au sein d'un autre multi-modèle de réseau. Cela se traduit par l'extension de la propriété de fermeture par couplage, présente au niveau formel et logiciel dans MECASYCO, à la couche conceptuelle. Nous rappelons les propriétés de la fermeture par couplage :

- La spécification de la structure d'un modèle couplé est équivalente à celle d'un modèle atomique.
- L'utilisation d'un modèle couplé comme un modèle atomique, permettant la construction hiérarchique de multi-modèle.
- Il existe un équivalent atomique d'un modèle couplé. Le comportement dynamique du modèle atomique est identique à celui du modèle couplé.

Au niveau conceptuel, cela se traduit par le fait qu'un modèle couplé doit se comporter comme un composant informationnel, défini comme le modèle atomique du réseau. La difficulté réside dans la définition sémantique du modèle couplé. Il s'agit en définitif de montrer qu'un multi-modèle agit sur son interface comme un composant informationnel. Conceptuellement, nous définissons un modèle couplé comme un niveau de représentation du réseau. Un modèle couplé représente par exemple une habitation dans laquelle chaque composant modélise un objet consommant ou produisant de l'énergie (machine à laver, micro-onde, télévision, panneau solaire...), un immeuble, un éco-quartier, selon le niveau d'étude souhaité.

Nous proposons de fournir à l'opérateur de couplage les fonctionnalités permettant de vérifier la propriété de fermeture de couplage au niveau conceptuel. Cela se résume ainsi :

- Déterminer les degrés d'ajustement possibles.
- Transmettre les informations des puissances consommables ou générables et les degrés d'ajustement possibles par l'ensemble du système à un instant donné.
- Réceptionner et appliquer les consignes de régulation provenant d'un système de gestion de niveau supérieur.
- Fournir des données de diagnostics comme la réception de consigne.

Pour remplir ces objectifs, nous ajoutons à notre opérateur de couplage les éléments suivants, illustrés figure 5.6 :

- Une sortie $D \in \mathbb{R}^N$ correspondant au couple [Puissance, valeurs d'ajustement acceptables]. La puissance correspond au delta de puissance entre celle consommable et celle pouvant être générée sur le micro-réseau. Les valeurs d'ajustement acceptables sont calculées à partir d'une fonction $f : D_o \rightarrow D$ qui permet de déterminer, à partir des degrés de liberté des composants informationnels couplés, les valeurs d'ajustement du micro-réseau dans son ensemble.
- Une entrée $C \in \mathbb{R}$ qui caractérise la valeur de régulation à atteindre. Pour le niveau de réseau le plus haut, cette valeur est nulle, pour atteindre l'équilibre énergétique du système global.

Notons que pour chaque composant couplé, le port d'observation des événements peut être visualisé séparément. Son comportement, discret, est spécifié par la génération et la réception d'événements.

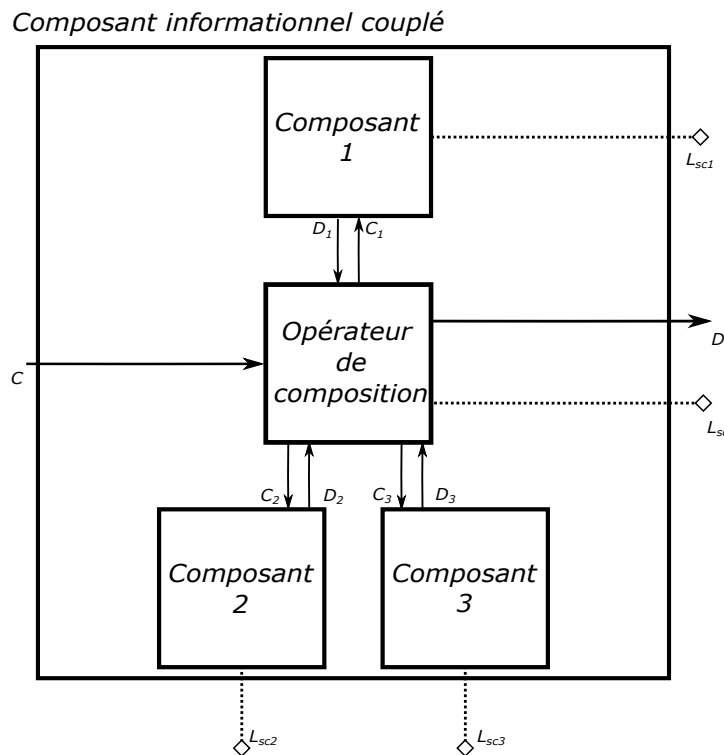


FIGURE 5.6 – Interface modèle couplé.

Réception d'événements : L'opérateur réceptionne la consigne de régulation. La régulation à son niveau se fait à partir de cette nouvelle valeur.

Génération d'événements : Tout changement d'état vis-à-vis de la balance énergétique du système génère un événement à destination du système de gestion de niveau supérieur. La stratégie, décidée lors de la modélisation du système, détermine alors la priorité de résolution du problème d'équilibrage : locale ou globale.

Pour représenter dans une même architecture de modélisation différentes échelles d'un réseau, nous utilisons l'opérateur de couplage comme *opérateur de composition*, illustré figure 5.7, en fournissant les informations nécessaires pour une gestion à un niveau supérieur de réseau. Le cas échéant, il reçoit échéant des consignes de régulation qui seront intégrées à la stratégie de gestion, et répercutées ensuite aux composants de son niveau. L'opérateur de couplage agit en fait comme un nœud dans lequel sont répartis divers éléments situés au même niveau de représentation du réseau. Pour chaque multi-modèle, l'opérateur de couplage de plus haut niveau correspond au sommet.

5.5 Conclusion

La principale contribution de cette thèse est donnée dans ce chapitre. Elle repose sur une vision informationnelle du réseau et le décompose comme un ensemble de composants échangeant des informations.

Nous définissons conceptuellement et formellement le composant informationnel et l'opérateur de couplage. Le premier intègre les éléments physiques sous leur angle informationnel : ils fournissent

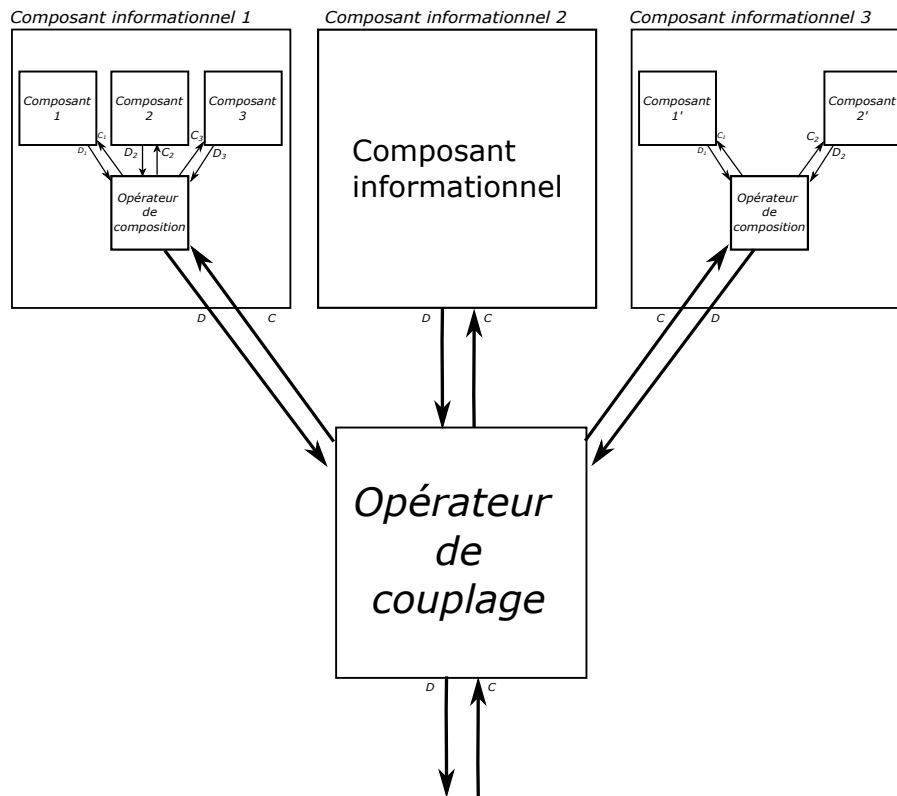


FIGURE 5.7 – Hiérarchisation de modèles couplés.

les données essentielles concernant l'évolution des valeurs d'état et appliquent sur la partie physique les consignes données par le second, qui modélise le système de gestion du réseau. L'opérateur de couplage, en outre, autorise la construction hiérarchique de modèles, en agissant comme un nœud du réseau. Il transmet les informations utiles à la gestion d'un réseau de plus grande envergure.

Cette distinction laisse la possibilité de développer séparément les modèles physiques d'un côté et le système de gestion de l'autre, relativement aux contraintes liées à l'objectif d'étude. Leur intégration dans un multi-modèle co-simulable est garanti par la définition formelle des interfaces respectives, basées sur le formalisme DEVS, élément clef de l'intergiciel MECSYCO. La cohérence du multi-modèle, lors de l'étape de couplage des modèles est également déterminée par la définition formelle.

Dans la suite, nous proposons de mettre en œuvre ces contributions, dans différents scénarios illustrant l'intégration et la gestion de plusieurs éléments spécifiques aux microréseaux.

EXPÉRIMENTATIONS ET ILLUSTRATION DE LA DÉMARCHE PROPOSÉE

Sommaire

6.1	Introduction	58
6.2	Contexte	58
6.2.1	Système cible	58
6.2.2	Liste de modèles	59
6.3	Des composants physiques vers des composants informationnels	62
6.3.1	Modèles physiques simples	62
6.3.2	Modèle thermique d'une pièce	62
6.4	Preuve de concept pour la construction de modèles de micro-réseaux	63
6.4.1	Objectifs et scénario	63
6.4.2	Expérimentations	66
6.4.3	Bilans et commentaires	66
6.5	Preuve de concepts pour l'itérativité et la modularité	68
6.5.1	Objectifs et scénario	68
6.5.2	Expérimentations	70
6.5.3	Bilans et commentaires	72
6.6	Preuve de concepts pour la construction hiérarchique de micro-réseaux	74
6.6.1	Objectifs et scénario	74
6.6.2	Expérimentations	75
6.6.3	Bilans et commentaires	76
6.7	Discussions	77
6.7.1	Modèles physiques et stratégie de gestion	77
6.7.2	Visualisation des résultats	78
6.8	Conclusion	78

Ce chapitre illustre l'approche proposée dans le chapitre précédent. Nous appliquons le principe de notre démarche en commençant par montrer comment, à partir de modèles physiques existants, il est possible de passer à une représentation informationnelle décrivant l'état du modèle physique. Par la suite, en nous appuyant sur trois preuves de concepts, nous montrons la capacité de notre approche à décrire et simuler un multi-modèle dans le cadre rigoureux de la démarche de M&S des micro-réseaux.

6.1 Introduction

Dans ce chapitre, notre objectif est de démontrer, à travers un ensemble d'expériences réalisées à l'aide de l'intergiciel MECSYCO, que l'approche s'inscrit dans une démarche itérative et modulaire de co-simulation, gérant des hétérogénéités de concepts, de formalismes et de logiciels et autorisant la construction hiérarchique de modèles.

Le chapitre est organisé de façon à reprendre les étapes essentielles de la démarche. Nous commençons par donner le contexte. Nous présentons notamment le système cible et les différents modèles que nous allons utiliser. Nous nous appliquons ensuite à obtenir une représentation informationnelle des modèles représentant des composants physiques. Cette étape est essentielle pour l'intégration des modèles dans notre démarche. Une fois le changement de représentation effectué, nous passons à une première preuve de concept qui permet de montrer comment s'instancie la démarche sur des modèles hétérogènes tant par les concepts que par les formalismes et les logiciels utilisés. Par itération, nous complexifions le micro-réseau créé par l'ajout de composants ou par la modification de la stratégie de gestion. Enfin la dernière preuve de concept illustre le caractère hiérarchique de la démarche.

6.2 Contexte

Nous reprenons l'exemple du chapitre 4 dont l'objectif est de dimensionner le système pour rendre notre maison autonome en énergie par l'ajout de modèles de sources ou de systèmes de stockage. L'intergiciel MECSYCO, manquant d'outils spécifiques au domaine des micro-réseaux, a montré ses limites dans le cadre d'une démarche de co-simulation pour les micro-réseaux.

Dans notre cas, il s'agit, en l'appliquant sur l'exemple, de démontrer que notre démarche étend au niveau conceptuel les propriétés de modularité et de construction hiérarchique possédées aux niveaux formel et logiciel par MECSYCO.

6.2.1 Système cible

Le point de départ est le multi-modèle thermique d'une habitation, rappelé en figure 6.1, constitué du modèle thermique du bâtiment et du modèle du contrôleur de climatiseur. Le multi-modèle calcule la puissance nécessaire pour climatiser la pièce de l'habitation en fonction de la météo. La sortie de ce modèle est la puissance nécessaire au fonctionnement du climatiseur pour réguler la température de la pièce. Le modèle thermique de l'habitation possède deux entrées. La première est la puissance

de fonctionnement réelle injectée pour faire fonctionner le climatiseur et ainsi refroidir la pièce. La deuxième est la température extérieure, qui influence la température intérieure de l'habitation.

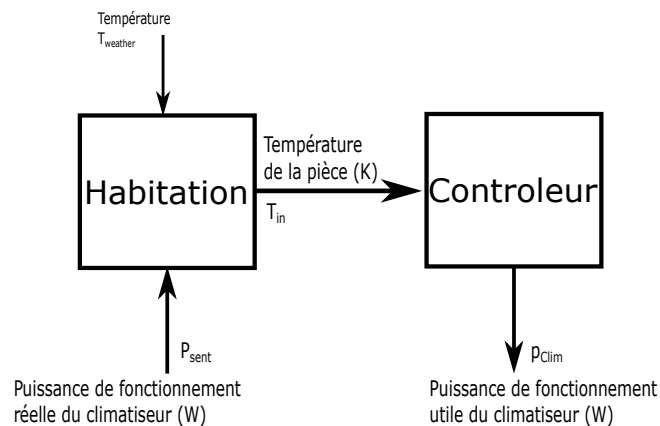


FIGURE 6.1 – Modèle thermique d'un bâtiment.

Les objectifs par rapport à ce multi-modèle restent les mêmes que ceux du chapitre 4 :

- Rendre l'habitation autonome en énergie en ajoutant dans le système des modèles de sources de production renouvelables ou des modèles de systèmes de stockage.
- Équilibrer le réseau : l'énergie produite doit être égale à l'énergie soutirée.

Pour modéliser ces composants, nous nous servons des modèles développés et fournis dans le cadre de notre travail avec le projet ULHyS⁹. Nous en présentons ici les interfaces avec les entrées, sorties et les paramètres et donnons en quelques mots le comportement de chaque modèle.

6.2.2 Liste de modèles

Les modèles développés peuvent se distinguer en plusieurs catégories, selon leur rôle dans le système. Il peut s'agir de données météorologiques, des sources de production ou des systèmes de stockage.

Modèles météo :

Base SQL : Elle contient des relevés météorologiques arrondies situés à Vandœuvre concernant la période de Juillet-Août 2018. Ces relevés sont fournis par l'APHEEN¹⁰ (Association Pour l'Hébergement des Étudiants et Enseignants de Nancy) dans le cadre d'un projet concernant le confort thermique de leurs logements. Ce modèle nous donne en sortie, à intervalle de temps régulier, des données de températures (K), d'ensoleillement (radiance solaire) ainsi que la vitesse du vent (m/s).

Modèles de sources :

9. <https://hal.univ-lorraine.fr/IMPACT-ULHYS/>

10. <https://www.apheen.fr/>

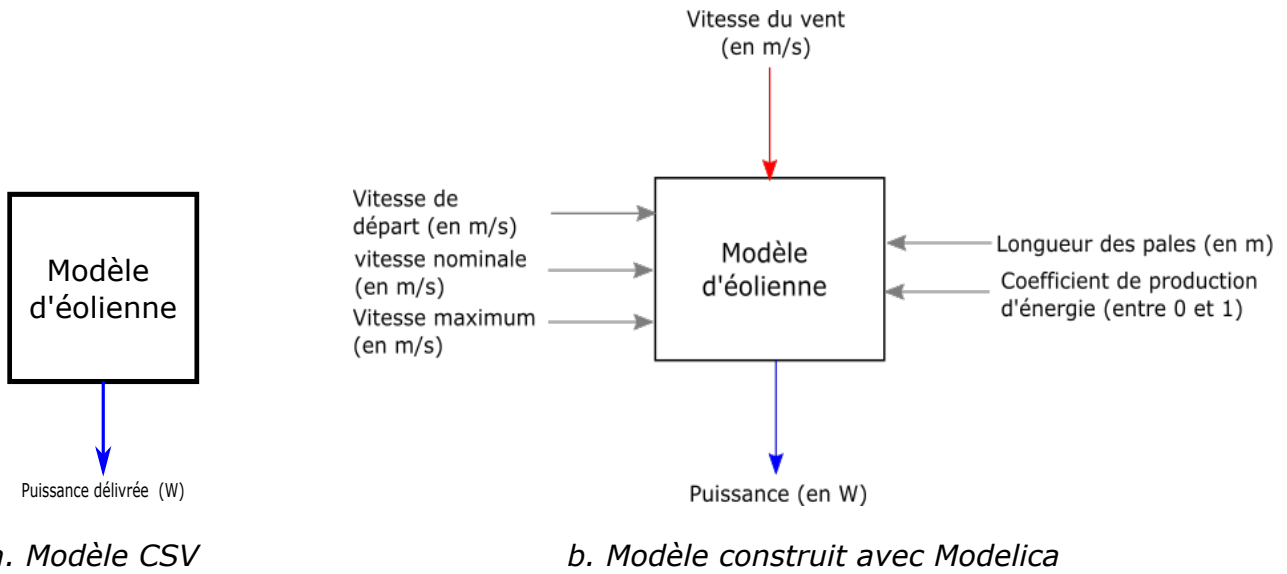


FIGURE 6.2 – Modèles de sources de production.

Éoliens : Ces modèles sont illustrés figure 6.2.

- Les premiers sont des modèles CSV, dont l’interface donne en sortie la puissance générable par l’éolienne. Il s’agit d’une base de données CSV donnant à intervalle régulier la production de l’éolienne.
- Le second modèle est un modèle continu construit avec l’outil Modelica [Fritzon and Engelson, 1998], puis généré sous forme de FMU. Il prend en entrée la vitesse du vent, et donne la puissance générable en W en sortie. Ses paramètres prennent en compte la longueur des pâles et la vitesse nominale de fonctionnement.

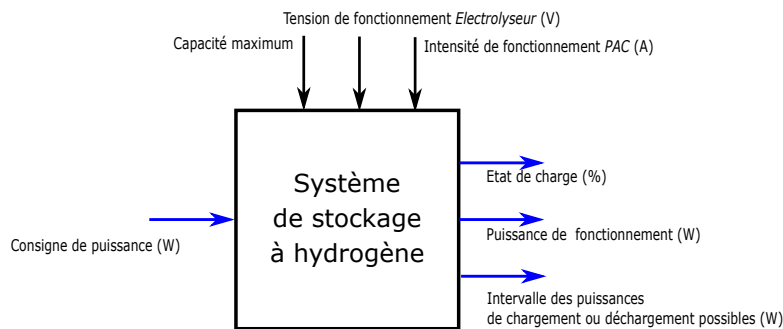


FIGURE 6.3 – Modèle de système de stockage.

Modèle de systèmes de stockage :

Système de stockage : Ce modèle continu développé en java représente un système de stockage. Il prend en entrée la consigne de fonctionnement sous la forme d’une puissance positive pour fournir de l’énergie (décharge) ou négative pour stocker (charge). Il donne en sortie son état de charge (%), la puissance de fonctionnement (W) qui représente son mode courant (charge

ou décharge). La dernière sortie représente les valeurs de puissance pouvant être prise par le système de stockage selon s'il stocke ou fournit de l'énergie.

L'interface, figure 6.3, permet d'utiliser à priori n'importe quelle technologie de système de stockage existante (comme par exemple le système de stockage à hydrogène par électrolyse).

TABLE 6.1 – Résumé des modèles.

N°	Modèle	Gestion temporelle	Entrées	Sorties	Logiciels
1	Modèle de consommation base de données	Événementiel	∅	Retourne la puissance consommable par une habitation en W à un instant donné	CSV
2	Modèle thermique couplé Équationnel	Continu	Reçoit une température extérieure en °C et une puissance pour le fonctionnement du climatiseur en W	Retourne la puissance utilisable par le climatiseur en W	FMU Java ad-hoc
3	Modèle de production éolien base de données	Événementiel	∅	Retourne la puissance pouvant être produite par l'éolienne en W à un instant donné	CSV
4	Modèle de production éolien	Continu	Reçoit la vitesse du vent	Retourne la puissance de production possible par l'éolienne en W	FMU
5	Modèle de système de stockage à hydrogène Equationnel	Continu	Reçoit une consigne de puissance en W	Retourne l'état de charge en % et le mode de fonctionnement (valeurs en W) et les valeurs possibles de puissance (W)	Java ad-hoc

Nous rassemblons dans le tableau 6.1 l'ensemble des modèles que nous utiliserons pour illustrer

notre démarche. Il permet de mettre en lumière les hétérogénéités conceptuelles (rôle des composants entre producteur, consommateur, ou système de stockage), formelles (modèles événementiel ou continu) et logicielles (FMU, ad-hoc ou encore CSV).

6.3 Des composants physiques vers des composants informationnels

Les modèles physiques précédents ne peuvent donner que la puissance pouvant être consommée ou produite au maximum et n'ont pas de degrés de liberté hormis la déconnexion physique. Ils ne s'intègrent pas directement à la démarche proposée, qui est centrée sur une vision informationnelle du système et qui utilise les degrés de liberté du composant pour déterminer la répartition de l'énergie.

Notre objectif est donc de passer d'une représentation physique à une représentation informationnelle permettant de donner l'information sur la puissance de sortie et les degrés de liberté du composant.

L'idée est d'ajouter une composante informationnelle à notre élément physique permettant de donner les renseignements utiles à la gestion du système. Nous illustrons d'abord ce processus sur deux composants physiques simples puis sur le multi-modèle couplé de la maison.

6.3.1 Modèles physiques simples

Nous utilisons deux modèles physiques qui représentent respectivement une charge et une source de production dont l'unique sortie est la puissance physique consommée ou produite. Le comportement de ces modèles donne en sortie la puissance consommée ou produite soit de façon régulière lorsque le modèle est continu, soit événementielle lorsque le modèle est discret.

Pour changer de représentation, de physique vers informationnelle, le principe de base est d'adjoindre un modèle informationnel au modèle physique. L'interface du modèle informationnel exige les éléments suivants :

Entrées : Recevoir l'information sur la puissance mesurée sur le modèle physique.

Sorties : Donner le couple [Puissance ; Degrés de liberté] nécessaire au système de gestion des échanges d'énergie. Dans le cadre d'un composant physique, les seuls degrés de liberté possibles sont la puissance de fonctionnement et la déconnexion du composant physique. Les degrés de liberté sont donc représentés par un couple [*Valeur de puissance du composant, Valeur nulle*] où la valeur nulle modélise la déconnexion du composant.

Illustré figure 6.4, le modèle physique est couplé au modèle informationnel où la puissance physique est donnée au modèle informationnel.

6.3.2 Modèle thermique d'une pièce

Pour la deuxième illustration, nous prenons notre exemple de l'habitation où la puissance physique est donnée par le contrôleur.

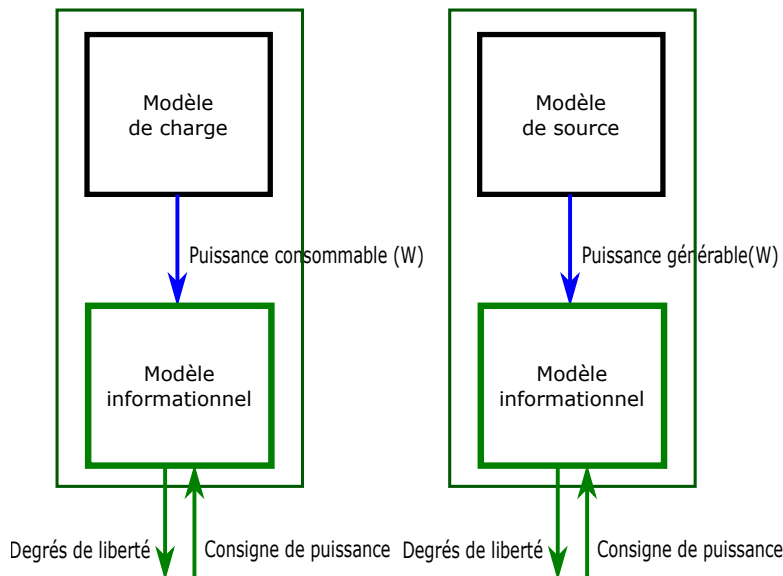


FIGURE 6.4 – Modèles couplés de composants informationnels.

Le comportement du multi-modèle de la maison donne en sortie la puissance nécessaire pour le fonctionnement du climatiseur et utilise en entrée la puissance reçue pour refroidir la pièce de la maison. Le multi-modèle calcule de façon continue la puissance nécessaire pour réguler la température intérieure de la maison en fonction de la température extérieure.

Nous reprenons et étendons le principe précédent. Le modèle informationnel qui est couplé reçoit en entrée la puissance prévisionnelle et donne en sortie le couple [*Valeur de puissance du composant, Valeur nulle*] représentant les degrés de liberté. Une valeur nulle modélise la déconnexion physique du composant. Le modèle informationnel réagit aux consignes reçues. Son comportement est, en plus du précédent, de donner au modèle thermique la puissance reçue pour réguler la température de la pièce, dans le cas ici, soit la puissance demandée soit zéro.

Illustré figure 6.5, le couplage entre le modèle physique et le modèle informationnel est donné par l'échange des données physiques du multi-modèle de l'habitation.

En changeant de représentation (physique vers informationnel), nous intégrons à notre démarche la plupart des modèles physiques capables de fournir une puissance en sortie. La suite de la démarche consiste à coupler nos composants informationnels à un opérateur de couplage pour la construction de micro-réseaux et la gestion de leurs échanges d'énergie.

6.4 Preuve de concept pour la construction de modèles de micro-réseaux

6.4.1 Objectifs et scénario

Pour ce premier exemple, notre premier objectif est de vérifier que les hétérogénéités sont gérées à plusieurs niveaux :

- Conceptuel : nous souhaitons représenter divers composants, consommant ou produisant de

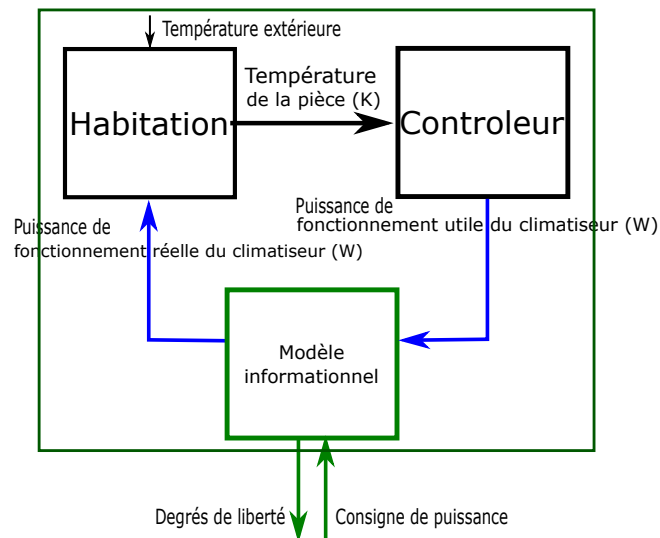


FIGURE 6.5 – Modèle thermique couplé informationnel.

l'énergie qui échangent de l'énergie, et dont les échanges sont régulés et équilibrés, c'est-à-dire que l'énergie consommée est équivalente à l'énergie produite.

- Formel et logiciel : nous souhaitons utiliser plusieurs formalismes pour nos composants et plusieurs logiciels, adaptés aux formalismes que nous utilisons. Ce niveau de gestion est à priori géré par l'intergiciel. Notre objectif est donc de vérifier que ces propriétés sont toujours garanties.

Pour la première illustration, nous utilisons le modèle thermique de l'habitation et un modèle de source de production CSV (modèles 1 et 3 de 6.1) sous leur forme informationnelle, données dans la section précédente. Pour ce cas simple, nous utilisons à la fois des modèles continu et événementiel, avec des modèles FMU et CSV.

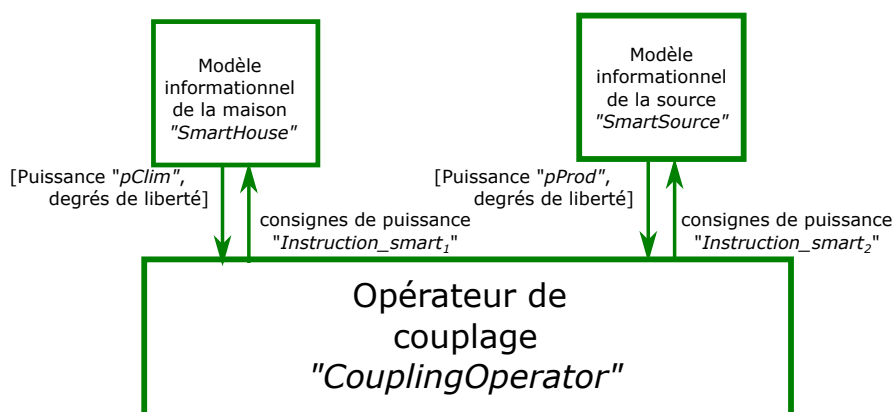


FIGURE 6.6 – Multi-modèle d'une habitation et d'une source de production.

La figure 6.6 donne la représentation du multi-modèle correspondant où chacun des composants informationnels est couplé de manière bi-directionnelle à l'opérateur de couplage (informations sur

la puissance et des degrés de liberté et la valeur de puissance).

Ce premier multi-modèle doit permettre de vérifier les éléments suivants :

- Les informations (*couple [Puissance ; Degrés de liberté] et consigne de régulation*) sont bien échangées entre les différents modèles.
- L'énergie est régulée par l'opérateur de couplage selon une stratégie donnée.

La stratégie choisie pour ce scénario, simple, est de fournir l'énergie lorsque celle-ci est disponible, et de déconnecter tous les composants lorsqu'elle ne l'est pas.

```

multimodel maisonAutonome_v1
2 submodels
3   name SmartHouse path "Library/Multimodel/ThermicHouse.xml"
4   name SmartSource path "Library/ Multimodel/SmartWindTurbine.xml"
5   name CouplingOperator path "Library/Basic/CouplingModule.xml"
6
7 interface
8   parameters
9     nbInput:2 refers to (CouplingOperator : "nbInput")
10  out put s
11    // Modele physique de la maison
12    T_inside : Double refers to (SmartHouse:"T1")
13    T_outside:Double refers to (SmartHouse:"temp")
14    pClim: Double to (SmartHouse:"Pow1_clim")
15
16    //Modele physique de l'eolienne
17    pProd: Double refers to (SmartSource:"prodEolien")
18
19    // Modele informationnel de la maison
20    powerAdjustment_load:Vector<Double> refers to (SmartHouse:"powerAdjustment")
21    listOutputEvent : String refers to (SmartHouse:"listOutputEvent")
22
23    // Modele informationnel de l'eolienne
24    powerAdjustment_source: Vector<Double> refers to (SmartSource:"powerdjustment")
25    listOutputEvent_source: String refers to (SmartSource:"listOutputEvent")
26
27    // Operateur de couplage
28    powerAdjustment_SmartComponent_1_out:
29      Double refers to (CouplingOperator:"powerAdjustment_SmartComponent_1_out")
30    powerAdjustment_SmartComponent_2_out :
31      Double refers to (CouplingOperator:"powerAdjustment_SmartComponent_2_out")
32    listOutputEvent_couplingModule:
33      String refers to (CouplingOperator: "listOutputEvent")
34
35 internal couplings
36 {SmartHouse."powerAdjustment" -> CouplingOperator."powerAdjustment_SmartComponent_1"}
37 {CouplingOperator."powerAdjustment_SmartComponent_1_out" -> SmartHouse."Pow1"}
38
39 {SmartSource."powerAdjustment" -> CouplingOperator."powerAdjustment_SmartComponent_2"}
40 {CouplingOperator."powerAdjustment_SmartComponent_2_out" -> SmartSource."powerInstruction"}
41
42 simulator
43 simulation variables
44 stopTime:169200. refers to (SmartHouse:"stopTime") (CouplingOperator:"stopTime")
45                               (SmartSource:"stopTime")
46 timeStep:120. refers to (SmartHouse:"timeStep")

```

Identification du modèle

Appel des sous-modèles :
identification et
chemin d'accès

description de l'interface du modèle :
les paramètres et les sorties du
multi-modèle ou des sous-modèles
qui le composent nécessaire pour
la visualisation

**Couplage interne
des modèles**

Variables de simulation

FIGURE 6.7 – Multi-modèle d'une habitation et d'une source de production.

La description du multi-modèle informationnel, réalisée avec le langage dédié de MECSYCO, est détaillée sur la figure 6.7. Celle-ci donne les éléments essentiels à sa co-simulation.

Identification du multi-modèle : nous donnons un nom au multi-modèle qui permet son identification.

Description des sous-modèles : nous décrivons ensuite les sous-modèles qui sont impliqués.

Description des interfaces : l'interface est décrite ensuite avec les paramètres des sous-modèles et leurs sorties. Dans les paramètres, nous avons choisi des températures de confort arbitraires pour la pièce de la maison, comprise entre 24°C et 22°C. Le climatiseur s'active si l'énergie est disponible et si la température est au-dessus de la température définie (24°C) et tant qu'elle n'est pas descendue à la température minimale (22°C). Les sorties sont mentionnées ici afin de les visualiser lors du lancement de la co-simulation.

Description des couplages internes : le couplage interne des modèles est donné dans la partie suivante.

Description des variables de simulation : nous donnons les variables de simulation comme les pas de temps associés au sous-modèle si nécessaire ou le temps de fin de simulation.

6.4.2 Expérimentations

Les figure 6.8 et 6.9 présentent les résultats de la simulation.

Graphes figure 6.8 : Ces trois courbes montrent le comportement de nos composants. De haut en bas, nous avons les puissances consommables ou pouvant être produites par les éléments physiques (*puissances nominales de fonctionnement*), puis la réponse de l'opérateur de couplage à travers les consignes envoyées pour la régulation des échanges et enfin l'évolution des températures intérieure et extérieure de l'habitation.

Instanciation de la stratégie de gestion figure 6.9 : Le deuxième élément de visualisation nous donne la liste des événements enregistrés par l'opérateur de couplage. Cette liste exprime l'instanciation de l'opérateur de couplage. L'opérateur de couplage reçoit à chaque variation de puissance un événement lui permettant de calculer la balance théorique entre la puissance produite et la puissance consommée. Après calcul de la répartition, nous avons la nouvelle valeur d'équilibre du réseau et les consignes envoyées à chacun des composants, parmi les degrés de liberté de chacun des éléments couplés.

La visualisation en parallèle de ces résultats nous permet de visualiser les échanges d'informations et la réponse donnée aux différentes ruptures d'équilibres. Pour ce cas, la déconnexion des composants est la seule option possible lorsque l'énergie est en surplus ou en déficit. En réaction, la température intérieure est régulée ou non selon la réception de l'énergie.

6.4.3 Bilans et commentaires

Nous avons montré avec cet exemple la validité de la démarche avec deux composants couplés à l'opérateur de couplage. Les informations échangées et les comportements associés permettent la régulation des échanges d'énergie. De plus, cet exemple permet de rassembler toutes les hétérogénéités gérées par MECSYCO (logicielle, formelle) et ajoute des représentations différentes (sources, charges, stratégie, aspect physique et informationnel du réseau).

6.4. Preuve de concept pour la construction de modèles de micro-réseaux

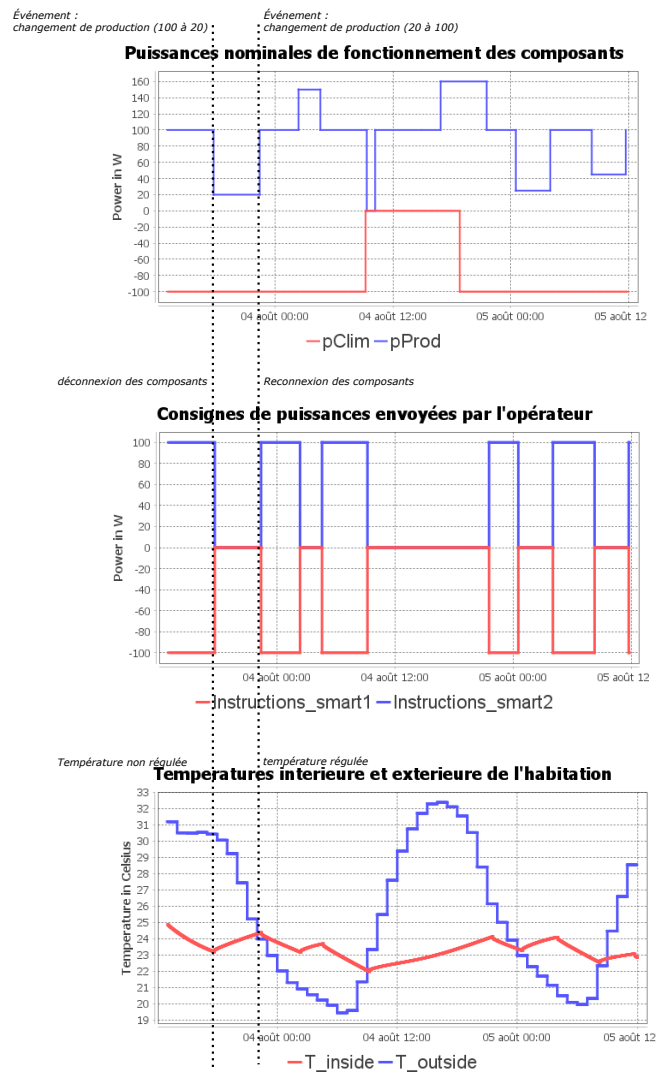


FIGURE 6.8 – Évolutions des valeurs physiques (puissances physiques consommables ou générables et températures) et consignes envoyées au cours du temps.

Cette première itération nous permet de montrer qu'à l'aide de la démarche, nous pouvons intégrer des hétérogénéités spécifiques aux domaines des micro-réseaux, que ce soit des modèles physiques existants ou des logiciels.

Dans la suite, nous montrons que la démarche s'inscrit dans une approche itérative et modulaire de modélisation et de simulation en ajoutant, modifiant ou retirant simplement des composants au multi-modèle.

```
0.30000000000000004;
0 :
1 : null
2 : null

50.30000000000000004;
0 : [INTERNAL EVENT] before taking decision network balance mesured : 0.0
1 : [INTERNAL EVENT] After taking decision network balance mesured : 0.0
2 : Instructions envoyées :
powerAdjustment_SmartComponent_1_out : -100.0
powerAdjustment_SmartComponent_2_out : 100.0

125.3;
0 : [INTERNAL EVENT] before taking decision network balance mesured : -80.0
1 : [INTERNAL EVENT] After taking decision network balance mesured : 0.0
2 : Instructions envoyées :
powerAdjustment_SmartComponent_1_out : 0.0
powerAdjustment_SmartComponent_2_out : 0.0

180.29999999999998;
0 : [INTERNAL EVENT] before taking decision network balance mesured : 0.0
1 : [INTERNAL EVENT] After taking decision network balance mesured : 0.0
2 : Instructions envoyées :
powerAdjustment_SmartComponent_1_out : -100.0
powerAdjustment_SmartComponent_2_out : 100.0

400.3;
0 : [INTERNAL EVENT] before taking decision network balance mesured : -30.0
1 : [INTERNAL EVENT] After taking decision network balance mesured : 0.0
2 : Instructions envoyées :
powerAdjustment_SmartComponent_1_out : 0.0
powerAdjustment_SmartComponent_2_out : 0.0
```

FIGURE 6.9 – Instanciation de la stratégie de l’opérateur de couplage.

6.5 Preuve de concepts pour l’itérativité et la modularité

6.5.1 Objectifs et scénario

L’objectif pour cette deuxième illustration est de montrer que la démarche permet de construire de façon itérative et modulaire des micro-réseaux. Au sein d’un multi-modèle représentant un micro-réseau, nous devons donc être capable de réaliser les modifications suivantes avec une certaine facilité :

- Ajouter, modifier ou retirer des composants sans pour autant modifier l’architecture générale du multi-modèle ni sa dynamique.
- Changer de stratégie de façon transparente par rapport au multi-modèle.

Pour cela, nous appuyons notre démonstration à l’aide de deux exemples, construits successivement à partir du multi-modèle précédent.

Le premier réseau que nous souhaitons modéliser, illustré figure 6.10, comporte deux sources et deux charges. Nous ajoutons des modèles de sources et de charges au multi-modèle initial, parmi les modèles résumés sur le tableau 6.1. Nous choisissons un modèle continu d’éolienne (ref 2), donné sous forme de FMU, dépendant de la vitesse du vent. Les différentes données de consommation de charge du second modèle sont des données CSV. Chacun des modèles est utilisé sous sa forme informationnelle.

Pour le second multi-modèle illustré figure 6.11, nous remplaçons une des sources de production du multi-modèle précédant par un système de stockage, référencé en 5 dans le tableau 6.1.

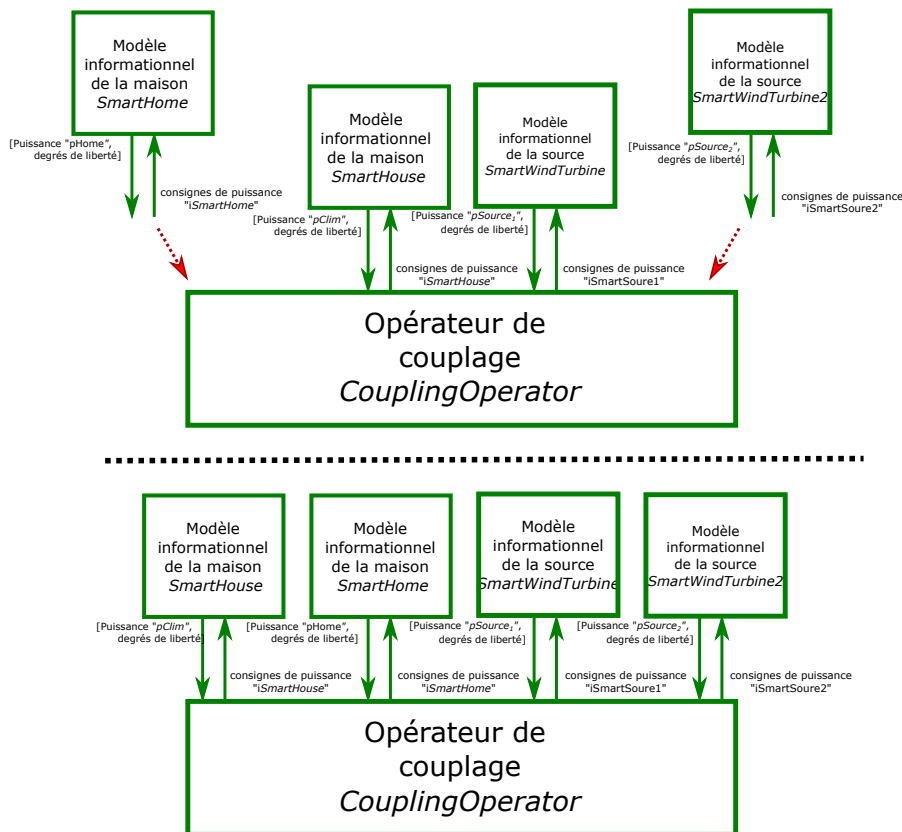


FIGURE 6.10 – Ajout de deux composants au multi-modèle 6.6.

L'itérativité et la modularité de la démarche est représentée par la capacité à modifier le multi-modèle par un ajout, une suppression ou une modification de composants, par un minimum de modifications dans la description du multi-modèle.

Ce critère est à mettre en parallèle avec l'approche ad hoc du chapitre 4 dans lequel des éléments supplémentaires (aggrégateurs, comparateurs) ont du être ajoutés au multi-modèle.

Chaque micro-réseau suit les mêmes objectifs que l'illustration précédente : au niveau conceptuel, nous voulons représenter divers composants consommant, produisant ou stockant de l'énergie. Les échanges d'énergie entre les composants doivent être régulés pour atteindre l'équilibre entre énergie produite et énergie stockée. Aux niveaux formel et logiciel, nous devons pouvoir utiliser des formalismes et des outils adaptés à la représentation des composants. Pour chacun des scénarios, nous devons nous assurer que les échanges d'énergie soient à l'équilibre. Nous devons donc vérifier que l'opérateur de couplage reçoit les informations utiles à la gestion du réseau, et que des décisions sont prises en conséquence.

Pour le premier réseau, la stratégie choisie est la même que celle utilisée précédemment : fournir l'énergie lorsque celle-ci est disponible ou déconnecter les composants lorsqu'elle ne l'est pas.

Pour le second réseau, les degrés de liberté du système de stockage permettent une stratégie différente. Celui-ci fournit un ensemble de valeurs de puissance possible compris entre sa puissance

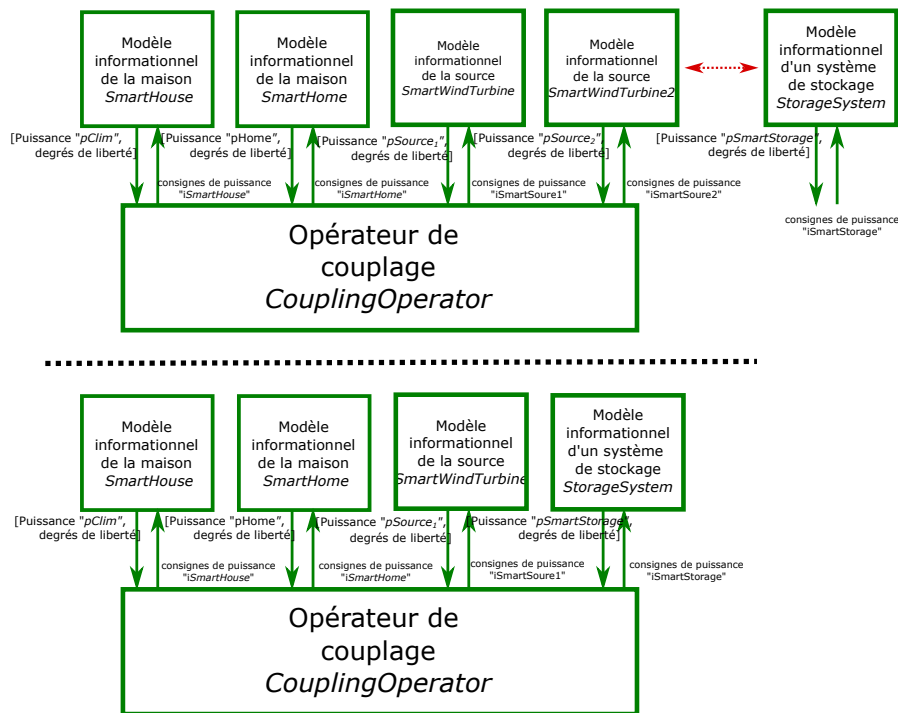


FIGURE 6.11 – Modification d'un composant au multi-modèle 6.10 (source par système de stockage).

maximale de charge ou de décharge¹¹. Dans ce cas, la stratégie est de vérifier qu'il existe un triplet de valeurs parmi les degrés de liberté disponibles des composants qui permettent d'être à l'équilibre, sinon l'opérateur de couplage déconnecte l'ensemble des composants.

6.5.2 Expérimentations

Pour construire chacun des multi-modèles, nous nous basons sur la description réalisée précédemment. En annexe C, nous donnons les descriptions complètes des deux multi-modèles.

Passage de la description des annexes B à C : Illustré figure 6.12, nous avons ajouté l'appel des deux sous-modèles (de la seconde source de production et de la seconde habitation), avec leur identification respectives ainsi que les couplages relatifs bi-directionnels. Dans une description de multi-modèle, un ajout de composant correspond donc à l'ajout de trois lignes.

Passage de la description des annexes C à D : illustré figure 6.13, La modification d'un composant dans la description du multi-modèle se fait par la modification de l'appel du sous-modèle et la modification du couplage bi-directionnel. En ne gardant qu'un identifiant générique (ici *Smart-WindTurbine* par exemple) pour l'appel du sous-modèle, le couplage n'a pas à être modifié. Dans ce cas, une seule ligne est à modifier dans la description du multi-modèle.

Nous pouvons noter deux éléments dans ces descriptions :

- Nous pouvons changer au besoin les paramètres de l'un des sous-modèles directement dans la description du multi-modèle (capacité maximale du stockage par exemple).

11. Note simplificatrice pour les experts

6.5. Preuve de concepts pour l'itérativité et la modularité



FIGURE 6.12 – Illustration d’ajout de composants dans la description des multi-modèles informationnels (de 6.6 à 6.10).

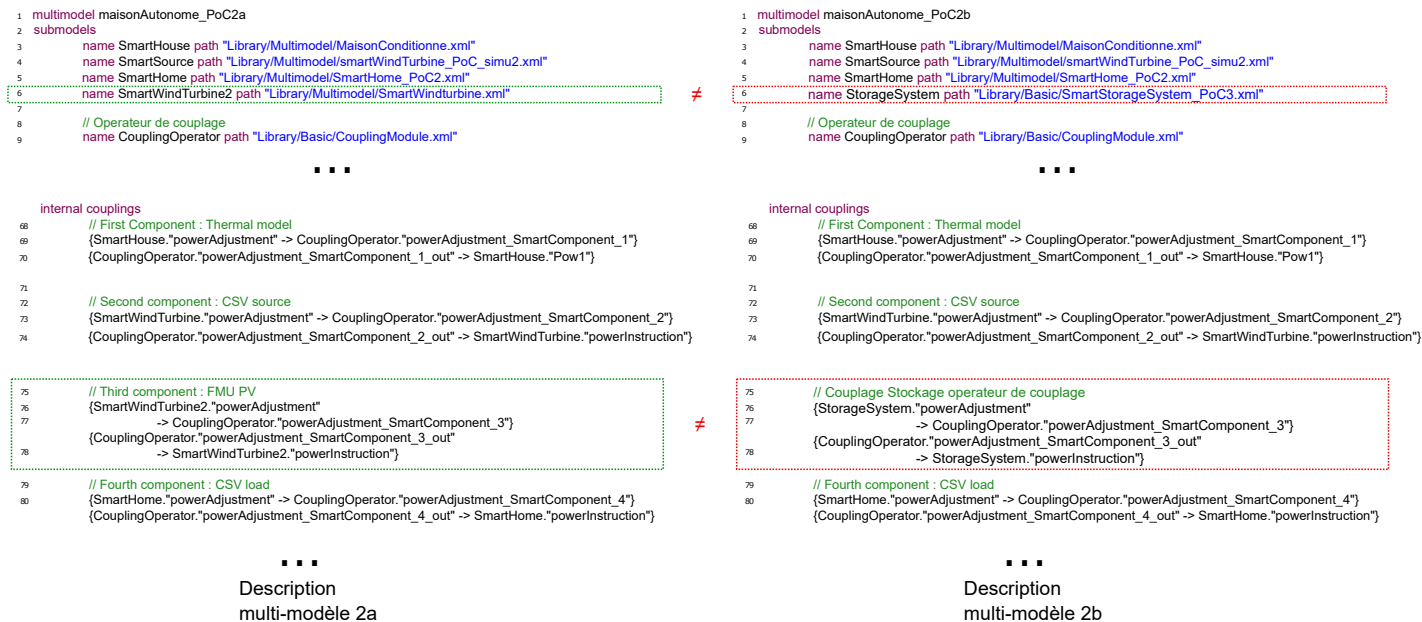


FIGURE 6.13 – Illustration d’une modification de la description de multi-modèle informationnel (de 6.10 à 6.11).

— **L’opérateur de couplage est le même pour tous les multi-modèles.** Son implémentation est réalisée de telle sorte que le nombre de port (d’entrées et de sorties) est variable (Celle-ci est initialisée par une liste). La stratégie est choisie selon le type d’événements reçus.

L’observation des résultats des simulations des deux multi-modèles construits, figure 6.14, donne

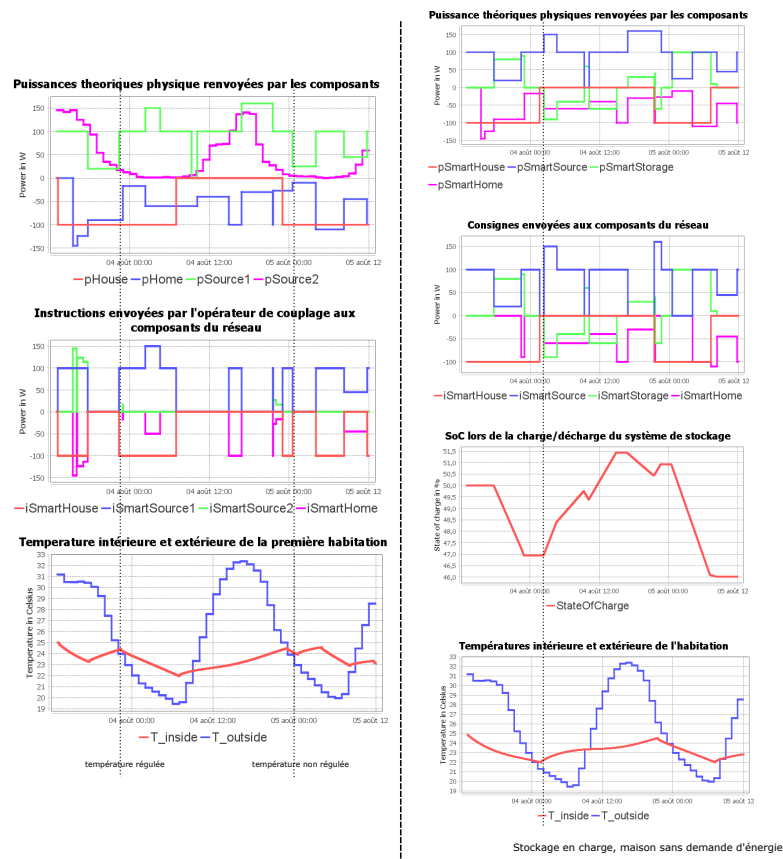


FIGURE 6.14 – Évolutions des valeurs physiques et consignes envoyées au multi-modèle 6.10 et 6.11.

le comportement de nos composants. La régulation thermique de la première habitation est en adéquation avec l'énergie disponible. Dans le premier multi-modèle, la température de la première habitation est successivement régulée ou non, selon les aléas de la production. Dans le second multi-modèle, avec un système de stockage initialement à moitié rempli, les valeurs de consommation et de production possibles correspondent aux valeurs de consignes en provenance de l'opérateur de couplage, qui pioche dans les capacités du système de stockage pour fournir de l'énergie aux différents consommateurs ou stocker l'énergie en surplus.

La réponse aux événements reçus par l'opérateur de couplage, à travers l'instanciation des stratégies illustrées sur les traces 6.15 et 6.16, nous confirme la régulation des échanges d'énergie dans les deux multi-modèles. À chaque événement de changement de production ou de consommation reçu, l'opérateur de couplage se charge de répartir l'énergie selon la stratégie implémentée.

6.5.3 Bilans et commentaires

Ces deux exemples illustrent les propriétés itératives et modulaires de la démarche.

- Aspect itératif : lors de la description du multi-modèle, un ajout de composant est donné par un couplage bi-directionnel sur l'opérateur de couplage.
- Aspect modulaire : toujours lors de la description du multi-modèle, modifier un composant

```

8761.2;
0 : [INTERNAL EVENT] before taking decision network balance measured : 145.0
1 : [INTERNAL EVENT] After taking decision network balance measured : 0.0
2 : Instructions envoyées :
powerAdjustment_SmartComponent_1_out : -100.0
powerAdjustment_SmartComponent_2_out : 100.0
powerAdjustment_SmartComponent_3_out : 0.0
powerAdjustment_SmartComponent_4_out : 0.0

8871.41;
0 : [INTERNAL EVENT] before taking decision network balance measured : 0.0
1 : [INTERNAL EVENT] After taking decision network balance measured : 0.0
2 : Instructions envoyées :
powerAdjustment_SmartComponent_1_out : -100.0
powerAdjustment_SmartComponent_2_out : 100.0
powerAdjustment_SmartComponent_3_out : 145.0
powerAdjustment_SmartComponent_4_out : -145.0

8881.2;
0 : [INTERNAL EVENT] before taking decision network balance measured : 0.0
1 : [INTERNAL EVENT] After taking decision network balance measured : 0.0
2 : Instructions envoyées :
powerAdjustment_SmartComponent_1_out : -100.0
powerAdjustment_SmartComponent_2_out : 100.0
powerAdjustment_SmartComponent_3_out : 145.0
powerAdjustment_SmartComponent_4_out : -145.0

```

FIGURE 6.15 – Instanciation de la stratégie de l'opérateur de couplage mutli-modèle 6.10.

```

48090.2999999999996;
0 : [INTERNAL EVENT] before taking decision network balance measured : 233.0
1 : [INTERNAL EVENT] After taking decision network balance measured : 0.0
2 : Instructions envoyées :
powerAdjustment_SmartComponent_1_out : -0.0
powerAdjustment_SmartComponent_2_out : 0.0
powerAdjustment_SmartComponent_3_out : 0.0
powerAdjustment_SmartComponent_4_out : 0.0

48090.4099999999996;
0 : [INTERNAL EVENT] before taking decision network balance measured : 190.0
1 : [INTERNAL EVENT] After taking decision network balance measured : 0.0
2 : Instructions envoyées :
powerAdjustment_SmartComponent_1_out : -0.0
powerAdjustment_SmartComponent_2_out : 150.0
powerAdjustment_SmartComponent_3_out : -90.0
powerAdjustment_SmartComponent_4_out : -60.0

48120.2;
0 : [INTERNAL EVENT] before taking decision network balance measured : 190.0
1 : [INTERNAL EVENT] After taking decision network balance measured : 0.0
2 : Instructions envoyées :
powerAdjustment_SmartComponent_1_out : -0.0
powerAdjustment_SmartComponent_2_out : 150.0
powerAdjustment_SmartComponent_3_out : -90.0
powerAdjustment_SmartComponent_4_out : -60.0

```

FIGURE 6.16 – Instanciation de la stratégie de l'opérateur de couplage mutli-modèle 6.11.

signifie changer son instance.

L'ajout ou la modification de composant dans le multi-modèle ne change pas pour autant sa dyna-

mique. Nous pouvons ajouter, modifier ou retirer des éléments sans pour autant changer toute l'architecture du multi-modèle co-simulé. Dans l'ensemble, les descriptions ressemblent à celles données en 6.7. L'aspect itératif de la démarche est illustré avec la description 6.12 : ajouter des composants (une source et une charge) se résume à l'ajout des couplages bi-directionnels des deux composants en suppléments. L'aspect modulaire, quand à lui, est donné sur la description 6.13 : le changement de sous-modèle se fait par la modification de la ligne instanciant le sous-modèle en question.

Avec ces exemples, nous avons montré que notre démarche permet la réalisation de multi-modèles co-simulables. Cependant, les modèles couplés ne sont utilisables que pour la représentation d'un seul micro-réseau dans un système fermé. Il n'existe donc pas encore de hiérarchie dans la construction de nos modèles, comme le propose actuellement l'intergiciel au niveau formel.

6.6 Preuve de concepts pour la construction hiérarchique de micro-réseaux

6.6.1 Objectifs et scénario

Avec MECSYCO et ses langages dédiés, et notamment la description de multi-modèles, nous pouvons construire des multi-modèles de façon hiérarchique, c'est-à-dire, utiliser un modèle couplé comme un modèle atomique dans un autre multi-modèle. Nous voulons montrer avec l'exemple suivant que la démarche proposée permet de réaliser hiérarchiquement des micro-réseaux, c'est-à-dire qu'un micro-réseau construit, représenté par un multi-modèle, peut-être réutilisé pour la construction d'un autre multi-modèle de réseau.

Nous nous intéressons dans cet exemple à la régulation de l'énergie d'un éco-quartier, en auto-consommation collective, avec quatre maisons individuelles et un système de stockage collectif.

Ce multi-modèle sera réalisé de manière hiérarchique en deux étapes :

1. Construction des multi-modèles représentant les maisons individuelles, capables de produire de l'énergie avec une source de production éolienne.
2. Création d'un multi-modèle représentant notre éco-quartier, équipé d'un système de stockage collectif.

La première étape dans la construction du scénario est de réaliser des multi-modèles de maisons individuelles. Nous reprenons le multi-modèle de la première illustration 6.17. Il constitue notre brique élémentaire pour la construction de l'éco-quartier. Il se compose donc du modèle thermique de l'habitation sous forme d'une FMU et du contrôleur JAVA permettant sa régulation thermique. L'opérateur de couplage vient compléter le multi-modèle. Celui-ci est utilisé comme opérateur de composition et permet de renvoyer les degrés de liberté du système, définis comme l'ensemble des valeurs énergétiques pouvant être pris par son réseau (somme de la production et de la consommation). L'opérateur peut également recevoir une consigne de régulation pour son système qui sera intégrée à la stratégie locale de régulation. Ainsi la somme de la production et de la consommation devra être égale à la nouvelle consigne de régulation qui peut ne pas être nulle.

La seconde étape consiste à construire le multi-modèle de l'éco-quartier, représenté figure 6.18. Il est donc composé d'un système de stockage collectif, repris du second exemple de la partie précé-

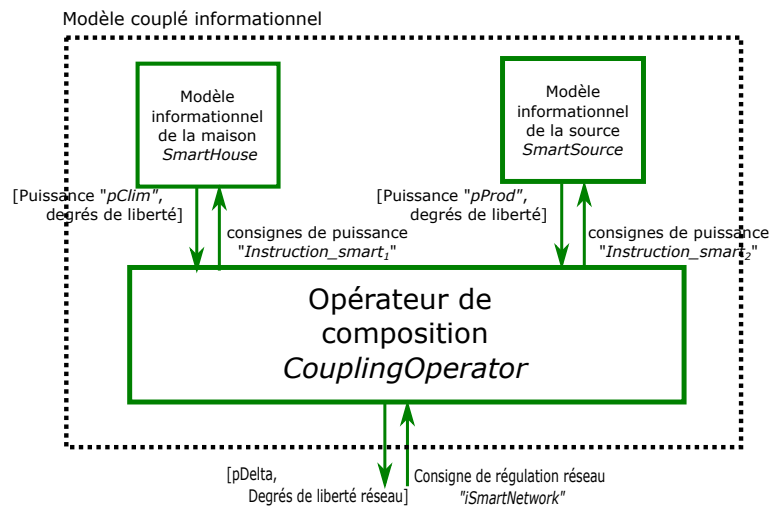


FIGURE 6.17 – Multi-modèle d'une maison individuelle.

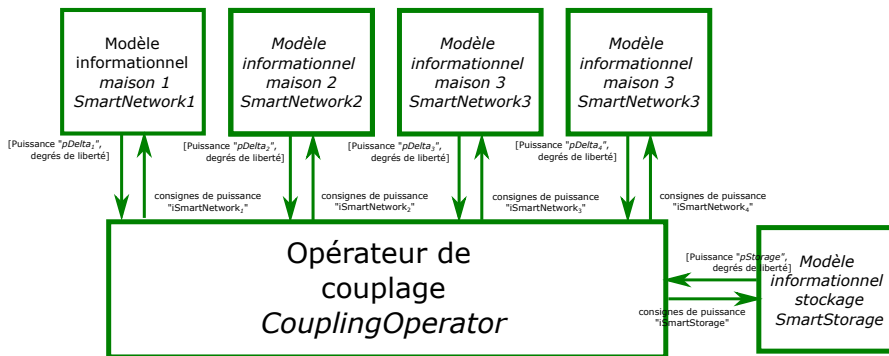


FIGURE 6.18 – Multi-modèle de micro-réseau construit hiérarchiquement.

dente, et des quatre instances de maisons individuelles. Nous donnons à ces maisons des températures de confort différentes : [23°C ; 25°C], [22°C ; 24°C], [21.5°C ; 23.5°C] et [21°C ; 23°C].

6.6.2 Expérimentations

La description du multi-modèle informationnel est donnée en annexe E. Par rapport à la logique de description des multi-modèles précédents, rien ne change. Nous trouvons toujours l'appel des sous-modèles utilisés pour construire le multi-modèle. L'interface de ceux-ci est similaire à un composant atomique, nous pouvons donc ajouter ou modifier un composant du multi-modèle qu'il soit atomique ou couplé. La stratégie pour l'ensemble du réseau est simple : trouver un ensemble de valeurs permettant d'avoir une balance énergétique nulle.

Les différentes figures 6.19 et 6.20 nous permettent de vérifier les comportements des différents modèles.

L'opérateur de couplage de l'ensemble du réseau nous montre, à travers la liste des événements 6.20 enregistrés qu'il est capable de réguler et d'envoyer un ensemble de valeurs aux différents éléments couplés. Les événements enregistrés montrent que les deux opérateurs de composition prennent

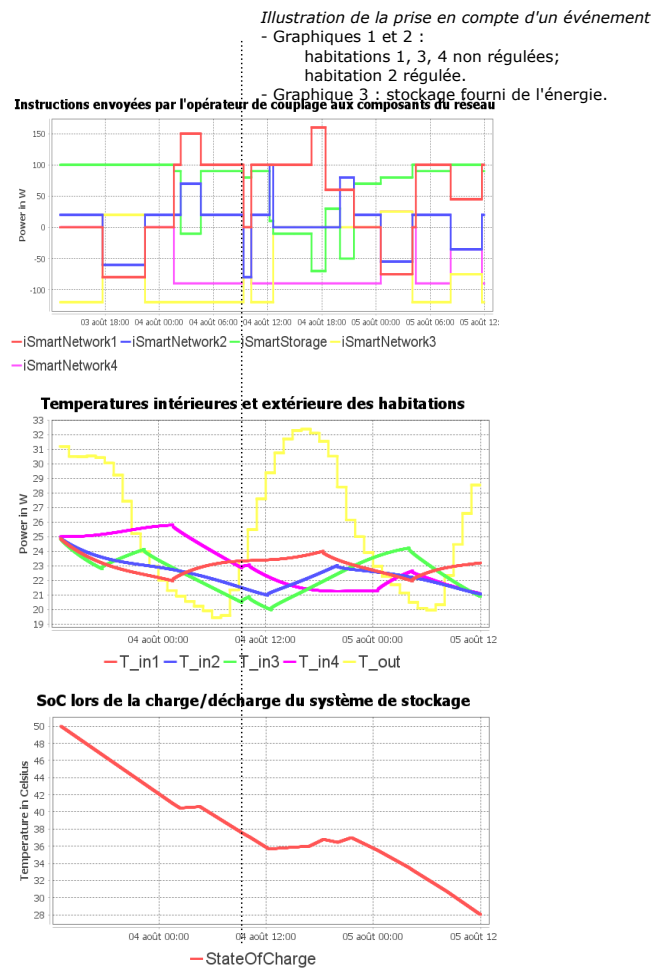


FIGURE 6.19 – Évolutions des puissances physiques théoriques et consigne de puissance envoyées.

en compte la nouvelle valeur de régulation : celle-ci se répercute dans les modèles physiques.

6.6.3 Bilans et commentaires

L'exemple construit nous permet d'illustrer la construction hiérarchique des multi-modèles, réalisée en plusieurs étapes.

1. La première étape consiste à construire un, ou plusieurs multi-modèles de réseaux répondant à des objectifs précis à l'aide d'opérateurs de couplage, en réalisant si besoin un changement de représentation de physique vers informationnel.
2. La seconde étape consiste à réutiliser le ou les multi-modèles couplés, ou atomique selon le besoin, à travers les opérateurs de composition, agissant comme intermédiaires entre les différents niveaux du multi-modèle.

Il est à noter que bien que la construction soit hiérarchique, l'exécution du multi-modèle reste à plat et permet toujours la décentralisation et l'exécution en parallèle.


```

73151.5;
0 : [INTERNAL EVENT] before taking decision network balance measured : -90.0
1 : [INTERNAL EVENT] After taking decision network balance measured : 0.0
2 : Instructions envoyées :
powerAdjustment_SmartComponent_1_out : 0.0
powerAdjustment_SmartComponent_2_out : 20.0
powerAdjustment_SmartComponent_3_out : 100.0
powerAdjustment_SmartComponent_4_out : -120.0
powerAdjustment_SmartComponent_5_out : 0.0

73151.7;
0 : [INTERNAL EVENT] before taking decision network balance measured : -190.0
1 : [INTERNAL EVENT] After taking decision network balance measured : 0.0
2 : Instructions envoyées :
powerAdjustment_SmartComponent_1_out : 0.0
powerAdjustment_SmartComponent_2_out : -80.0
powerAdjustment_SmartComponent_3_out : 80.0
powerAdjustment_SmartComponent_4_out : 0.0
powerAdjustment_SmartComponent_5_out : 0.0

73200.2;
0 : [INTERNAL EVENT] before taking decision network balance measured : -190.0
1 : [INTERNAL EVENT] After taking decision network balance measured : 0.0
2 : Instructions envoyées :
powerAdjustment_SmartComponent_1_out : 0.0
powerAdjustment_SmartComponent_2_out : -80.0
powerAdjustment_SmartComponent_3_out : 80.0
powerAdjustment_SmartComponent_4_out : 0.0
powerAdjustment_SmartComponent_5_out : 0.0

```

FIGURE 6.20 – Instanciation de la stratégie de l’opérateur de couplage.

6.7 Discussions

Nous avons montré à travers ces exemples une preuve de concepts de l’approche. Cependant, ils montrent aussi les limites de celle-ci. Dans cette partie nous discutons des hypothèses émises et de leurs conséquences. Faisant suite à celles-ci, nous proposons quelques pistes d’amélioration.

6.7.1 Modèles physiques et stratégie de gestion

Nos exemples servent de preuve de concept de l’approche. Les stratégies utilisées et les modèles physiques restent simples mais permettent d’illustrer les propriétés itératives, modulaires et hiérarchiques de la démarche de construction. Cependant, au moins deux aspects peuvent être discutés pour des travaux immédiats.

Le premier aspect concerne les modèles physiques utilisés, et plus particulièrement le système de stockage. Pour apporter une réponse à la question du dimensionnement de celui-ci, celui-ci est considéré sans contraintes de chargement ou de déchargement et la limite de stockage n’est pas testée ici. D’un point de vue informationnel, cela se traduit par des degrés de liberté assez permissif (ensembles de valeurs pouvant être prise par le système de stockage). Dans la réalité, un système de stockage possède plus de deux modes de fonctionnement que le simple chargement ou déchargement (charge souple ou forcée; décharge souple ou forcée) qui peut influencer les degrés de libertés. Un système de stockage plus abouti pourrait permettre de réaliser des scénarios plus pertinents.

Nous pouvons également améliorer nos scénarios en prenant en compte d’autres facteurs de consommation. L’activité humaine [Perrois et al., 2021] ou encore la consommation d’énergie des

applications IoT [Guegan and Orgerie, 2019] seraient une amélioration significative dans le cadre de l'étude par co-simulation des échanges d'énergie dans les réseaux.

Le deuxième point que nous souhaitons aborder est axé sur la stratégie de gestion. Les stratégies de gestion dans nos exemples se résument en la recherche par un parcours de graphes des valeurs d'équilibrage, en sélectionnant les valeurs répondant au problème. Des stratégies plus réfléchies, avec des degrés de liberté hétérogènes (intervalle de puissance, valeurs par exemple) ou encore modélisant la gestion de la demande pour le déplacement de charges pourraient également venir améliorer nos scénarios.

6.7.2 Visualisation des résultats

La visualisation des résultats dans notre approche est effectuée avec l'aide d'outils intégrés à MECSYCO (visualisation graphique de l'évolution des variables d'états) et par la consultation des événements enregistrés par les modèles informationnels. Comme expliqué au chapitre 2, la vérification et la visualisation des résultats est un élément important pour la robustesse des modèles. Bien que cet ensemble de résultats permettent de valider le comportement attendu, les différentes co-simulation gagneraient en pertinence avec une visualisation plus efficace, en fournissant des outils d'analyse relatives aux applications réalisées.

Un candidat pertinent est l'outil RMARKDOWN. RMARKDOWN est une syntaxe qui permet de créer des documents en combinant la narrative du document et l'exécution de code afin de générer dynamiquement des documents en différents formats. Ceci permet de créer des rapports scientifiques qui intègrent des éléments textuels écrits par les auteurs avec des représentations visuelles ou des résultats d'analyse statistique. RMARKDOWN peut être utilisé pour générer différents types et formats de documents, comme par exemple des tutoriels interactifs ou des articles scientifiques déjà mise en page. Ce type d'approche favorise la transparence et reproductibilité des rapports scientifiques puisque les auteurs peuvent regrouper toutes les informations nécessaires et peuvent y accéder dans le temps.

Dans le cadre de notre travail, nous avons entamé un travail qui consiste en l'intégration de RMARKDOWN dans MECSYCO, avec une exécution de scripts à la suite d'une co-simulation pour la gestion des rapports automatisés.

6.8 Conclusion

À partir des exemples de ce chapitre, nous avons démontré les propriétés de la démarche. Celle-ci étend au niveau conceptuel les propriétés d'intégration et de gestion des hétérogénéités proposées aux niveaux formel et logiciel par l'intergiciel MECSYCO.

Ces exemples résument par ailleurs les étapes à réaliser pour la construction hiérarchique de micro-réseaux pour l'étude des échanges d'énergie par co-simulation :

1. Changement de représentation (physique vers informationnelle) : nous avons réalisé un changement de représentation pour deux modèles simples, modélisant par des données CSV la pro-

duction et la consommation possible de deux composants, et un modèle plus complexe, qui représente la régulation thermique d'un bâtiment.

2. Description des multi-modèles : le micro-réseau est découpé pour représenter à la fois les composants réalisant des opérations sur l'énergie et la stratégie de gestion par l'intermédiaire de l'opérateur de couplage. Cette représentation facilite la construction de multi-modèles. L'ajout ou le retrait d'un composant se fait par ajout ou retrait d'un couplage bi-directionnel lors de la description du multi-modèle en construction, sans changer la dynamique du système, ni l'architecture du multi-modèle dans son ensemble.
3. Construction hiérarchique de multi-modèles : le dernier exemple montre que l'opérateur de composition permet une démarche hiérarchique de construction de multi-modèles avec la construction d'un éco-quartier à partir de l'instanciation de plusieurs habitations et plus sources de production.

Ces exemples ont également permis d'établir des pistes d'améliorations, que ce soit sur les scénarios proposés ou sur la démarche à proprement parler. Des modèles plus pertinents ou des stratégies plus élaborées, associés à des indicateurs plus performants (RMARKDWON) viendraient étayer les possibilités de la démarche.

CONCLUSION

Sommaire

7.1	Contexte et problématiques abordées	81
7.2	Contributions	82
7.3	Perspectives	82

7.1 Contexte et problématiques abordées

En accord avec les enjeux de la transition énergétique, l'importance de développer des nouvelles méthodes de gestion de l'énergie se fait de plus en plus pressante. Le projet LUE, IMPACT ULHyS, programme de recherche multidisciplinaire sur les technologies de l'hydrogène et des piles à combustible, a permis de développer plusieurs axes de recherche dont cette thèse fait partie.

Celle-ci s'inscrit dans la continuité des travaux réalisés sur l'intergiciel MECSYCO, dans le cadre de la modélisation et de la simulation des systèmes complexes, appliquée au micro-réseau. Leur modélisation impose de décrire le système comme l'intégration de sous-systèmes hétérogènes en interaction. L'intergiciel propose une démarche rigoureuse de modélisation et de simulation de systèmes complexes, basée sur le formalisme DEVS et le méta-modèle AA4MM, qui assure la gestion des hétérogénéités aux niveaux formel et logiciel.

En revanche, dans le cadre spécifique de la modélisation et de la simulation de micro-réseaux, la plateforme ne permet pas une utilisation adaptée et nécessite un apprentissage conséquent pour réaliser de simples multi-modèles.

La problématique abordée concerne donc le développement d'une approche de co-simulation rigoureuse pour l'étude des échanges d'énergie d'un micro-réseau. Nous nous sommes concentrés particulièrement sur l'intégration des modèles hétérogènes des micro-réseaux, en proposant des concepts de modélisation applicables aux éléments spécifiques des micro-réseaux.

7.2 Contributions

Nous proposons dans cette thèse des concepts adaptés à la co-simulation des échanges d'énergie des micro-réseaux. Les travaux reposent sur une vision informationnelle du réseau et définissent deux concepts :

- Les composants informationnels : ils modélisent les éléments du réseau effectuant des opérations physiques sur l'énergie (consommer, produire, stocker), en fournissant les données de puissances consommable ou générable.
- L'opérateur de couplage : il modélise d'une part le système de gestion des échanges d'énergie du réseau et d'autre part il agit comme nœud hiérarchique du réseau. Dans la première fonction, il collecte les informations et calcule une nouvelle répartition de l'énergie garantissant l'équilibrage du réseau. Avec ces informations, il permet la construction hiérarchique de multi-modèles. Il possède, de fait, le même comportement qu'un composant informationnel réutilisable dans un autre multi-modèle.

Ces concepts ont été mis en œuvre dans un ensemble d'exemples qui construit pas à pas le multi-modèle d'un éco-quartier.

1. Par un changement de représentation, nous avons pu simplement passer d'un modèle physique à sa représentation informationnelle, réutilisable dans le cadre de notre démarche.
2. Nous avons ensuite appliqué la démarche, en couplant les modèles informationnels à l'opérateur de couplage pour réaliser le multi-modèle d'une maison autonome en énergie.
3. Enfin nous avons repris le modèle couplé de la maison autonome pour réaliser le multi-modèle de l'éco-quartier dans lequel plusieurs habitations échangent de l'énergie, dans le cadre de l'auto-consommation collective.

Par cette réalisation, nous avons illustré les propriétés d'intégration modulaire de modèles et de hiérarchisation à tous les niveaux de la démarche de co-simulation.

7.3 Perspectives

Outre les pistes d'améliorations à plus court termes vus dans la discussion du chapitre 6, nous souhaitons donner quelques perspectives à plus long terme.

Une première réflexion concerne le changement de représentation réalisée pour l'intégration des modèles physiques dans la démarche. Notre proposition utilise la partie informationnelle des éléments pour permettre l'équilibrage de la puissance. Notre cadre se limite donc aux solutions d'équilibrage du système d'un point de vue informationnel. Les valeurs de puissances données par l'opérateur de couplage, après application de la stratégie, sont des références vers lesquelles les systèmes physiques doivent tendre. Dans ce cas, nous avons émis l'hypothèse que le système physique est capable, sur une courte période de temps, de supporter des écarts de puissances, avant d'atteindre l'état d'équilibre souhaité. Cela signifie que la physique des composants (tension, fréquence) est respectée pour tous les composants à tout moment.

Avec cette hypothèse, passer du physique vers l'informationnel ne pose pas de problème. En revanche passer de l'informationnel vers le physique est plus contraignant et demande davantage de

réflexions. En effet, la physique des composants ne se limitent pas à la variabilité de la puissance. La tension et la fréquence du composant jouent un rôle important dans les degrés de liberté physique, et sur la stabilité du composant. La vérification du comportement physique du composant est dans ce cas indispensable. Pour relever ce défi, une piste envisagée est la modélisation de l'aspect informationnel et physique du réseau avec deux opérateurs de couplages. Nous aurions ainsi deux opérateurs de couplage, l'un informationnel qui décide de la répartition des échanges et un physique qui subit cette répartition et vérifie le bon fonctionnement physique.

La stratégie de gestion est le centre d'une seconde piste de recherche. En plus du besoin de scénarios plus pertinents avec des stratégies plus abouties, notre approche possède plusieurs limites concernant l'instanciation du système de gestion. Notre proposition découple la stratégie de gestion des éléments réalisant des opérations sur l'énergie. Avec cette approche, l'opérateur de couplage est seul responsable de la régulation des échanges d'énergie. Nous avons donc centralisé les informations et la stratégie de gestion. L'implémentation et l'utilisation de stratégies décentralisées n'est a priori pas possible avec notre démarche. Par ailleurs, les composants informationnels ne fournissent actuellement pas assez d'informations pour la gestion décentralisée de l'énergie.

Une piste de réflexion pour développer des stratégies décentralisées, dans le cadre des systèmes informationnels, est d'"agentifier" les composants. Deux approches sont possibles et à explorer dans de futurs travaux :

- Au sein de l'intergiciel, la réception et l'envoi des événements d'un modèle sont sous la responsabilité d'un agent. Une évolution de cet agent vers un agent domaine pour l'équilibrage pourrait permettre l'intégration de stratégie décentralisée.
- Revenir sur le comportement du modèle informationnel pour lui donner la possibilité d'agir sur son environnement et négocier avec les éléments qui composent le réseau.

Dans nos expériences, nous avons utilisé les langages dédiés de MECSYCO développés dans [Paris, 2019]. Non adaptés aux micro-réseaux, nous pourrions gagner en expressivité et en efficacité avec un langage dédié, centré sur l'automatisation des couplages à travers les opérateurs de couplages et de composition.

Enfin, des pistes de recherche plus spécifiques peuvent être notées. Nous nous sommes attachés ici à l'intégration spécifique des composants hétérogènes des micro-réseaux. Une orientation de recherche possible serait d'intégrer des méthodes d'optimisation dans la co-simulation. Dans ce cas, en plus des problématiques des domaines impliquées, l'idée serait de décrire dans la plateforme de co-simulation des expériences successives à viser d'optimisation.

DESCRIPTION DU MULTI-MODÈLE DE LA MAISON AUTONOME (AD-HOC)

Nous donnons ci-dessous l'exemple de code MECSYCO permettant la co-simulation ad-hoc de la maison autonome, présentée chapitre 4.

```
1 multimodel Maison_autonome_adhoc
2 submodels
3     name House path "My Models/fmu/TP_Thermique_ENSEM_BuildSysProVersion_HouseFmu_v6.fmu
4     "
5     name Weather path "Library/Basic/SqlModelWeather.xml"
6     name Controller path "Library/Basic/ControllerJava.xml"
7     name ModuleHydrogen path "Library/Multimodel/ModuleHydrogeneCfmu.xml"
8     name Eolienne path "Library/Basic/eolienneJava.xml"
9     name Connecteur path "Library/Basic/connecteur.xml"
10
11 interface
12     parameters
13         //Weather SQL parameters
14         startDate:"2018-08-02 12:00:00" refers to (Weather:"startDate")
15         endDate:"2018-08-05 00:00:00" refers to (Weather:"endDate")
16
17         //House parameters
18         Tinit:298.15 refers to (House:"Tinit") //inside the rooms
19         TextInit:298.15 refers to (House:"TextInit") //on the outer face of walls (
20             keep this equal to Tinit)
21
22         //Controller parameters
23         maxTemp1:297.15 refers to (Controller:"maxTemp1")
24         minTemp1:293.15 refers to (Controller:"minTemp1")
25         Temp1:298.15 refers to (Controller:"Temp1")
26
27         //Initial values of the controller's command
28         Pow1:0. refers to (Controller:"Pow1")
29
30         //Maximum power allowed
31         maxPow1:100. refers to (Controller:"maxPow1")
```



```

30     stepController:720. refers to (Controller:"step")
31
32     //Eolienne parameters
33     rho:1.23 refers to (Eolienne:"rho")
34     area: 201. refers to (Eolienne:"area")
35     cp:0.17 refers to (Eolienne:"cp")
36     wind:0. refers to (Eolienne:"wind")
37     powerUsefull:0. refers to (Eolienne:"powerUsefull")
38
39     outputs
40     T1:Double refers to (House:"T1")
41     Text:Double refers to (Weather:"TWeather")
42     Pow1:Double refers to (Controller:"Pow1_out")
43     output1:Double refers to (Connecteur:"output")
44
45     powerUsefull:Double refers to (Eolienne:"powerUsefull")
46     currentPI:Double refers to (ModuleHydrogen:"currentPI")
47     voltagePAC:Double refers to (ModuleHydrogen:"voltagePAC")
48     powerUP:Double refers to (ModuleHydrogen:"powerUP")
49     hydrogenFlowElec:Double refers to (ModuleHydrogen:"hydrogenFlowElec")
50     volume:Double refers to (ModuleHydrogen:"volume")
51     volumemax:Double refers to (ModuleHydrogen:"volumemax")
52     hydrogenFlowOut:Double refers to (ModuleHydrogen:"hydrogenFlowOut")
53     hydrogenFlowOutC:Double refers to (ModuleHydrogen:"hydrogenFlowOutC")
54     changeHydrogen:Double refers to (ModuleHydrogen:"changeHydrogen")
55
56     internal couplings
57     //link between Weather and House
58     {Weather."TWeather" -> House."Text" event operation "model.operation.
59         AddDoubleOperation" arg=273.15}
60
61     //link between Weather and Eolienne
62     {Weather."WindSpeed" -> Eolienne."wind"}
63
64     //link between House and Controller
65     {House."T1" -> Controller."Temp1"}
66
67     //link between Controller and Eolienne --> Connecteur
68     //in order to calculate Min(Peol, Pcontroller) = Comparateur(Min) output (W)
69     {aggregation "model.operation.ComparateurDoubleAggregationOperation", (Controller."
70         Pow1_out" , Eolienne."powerUsefull")
71         -> (Connecteur."input")
72     }
73
74     //link between Controller and Eolienne --> ModuleHydrogen (Deficit: DeltaP < 0)
75     //Multiplexer in order to calculate DeltaP (Peol - Pcontroller) = Comparateur (
76         DeltaP) (W)
77     //We send the deficit of energy (first converted in current) to inform the battery
78     that we need power or we send 0 (deficit = deltaP < 0 = min (DeltaP, 0) )
79     {aggregation "mecsycy.core.operation.aggregation.SumAggregationOperation",
80     (Controller."Pow1_out" event operation "model.operation.MultiplyDoubleOperation" arg
81         =-1. , Eolienne."powerUsefull")
82         -> (ModuleHydrogen."powerReq" event operation "model.operation.
83             MinDoubleOperation" arg=0.)

```

```

78     }
79
80     //Link between Controller and Eolienne --> ModuleHydrogen (Surplus: DeltaP > 0)
81     //Multiplexer in order to calculate DeltaP (Peol - Pcontroller) = Compareteur (
      DeltaP) (W)
82     //We send the surplus of energy to charge the battery or we send 0 (surplus = deltaP
      > 0 = max(DeltaP, 0) )
83     {aggregation "mecsycoco.core.operation.aggregation.SumAggregationOperation",
84     (Controller."Pow1_out" event operation "model.operation.MultiplyDoubleOperation" arg
      =-1. , Eolienne."powerUsefull")
85       -> (ModuleHydrogen."powerPI" event operation "model.operation.
      MaxDoubleOperation" arg=0.)
86     }
87
88     //Link between Compareteur (Min) and ModuleHydrogen --> House (Wh)
89     {aggregation "mecsycoco.core.operation.aggregation.SumAggregationOperation",
90     (Connecteur."output", //comparator (Min)
91     ModuleHydrogen."powerUP")
92     -> (House."Pow1" event operation "model.operation.MultiplyDoubleOperation"
      arg=-1.)
93     }
94
95     information
96       description "Couplage ad hoc de la regulation thermique d'une habitation."
97
98     simulator
99       simulation variables
100         stopTime:169200. refers to (House:"stopTime") (Controller:"stopTime")
101                                     (Weather:"stopTime") (
102                                     ModuleHydrogen:"stopTime")
103                                     (Connecteur:"stopTime") (Eolienne:
104                                     "stopTime")
105
106         timeStep:120. refers to (House:"timeStep") (ModuleHydrogen:"timeStep")
107                                     (Eolienne:"step") (Connecteur:"
108                                     step")

```

Les différents éléments importants de cette description concernent en particulier la gestion des couplages internes, dans la partie "*internal couplings*". Ce qu'il faut retenir ici est le nombre d'opérations ayant dû être ajoutées pour équilibrer le système. Par ailleurs, beaucoup de ces grandeurs peuvent être des grandeurs physique ou des grandeurs informationnels.

Avec peu de composants, la description est rapidement lourde. Sans connaissance avancée de l'outil, la réalisation de ce type de description est impossible et est rapidement confuse.

DESCRIPTION DU MULTI-MODÈLE 6.6 (PREUVE DE CONCEPT)

Nous donnons ci-dessous l'exemple de code MECSYCO permettant la co-simulation modulaire de la maison autonome, présentée chapitre 6.

Celui-ci comprend deux modèles informationnels représentant les composants échangeant physiquement de l'énergie et l'opérateur de couplage, répartissant l'énergie en fonction de la stratégie.

```
1 multimodel maisonAutonome_PoC1
2 submodels
3     name SmartHouse path "Library/Multimodel/MaisonConditionne.xml"
4     name SmartSource path "Library/Multimodel/smartWindTurbine_PoC_simu1.xml"
5
6     // Operateur de couplage
7     name CouplingOperator path "Library/Basic/CouplingModule.xml"
8
9 interface
10     parameters
11         //Initial value for the House
12         Tinit:298.15 refers to (SmartHouse:"Tinit") //inside the rooms
13         TextInit:298.15 refers to (SmartHouse:"TextInit") //on the outer face of
14             walls (keep this equal to Tinit)
15
16         //Controller parameters
17         maxTemp1:297.15 refers to (SmartHouse:"maxTemp1") //Tsouhaitee en Kelvin
18         minTemp1:293.15 refers to (SmartHouse:"minTemp1")
19
20         Temp1:298.15 refers to (SmartHouse:"Temp1")
21
22         //Initial values of the controller's command
23         Pow1_clim:0. refers to (SmartHouse:"Pow1_clim")
24
25         //Maximum power allowed
26         maxPow1:100. refers to (SmartHouse:"maxPow1")
27
28         //Represents the time between each controller's command
29         stepController:720. refers to (SmartHouse:"stepController")
```

```
29
30         nbInput:2 refers to (CouplingOperator:"nbInput")
31     outputs
32
33         // Modele physique de la maison
34         T1:Double refers to (SmartHouse:"T1")
35         temp:Double refers to (SmartHouse:"temp")
36         Pow1_clim:Double refers to (SmartHouse:"Pow1_clim")
37
38         // Modele physique de la source
39         power_windTurbine:Double refers to (SmartSource:"power_windTurbine")
40
41         // SmartModule house
42         powerAdjustment:Vector<Double> refers to (SmartHouse:"powerAdjustment")
43         listInputEvent:String refers to (SmartHouse:"listInputEvent")
44         listOutputEvent:String refers to (SmartHouse:"listOutputEvent")
45
46         // Smart Source
47         powerAdjustment_source:Vector<Double> refers to (SmartSource:"powerAdjustment
48             ")
49         listInputEvent_source:String refers to (SmartSource:"listInputEvent")
50         listOutputEvent_source:String refers to (SmartSource:"listOutputEvent")
51
52         // Coupling operator
53         powerAdjustment_SmartComponent_1_out:Double refers to (CouplingOperator:"
54             powerAdjustment_SmartComponent_1_out")
55         powerAdjustment_SmartComponent_2_out:Double refers to (CouplingOperator:"
56             powerAdjustment_SmartComponent_2_out")
57         listInputEvent_couplingModule:String refers to (CouplingOperator:"
58             listInputEvent")
59         listOutputEvent_couplingModule:String refers to (CouplingOperator:"
60             listOutputEvent")
61
62     internal couplings
63         // Couplage Maison operateur de couplage
64         {SmartHouse."powerAdjustment" -> CouplingOperator."powerAdjustment_SmartComponent_1"
65             }
66         {CouplingOperator."powerAdjustment_SmartComponent_1_out" -> SmartHouse."Pow1"}
67
68         // Couplage Source operateur de couplage
69         {SmartSource."powerAdjustment" -> CouplingOperator."powerAdjustment_SmartComponent_2
70             "}
71         {CouplingOperator."powerAdjustment_SmartComponent_2_out" -> SmartSource."
72             powerInstruction"}
73
74     information
75         description "Deux composants"
76
77     simulator
78         simulation variables
79             stopTime:169200. refers to (SmartHouse:"stopTime") (CouplingOperator:"
80                 stopTime")(SmartSource:"stopTime")
81             timeStep:120. refers to (SmartHouse:"timeStep") //Time step for the House
```

```
simulation
commStep:1 refers to (SmartHouse: "commStep") // Number of time steps between
each communication time, keep 1.
```

Les éléments essentiels à retenir ici sont encore une fois les couplages internes. Par rapport à la description ad hoc, il n'y a plus d'opérations supplémentaires pour réguler les échanges, puisque la stratégie de gestion est représentée par un modèle à part entière. Le couplage des grandeurs informationnelles sont centrées sur l'opérateur de couplage, ce qui facilite le couplage interne.

DESCRIPTION DU MULTI-MODÈLE 6.10 (ITÉRATIVITÉ)

Nous donnons ci-dessus la description du multi-modèle informationnel 6.10. Nous avons ajouté dans celui-ci deux composants : une source de production et une habitation.

```
1 multimodel maisonAutonome_PoC2
2 submodels
3     name SmartHouse path "Library/Multimodel/MaisonConditionne.xml"
4     name SmartHome path "Library/Multimodel/SmartHome_PoC2.xml"
5     name SmartWindTurbine path "Library/Multimodel/smartWindTurbine_PoC_simu2.xml"
6     name SmartWindTurbine2 path "Library/Multimodel/SmartWindturbine.xml"
7
8     // Operateur de couplage
9     name CouplingOperator path "Library/Basic/CouplingModule.xml"
10
11 interface
12     parameters
13         //Initial value for the House
14         Tinit:298.15 refers to (SmartHouse:"Tinit") //inside the rooms
15         TextInit:298.15 refers to (SmartHouse:"TextInit") //on the outer face of
16             walls (keep this equal to Tinit)
17
18         //Controller parameters
19         maxTemp1:297.15 refers to (SmartHouse:"maxTemp1") //Tsouhaitee en Kelvin
20         minTemp1:294.15 refers to (SmartHouse:"minTemp1")
21
22         Temp1:298.15 refers to (SmartHouse:"Temp1")
23
24         //Initial values of the controller's command
25         Pow1_clim:0. refers to (SmartHouse:"Pow1_clim")
26
27         //Maximum power allowed
28         maxPow1:100. refers to (SmartHouse:"maxPow1")
29
30         //Represents the time between each controller's command
31         stepController:720. refers to (SmartHouse:"stepController")
```



```

31
32         nbInput:4 refers to (CouplingOperator:"nbInput")
33     outputs
34         // Modele physique de la maison
35         T1:Double refers to (SmartHouse:"T1")
36         temp:Double refers to (SmartHouse:"temp")
37         Pow1_clim:Double refers to (SmartHouse:"Pow1_clim")
38
39         // Modele physique de l'eolienne
40         power_windTurbine:Double refers to (SmartWindTurbine:"power_windTurbine")
41
42         // Modele physique PV
43         prodEolien:Double refers to (SmartWindTurbine2:"prodEolien")
44
45         //Modele physique de la seconde habitation
46         power_home:Double refers to (SmartHome:"power_home")
47
48         // SmartModule house
49         powerAdjustment:Vector<Double> refers to (SmartHouse:"powerAdjustment")
50         listInputEvent:String refers to (SmartHouse:"listInputEvent")
51         listOutputEvent:String refers to (SmartHouse:"listOutputEvent")
52
53         // Smart Source
54         powerAdjustment_source:Vector<Double> refers to (SmartWindTurbine:"
55             powerAdjustment")
56         listInputEvent_source:String refers to (SmartWindTurbine:"listInputEvent")
57         listOutputEvent_source:String refers to (SmartWindTurbine:"listOutputEvent")
58
59         // Coupling operator
60         powerAdjustment_SmartComponent_1_out:Double refers to (CouplingOperator:"
61             powerAdjustment_SmartComponent_1_out")
62         powerAdjustment_SmartComponent_2_out:Double refers to (CouplingOperator:"
63             powerAdjustment_SmartComponent_2_out")
64         powerAdjustment_SmartComponent_3_out:Double refers to (CouplingOperator:"
65             powerAdjustment_SmartComponent_3_out")
66         powerAdjustment_SmartComponent_4_out:Double refers to (CouplingOperator:"
67             powerAdjustment_SmartComponent_4_out")
68         listInputEvent_couplingModule:String refers to (CouplingOperator:"
69             listInputEvent")
70         listOutputEvent_couplingModule:String refers to (CouplingOperator:"
71             listOutputEvent")
72
73     internal couplings
74         // First Component : Thermal model
75         {SmartHouse."powerAdjustment" -> CouplingOperator."powerAdjustment_SmartComponent_1"
76             }
77         {CouplingOperator."powerAdjustment_SmartComponent_1_out" -> SmartHouse."Pow1"}
78
79         // Second component : CSV source
80         {SmartWindTurbine."powerAdjustment" -> CouplingOperator."
81             powerAdjustment_SmartComponent_2"}
82         {CouplingOperator."powerAdjustment_SmartComponent_2_out" -> SmartWindTurbine."
83             powerInstruction"}

```

```

75
76 // Third component : FMU PV
77 {SmartWindTurbine2."powerAdjustment" -> CouplingOperator."
78   powerAdjustment_SmartComponent_3"}
79 {CouplingOperator."powerAdjustment_SmartComponent_3_out" -> SmartWindTurbine2."
80   powerInstruction"}
81
82 // Fourth component : CSV load
83 {SmartHome."powerAdjustment" -> CouplingOperator."powerAdjustment_SmartComponent_4"}
84 {CouplingOperator."powerAdjustment_SmartComponent_4_out" -> SmartHome."
85   powerInstruction"}
86
87 information
88   description "Deuxieme exemple de la demarche de construction de reseaux"
89
90 simulator
91   simulation variables
92     stopTime:169200. refers to (SmartHouse:"stopTime") (CouplingOperator:"
93       stopTime")(SmartWindTurbine:"stopTime")(SmartWindTurbine2:"stopTime")(
94       SmartHome:"stopTime")
95     timeStep:120. refers to (SmartHouse:"timeStep")//Time step for the House
96       simulation
97     commStep:1 refers to (SmartHouse: "commStep") // Number of time steps between
98       each communication time, keep 1.

```

Encore une fois, il faut se pencher sur les couplages. Le nombre de composants ne modifie dans la description que le nombre de composants couplés à l'opérateur de couplage. L'implémentation de l'opérateur de couplage permet le couplage d'un nombre variable de ports.

DESCRIPTION DU MULTI-MODÈLE 6.11 (MODULARITÉ)

Nous donnons ci-dessus la description du multi-modèle informationnel 6.11. Nous avons remplacé la source de production par un système de stockage.

```
1 multimodel maisonAutonome_PoC3
2 submodels
3     name SmartHouse path "Library/Multimodel/MaisonConditionne.xml"
4     name SmartHome path "Library/Multimodel/SmartHome_PoC2.xml"
5     name SmartSource path "Library/Multimodel/smartWindTurbine_PoC_simu3.xml"
6     name StorageSystem path "Library/Basic/SmartStorageSystem_PoC3.xml"
7
8     // Operateur de couplage
9     name CouplingOperator path "Library/Basic/CouplingModule.xml"
10
11 interface
12     parameters
13         //Initial value for the House
14         Tinit:298.15 refers to (SmartHouse:"Tinit") //inside the rooms
15         TextInit:298.15 refers to (SmartHouse:"TextInit") //on the outer face of
16             walls (keep this equal to Tinit)
17
18         //Controller parameters
19         maxTemp1:297.15 refers to (SmartHouse:"maxTemp1") //Tsouhaitee en Kelvin
20         minTemp1:293.15 refers to (SmartHouse:"minTemp1")
21         Temp1:298.15 refers to (SmartHouse:"Temp1")
22
23         //Initial values of the controller's command
24         Pow1_clim:0. refers to (SmartHouse:"Pow1_clim")
25
26         //Maximum power allowed
27         maxPow1:100. refers to (SmartHouse:"maxPow1")
28
29         nbInput:4 refers to (CouplingOperator:"nbInput")
30     outputs
31         // Modele physique de la maison
```

```
31     T1:Double refers to (SmartHouse:"T1")
32     temp:Double refers to (SmartHouse:"temp")
33     Pow1_clim:Double refers to (SmartHouse:"Pow1_clim")
34
35     // Modele physique de la source
36     power_windTurbine:Double refers to (SmartSource:"power_windTurbine")
37
38     //Modele physique de la seconde habitation
39     power_home:Double refers to (SmartHome:"power_home")
40
41     // SmartModule house
42     powerAdjustment:Vector<Double> refers to (SmartHouse:"powerAdjustment")
43     listInputEvent:String refers to (SmartHouse:"listInputEvent")
44     listOutputEvent:String refers to (SmartHouse:"listOutputEvent")
45
46     // Smart Source
47     powerAdjustment_source:Vector<Double> refers to (SmartSource:"powerAdjustment
48     ")
49     listInputEvent_source:String refers to (SmartSource:"listInputEvent")
50     listOutputEvent_source:String refers to (SmartSource:"listOutputEvent")
51
52     // Storage
53     SoC:Double refers to (StorageSystem:"SoC")
54     hydrogenFlow:Double refers to(StorageSystem:"hydrogenFlow")
55     powerMode:Double refers to(StorageSystem:"powerMode")
56     powerAdjustment_storage:Vector<Double> refers to (StorageSystem:"
57     powerAdjustment")
58     listInputEvent_storage :String refers to (StorageSystem:"listInputEvent")
59     listOutputEvent_storage:String refers to (StorageSystem:"listOutputEvent")
60
61     // Coupling operator
62     powerAdjustment_SmartComponent_1_out:Double refers to (CouplingOperator:"
63     powerAdjustment_SmartComponent_1_out")
64     powerAdjustment_SmartComponent_2_out:Double refers to (CouplingOperator:"
65     powerAdjustment_SmartComponent_2_out")
66     powerAdjustment_SmartComponent_3_out:Double refers to (CouplingOperator:"
67     powerAdjustment_SmartComponent_3_out")
68     powerAdjustment_SmartComponent_4_out:Double refers to (CouplingOperator:"
69     powerAdjustment_SmartComponent_4_out")
70     listInputEvent_couplingModule:String refers to (CouplingOperator:"
71     listInputEvent")
72     listOutputEvent_couplingModule:String refers to (CouplingOperator:"
73     listOutputEvent")
74
75     // Couplage Maison operateur de couplage
76     {SmartHouse."powerAdjustment" -> CouplingOperator."powerAdjustment_SmartComponent_1"
77     }
78     {CouplingOperator."powerAdjustment_SmartComponent_1_out" -> SmartHouse."Pow1"}
79
80     // Couplage Source operateur de couplage
```

```

75     {SmartSource."powerAdjustment" -> CouplingOperator."powerAdjustment_SmartComponent_2
76         "}
77     {CouplingOperator."powerAdjustment_SmartComponent_2_out" -> SmartSource."
78         powerInstruction"}
79     // Couplage Stockage operateur de couplage
80     {StorageSystem."powerAdjustment" -> CouplingOperator."
81         powerAdjustment_SmartComponent_3"}
82     {CouplingOperator."powerAdjustment_SmartComponent_3_out" -> StorageSystem."
83         powerInstruction"}
84     // Third component : CSV load
85     {SmartHome."powerAdjustment" -> CouplingOperator."powerAdjustment_SmartComponent_4"}
86     {CouplingOperator."powerAdjustment_SmartComponent_4_out" -> SmartHome."
87         powerInstruction"}
88
89 information
90     description "Quatre composants dont un systeme de stockage"
91
92 simulator
93     simulation variables
94         stopTime:169200. refers to (SmartHouse:"stopTime") (CouplingOperator:"
95             stopTime")(SmartSource:"stopTime")(SmartHome:"stopTime")(StorageSystem:"
96                 stopTime")
97         timeStep:120. refers to (SmartHouse:"timeStep")(StorageSystem:"timeStep") //
98             Time step for the House simulation

```

Dans les couplages internes, seules les noms des ports d'entrées et de sorties sont modifiés mais n'ajoutent aucune ligne. Avec des noms génériques, seul le chemin d'accès serait à modifier pour la modification d'un composant.

DESCRIPTION DU MULTI-MODÈLE 6.18 (HIÉRARCHISATION)

La dernière description est celle du multi-modèle 6.18, présentée au chapitre 6. Il s'agit de la construction hiérarchique de modèles.

```

1 multimodel reseauAutonome_PoC1
2 submodels
3     name SmartIndividualHouse_1 path "Library/MultiModel/maisonAutonome_PoC_Composition.
4         xml"
5     name SmartIndividualHouse_2 path "Library/MultiModel/maisonAutonome_PoC_Composition.
6         xml"
7     name SmartIndividualHouse_3 path "Library/MultiModel/maisonAutonome_PoC_Composition.
8         xml"
9     name SmartIndividualHouse_4 path "Library/MultiModel/maisonAutonome_PoC_Composition.
10        xml"
11    name StorageSystem path "Library/Basic/SmartStorageSystem_PoC3.xml"
12
13    name CouplingOperator path "Library/Basic/CouplingModule.xml"
14
15 interface
16     parameters
17         // SmartIndividualHouse_1
18         maxTemp1:297.15 refers to (SmartIndividualHouse_1:"maxTemp1")
19         minTemp1:295.15 refers to (SmartIndividualHouse_1:"minTemp1")
20         Temp1:298.15 refers to (SmartIndividualHouse_1:"Temp1")
21
22         maxPow1:100. refers to (SmartIndividualHouse_1:"maxPow1")
23
24         // SmartIndividualHouse_2
25         maxTemp2:296.15 refers to (SmartIndividualHouse_2:"maxTemp1")
26         minTemp2:294.15 refers to (SmartIndividualHouse_2:"minTemp1")
27         Temp2:298.15 refers to (SmartIndividualHouse_2:"Temp1")
28
29         maxPow2:100. refers to (SmartIndividualHouse_2:"maxPow1")
30
31         // SmartIndividualHouse_3

```



```
28     maxPow3:120. refers to (SmartIndividualHouse_3:"maxPow1")
29
30     // SmartIndividualHouse_4
31     maxPow4:130. refers to (SmartIndividualHouse_4:"maxPow1")
32
33     nbInput:5 refers to (CouplingOperator:"nbInput")
34
35     outputs
36     T_in3:Double refers to (SmartIndividualHouse_3:"T1")
37     T_in4:Double refers to (SmartIndividualHouse_4:"T1")
38
39     // Modele physique de la premiere maison
40     T_in1:Double refers to (SmartIndividualHouse_1:"T1")
41     T_out1:Double refers to (SmartIndividualHouse_1:"temp")
42     pClim1:Double refers to (SmartIndividualHouse_1:"Pow1_clim")
43
44     // Modele informationnel de la premiere maison
45     InputEvent_house1:String refers to (SmartIndividualHouse_1:"
46         listInputEvent_couplingModule")
47     OutputEvent_house1:String refers to (SmartIndividualHouse_1:"
48         listOutputEvent_couplingModule")
49     balanceMeasured1:Double refers to (SmartIndividualHouse_1:"balanceMeasured")
50
51     // Modele physique de la premiere maison
52     T_in2:Double refers to (SmartIndividualHouse_2:"T1")
53     T_out2:Double refers to (SmartIndividualHouse_2:"temp")
54     pClim2:Double refers to (SmartIndividualHouse_2:"Pow1_clim")
55
56     // Modele informationnel de la seconde maison
57     InputEvent_house2:String refers to (SmartIndividualHouse_2:"
58         listInputEvent_couplingModule")
59     OutputEvent_house2:String refers to (SmartIndividualHouse_2:"
60         listOutputEvent_couplingModule")
61     balanceMeasured2:Double refers to (SmartIndividualHouse_2:"balanceMeasured")
62
63     InputEvent_house3:String refers to (SmartIndividualHouse_3:"
64         listInputEvent_couplingModule")
65     OutputEvent_house3:String refers to (SmartIndividualHouse_3:"
66         listOutputEvent_couplingModule")
67     balanceMeasured3:Double refers to (SmartIndividualHouse_3:"balanceMeasured")
68
69     InputEvent_house4:String refers to (SmartIndividualHouse_4:"
70         listInputEvent_couplingModule")
71     OutputEvent_house4:String refers to (SmartIndividualHouse_4:"
72         listOutputEvent_couplingModule")
73     balanceMeasured4:Double refers to (SmartIndividualHouse_4:"balanceMeasured")
74
75     // Storage
76     SoC:Double refers to (StorageSystem:"SoC")
77     hydrogenFlow:Double refers to(StorageSystem:"hydrogenFlow")
78     powerMode:Double refers to(StorageSystem:"powerMode")
79     powerAdjustment_storage:Vector<Double> refers to (StorageSystem:"
80         powerAdjustment")
81     listInputEvent_storage :String refers to (StorageSystem:"listInputEvent")
82     listOutputEvent_storage:String refers to (StorageSystem:"listOutputEvent")
```

```

73
74 // Coupling operator
75 powerAdjustment_SmartComponent_1_out:Double refers to (CouplingOperator:"
    powerAdjustment_SmartComponent_1_out")
76 powerAdjustment_SmartComponent_2_out:Double refers to (CouplingOperator:"
    powerAdjustment_SmartComponent_2_out")
77 powerAdjustment_SmartComponent_3_out:Double refers to (CouplingOperator:"
    powerAdjustment_SmartComponent_3_out")
78 powerAdjustment_SmartComponent_4_out:Double refers to (CouplingOperator:"
    powerAdjustment_SmartComponent_4_out")
79 powerAdjustment_SmartComponent_5_out:Double refers to (CouplingOperator:"
    powerAdjustment_SmartComponent_5_out")
80 listInputEvent_couplingModule:String refers to (CouplingOperator:"
    listInputEvent")
81 listOutputEvent_couplingModule:String refers to (CouplingOperator:"
    listOutputEvent")
82
83 internal couplings
84 // Couplage Maison operateur de couplage
85 {SmartIndividualHouse_1."powerAdjustment_Compo" -> CouplingOperator."
    powerAdjustment_SmartComponent_1"}
86 {CouplingOperator."powerAdjustment_SmartComponent_1_out" -> SmartIndividualHouse_1."
    powerInstruction"}
87
88 // Couplage Source operateur de couplage
89 {SmartIndividualHouse_2."powerAdjustment_Compo" -> CouplingOperator."
    powerAdjustment_SmartComponent_2"}
90 {CouplingOperator."powerAdjustment_SmartComponent_2_out" -> SmartIndividualHouse_2."
    powerInstruction"}
91
92 // Couplage Stockage operateur de couplage
93 {StorageSystem."powerAdjustment" -> CouplingOperator."
    powerAdjustment_SmartComponent_3"}
94 {CouplingOperator."powerAdjustment_SmartComponent_3_out" -> StorageSystem."
    powerInstruction"}
95
96 // Couplage Source operateur de couplage
97 {SmartIndividualHouse_3."powerAdjustment_Compo" -> CouplingOperator."
    powerAdjustment_SmartComponent_4"}
98 {CouplingOperator."powerAdjustment_SmartComponent_4_out" -> SmartIndividualHouse_3."
    powerInstruction"}
99
100 // Couplage Source operateur de couplage
101 {SmartIndividualHouse_4."powerAdjustment_Compo" -> CouplingOperator."
    powerAdjustment_SmartComponent_5"}
102 {CouplingOperator."powerAdjustment_SmartComponent_5_out" -> SmartIndividualHouse_4."
    powerInstruction"}
103
104
105 information
106     description "Composition"
107
108 simulator
109     simulation variables

```

```
110     stopTime:169200. refers to (SmartIndividualHouse_1:"stopTime") (
        SmartIndividualHouse_2:"stopTime")(CouplingOperator:"stopTime")(
        StorageSystem:"stopTime")
111     timeStep:120. refers to (SmartIndividualHouse_1:"timeStep")(
        SmartIndividualHouse_2:"timeStep")(StorageSystem:"timeStep")
112     minPropagationDelay1:0.2 refers to (SmartIndividualHouse_1:"
        minPropagationDelay")
113     minPropagationDelay3:0.4 refers to (SmartIndividualHouse_2:"
        minPropagationDelay")
```

Ici, il faut noter que cette description ressemble aux niveaux des couplages, à celles données précédemment en annexes C et D. Pourtant chacun des composants hormis le système de stockage, est déjà un microréseau, composé d'une habitation régulée et d'une source de production dont la description initiale est donnée en annexe B.

En fait, chacun des éléments de multi-modèle a déjà été utilisée dans un précédent modèles couplés. Seuls les paramètres ont été modifiés (température de confort des habitations en particulier).

BIBLIOGRAPHIE

- [CRE, 2021] (2021). Le concept de microréseau.
- [Albano et al., 2015] Albano, M., Ferreira, L. L., and Pinho, L. M. (2015). Convergence of Smart Grid ICT Architectures for the Last Mile. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(1) :187–197. Conference Name : IEEE Transactions on Industrial Informatics.
- [Albouys-Perrois, 2021] Albouys-Perrois, J. (2021). *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*. PhD thesis, Université de La Rochelle.
- [Bacci et al., 2016] Bacci, G., Lasaulce, S., Saad, W., and 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.
- [Benahmed, 2021] Benahmed, S. (2021). *Distributed cooperative control for DC microgrids*. Theses, Université de Lorraine.
- [Bliudze et al., 2019] Bliudze, S., Furic, S., Sifakis, J., and Viel, A. (2019). Rigorous design of cyber-physical systems. *Software & Systems Modeling*, 18(3) :1613–1636.
- [Blochwitz et al., 2011] Blochwitz, T., Otter, M., Arnold, M., Bausch, C., Clauß, C., Elmqvist, H., Junghanns, A., Mauss, J., Monteiro, M., Neidhold, T., and others (2011). The Functional Mockup Interface for tool independent exchange of simulation models. In *Proceedings of the 8th International Modelica Conference*, pages 105–114. Linköping University Press.
- [Bryant, 1979] Bryant, R. E. (1979). Simulation on a distributed system. In *Proc. of the 16th Design Automation Conference*, pages 544–552.
- [Camus, 2015] Camus, B. (2015). Environnement Multi-agent pour la Multi-modélisation et Simulation des Systèmes Complexes. page 148.
- [Chandy and Misra, 1979] Chandy, K. M. and Misra, J. (1979). Distributed simulation : A case study in design and verification of distributed programs. *IEEE Transactions on software engineering*, (5) :440–452.
- [Chowdhury et al., 2009] Chowdhury, S., Chowdhury, S. P., and Crossley, P. (2009). *Microgrids and active distribution networks*. Number 6 in IET renewable energy series. Institution of Engineering and Technology, Stevenage. OCLC : ocn318673357.
- [Cuenca et al., 2017] Cuenca, J., Larrinaga, F., and Curry, E. (2017). A unified semantic ontology for energy management applications. page 12.

- [Dahmann, 1999] Dahmann, J. S. (1999). The High Level Architecture and beyond : technology challenges. In *Proceedings of the thirteenth workshop on Parallel and distributed simulation*, pages 64–70. IEEE Computer Society.
- [Davis and Anderson, 2004] Davis, P. K. and Anderson, R. H. (2004). Improving the composability of dod models and simulations. *The Journal of Defense Modeling and Simulation*, 1(1) :5–17.
- [Docquier, 2021] Docquier, T. (2021). *Méthodologies pour l'évaluation de performances d'architectures réseaux smart grids*. PhD thesis, Université de Lorraine.
- [Docquier et al., 2019] Docquier, T., Song, Y.-Q., Chevrier, V., Pontnau, L., and Ahmed-Nacer, A. (2019). Generating substation network simulations from substation configuration description files. In *13th Junior Researcher Workshop on Real-Time Computing (JRWRTC)*.
- [Duboz et al., 2012] Duboz, R., Bonté, B., and Quesnel, G. (2012). Vers une spécification des modèles de simulation de systèmes complexes. *Stud. Inform. Univ.*, 10(1) :7–37.
- [Faschang et al., 2013] Faschang, M., Kupzog, F., Mosshammer, R., and Einfalt, A. (2013). Rapid control prototyping platform for networked smart grid systems. In *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, page 8172–8176.
- [Ferber, 1997] Ferber, J. (1997). Les systemes multi-agents : un aperçu general. *Technique Et Science Informatiques - TSI*, 16 :79–1012.
- [Fishwick and Zeigler, 1992] Fishwick, P. A. and Zeigler, B. P. (1992). A multimodel methodology for qualitative model engineering. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 2(1) :52–81.
- [Fritzson and Engelson, 1998] Fritzson, P. and Engelson, V. (1998). Modelica – A Unified Object-Oriented Language for System Modeling and Simulation. In *In Proceedings of European Conference on Object-Oriented Programming (eoop98)*, pages 67–90. Springer-Verlag.
- [Gomes et al., 2018] Gomes, C., Thule, C., Broman, D., Larsen, P. G., and Vangheluwe, H. (2018). Co-Simulation : A Survey. *ACM Computing Surveys*, 51(3) :1–33.
- [Grandjean, 2013] Grandjean, A. (2013). *Introduction de non linéarités et de non stationnarités dans les modèles de représentation de la demande électrique résidentielle*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [Guegan and Orgerie, 2019] Guegan, L. and Orgerie, A.-C. (2019). Estimating the end-to-end energy consumption of low-bandwidth iot applications for wifi devices. In *2019 IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom)*, page 287–294.
- [Guérard, 2014] Guérard, G. (2014). *Optimisation de la diffusion de l'énergie dans les smart-grids*. PhD thesis, Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines.
- [Guilbert and Scipioni, 2018] Guilbert, D. and Scipioni, A. (2018). Validation expérimentale d'un modèle dynamique électrique d'un électrolyseur de type pem pour des applications électronique de puissance. *Symposium de Génie Electrique*, page 7.
- [Hammad et al., 2019] Hammad, E., Ezeme, M., and Farraj, A. (2019). Implementation and development of an offline co-simulation testbed for studies of power systems cyber security and control verification. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 104 :817–826.
- [Huraux, 2015] 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*. PhD thesis, UPMC-Paris 6 Sorbonne Universités.

-
- [Huraux et al., 2015] Huraux, T., Sabouret, N., Haradji, Y., and Sempé, F. (2015). Simulations multi-agents de l'activité humaine : application dans le contexte énergétique résidentiel français. *Applications Pratiques de l'Intelligence Artificielle (APIA)*.
- [José Manuel Galán, 2009] José Manuel Galán, L. R. I. (2009). Errors and Artefacts in Agent-Based Modelling. Publisher : JASSS.
- [Kiehadrouinezhad et al., 2022] Kiehadrouinezhad, M., Merabet, A., Abo-Khalil, A. G., Salameh, T., and Ghenai, C. (2022). Intelligent and optimized microgrids for future supply power from renewable energy resources : A review. *Energies*, 15(99) :3359.
- [Kounev et al., 2015] Kounev, V., Tipper, D., Levesque, M., Grainger, B. M., Mcdermott, T., and Reed, G. F. (2015). A microgrid co-simulation framework. In *2015 Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES)*, page 1–6. IEEE.
- [Kuhn, 1972] Kuhn, T. S. (1972). La structure des révolutions scientifiques.
- [Lara and Vangheluwe, 2002] Lara, J. d. and Vangheluwe, H. (2002). *AToM3 : A Tool for Multi-formalism and Meta-modelling*, volume 2306 of *Lecture Notes in Computer Science*, page 174–188. Springer Berlin Heidelberg.
- [Larsen et al., 2016] Larsen, P. G., Fitzgerald, J., Woodcock, J., Fritzson, P., Brauer, J., Kleijn, C., Lecomte, T., Pfeil, M., Green, O., Basagiannis, S., and et al. (2016). Integrated tool chain for model-based design of cyber-physical systems : The into-cps project. In *2016 2nd International Workshop on Modelling, Analysis, and Control of Complex CPS (CPS Data)*, page 1–6. IEEE.
- [Li et al., 2019] Li, B., Roche, R., Paire, D., and Miraoui, A. (2019). A price decision approach for multiple multi-energy-supply microgrids considering demand response. *Energy*, 167 :117–135.
- [Luu, 2014] Luu, N. A. (2014). *Control and management strategies for a microgrid*. PhD thesis, UNIVERSITÉ DE GRENOBLE.
- [López et al., 2019] López, C. D., Cvetković, M., van der Meer, A., and Palensky, P. (2019). *Co-simulation of Intelligent Power Systems*, page 99–119. Springer International Publishing, Cham.
- [Mengelkamp et al., 2018] Mengelkamp, E., Gartner, J., Rock, K., Kessler, S., Orsini, L., and Weinhardt, C. (2018). Designing microgrid energy markets : A case study : The brooklyn microgrid. *Applied Energy*, 210 :870–880.
- [Mets et al., 2014] Mets, K., Ojea, J. A., and Develder, C. (2014). Combining power and communication network simulation for cost-effective smart grid analysis. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 16(3) :1771–1796.
- [Minsky, 1965] Minsky, M. (1965). Matter, Mind and Models.
- [Momoh, 2009] Momoh, J. A. (2009). Smart grid design for efficient and flexible power networks operation and control. In *2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, page 1–8.
- [Morse, 2004] Morse, K. (2004). Data and metadata requirements for composable mission space environments. In *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference, 2004.*, volume 1, page 278.
- [Müller and Diallo, 2012] Müller, J. P. and Diallo, A. (2012). Vers une méthode multi-point de vue de modélisation multi-agent. Cepaduès.

- [Palensky et al., 2017] Palensky, P., van der Meer, A., Lopez, C., Joseph, A., and Pan, K. (2017). Applied cosimulation of intelligent power systems : Implementing hybrid simulators for complex power systems. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 11(2) :6–21.
- [Paris, 2019] Paris, T. (2019). *Modélisation de Systèmes Complexes par Composition : Une démarche hiérarchique pour la co-simulation de composants hétérogènes*. Theses, Université de Lorraine. Issue : 2019LORR0035.
- [Paris et al., 2019] Paris, T., Wiart, J.-B., Netter, D., and Chevrier, V. (2019). Teaching co-simulation basics through practice. In *Proceedings of the 2019 Summer Simulation Conference*, page 31. Society for Computer Simulation International.
- [Paul et al., 2010] Paul, D., Ela, E., Kirby, B., and Milligan, M. (2010). The role of energy storage with renewable electricity generation. Technical report, Technical report NREL/TP-6A2-47187. National Renewable Energy Laboratory
- [Perrois et al., 2021] Perrois, J. A., Sabouret, N., Haradji, Y., Schumann, M., Charrier, B., and Inard, C. (2021). Étude de différentes configurations d’autoconsommation collective de l’énergie à l’échelle du quartier à l’aide de la simulation multi-agent. page 11.
- [Petty and Weisel, 2003] Petty, M. D. and Weisel, E. W. (2003). A composability lexicon.
- [Plessis et al., 2014a] Plessis, G., Kaemmerlen, A., and Lindsay, A. (2014a). BuildSysPro a Modelica library for modelling buildings and energy systems. pages 1161–1169.
- [Plessis et al., 2014b] Plessis, G., Kaemmerlen, A., and Lindsay, A. (2014b). Buildsyspro : a modelica library for modelling buildings and energy systems. page 1161–1169.
- [Polleux et al., 2022] Polleux, L., Guerassimoff, G., Marmorat, J.-P., Sandoval-Moreno, J., and Schuhler, T. (2022). An overview of the challenges of solar power integration in isolated industrial microgrids with reliability constraints. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155 :111955.
- [Post, 2021] Post, S. ((accessed July 14, 2021)). Énergies renouvelables : en 2020, l’Europe a basculé. <https://sciencepost.fr/2020-europe-energies-renouvelables/>.
- [Ramat, 2006] Ramat, E. (2006). Introduction à la simulation : principaux concepts.
- [Rehtanz and Guillaud, 2016] Rehtanz, C. and Guillaud, X. (2016). Real-time and co-simulations for the development of power system monitoring, control and protection. In *2016 Power Systems Computation Conference (PSCC)*, page 1–20.
- [Reynaud et al., 2017] Reynaud, Q., François, S., Haradji, Y., and Sabouret, N. (2017). Simuler l’activité humaine en combinant un système multi-agent avec des approches statistiques basées sur les «enquêtes emploi du temps». In *Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA 2017)*.
- [Salameh et al., 2015] Salameh, K., Chbeir, R., Camblong, H., Tekli, G., and Vechiu, I. (2015). *A Generic Ontology-Based Information Model for Better Management of Microgrids*, volume 458 of *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, page 451–466. Springer International Publishing, Cham.
- [Sargent, 2013] Sargent, R. G. (2013). Verification and validation of simulation models. *Journal of simulation*, 7(1) :12–24.
- [Sarjoughian, 2006] Sarjoughian, H. S. (2006). Model composability. In *Proceedings of the 38th conference on Winter simulation*, pages 149–158. Winter Simulation Conference.

-
- [Schloegl et al., 2015] Schloegl, F., Rohjans, S., Lehnhoff, S., Velasquez, J., Steinbrink, C., and Palensky, P. (2015). Towards a classification scheme for co-simulation approaches in energy systems. In *2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST)*, pages 516–521.
- [Schütte et al., 2011] Schütte, S., Scherfke, S., and Tröschel, M. (2011). Mosaik : A framework for modular simulation of active components in smart grids. In *2011 IEEE First International Workshop on Smart Grid Modeling and Simulation (SGMS)*, pages 55–60. IEEE.
- [Sdanghi, 2019] Sdanghi, G. (2019). *Développement d'un compresseur hybride d'hydrogène : électrochimique à basse pression/ adsorption à haute pression*. PhD thesis, Université de Lorraine.
- [Shayeghi et al., 2019] Shayeghi, H., Shahryari, E., Moradzadeh, M., and Siano, P. (2019). A survey on microgrid energy management considering flexible energy sources. *Energies*, 12(11) :2156.
- [Siebert, 2011] Siebert, J. (2011). Approche multi-agent pour la multi-modélisation et le couplage de simulations : application à l'étude des influences entre le fonctionnement des réseaux ambiants et le comportement de leurs utilisateurs. page 155.
- [Singh et al., 2021] Singh, A., Singh, K. K., Rathore, R., and Rai, S. (2021). Review of hydrogen-based energy storage techniques. page 7.
- [Singla et al., 2021] Singla, M. K., Nijhawan, P., and Oberoi, A. S. (2021). Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future : a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(13) :15607–15626.
- [Stadler et al., 2016] Stadler, M., Cardoso, G., Mashayekh, S., Forget, T., DeForest, N., Agarwal, A., and Schönbein, A. (2016). Value streams in microgrids : A literature review. *Applied Energy*, 162 :980–989.
- [Steinbrink et al., 2018] Steinbrink, C., van der Meer, A. A., Cvetkovic, M., Babazadeh, D., Rohjans, S., Palensky, P., and Lehnhoff, S. (2018). Smart grid co-simulation with mosaik and hla : A comparison study. *Computer Science - Research and Development*, 33(1–2) :135–143. arXiv : 1811.06877.
- [Taylor et al., 2013] Taylor, S. J., Khan, A., Morse, K. L., Tolk, A., Yilmaz, L., and Zander, J. (2013). Grand challenges on the theory of modeling and simulation. In *SpringSim (TMS-DEVS)*, page 34.
- [Tolk et al., 2007] Tolk, A., Diallo, S. Y., and Turnitsa, C. D. (2007). Applying the levels of conceptual interoperability model in support of integratability, interoperability, and composability for system-of-systems engineering. 5(5) :11.
- [Tolk and Muguira, 2003] Tolk, D. A. and Muguira, J. A. (2003). The levels of conceptual interoperability model. In *in '2003 Fall Simulation Interoperability Workshop*.
- [Tong et al., 2017] Tong, H., Luo, J., Ni, M., Li, Y., Xue, Y., and Wei, Y. (2017). Global status event-based iterative co-simulation framework for power and communication. In *Power & Energy Society General Meeting, 2017 IEEE*, pages 1–6. IEEE.
- [Vangheluwe, 2000] Vangheluwe, H. (2000). Devs as a common denominator for multi-formalism hybrid systems modelling. In *CACSD. Conference Proceedings. IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design (Cat. No.00TH8537)*, page 129–134. IEEE.
- [Vangheluwe et al., 2002] Vangheluwe, H., De Lara, J., and Mosterman, P. J. (2002). An introduction to multi-paradigm modelling and simulation. In *Proceedings of the AIS'2002 conference (AI, Simulation and Planning in High Autonomy Systems), Lisboa, Portugal*, pages 9–20.

- [Varga and Hornig, 2008a] Varga, A. and Hornig, R. (2008a). AN OVERVIEW OF THE OMNeT++ SIMULATION ENVIRONMENT. In *Proceedings of the First International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications Networks and Systems*, Marseille, France. ICST.
- [Varga and Hornig, 2008b] Varga, A. and Hornig, R. (2008b). An overview of the omnet++ simulation environment. In *Proceedings of the First International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications Networks and Systems*, Marseille, France. ICST.
- [Vaubourg et al., 2015] Vaubourg, J., Presse, Y., Camus, B., Bourjot, C., Ciarletta, L., Chevrier, V., Tavella, J.-P., Morais, H., Deneuille, B., and Chilard, O. (2015). Smart grids simulation with mecsyco. In *International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems*, pages 320–323. Springer.
- [Vaubourg et al.,] Vaubourg, J., Presse, Y., Camus, B., and Ciarletta, L. Simulation de smart grids avec mecsyco. page 3.
- [Vogt et al., 2018] Vogt, M., Marten, F., and Braun, M. (2018). A survey and statistical analysis of smart grid co-simulations. *Applied energy*, 222 :67–78.
- [Wainer et al., 2011] Wainer, G. A., Al-Zoubi, K., Hill, D. R. C., Mittal, S., Martín, J. L. R., Sarjoughian, H., Touraille, L., Traoré, M. K., and Zeigler, B. P. (2011). *An Introduction to DEVS Standardization*. CRC Press.
- [Yilmaz and Ören, 2004] Yilmaz, L. and Ören, T. (2004). Dynamic Model Updating in Simulation with Multimodels : A Taxonomy and a Generic Agent-Based Architecture. *Simulation Series*, page 6.
- [Zacharewicz, 2006] Zacharewicz, G. (2006). A g-devs / hla environment : Application to distributed modelling and simulation of workflow.
- [Zeigler et al., 2000] Zeigler, B., Prähofer, H., and Kim, T. G. (2000). Theory of Modeling and Simulation : Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems. 2.
- [Zeigler, 2006] Zeigler, B. P. (2006). Embedding dev&dess in devs. page 18.
- [Zeigler et al., 2018] Zeigler, B. P., Muzy, A., and Kofman, E. (2018). *Theory of modeling and simulation : discrete event & iterative system computational foundations*. Academic press.
- [Zeigler and Sarjoughian, 2002] Zeigler, B. P. and Sarjoughian, H. S. (2002). Implications of M&S foundations for the V&V of large scale complex simulation models. In *Proceedings of the Foundations for V&V in the 21st Century Workshop, Laurel, MD*. Citeseer.
- [Zeigler et al., 2013] Zeigler, B. P., Sarjoughian, H. S., Duboz, R., and Soulie, J.-C. (2013). *Guide to modeling and simulation of systems of systems*. Springer.

Résumé

Le contexte de cette thèse s'intègre dans une démarche de modélisation et simulation de micro-réseaux. Financée par le projet LUE ULHyS, programme de recherche multidisciplinaire sur les technologies de l'hydrogène et des piles à combustible, des matériaux innovants pour les PEM-FC à l'économie de l'hydrogène et à l'ergonomie prospective, la thèse a proposé un cadre multi-disciplinaire dont le sujet porte sur l'étude par co-simulation des échanges d'énergies dans les micro-réseaux.

La modélisation des micro-réseaux multi-sources multi-porteurs impose de décrire le système comme l'intégration de sous-systèmes hétérogènes en interaction. Sa simulation consiste à gérer la synchronisation des simulateurs hétérogènes ainsi que l'échange de données entre eux. Mecsyco (Multi-agent Environment for Complex SYstem CO-simulation - mecsyco.fr) a démontré sa capacité à aborder rigoureusement ces questions. Les enjeux se situent, non plus aux niveaux formel et logiciel, mais sur l'aspect sémantique. Actuellement, la montée en compétence des experts en micro-réseaux sur des problématiques informatique, des principes d'intégration de formalisme, etc. pour pouvoir concevoir eux-mêmes des modèles de micro-réseaux et les simuler les détourne de leur objectif initial, prend du temps et peut potentiellement introduire de graves erreurs. Le défi réside dans l'intégration dans une démarche de co-simulation, au niveau sémantique, des hétérogénéités spécifiques à l'étude des échanges d'énergies dans un micro-réseau.

Cette thèse propose des concepts et des composants logiciels (outils logiciels connexes en relation avec mecsyco) adaptés aux experts en micro-réseaux pour combler le fossé entre les exigences conceptuelles et la simulation de micro-réseaux multi-sources et multi-porteurs. Les travaux définissent deux concepts permettant la représentation des micro-réseaux dans une démarche de co-simulation modulaire et hiérarchique à tout les niveaux de la modélisation et simulation : les smart-composants d'abord, caractéristique informationnel des composants effectuant des opérations physiques (consommer, produire, stocker) sur l'énergie ; l'opérateur de couplage ensuite, objet de la réification de la stratégie de gestion du réseau, collectant les informations et permettant le calcul d'une nouvelle répartition de l'énergie garantissant l'équilibrage du réseau.

L'évaluation du travail se fait à travers un exemple itératif de simulation d'un éco-quartier dans laquelle nous illustrons les propriétés d'intégration modulaire de modèles et de hiérarchisation à tout les niveaux de la démarche de co-simulation.

Mots-clés: co-simulation

Abstract

The context of this thesis is part of a microgrid modelling and simulation approach. Funded by the LUE ULHyS project, a multidisciplinary research programme on hydrogen and fuel cell technologies, from innovative materials for PEM-FCs to hydrogen economics and prospective ergonomics, the thesis proposed a multi-disciplinary framework for the study of energy exchanges in microgrids by co-simulation.

The modeling of multi-source, multi-carrier microgrids requires the system to be described as the integration of interacting heterogeneous subsystems. Its simulation consists in managing the synchronisation of heterogeneous simulators and the exchange of data between them. Mecsyco (Multi-agent Environment for Complex SYstem CO-simulation - mecsyco.fr) has demonstrated its ability to rigorously address these issues. The challenges are no longer at the formal and software levels, but on the semantic aspect. Currently, the need for microgrid experts to become more competent in computer science, formalism integration principles, etc. in order to be able to design microgrid models and simulate them themselves diverts them from their initial objective, takes time and can potentially introduce serious errors. The challenge lies in the integration of the heterogeneities specific to the study of energy exchanges in a microgrid into a co-simulation approach, at the semantic level.

This thesis proposes concepts and software components (related software tools in relation with mecpsyco) adapted to microgrid experts to bridge the gap between conceptual requirements and the simulation of multi-source and multi-carrier microgrids. The work defines two concepts allowing the representation of microgrids in a modular and hierarchical co-simulation approach at all levels of modelling and simulation : the informationnal components first, informational characteristic of the components performing physical operations (consume, produce, store) on energy ; the coupling operator second, object of the reification of the network management strategy, collecting information and allowing the calculation of a new energy distribution guaranteeing the network balancing.

The evaluation of the work is done through an iterative example of simulation of an eco-neighbourhood in which we illustrate the properties of modular integration of models and hierarchisation at all levels of the co-simulation approach. We also illustrate the visualisation capabilities of the results through the automated R reports, newly integrated to the Mecpsyco middleware.

Keywords: co-simulation.

