



**HAL**  
open science

# Approche à base d'agents pour l'ingénierie et le contrôle de micro-réseaux

Gillian Basso

► **To cite this version:**

Gillian Basso. Approche à base d'agents pour l'ingénierie et le contrôle de micro-réseaux. Ordinateur et société [cs.CY]. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2013. Français. NNT : 2013BELF0221 . tel-00982342

**HAL Id: tel-00982342**

**<https://theses.hal.science/tel-00982342>**

Submitted on 23 Apr 2014

**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.

# SPIM

## Thèse de Doctorat



école doctorale sciences pour l'ingénieur et microtechniques

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE BELFORT-MONTBÉLIARD

Approche à base d'agents pour  
l'ingénierie et le contrôle de  
microréseaux

■ GILLIAN BASSO



# SPIM

## Thèse de Doctorat



école doctorale sciences pour l'ingénieur et microtechniques  
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE BELFORT-MONTBÉLIARD

N° | P | h | D | - | 2 | 0 | 1 | 3 | - | 0 | 1 |

THÈSE présentée par

**GILLIAN BASSO**

pour obtenir le

Grade de Docteur de

l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

Spécialité : **Informatique**

# Approche à base d'agents pour l'ingénierie et le contrôle de microréseaux

Soutenue publiquement le 09 décembre 2013 devant le Jury composé de :

ABDERRAFIÀA KOUKAM	Président	Professeur des Universités, UTBM
PIERRE COLLET	Rapporteur	Professeur des Universités, Université de Strasbourg
CYRIL FONLUPT	Rapporteur	Professeur des Universités, Université du Littoral Côte d'Opale
LHASSANE IDOUMGHAR	Examineur	Maître de Conférences-HDR, UHA
SEBASTIAN RODRIGUEZ	Examineur	Professeur des Universités, Universidad Tecnológica Nacional
VINCENT HILAIRE	Directeur de Thèse	Professeur des Universités, UTBM
FABRICE LAURI	Co-Directeur de Thèse	Maître de Conférences, UTBM



# REMERCIEMENTS

*Je tiens tout d'abord à remercier Abderrafiâa Koukam pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse.*

*Je remercie également Pierre Collet et Cyril Fonlupt pour avoir accepté de rapporter sur ce travail, les remarques que vous m'avez faites m'ont permis d'améliorer significativement ce document.*

*Je remercie aussi Lhassane Idoumghar et Sebastian Rodriguez pour avoir accepté de faire partie de mon jury.*

*Je ne peux également que remercier vivement Vincent Hilaire et Fabrice Lauri, mes directeurs de thèse, sans qui ces travaux n'auraient simplement pas pu se faire. Pour tout le temps que vous m'avez consacré, pour l'encadrement, la relecture, les réunions mais aussi pour les conversations scientifiques, ou non, que nous avons eues et qui m'ont été d'une grande aide durant ces 3 années, je vous dis un grand merci. J'espère que mon travail a pu répondre à vos attentes.*

*Mes collègues de bureau avec qui j'ai passé des moments très sympathiques, Achraf, Jonathan (Krishna) et Li Shi, Messieurs les docteurs, merci à vous.*

*Je tiens également à remercier Michael Schumacher et son équipe pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire, ces 5 semaines furent très agréables d'un point de vue personnel et m'ont beaucoup appris d'un point de vue professionnel.*

*Il est évident qu'un travail lors d'un doctorat est avant tout un travail d'équipe, et pour cela je veux dire un grand merci à Stéphane Galland et Nicolas Gaud pour leurs aides inestimables et nombreuses durant le développement de mes travaux, ainsi qu'à Arnaud Gaillard, Damien Paire et Robin Roche pour leur expertise côté énergie, mais également à Abdeljalil Abbas-Turki, Florian Béhe, Cédric Boittin, Jocelyn Buisson, Cindy Cappelle, Jean-Michel Contet, Baudouin Dafflon, Philippe Descamps, Madeleine El Zaher, Franck Gechter, Ariane Glatigny, Pablo Gruer, Olivier Lamotte, Alexandre Lombard, Julian Murgia, Florent Perronnet, Yassine Ruichek et Frédéric Zann avec qui j'ai pu avoir de nombreuses conversations, dont quelques unes, scientifiques.*

*Merci aux personnes avec qui j'ai pu collaborer dans le cadre scientifique ou associatif durant ces 3 années. Je pense notamment aux activités faites par Doceo, à l'événement IngéDoc, et aux différents conseils qui m'ont permis d'avoir une vision différente de la recherche.*

*Un fancy merci à Charly Legros, nos conversations passionnantes, tes musiques extraordinaires et tes "houete" de couloir m'ont vraiment offert des moments inoubliables.*

*Je voudrais aussi dire un grand merci Madame Ricord pour sa présence dès que j'avais besoin d'elle, mais aussi quand ce n'était pas le cas.*

*Enfin, je veux absolument remercier mes amis qui ont toujours trouvé du temps pour organiser quelque chose, ou simplement passer me voir, pour me changer les idées. Je ne peux nommer tout le monde mais je tiens à citer ceux avec qui j'ai pu passer le plus de temps : 2trèfle, 6pour5, Asable, Bido, Cash, Chachou, Chulie, Dameur, Detapi, Dyna, Efan, Émilie, Foif, Ki ?, Luidir, Marjo, Nyst, Onier, Ré-√, et tous les gens qui se reconnaîtront dans ces termes : "Merci !" et pour certains je rajouterai "Trisous !"*

*Je voudrais évidemment remercier toute ma famille, mon frère et sa famille grandissante, ma mère, mon père, oncles, tantes, cousins, cousines et grands-parents, qui m'ont toujours supporté durant mes longues années d'études.*

*Je terminerai par remercier toutes les personnes qui ont été auprès de moi et m'ont soutenu durant mes années d'études, ce document est l'aboutissement de toutes ces années et bien que vous ne soyez pas nommés directement dans ce document, j'ai bien évidemment une pensée pour vous.*

# SOMMAIRE

<b>I</b>	<b>Contexte</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
1.1	Contexte général . . . . .	3
1.2	Objectifs de ces travaux . . . . .	5
1.2.1	Cadre de comparaison des approches pour les smartgrids	6
1.2.2	Approche méthodologique pour le contrôle de smartgrids .	6
1.2.3	Modèle de stratégie de contrôle . . . . .	7
1.2.4	Simulateur de smartgrids . . . . .	7
1.3	Plan de la thèse . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Présentation et Définitions</b>	<b>9</b>
2.1	Introduction . . . . .	9
2.2	Les réseaux électriques . . . . .	9
2.2.1	Les réseaux électriques actuels . . . . .	9
2.2.2	Les futurs réseaux électriques intelligents . . . . .	11
2.3	Les microgrids . . . . .	14
2.4	Les smartgrids aujourd'hui . . . . .	15
2.5	Les approches multi-agents . . . . .	17
2.6	Les agents apprenants . . . . .	19
2.6.1	Apprentissage par renforcement mono-agent . . . . .	20
2.6.2	Apprentissage par renforcement multi-agents . . . . .	21
2.7	Discussions . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Un cadre pour la définition et l'évaluation des approches pour smart-grids</b>	<b>23</b>
3.1	Introduction . . . . .	23
3.2	La définition pour l'évaluation et le positionnement . . . . .	24
3.2.1	La dimension structurelle . . . . .	24



3.2.2	Les familles de problèmes . . . . .	25
3.3	Cadre d'évaluation . . . . .	27
3.3.1	L'approche environnementale . . . . .	27
3.3.2	Le critère économique . . . . .	28
3.3.3	La qualité de service . . . . .	29
3.3.4	L'intégration de l'humain . . . . .	30
3.4	Récapitulatif . . . . .	31
3.5	Évaluation . . . . .	31
3.5.1	GridAgent™ . . . . .	32
3.5.2	HOMEBOOTS . . . . .	32
3.5.3	IDAPS . . . . .	35
3.5.4	IDEAS PROJECT . . . . .	35
3.5.5	PowerMatcher . . . . .	37
3.6	Conclusion . . . . .	41

## **II Modélisation et Conception 43**

<b>4</b>	<b>Une approche méthodologique pour l'analyse et la conception de boucles de rétroaction 45</b>
4.1	Introduction . . . . . 45
4.2	Aperçu de l'approche . . . . . 46
4.2.1	Modèle influence/réaction . . . . . 46
4.2.2	Les automates combinatoires . . . . . 47
4.3	ASPECS . . . . . 48
4.3.1	Les concepts . . . . . 48
4.3.2	Les phases . . . . . 49
4.3.3	Les activités . . . . . 50
4.3.3.1	Description de l'ontologie de domaine . . . . . 50
4.3.3.2	Identification des organisations . . . . . 50
4.3.3.3	Identification des rôles et des interactions . . . . . 52
4.3.3.4	Description de scénarios . . . . . 52
4.3.3.5	Plan des rôles . . . . . 52
4.3.3.6	Identification des capacités . . . . . 53
4.4	Analyse des boucles de rétroaction . . . . . 54

4.4.1	Conceptualisation . . . . .	54
4.4.2	Identification des organisations . . . . .	56
4.4.3	Identification des rôles et des interactions . . . . .	57
4.4.4	Scénarios . . . . .	58
4.4.5	Identification de capacités . . . . .	58
4.5	Conclusion . . . . .	59
<b>5</b>	<b>Un modèle de gestion offre-demande dans un microgrid</b>	<b>61</b>
5.1	Introduction . . . . .	61
5.2	Présentation des problèmes de gestion d'un microgrid . . . . .	62
5.2.1	Ontologie du problème de durabilité dans un microgrid . . . . .	64
5.2.2	Mise en évidence des boucles de rétroaction . . . . .	66
5.2.3	Fréquences de décision . . . . .	67
5.3	Agentification des boucles de rétroaction . . . . .	67
5.3.1	Hypothèses de travail et notations . . . . .	67
5.3.2	Boucle offre-demande . . . . .	69
5.3.2.1	Système de gestion de la production . . . . .	69
5.3.2.2	Système de gestion de la consommation . . . . .	70
5.3.3	Boucle de stabilité . . . . .	73
5.3.3.1	Processus de décision pour la stabilité dans un microgrid . . . . .	74
5.4	Résultats expérimentaux . . . . .	80
5.5	Conclusion . . . . .	84
<b>III</b>	<b>Implémentation, Expérimentation et Résultats</b>	<b>89</b>
<b>6</b>	<b>Un simulateur multi-agents de microgrids</b>	<b>91</b>
6.1	Introduction . . . . .	91
6.2	Les simulateurs existants . . . . .	92
6.3	Les grands principes du simulateur . . . . .	93
6.3.1	Le modèle influence/réaction . . . . .	93
6.3.2	Agentification des smart grids . . . . .	94
6.3.3	Le modèle holonique . . . . .	96
6.4	Analyse organisationnelle du simulateur . . . . .	97

6.4.1	Ontologie de domaine . . . . .	97
6.4.2	Identification des organisations . . . . .	100
6.4.2.1	Identification des rôles et des interactions . . . . .	101
6.4.2.2	La gestion du temps dans l'organisation . . . . .	102
6.4.2.3	Intégration de l'organisation microgrid . . . . .	104
6.5	Expérimentations et premiers résultats . . . . .	106
6.5.1	Scénario . . . . .	106
6.5.2	Résultats . . . . .	107
6.6	Conclusion . . . . .	107
<b>7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>111</b>
7.1	Bilan des travaux . . . . .	111
7.2	Perspectives et travaux futurs . . . . .	113
7.2.1	Vers un contrôle multi-niveaux de réseaux électriques . . . . .	113
7.2.2	Vers un simulateur cyberphysique de réseaux électriques . . . . .	114

I

# CONTEXTE



# INTRODUCTION

## 1.1/ CONTEXTE GÉNÉRAL

La gestion des réseaux d'électricité est un défi majeur du 21<sup>e</sup> siècle. En effet, plusieurs objectifs, de manière concurrente, induisent un bouleversement. Le premier objectif est lié aux enjeux internationaux en matière d'économies d'énergies qui sont explicitement chiffrés aux niveaux français et européen :

- l'atteinte des objectifs de réduction d'émissions anthropiques de gaz à effet de serre aux horizons 2020 (réduction de 20 %) et 2050 (facteur 4), notamment au travers des programmes d'efficacité énergétique ;
- à minima, le respect des objectifs européens en matière d'intégration des énergies renouvelables (23 % de la consommation finale à l'horizon 2020) et d'amélioration de l'efficacité énergétique aux horizons 2020 et au-delà.

Le deuxième objectif, lié à la qualité de service, est le maintien d'un niveau élevé de qualité de fourniture d'électricité et de sécurité du système électrique (équilibre offre – demande), notamment dans des objectifs de compétitivité pour les secteurs électro-intensifs et de service public pour les usagers individuels.

Ce défi est complexe pour deux raisons. D'une part à cause de la nécessité de bâtir sur un existant, inadapté pour une gestion efficace, en matière d'installations de production d'électricité et d'équipement de consommation. D'autre part, à cause de la transition vers de nouveaux dispositifs pour la gestion de l'électricité, qui peuvent nécessiter des investissements lourds.

Le troisième objectif est la prise en compte des nouveaux usages et usagers. Des exemples de nouveaux usages sont l'accroissement des besoins énergétiques, l'intégration des véhicules électriques et le besoin de modernisation du réseau électrique, actuellement fortement centralisé. Ce dernier élément constitue un des objectifs indispensables pour l'intégration des EnR (Énergies Renouvelables) naturellement distribuées dont l'implantation n'est pas sans poser un certain nombre d'obstacles, autres que purement technologiques.

Parmi ces nouvelles sources de production (EnR), on peut citer les panneaux photovoltaïques ou les éoliennes. Ces nouvelles sources sont les plus connues et les plus déployées, mais il existe aussi d'autres sources d'énergie renouvelables comme l'énergie hydraulique, déjà fortement utilisée en tant que centrales

hydroélectriques. D'autant plus que de nouvelles utilisations apparaissent comme les centrales marémotrices utilisant l'énergie des marées, les hydroliennes utilisant les courants marins ou encore les centrales houlomotrices utilisant l'énergie des vagues. De plus, la géothermie, l'énergie calorifique extraite de la Terre, est également un nouveau système de production d'énergie électrique en plein développement, bien que principalement utilisée pour le chauffage des bâtiments. Enfin, l'hydrogène est une nouvelle source, en terme d'utilisation, pouvant apporter une quantité importante d'énergie. Ces nouveaux générateurs d'énergie sont à la base de la transition énergétique permettant de diminuer la part des énergies fossiles (ou plus généralement des énergies non renouvelables) dans la production d'énergie, en intégrant un grand nombre de productions d'énergies différentes. Dans [Ramchurn et al., 2011c], les auteurs détaillent les problèmes soulignés par les évolutions possibles des réseaux électriques, tels que la gestion de la demande ("*demand-side management*"), l'intégration des véhicules électriques ou hybrides ou encore les nouveaux types (et comportements) d'utilisateurs du réseau tels les "*prosumers*", des consommateurs ayant leurs propres générateurs d'énergie.

La France a spécifiquement pour objectif de diminuer la part du nucléaire dans la production d'électricité de notre pays de 75% à 50% en 2025 tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre [général du débat national sur la transition énergétique, 2013]. Au niveau européen, le parlement a voté une directive sur la performance énergétique des bâtiments. Les bâtiments construits à partir de 2019 se devront de produire leur propre énergie [parlement européen, 2009].

Les réseaux électriques intelligents ("*smart grid*") sont une des solutions émergentes à ces problèmes. Un *smart grid* n'est pas seulement un réseau électrique intégrant les nouveaux générateurs d'énergie centralisés ou distribués. En ajoutant une communication bidirectionnelle et de nouvelles capacités en matière de technologies de l'information et de la communication, ceux-ci posent les premières briques pour un système de gestion intelligente de l'énergie. Ce système offre de nouvelles perspectives que ce soit dans le domaine de la production comme celui de la consommation d'énergie.

Tout comme les réseaux caractérisant l'environnement urbain (réseaux routiers, réseaux d'assainissement, réseaux de chaleur, etc.), un réseau électrique peut être vu comme un système complexe. L'analyse et le contrôle d'un tel système se révèlent extrêmement difficiles. Déployer une stratégie de contrôle globale sur le réseau électrique actuel s'avère être un véritable défi. Une solution serait de décomposer le réseau en sous-réseaux interconnectés, les micro-réseaux ("*microgrids*") [Lasseter and Paigi, 2004] comme c'est le cas pour d'autres réseaux<sup>1</sup>. Dans le cas de réseaux non connectés, leurs stratégies de contrôle se doivent d'intégrer la qualité de l'énergie, c'est-à-dire d'assurer la stabilité de celui-ci pour éviter les pannes sur le réseau, tout en gérant de manière optimale l'énergie.

---

1. En effet, les feux tricolores ou les réseaux d'assainissement sont, par exemple, gérés par villes ou par communautés d'agglomérations

Par définition, un *microgrid* est un réseau moins complexe que le réseau électrique global, mais ce réseau reste un système complexe comprenant de nombreux périphériques qui peuvent être producteurs ou consommateurs d'énergie. De plus, un *microgrid* est un système dit ouvert qui possède sa propre dynamique en terme de comportement et intégration des entités qui le composent. Cette dynamique reste difficilement prévisible. Par exemple, nous pouvons considérer une habitation résidentielle comme un *microgrid*. En effet, une habitation comprend à elle seule quelques dizaines de périphériques consommateurs d'énergie et peut posséder des systèmes de production d'énergie, comme des panneaux photovoltaïques, ou un garage pouvant accueillir un ou plusieurs véhicules électriques comme systèmes de stockage.

## 1.2/ OBJECTIFS DE CES TRAVAUX

L'objectif de cette thèse peut se résumer ainsi :

Proposer une approche de contrôle pour la gestion des flux d'énergie dans un réseau électrique. En particulier, nous nous restreindrons aux *microgrids*, ces réseaux étant assez complexes pour poser un grand nombre de problèmes et pouvant être composés pour constituer un réseau de plus grande ampleur.

Afin de satisfaire cet objectif, nous nous plaçons dans le paradigme des Systèmes Multi-Agents (SMA) [Ferber, 1995, Weiss, 1999]. En effet, comme énoncé précédemment, un *smart grid* est composé d'entités distribuées. C'est un système ouvert qui possède sa dynamique propre et dans lequel certaines entités sont autonomes. Ces propriétés font des *smart grids* un objet privilégié pour les SMA [McArthur et al., 2007a, McArthur et al., 2007b]. De cet objectif général, nous pouvons en extraire trois sous-objectifs :

- Premièrement, et pour prendre en compte la complexité des problématiques liées aux réseaux électriques et leurs relations, il apparaît comme nécessaire de mener une étude comparative des approches existantes dans ce domaine. En particulier, quelles sont les problématiques clairement identifiées, quelles sont les relations entre ces problématiques et les solutions proposées. Pour cette étude nous avons choisi de cibler les approches à base d'agents, car nous avons posé comme hypothèse que ce paradigme est un candidat de choix pour s'attaquer aux *smart grids*.
- Deuxièmement, la définition d'une stratégie de contrôle pour *microgrids*. Cette stratégie va être appliquée sur un sous-ensemble des problèmes identifiés lors de l'étude comparative. Toutefois, afin de généraliser cette stratégie, une approche méthodologique sera proposée. Cette approche méthodologique doit permettre la prise en compte des problèmes non traités dans cette thèse, mais



aussi d'enrichir l'approche présentée.

- Une telle stratégie de contrôle ne peut pas être déployée directement sur un réseau électrique réel sans avoir été préalablement testée de manière intensive pour parer à toutes éventualités. Il apparaît donc nécessaire d'associer à cette stratégie un outil de modélisation et de simulation pour la valider. Il apparaît donc que la réalisation d'un simulateur de réseaux électriques permettant de tester une stratégie de contrôle distribuée avant de la déployer dans un système réel est nécessaire. Ce simulateur permet de réaliser les opérations sur le réseau de manière fiable avec une grande quantité de périphériques différents, et accepte dynamiquement de nouveaux périphériques au cours de la simulation. Il permet également le contrôle dynamique de ces périphériques par un processus de décision externe, mais aussi de réaliser ces opérations à différentes échelles géographiques (simulation d'une maison aussi bien que d'un quartier) et temporelles (simulation en temps réel ou aussi rapidement que le permet l'électronique sous-jacente).

### 1.2.1/ CADRE DE COMPARAISON DES APPROCHES POUR LES SMARTGRIDS

Nous proposons la définition d'un cadre de comparaison d'approches à base d'agents pour les *smart grids*. Ce cadre définit un ensemble de critères. Ces critères sont regroupés au sein de catégories qui représentent les points de vue qui nous paraissent pertinents pour étudier les *smart grids*. Ces points de vue sont : la dimension structurelle et technique des *smart grids*, c'est-à-dire l'infrastructure, et les challenges, ou problèmes que les *smart grids* essayent de résoudre et un point de vue sociétal. Ce dernier point de vue se décompose en plusieurs éléments : l'impact environnemental, l'aspect économique, la qualité de service et l'intégration de l'humain.

Cet ensemble de critères est ensuite appliqué à un panel d'approches à base d'agents qui ont donné lieu à des publications et/ou résultats permettant ainsi leur évaluation.

### 1.2.2/ APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE POUR LE CONTRÔLE DE SMARTGRIDS

Le cœur des travaux présentés ci-après repose sur le métamodèle CRIO [Cossentino et al., 2007] qui fournit les abstractions nécessaires à l'analyse et la conception de systèmes complexes. Ce métamodèle est ensuite intégré dans le processus méthodologique ASPECS [Cossentino et al., 2010, Cossentino et al., 2013] afin de faciliter sa mise en œuvre.

Notre contribution réside dans l'extension de cette méthodologie afin de prendre en compte les boucles de rétroactions. En effet, nous partons du constat que les *microgrids* (et les *smart grids*) posent plusieurs challenges qui peuvent être for-

mulés selon plusieurs niveaux d'abstractions devant être résolus simultanément. L'idée est de définir des boucles de rétroaction qui permettent de contrôler chaque niveau séparément tout en assurant une cohérence globale et la gestion des différents problèmes du *smart grid* (notamment ceux présentés dans [Ramchurn et al., 2011c, Basso et al., 2013]). La cohérence globale est basée sur les échanges d'informations pour s'influencer réciproquement.

### 1.2.3/ MODÈLE DE STRATÉGIE DE CONTRÔLE

La stratégie de contrôle proposée est basée sur une boucle de rétroactions à base d'agents apprenants. Le mécanisme d'apprentissage est conçu pour prendre en compte la problématique d'interactions liée aux SMA et aux boucles de rétroaction au sein de SMA à plusieurs niveaux d'abstractions.

### 1.2.4/ SIMULATEUR DE SMARTGRIDS

Le simulateur proposé dans cette thèse doit répondre à un certain nombre de contraintes. La première est de représenter fidèlement le comportement d'un réseau électrique afin de valider la stratégie de contrôle. La deuxième est de faciliter l'intégration de différentes stratégies de contrôle. D'une part de façon transparente pour le reste du système et d'autre part ces stratégies de contrôle doivent être les mêmes que ce soit en simulation ou dans un cas réel. Nous avons donc choisi, pour toutes ces raisons, de réaliser ce simulateur avec le paradigme des SMA. L'ensemble du développement est réalisé avec la plateforme multi-agent JANUS [Gaud et al., 2009], conçue pour faciliter l'implantation des modèles fondés sur CRIO et ASPECS.

## 1.3/ PLAN DE LA THÈSE

Ce mémoire est constitué des chapitres suivants :

- **Le chapitre 2** : donne dans un premier temps, les définitions nécessaires à la compréhension des *smart grids* et des *microgrids*. Dans un deuxième temps, nous présentons les concepts de base des systèmes multi-agents et plus particulièrement des systèmes multi-agents apprenants.
- **Le chapitre 3** : introduit un cadre pour la définition et l'évaluation des approches pour *smart grids*. Ce cadre permet de classer les approches selon leurs structures et leurs objectifs, pour ensuite pouvoir comparer leurs résultats et contributions.
- **Le chapitre 4** : présente une approche méthodologique pour l'analyse et la conception de boucles de rétroaction permettant à différentes stratégies de contrôle, de plusieurs niveaux, d'interagir entre elles.

- **Le chapitre 5** : présente un modèle de gestion énergétique d'un *microgrid* utilisant des boucles de rétroaction pour l'autorégulation de la production et de la consommation d'énergie tout en intégrant un système de stabilité du réseau.
- **Le chapitre 6** : présente un simulateur multi-agents multi-échelles de distribution d'énergie. Ce simulateur permet un contrôle et une observation des périphériques pour réguler leurs consommations ou leurs productions. Il permet aussi d'extraire des données de simulation pour pouvoir comparer les différentes stratégies de contrôle déployées.
- **Le chapitre 7** : présente un bilan des travaux de recherche décrit dans ce manuscrit ainsi que les perspectives à développer dans le but d'améliorer ce travail.

# PRÉSENTATION ET DÉFINITIONS

## 2.1/ INTRODUCTION

Étant donné que de multiples domaines de recherches ont été abordés au cours de cette thèse, de nombreux concepts empruntés à ces domaines sont utilisés tout au long de ce mémoire. Nous détaillons dans ce chapitre ces différents concepts.

Dans un premier temps, nous présenterons les réseaux électriques, leurs enjeux, mais aussi leurs évolutions vers les nouveaux réseaux intelligents, les *smart grids*. Une attention particulière est portée aux *microgrids*, à leurs particularités, mais aussi à leurs similitudes vis-à-vis des *smart grids*. Dans un second temps, plusieurs définitions des systèmes multi-agents sont présentées afin de percevoir la complexité de ces systèmes. L'utilité des agents apprenants dans des environnements complexes ainsi que les cadres classiques de l'apprentissage par renforcement mono-agent et multi-agent y sont également détaillés.

## 2.2/ LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

### 2.2.1/ LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES ACTUELS

Actuellement, les réseaux électriques existants peuvent être décomposés en 4 niveaux :

- les gros producteurs centralisés, tels que les centrales à charbon, les centrales nucléaires ou les centrales hydrauliques, fournissant la majeure partie de l'électricité du réseau ;
- le système de transport de l'énergie, permettant de transporter de grandes quantités d'énergie à haute tension sur de longues distances ;
- le système de distribution d'énergie, caractérisé par des tensions plus faibles, est chargé de délivrer l'énergie aux usagers ;
- les usagers, ou consommateurs, répartis sur une grande partie du territoire, utilisant l'énergie reçue de façon très variée.

Les usagers peuvent demander de l'énergie à tout moment. Il revient alors aux gestionnaires des autres niveaux de fournir l'énergie nécessaire pour répondre aux besoins des consommateurs. L'équilibre offre-demande est un point clé dans l'utilisation des réseaux électriques. Si la stabilité n'est pas respectée, la tension varie, ce qui entraîne une usure prématurée des installations.

Cependant, de nouvelles tendances annoncent de grands changements sur les réseaux électriques. Ils devront devenir plus autonomes qu'ils ne le sont aujourd'hui. Parmi ces tendances, nous pouvons citer :

- **L'augmentation de la demande en énergie** : La demande d'énergie mondiale croît régulièrement comme présentée par la Figure 2.1 du fait de plusieurs facteurs. Ainsi, l'augmentation de la population mondiale implique une plus grande consommation. L'amélioration de la vie dans les pays en voie de développement, notamment les BRICS<sup>1</sup>, influe fortement sur la consommation d'énergie.

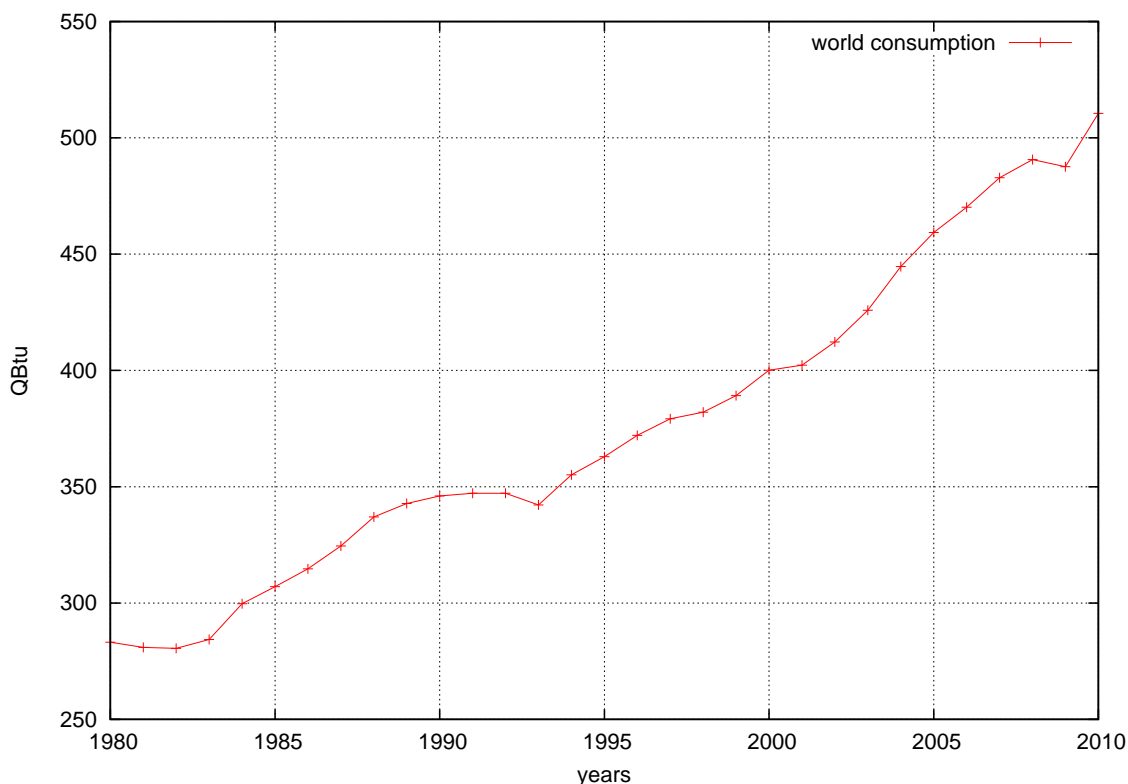


FIGURE 2.1 – Évolution de la consommation mondiale (Source : <http://www.eia.gov>)

- **La préoccupation environnementale** : Selon les rapports du GIEC<sup>2</sup>, les changements climatiques sont sans équivoque. Depuis les années 1950, beaucoup des changements observés sont sans précédent sur les dernières

1. Brésil, Russie, Inde, Chine, Afrique du Sud

2. Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

décennies à millénaires. Le GIEC annonce également comme « très probable » le fait que ces changements soient dus à une influence humaine. Le groupe cite notamment : le réchauffement océanique, la diminution des masses des calottes glaciaires, l'augmentation du niveau de la mer, l'augmentation de la concentration des  $NO_x$  dans l'atmosphère.

- **L'intégration des nouvelles sources décentralisées** : Les réseaux électriques actuels ont été conçus pour transporter l'énergie de gros producteurs, que sont les centrales productrices, aux consommateurs. L'intégration des nouvelles sources décentralisées amène des modifications structurelles et comportementales sur le réseau. Les sources d'énergie renouvelable, telles que les panneaux photovoltaïques et les éoliennes, produisent de manière stochastique, irrégulière, et peuvent donc amener une instabilité sur le réseau. Enfin, l'intégration des véhicules électriques ou hybrides devant être rechargés sur le réseau suggère également de tenir compte de nouveaux comportements émergents.
- **Le coût de l'énergie** : L'épuisement prévisible des ressources en énergies fossiles ainsi que le début des démantèlements des centrales nucléaires va impliquer une augmentation du prix de l'énergie. Pour compenser, de nouvelles sources d'énergie ont été développées, mais celles-ci ont un prix de production plus élevé. Cette hausse de prix sera forcément répercutée sur les factures des consommateurs. Il va donc falloir trouver de nouveaux comportements sur le marché pour réduire cette augmentation de tarif afin que l'énergie puisse encore être accessible au plus grand nombre.

Ce sont ces grands changements, autant comportementaux que structurels, qui ont induit le développement d'un nouveau type de réseau : les réseaux intelligents ou *smart grids*.

### 2.2.2/ LES FUTURS RÉSEAUX ÉLECTRIQUES INTELLIGENTS

Il existe actuellement plusieurs définitions d'un *smart grid* [Coll-Mayor et al., 2007] et également plusieurs objectifs pour une même définition d'un *smart grid*. Toutefois, l'ensemble des définitions s'accorde à dire que la communication bidirectionnelle est une des clés des futurs réseaux intelligents.

#### Définition 1 : Smart grid [Team, 2011]

Le *Software Engineering Institut* de l'université de *Carnegie Mellon* définit le *smart grid*, ou réseau intelligent, comme un terme utilisé pour se référer à un réseau électrique dont les opérations sont passées d'une technologie analogique à l'utilisation d'une technologie numérique intégrée permettant la communication, la détection, la prévision et le contrôle.

De plus, nous pouvons définir 7 caractéristiques principales associées à ses

réseaux, comme spécifiées par le *U.S. Department of Energy's National Energy Technology Laboratory* dans sa stratégie pour un réseau moderne [Pullins, 2009].

Un *smart grid* se doit :

1. de faire participer de façon active les consommateurs,
2. d'accueillir l'ensemble des générateurs (centralisés ou non) et des systèmes de stockage (comme les véhicules électriques),
3. de permettre de nouveaux produits, services et marchés,
4. d'offrir une qualité d'énergie pour supporter l'économie numérique,
5. d'optimiser l'utilisation de l'existant et de fonctionner efficacement,
6. d'anticiper et de répondre à des perturbations sur le système,
7. de résister aux attaques ou aux catastrophes naturelles.

Un des principaux problèmes soulevés par les *smart grids* est leur intégration dans les réseaux électriques physiques utilisés quotidiennement par des millions d'utilisateurs. Le tableau 2.1 compare les caractéristiques des réseaux électriques d'aujourd'hui et ceux potentiels des *smart grids*.

L'objectif de modernisation des réseaux implique des fonctionnalités pour faciliter le développement d'un système énergétique efficace et fiable. Dans [Momoh, 2012], l'auteur donne une liste de fonctionnalités permettant de passer du réseau électrique actuel au *smart grid* :

1. Identification et réduction des obstacles à l'adoption de la technologie, des pratiques et des services des réseaux intelligents.
2. Fournir aux consommateurs des renseignements et des options de contrôle.
3. Utilisation accrue de la technologie numérique et de la technologie de contrôle pour améliorer la fiabilité, la sécurité et l'efficacité du réseau électrique.
4. Développement et intégration de réponses à la demande, de la gestion de la demande et de l'efficacité énergétique.
5. Déploiement et intégration des systèmes de stockage et des technologies permettant l'effacement des pics, y compris les véhicules électriques et les climatiseurs.
6. Optimisation dynamique des opérations et des ressources sur le réseau, intégrant la cybersécurité.
7. Déploiement et intégration des ressources et de la production décentralisée, y compris des ressources renouvelables.
8. Intégration des appareils et des dispositifs de consommation dits « intelligents ».
9. Élaboration de normes pour la communication et l'interopérabilité des appareils et des équipements raccordés au réseau électrique, y compris l'infrastructure opérant sur le réseau.

<i>Caractéristiques</i>	<i>réseaux classiques</i>	<i>smart grids</i>
<i>Participation des consommateurs</i>	Les consommateurs ne sont pas informés et ne participent pas.	Les consommateurs sont informés et potentiellement actifs.
<i>Intégration des sources et systèmes de stockage</i>	Dominés par les producteurs d'énergie centralisée.	Déploiement d'un grand nombre de producteurs distribués "plug and play".
<i>Nouveaux produits, services et marchés</i>	Limité, peu d'intégration du marché pour les consommateurs.	Grande intégration du marché, Augmentation de l'utilisation du marché de l'énergie pour les consommateurs.
<i>Qualité de l'énergie</i>	Centrée sur les pannes, réponse lente aux problèmes de qualité de l'énergie.	Priorité sur la qualité de l'énergie avec une grande variété de qualité et de prix, Rapide résolution des problèmes.
<i>Optimisation des actifs</i>	Peu d'intégration des données opérationnelles de gestion d'actifs.	Nombreuses acquisitions de données élargies et des paramètres du réseau.
<i>Autocicatrisation</i>	Prévention pour réduire l'impact des dégâts en se concentrant sur la protection des infrastructures suite à une panne	Détection automatique et correction des problèmes, centrés sur la prévention pour minimiser l'impact sur le consommateur.
<i>Résistance aux attaques</i>	Très vulnérables aux attaques.	Résistance aux attaques avec restaurations rapides en cas de problèmes.

TABLE 2.1 – Comparaison des réseaux classiques et des *smart grids* (inspiré de [Schneider et al., 2008])



10. Déploiement de technologies dites « intelligentes » (temps réel et automatisées optimisant le fonctionnement des appareils et des dispositifs de consommation) pour la mesure, la communication relative à l'exploitation du réseau et l'automatisation de la distribution.

Il existe un grand nombre de recherches actuellement effectuées sur les *smart grids* [Farhangi, 2010, Hassan and Radman, 2010, Basso et al., 2013]. Ces dernières années, des approches *smart grids* ont été déployées sur des systèmes réels que ce soit en test, ou sur les réseaux électriques utilisés par des consommateurs [James et al., 2006].

Enfin, une nouvelle approche émergente définit les *smart grids* comme un système holonique [Lee, 2009], c'est-à-dire comme un système composé de sous-systèmes. Par exemple, Negeri & Baken présentent dans [Negeri and Baken, 2012] une architecture holonique traitant les *prosumers*, des consommateurs produisant leur propre énergie, comme des holons. Cette architecture permet, d'une part, de gérer de manière autonome les productions propres de l'utilisateur, et d'autre part rejoindre un groupe de *prosumers* pour collectivement influencer le marché.

Dans le cadre de cette thèse, une attention particulière va être portée sur la modélisation et la conception de *smart grids* comme des systèmes holoniques. Un *smart grid* sera donc considéré comme un ensemble interconnecté de *micro-grids*.

## 2.3/ LES MICROGRIDS

Le taux de pénétration de la production décentralisée à travers le monde n'a pas encore atteint des niveaux significatifs. Mais cette situation évolue rapidement au cours des dernières années. La production décentralisée englobe un large éventail de technologies telles que : les moteurs à combustion interne, les turbines à gaz, les microturbines, les panneaux photovoltaïques, les piles à combustible ou encore l'énergie éolienne [Lasseter and Paigi, 2004].

Malheureusement, l'utilisation de générateurs distribués peut amener autant de problèmes qu'elle peut en résoudre. Une meilleure façon d'utiliser le potentiel énergétique de la production distribuée est d'adopter une approche permettant le contrôle local des générateurs, mais aussi des consommateurs dans un sous-réseau. Ces sous-réseaux peuvent être dénommés *microgrid*.

Les *microgrids* peuvent être considérés, de fait, comme les premiers réseaux à avoir été déployés. En 1882, Thomas Edison construisit le premier réseau électrique en courant continu dans le quartier de Wall Street à Manhattan alimenté par la première centrale électrique, la *Pearl Street Station*. Ce réseau peut être considéré comme un *microgrid* étant donné qu'aucun réseau principal n'existait alors.

Tout comme il existe plusieurs définitions d'un *smart grid*, il existe plusieurs

définitions d'un *microgrid*. Le *Consortium for Electric Reliability Technology Solutions* (CERTS) le définit comme une agrégation d'usagers du réseau et de micro-producteurs exploitant comme un seul système l'énergie électrique et calorifique [Lasseter and Paigi, 2004]. Ou encore, un *microgrid* peut être défini comme étant un système d'énergie comprenant des producteurs d'énergie distribuée et de multiples charges électriques fonctionnant ensemble, de manière autonome, en parallèle ou « îlotés » des réseaux principaux [Asmus, 2010].

Nous adoptons, dans la suite de ce travail, la définition suivante.

#### Définition 2 : Microgrid

Les *microgrids*, ou micro-réseaux peuvent être définis comme des sous-réseaux de basse tension incluant des consommateurs, des générateurs décentralisés (potentiellement renouvelables) et des systèmes de stockage locaux. Ils peuvent être exploités en étant connectés à d'autres réseaux (ou au réseau principal) ou en étant "îlotés", c'est-à-dire sans aucun apport d'énergie de l'extérieur.

Fondamentalement, il est donc possible de définir un *microgrid* comme étant une partie d'un *smart grid* et donc devant répondre aux 7 caractéristiques définies précédemment.

## 2.4/ LES SMARTGRIDS AUJOURD'HUI

Bien que la recherche en laboratoire dans le domaine des *smart grids* existe depuis de nombreuses années, l'implémentation dans des systèmes réels est bien plus récente. Aujourd'hui, de nombreux états ont commencé à déployer des systèmes intelligents dans leurs réseaux électriques.

**Europe** Le livre vert de 2006 de la Commission Européenne "Une stratégie européenne pour une énergie sûre, compétitive et durable" souligne que l'Europe est entrée dans une nouvelle ère énergétique. Les objectifs primordiaux de la politique européenne de l'énergie doivent être durabilité, compétitivité et sécurité d'approvisionnement, ce qui nécessite un ensemble cohérent et uniforme des politiques et des mesures pour les atteindre.

L'*European Electricity Grid Initiative (EEGI)* est l'une des initiatives industrielles européennes dans le cadre du plan pour les technologies énergétiques stratégiques (SET-PLAN) et propose un programme de recherche de 9 ans, le développement et la démonstration pour accélérer l'innovation et le développement des réseaux électriques du futur en Europe. Le programme se concentre sur l'innovation des systèmes existants plutôt que sur l'innovation technologique, et s'intéresse particulièrement à l'intégration des nouvelles technologies dans des conditions réelles et à la validation des résultats.

**États-Unis** De nombreuses initiatives existent aux États-Unis. Ces initiatives peuvent être fédérales, étatiques ou localisées au niveau d'une ville.

L'article XIII de la loi sur la sécurité et l'indépendance énergétique de 2007 (EISA) (Pub.L. 110-140) fait partie de la législation fédérale et traite de la modernisation de la transmission des services d'électricité aux États-Unis. Il traite aussi du passage aux *smart grids* pour offrir une plus grande fiabilité et une protection aux infrastructures existantes tout en offrant de nouveaux avantages tels que la participation des consommateurs.

Fondée en 2003, la *GridWise Alliance* est un exemple de regroupement de services comprenant des entreprises technologiques émergentes, des partenaires académiques et des représentants des milieux financiers. Des experts du *National Renewable Energy Laboratory (NREL)* ainsi que d'autres laboratoires du *Department of Energy (DoE)*, de l'*Electric Power Research Institute (EPRI)*, mais aussi de *General Electric (GE)*, Cisco et d'IBM ont été les membres fondateurs de cette alliance. Cette alliance est un moyen pour élargir la sphère des parties impliquées dans l'élaboration des futurs réseaux intelligents. Avec cette alliance, tous les intervenants peuvent travailler de concert pour faire progresser le réseau électrique américain et le faire passer de l'ère industrielle à l'ère de l'information et de la télécommunication.

Au niveau de la ville d'Austin au Texas, Austin Energy décide en 2003 de transformer les services de la ville pour améliorer leurs flexibilités [Carvallo and Cooper, 2011]. Cela se traduit en 2007 par l'émergence d'un *smart grid*. À cette date, il s'agit surtout d'un ensemble de programmes, de systèmes et de capteurs plus qu'un seul écosystème intégré. C'est en 2008 qu'est réellement créé l'écosystème *smart grid* qui va permettre de transformer le réseau d'énergie. Ces changements sont, à l'heure actuelle, toujours en cours.

Ces deux présentations sont des exemples, mais d'autres groupes ou initiatives existent à tous les niveaux.

**Chine** Le marché des *smart grids* en Chine devrait croître de près de 20% d'ici 2020<sup>3</sup>. L'un des principaux facteurs contribuant à cette croissance du marché de l'énergie est son plan de mise en œuvre systématique de réseaux intelligents. Le marché du *smart grid* en Chine a également été le témoin d'investissements gouvernementaux de plus en plus importants durant ces dernières années. Toutefois, l'importante exposition des réseaux chinois aux cyberattaques pourrait être un défi majeur à la croissance de ce marché.

La grande majorité des investissements dans les *smart grids* se situe dans les domaines de la transmission d'énergie, de l'automatisation de la distribution et de la récolte automatique de données pour soutenir le développement du futur réseau et pour soutenir l'intégration des énergies renouvelables. Le marché du *smart grid* en Chine sera d'une grande influence pour deux raisons.

– L'engagement croissant de la Chine pour le développement de l'énergie verte

---

3. [http://www.researchandmarkets.com/reports/2640050/analyzing\\_the\\_smart\\_grid\\_in\\_china](http://www.researchandmarkets.com/reports/2640050/analyzing_the_smart_grid_in_china)

conduira à d'énormes besoins en technologies dans le domaine des réseaux intelligents.

- La Chine a un contexte structurel unique qui pourrait lui permettre l'élaboration d'un nouveau réseau intelligent plus rapidement. Le rôle central que le gouvernement peut jouer dans l'économie et la gestion de l'énergie rendra cela possible.

Cependant, la Chine ne peut pas exploiter pleinement cette opportunité. Les organismes gouvernementaux de réglementation devront créer une vision appropriée pour les réseaux intelligents et fournir des politiques et des mesures incitatives de soutien permettant une diminution de la consommation.

Le gouvernement chinois, la *State Grid Corporation of China (SGCC)* et la *China Southern Power Grid Company (CSG)* formulent des plans et mettent en place des mesures pour achever le développement des réseaux intelligents en Chine. Cette initiative prise par SGCC s'applique à la période 2011-2020.

## 2.5/ LES APPROCHES MULTI-AGENTS

De par leurs complexités et leurs répartitions géographiques, les *smart grids*, comme les *microgrids*, ne peuvent pas être gérés facilement par des systèmes centralisés. Les systèmes intelligents intégrés aux *smart grids* doivent gérer la production des grandes centrales, mais également les énergies renouvelables ou encore aider à réduire la consommation des différents usagers du réseau. Les intelligences artificielles distribuées et plus particulièrement les systèmes multi-agents apparaissent comme un moyen adéquat de résoudre les problèmes liés aux *smart grids* [McArthur et al., 2007a, McArthur et al., 2007b].

### Définition 3 : Agents [Russell et al., 1995]

Un agent est tout ce qui peut être vu comme percevant son environnement à l'aide de capteurs et agissant sur cet environnement à l'aide d'effecteurs, de façon autonome.

Cette définition donne un point de vue très général sur la définition d'agent. Dans [Wooldridge and Jennings, 1995], Wooldridge et Jennings définissent un agent comme un système, logiciel ou non, ayant les propriétés suivantes :

- **autonomie** : Un agent se doit d'opérer sans une intervention directe de l'extérieur, et d'avoir un certain contrôle de ses actions et de ses états internes.
- **aptitudes sociales** : Les agents interagissent entre eux grâce à un langage.
- **réactivité** : Les agents perçoivent leur environnement et répondent en temps opportun aux changements intervenant dans celui-ci.
- **proactivité** : Les agents ne font pas que répondre aux changements de l'environnement, ils peuvent également avoir un comportement leur permettant d'agir par eux-mêmes pour satisfaire leurs objectifs.

Enfin, Ferber étend ces définitions pour mettre en évidence l'importance de l'en-

	<i>Coopératifs</i>	<i>Compétitifs</i>	<i>Mixtes</i>
<i>Indépendants</i>	non-coordonnés	opposition directe	agents indépendants
<i>Correspondants</i>	coordination directe	—	agents correspondants
<i>Conscients</i>	coordination indirecte	opposition indirecte	communication indirecte

TABLE 2.2 – Classification des SMA par type d'interactions et degré de conscience des agents [Buşoniu et al., 2008b]

vironnement [Ferber, 1995]. Pour Ferber, l'agent est une entité physique ou virtuelle :

1. qui est capable d'agir dans un environnement ;
2. qui peut communiquer directement avec d'autres agents ;
3. qui est mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou de fonctions de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser) ;
4. qui possède des ressources propres ;
5. qui est capable de percevoir son environnement (mais de manière limitée) ;
6. qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune) ;
7. qui possède des compétences et offre des services ;
8. qui peut éventuellement se reproduire ;
9. et dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit.

Ce sont les agents, qui en communiquant et collaborant forment un système multi-agents. Les objectifs de ces agents peuvent être de toutes sortes. Par exemple, deux agents d'un même système peuvent avoir des objectifs opposés.

Dans [Buşoniu et al., 2008a], les auteurs présentent une classification des systèmes multi-agents grâce aux interactions des agents. Cette classification est décomposée en 2 dimensions. La première représente le type d'interactions des agents. La seconde représente le degré de conscience des agents. Le tableau 2.2 présente cette classification.

Bien que les agents d'un système multi-agents peuvent être dotés de comportements permettant de prévoir les événements futurs, il est souvent nécessaire pour eux d'apprendre dynamiquement de nouveaux comportements. [Buşoniu et al., 2010]. L'apprentissage est donc un point important dans l'élaboration des comportements d'un agent évoluant dans un environnement dynamique.

## 2.6/ LES AGENTS APPRENANTS

Les systèmes multi-agents sont principalement utilisés pour être déployés dans des environnements complexes, partiellement ou non prévisibles [Weiss, 1999]. Dans de tels environnements, il est souvent difficile, voire impossible, de spécifier des comportements à priori. L'apprentissage apparaît donc, dans ce contexte, comme un outil pertinent pour améliorer les performances des agents lorsqu'ils doivent réaliser une tâche donnée [Cornuéjols and Miclet, 2010].

Traditionnellement, les approches d'apprentissage artificiel peuvent être divisées en trois catégories :

- **l'apprentissage supervisé** : consiste à déterminer, à partir d'un corpus  $C$  d'exemples, une loi (ou fonction)  $h$  qui permet de donner une réponse  $y$  face à toute situation  $x$ . Plus formellement, soient  $X$  l'ensemble des situations possibles et  $Y$  l'ensemble des réponses possibles. L'apprentissage supervisé doit déterminer la fonction  $h : X \rightarrow Y$  qui minimise un critère d'erreur défini sur le corpus  $C = \{(x^{(i)}, y^{(i)})\}_{i=1,2,\dots,n}$  composé de  $n$  exemples. Les machines à vecteurs de support et les réseaux de neurones artificiels font partie des techniques communément employées pour résoudre ce type de problèmes.
- **l'apprentissage non supervisé** : consiste à déterminer la manière de former des classes pour catégoriser un ensemble de faits ou de situations décrits par un ensemble de caractéristiques. Il s'agit ici de déterminer une frontière définie par une fonction  $h$  qui permet de séparer au mieux n'importe quelles situations prises dans un ensemble  $X$ . Le corpus d'apprentissage utilisé pour déterminer cette fonction  $h$  est uniquement composé d'un ensemble  $C = \{x^{(i)}\}_{i=1,2,\dots,n}$  d'exemples représentant des situations. L'algorithme des  $k$ -moyennes et l'Analyse par Composantes Principales sont des techniques largement utilisées pour ce type d'apprentissage.
- **l'apprentissage par renforcement** : consiste à déterminer le comportement que devra exhiber un agent afin de réaliser au mieux une tâche donnée. Plus formellement, il s'agit ici de déterminer une fonction  $h : X \rightarrow U$  qui associe à chaque état  $x \in X$  de l'environnement perçu par l'agent, l'action  $u \in U$  à réaliser afin de maximiser un critère de performance représentant généralement un cumul (pondéré) des récompenses reçues.  $Q$ -Learning est l'un des algorithmes les plus largement employés pour réaliser de l'apprentissage par renforcement.

Dans toutes ces approches d'apprentissage, généralement la fonction  $h$  est déterminée à partir d'exemples d'apprentissage et elle est ensuite utilisée de manière *ad hoc*.

L'apprentissage par renforcement semble être l'approche la plus adéquate pour contrôler les flux d'énergie dans un *smart grid*. En effet, pour que ce problème puisse être résolu par une approche d'apprentissage supervisé, il faudrait disposer d'un corpus d'apprentissage composé de nombreux exemples de la forme  $\langle \text{situation rencontrée}, \text{réponse désirée} \rangle$ , ce qui n'est pas du tout envisageable ici étant donné la complexité du problème. L'approche d'apprentissage non supervisée est quant à elle inadaptée pour résoudre un tel problème. En utilisant

une approche d'apprentissage par renforcement, les agents représentant des périphériques électriques peuvent apprendre comment se comporter en interagissant avec un environnement dynamique de type *smart grid*.

Nous allons aborder ci-dessous plus particulièrement l'apprentissage par renforcement mono-agent et multi-agent, puisque c'est ce type d'approche qui est choisi dans cette thèse et détaillé dans le chapitre 5.

### 2.6.1/ APPRENTISSAGE PAR RENFORCEMENT MONO-AGENT

Le cadre de travail classique de l'apprentissage par renforcement implique un seul agent dont la tâche peut généralement être modélisée par un processus de décision de Markov à temps discret ( $MDP^4$ )  $M = (X, U, f, \rho, T, \gamma)$ .  $X$  est l'ensemble des états que l'agent peut percevoir,  $U$  est l'ensemble des actions possibles qu'il peut réaliser,  $f$  est la fonction de transition entre états,  $\rho$  est la fonction de récompense qui évalue l'effet immédiat d'une action,  $T \subseteq \mathbb{N}$  est l'espace de temps discret et  $\gamma$  est un facteur de pondération [Sutton and Barto, 1998].

Dans le cas de l'horizon infini, c'est-à-dire lorsque  $T$  est infini et  $\gamma \in [0; 1[$ , le comportement optimal d'un agent peut être décrit complètement par une politique  $h^* : S \rightarrow A$ , c'est-à-dire une fonction associant à chaque état l'action optimale à réaliser. Cette fonction maximise l'espérance des récompenses cumulées  $R^h(x_0)$  dans chaque état initial  $x_0 \in X_0 \subseteq X$ , telle que :

$$R^h(x_0) = \left\langle \sum_{t \in T} \gamma^t r_{t+1} \right\rangle_{x_0, h} \quad (2.1)$$

$r_t$  est la récompense reçue à l'instant  $t \in T$ ,  $\langle \cdot \rangle_{x_0, h}$  est l'espérance des récompenses cumulées sur toutes les transitions d'états possibles à partir de l'état  $x_0$  en suivant la politique  $h$ , et  $\gamma \in [0, 1[$  est le facteur de pondération garantissant que la somme des récompenses est bornée.

Un  $MDP$  encode un problème de décision séquentiel qui peut être résolu en utilisant une technique de programmation dynamique lorsque la fonction de transition  $f$  est connue, ou une technique d'apprentissage par renforcement (comme  $Q$ -Learning par exemple) lorsque  $f$  est inconnue (ce qui est le cas ici). Pour des tâches complexes, lorsque l'espace d'états et/ou d'actions est très grand, il est préférable d'utiliser également des algorithmes d'apprentissage par renforcement qui ne nécessitent pas la mise à jour complète de valeurs associées à tous les états à chaque itération. Les mises à jour représentent l'apprentissage qui apparaît à chaque fois qu'une transition d'un état  $x$  à un état  $x'$  est observée avec une récompense immédiate  $r$  lorsque l'action  $u$  est réalisée dans  $x$ .

Dans la technique de  $Q$ -learning, une mise à jour de la fonction  $Q$  (une fonction de valeur qui estime l'espérance des récompenses cumulées pour chaque couple

---

4. Markov Decision Process

état-action) est définie par :

$$Q(x, u) \leftarrow^\alpha r + \gamma \max_{u' \in U} Q(x', u') \quad (2.2)$$

où :  $A \leftarrow^\alpha B$  signifie  $A \leftarrow (1 - \alpha)A + \alpha B$ . Le facteur d'apprentissage  $0 \leq \alpha \leq 1$  influence la vitesse d'apprentissage.

Une fois que  $Q$  a convergé vers la fonction  $Q$  optimale  $Q^*$ , l'action optimale dans chaque état  $x$  peut être obtenue selon :

$$h^*(x) = \operatorname{argmax}_{u \in U} Q^*(x, u) \quad (2.3)$$

L'équation (2.2) suppose implicitement qu'une valeur  $Q$  peut être estimée et stockée pour chaque couple état-action. Lorsque l'espace d'états et d'actions est trop grand, des approximateurs de fonction doivent être utilisés [Buşoniu et al., 2010], puisque toutes ces valeurs  $Q$  ne peuvent plus être ni stockées ni estimées précisément.

### 2.6.2/ APPRENTISSAGE PAR RENFORCEMENT MULTI-AGENTS

Dans le cas des systèmes multi-agents, la tâche du système peut être modélisée par un MDP  $M = (X, U, f, \rho, T, \gamma)$  [Panait and Luke, 2005] tel que  $X$  est l'ensemble des états que les agents peuvent percevoir.  $U = (U_1, \dots, U_n)$  est, avec  $n$  le nombre d'agents, l'ensemble des actions possibles que peuvent réaliser les agents.  $f$  est la fonction de transition entre les états.  $\rho = (\rho_1, \dots, \rho_n)$  est l'ensemble des fonctions de récompenses des agents.  $T \subseteq \mathbb{N}$  est l'espace de temps discret et  $\gamma$  est le facteur de pondération.

Dans le cas des systèmes multi-agents, la fonction de transition est le résultat de l'ensemble des actions effectuées par les agents [Buşoniu et al., 2008a],  $u_k = [u_{1,k}^T, \dots, u_{n,k}^T]^T$ ,  $u_k \in U$ . La politique de décision du système  $h = (h_1, \dots, h_n)$  est maintenant l'ensemble des décisions de chaque agent. Enfin, la récompense  $R_i$  et la fonction  $Q_i$  de chaque agent dépendent, dans le cas des systèmes multi-agents, de l'ensemble des actions et de la politique de décision de chaque agent.

En reprenant la classification par type d'interactions donnée dans le tableau 2.2, il est possible de détailler les fonctions de récompense. Dans le cas d'un système multi-agents entièrement coopératif, c'est-à-dire quand tous les agents ont le même but, tous les agents possèdent la même fonction de récompense,  $\rho_1 = \rho_2 = \dots = \rho_n$ . Ils ont donc la même récompense,  $R_1 = R_2 = \dots = R_n$ . Si  $n = 2$  et  $\rho_1 = -\rho_2$ , les 2 agents ont des buts opposés. Dans ce cas le système est compétitif. Il est également possible d'avoir un système entièrement compétitif avec plus de deux agents, mais les fonctions de récompenses sont plus difficiles à définir. Enfin, les systèmes mixtes sont ceux n'étant ni entièrement coopératifs ni entièrement compétitifs.

Nous présenterons plus en détail dans le chapitre 5 (page 73) la technique d'apprentissage par renforcement multi-agent que nous avons utilisée pour résoudre un problème de stabilité dans un *smart grid*.



## 2.7/ DISCUSSIONS

Dans ce chapitre, nous avons présenté les caractéristiques principales des réseaux électriques actuels. Ces explications ont mis en exergue la structure statique des réseaux électriques. Actuellement, les réseaux sont composés de gros producteurs d'énergie devant répondre aux variations des demandes des consommateurs. Avec l'augmentation du nombre de consommateurs et l'augmentation de leurs consommations, il ne sera plus possible pour ces gros producteurs de satisfaire la consommation. Ces gros producteurs d'énergie sont aussi de gros producteurs de déchets (gaz à effet de serre, déchets nucléaires, etc.). Il est donc nécessaire de modifier le réseau en intégrant de nouveaux producteurs d'énergie afin de créer un équilibre énergétique. Ces producteurs se doivent de produire une énergie propre. Enfin, les consommateurs doivent devenir de nouveaux acteurs du réseau en modifiant leurs consommations en fonction de la production d'énergie.

L'introduction de nouveaux réseaux, les *smart grids*, qui sont maintenant clairement définis offre une réponse à ces évolutions futures. La diversité des producteurs dans les nouveaux réseaux, les nouveaux comportements des consommateurs ainsi que leurs diversités géographiques posent un problème de contrôle de l'ensemble de ces utilisateurs du réseau. Une intelligence localisée pour satisfaire la demande de chaque usager apparaît dès lors comme une solution intéressante pour conserver une stabilité sur le réseau.

Cette décentralisation permet maintenant de décomposer un réseau en sous-réseau, les *microgrids*, qui peuvent se suffire à eux-même.

Les systèmes multi-agents sont une solution adéquate pour le contrôle des utilisateurs des *smart grids*, mais aussi des *microgrids*. Finalement, pour améliorer les interactions entre les différents utilisateurs et offrir un contrôle personnalisé, il est intéressant d'intégrer une partie apprenante dans le système.

# UN CADRE POUR LA DÉFINITION ET L'ÉVALUATION DES APPROCHES POUR SMARTGRIDS

## 3.1/ INTRODUCTION

De nombreux investissements ont été faits, particulièrement par l'Union Européenne et aux États-Unis, pour tester, développer et déployer les nouvelles technologies permettant une gestion intelligente des réseaux. De nouveaux travaux sont en train d'évaluer les coûts, les performances et le bénéfice que va engendrer cette nouvelle technologie. Actuellement, aucun standard n'a été établi, mais de récents travaux sont en cours. Nous pouvons citer :

- le second séminaire EU-US sur les "Smart Grid Assessment Methodologies" conjointement organisé par le *Joint Research Centre* et le *Department of Energy (DoE)*, avec l'aide du *US-EU Energy Council-Technology Working Group*, le 7 novembre 2011 à Washington, le premier séminaire ayant eu lieu le 6 décembre 2010 à Albuquerque. Ces deux séminaires ont amené à la création d'un rapport pour évaluer les avantages et les impacts des réseaux intelligents [Giordano and Bossart, 2012].
- un cadre d'évaluation des projets de déploiement de réseaux intelligents [Herter et al., 2011]
- un *smart grid scorecard*<sup>1</sup> qui fournit une liste de prérequis qu'un produit doit contenir pour pouvoir s'intégrer à un réseau intelligent.
- des initiatives pour déterminer comment mesurer de manière fiable, comment calculer les coûts réels et comment définir les avantages des projets liés aux réseaux intelligents [Bossart and Bean, 2011, Wakefield, 2010].

Ce chapitre s'inscrit dans la même ligne que ces travaux en présentant un cadre d'évaluation pour les approches à base d'agents pour les *smart grids*. Il est inspiré de l'article [Basso et al., 2013]. Dans les sections suivantes, nous présentons le cadre d'évaluation. Celui-ci se décompose en deux étapes, la première a pour but de positionner et d'évaluer l'approche étudiée. Cette étape se décompose en

---

1. [http://www.smartgridnews.com/pdf/Smart\\_Grid\\_Scorecard.pdf](http://www.smartgridnews.com/pdf/Smart_Grid_Scorecard.pdf)

deux dimensions :

- **la dimension structurelle** : qui représente l'infrastructure du réseau étudié ;
- **la dimension du problème** : qui définit les différentes classes de problème que doit résoudre un *smart grid*.

La seconde étape permet d'évaluer qualitativement et quantitativement les différentes approches par l'évaluation des impacts sociétaux des *smart grids*. Ces impacts sont définis par rapport aux principaux objectifs des *smart grids* :

- **la réduction des gaz à effet de serre** : qui permet d'évaluer la réduction de l'empreinte carbone à travers la chaîne de production du réseau. Elle est traitée par la dimension environnementale du cadre d'évaluation ;
- **la sécurité énergétique** : qui évalue la possibilité d'extension du réseau et les interruptions qui peuvent apparaître sur celui-ci. Elle est traitée par la dimension structurelle et la dimension de la qualité de service du cadre d'évaluation ;
- **la compétitivité économique** : qui permet d'évaluer l'investissement nécessaire au déploiement de l'intelligence sur le réseau, mais aussi l'intégration de cette intelligence sur le marché de l'énergie. Elle est traitée par la dimension économique du cadre d'évaluation ;
- **l'intégration de l'humain** : qui évalue l'intégration des consommateurs et leurs participations sur ce nouveau réseau. Elle est traitée par la dimension humaine du cadre d'évaluation.

Pour l'ensemble de ces objectifs, un ensemble d'indicateurs est proposé. Toutefois, il n'est pas toujours possible de tester l'ensemble des approches avec chaque indicateur, certaines approches ne prenant pas du tout en compte certains objectifs.

La section 3.2 présente l'aspect structurel et les familles des problèmes permettant le positionnement de l'approche étudiée. La section 3.3 présente l'impact de l'approche à travers les dimensions sociétales et humaines.

## 3.2/ LA DÉFINITION POUR L'ÉVALUATION ET LE POSITIONNEMENT

### 3.2.1/ LA DIMENSION STRUCTURELLE

La dimension structurelle définit l'infrastructure d'un réseau intelligent. Elle est constituée de deux systèmes complexes interconnectés : le réseau d'énergie physique dans lequel s'échange l'énergie fournie au réseau et le marché de l'énergie où s'échangent les valeurs financières de l'énergie [Kok et al., 2010]. Ces deux systèmes et leurs relations sont précisément décrits par une ontologie dans [van Dam, 2009]. Pour cerner l'approche à étudier, certaines questions doivent être posées. Ces questions permettent de définir la complexité du réseau physique, par son nombre d'utilisateurs, leurs variétés, leurs interactions. Elles doivent permettre de définir la topologie du réseau physique ainsi que les liens

avec le marché de l'énergie. Le tableau 3.1 détaille les principales questions à poser pour une analyse de l'approche étudiée.

### 3.2.2/ LES FAMILLES DE PROBLÈMES

Les *smart grids* soulèvent un grand nombre de défis importants dans le domaine de l'intelligence artificielle [Ramchurn et al., 2011c]. En effet, de nouveaux concepts et de nouvelles techniques seront nécessaires pour résoudre les nombreux problèmes ne pouvant pas être résolus sur les réseaux d'énergie actuels. Parmi ces problèmes, nous pouvons citer : la stabilité du réseau, la fiabilité de l'approvisionnement, la gestion des nouvelles sources d'énergie distribuées (DER), d'intégration des nouveaux acteurs hétérogènes et distribués, l'autocicatrisation des réseaux. Certains problèmes sont déjà particulièrement étudiés donc mieux formulés. Voici une liste non exhaustive de ceux-ci :

- **Unit Commitment (UC)** : le problème de l'UC [Salam, 2007, Padhy, 2004] vise à répartir la production d'énergie à travers un nombre de sources connues qui répond à la demande pour un coût minimum. En d'autres termes, l'objectif est de déterminer la combinaison de sources de production disponibles et de planifier leurs productions respectives pour satisfaire la demande prévue avec le coût minimum de production totale sous les contraintes d'exploitation imposées par le réseau.
- **Demand Side Management (DSM)** : la gestion de la demande [Gellings and Chamberlin, 2008] implique la modification de la demande des consommateurs d'énergie à travers diverses méthodes telles que l'incitation financière ou l'éducation. L'objectif du DSM est d'encourager les consommateurs à utiliser moins d'énergie aux heures de pointe, ou pour déplacer pendant les heures creuses l'allumage de certains appareils. Le DSM n'implique pas nécessairement une diminution de la consommation totale d'énergie, mais grâce à une meilleure gestion il est possible de réduire l'investissement dans les systèmes de production en réduisant les pics de consommation.
- **Demand Response (DR)** : le DR [US Department of Energy, 2006] est une extension du DSM, il permet de modifier la consommation d'énergie grâce à différents stimuli, par exemple, par une augmentation du prix de l'énergie va induire une réduction de la consommation.
- **Supply and Demand Matching (SDM)** : a pour but de contrôler simultanément la production et la consommation pour améliorer l'équilibre global sur le réseau.
- **Vehicule to Grid (V2G)** : l'idée derrière le concept de V2G [Clement-Nyns et al., 2011, Clement-Nyns et al., 2010] est d'utiliser l'énergie (à la fois en charge et en décharge) d'un véhicule électrique. Les voitures électriques (BEV) ou les véhicules hybrides rechargeables (PHEV) ont la capacité de produire de l'électricité en courant alternatif. Le défi est de fournir de l'électricité en cas de besoin, mais aussi recharger ces véhicules de façon efficace, pour ne pas endommager la batterie, mais aussi pour que l'utilisateur du véhicule puisse s'en servir normalement.

Questions
<b>Quels sont les types de réseaux étudiés ?</b>
Que ce soit pour le marché ou pour le réseau physique, ils peuvent être simulés, réels, ou bien combiner les deux (approche cyberphysique).
<b>Le réseau physique est-il pris en compte ?</b>
Le réseau physique gère l'échange d'énergie.
<b>Quelle est la topologie du réseau ?</b>
La topologie du réseau permet de définir l'architecture du réseau et les différentes connexions entre les périphériques présents sur le réseau.
<b>Quelle est la taille du réseau ?</b>
La taille d'un réseau est un concept complexe et ne peut pas être définie avec précision par une valeur unique. Pour être complète, une taille de réseau doit contenir les caractéristiques internes du réseau (tensions, fréquence), et le nombre maximal d'appareils présents sur les différentes parties du réseau.
<b>Quels types de systèmes de stockage sont utilisés ?</b>
Il faut préciser leurs capacités maximales, leurs dynamiques, etc.
<b>Quels sont les producteurs présents sur le réseau ?</b>
La grande différence entre producteurs oblige à préciser lesquels sont présents sur le réseau, cela peut aller de la simple éolienne à la centrale nucléaire.
<b>Quels sont les usagers présents sur le réseau ?</b>
Les usagers du réseau, suivants leurs types (résidentiel, industriel, etc.) mais aussi leurs comportements, vont avoir une influence différente sur la consommation.
<b>Le réseau peut-il évoluer en temps réel ?</b>
Le nombre de périphériques peut-il varier en temps réel, si oui, l'intelligence doit prendre en compte cette possibilité et les problèmes qu'elle pose (imprédictibilité, surcharge du réseau, etc.)
<b>Les périphériques peuvent-ils communiquer entre eux ?</b>
La communication bidirectionnelle est un point important des <i>smart grids</i> , cela implique de nouvelles infrastructures. Sont-elles mises en place ?
<b>Le réseau est-il connecté à d'autres réseaux ?</b>
Les travaux s'effectuent-ils sur une partie du réseau (type <i>microgrid</i> ) ou sur un réseau global ?
<b>Le marché de l'énergie est-il pris en compte ?</b>
La gestion du prix de l'énergie et l'échange sur le marché sont importants pour les différents acteurs présents sur le réseau, qu'ils soient producteurs (augmentation des bénéfices) ou consommateurs (réduction de la facture).
<b>Les prix du marché sont-ils dynamiques ?</b>
Sur la plupart des réseaux actuels, le prix de l'énergie est prédéterminé, une approche dynamique de l'énergie pourrait aider à changer les mœurs, mais rendrait plus complexe la gestion de l'énergie.
<b>Quelles sont les échelles de temps utilisées ?</b>
Selon les mesures de contrôle possibles, le bilan énergétique doit être maintenu à différentes échelles de temps [Amin, 2001]. Le marché de gros et le commerce de détail doivent assurer l'équilibre de l'énergie à moyen terme (minutes ou heures) et long terme (jours, mois ou années). Le marché secondaire assure l'équilibre énergétique à court terme (millisecondes ou secondes) et moyen terme.

TABLE 3.1 – Questions pour l'analyse d'une approche *smart grid*

- **Virtual Power Plant (VPP)** : le problème du VPP [Asmus, 2010] regroupe un ensemble de dispositifs de production décentralisée (comme les microturbines, les PVs, les éoliennes, les petites centrales hydroélectriques, etc.) qui agissent comme une centrale électrique centralisée pour vendre de l'énergie au réseau. Le but du VPP est de maximiser le prix de vente à l'aide de systèmes intelligents. Les VPPs sont similaires aux micro-réseaux, mais si les *microgrids* ont une portée locale, les VPPs peuvent théoriquement être déployées à grande échelle.
- **Self-Healing Network** : L'un des avantages majeurs des *smart grids* est de permettre l'autocicatrisation du réseau, c'est-à-dire la remise en état du réseau sans l'intervention de techniciens. Cela assure un approvisionnement fiable en électricité et réduit la vulnérabilité du réseau aux attaques ou aux catastrophes naturelles.

### 3.3/ CADRE D'ÉVALUATION

Les points décrits dans la section 3.2 présentent le travail à effectuer en amont pour l'analyse de *smart grid*. Toutefois, les objectifs des réseaux intelligents consistent à aider les entreprises et les particuliers à résoudre les problèmes dus à la production et la gestion de l'énergie au quotidien. Afin d'évaluer l'impact des *smart grids*, de nouveaux concepts doivent être définis. Nous introduisons ici la notion de durabilité<sup>2</sup> généralement considérée comme le regroupement de l'environnement, de l'économie et de la société. De plus, nous lui ajoutons une dimension humaine qui représente le contrôle et les capacités de supervision des systèmes. Nous avons essayé de recueillir dans ce cadre d'évaluation une combinaison de ces quatre points de vue différents regroupés sous le terme générique de dimension sociétale.

#### 3.3.1/ L'APPROCHE ENVIRONNEMENTALE

L'impact environnemental de la production d'énergie le plus reconnu est celui des rejets dans l'atmosphère, l'eau et la terre. De ces émissions, les émissions de gaz à effet de serre sont les plus significatifs en terme d'impact, ils comprennent le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ), les oxydes d'azote ( $NO_x$ ), le dioxyde de soufre ( $SO_2$ ), le méthane ( $CH_4$ ), etc. L'impact sur l'eau et la terre est plus difficile à quantifier. Toutefois, l'actuel exemple des rejets et des fuites d'eau radioactives de la centrale nucléaire de Fukushima dans l'océan Pacifique permet de montrer une pollution majeure des terres et de l'eau.

Il est malgré tout important d'avoir des indicateurs pour évaluer la performance environnementale des *smart grids* [Aabakken, 2006, Chapter 11]. Pour évaluer l'émission des gaz à effet de serre, l'UNFCC<sup>3</sup> ("United Na-

2. en anglais : *sustainability*

3. <http://unfccc.int>

tions Framework Convention on Climate Change ") définit une mesure basée sur l'impact environnemental du  $CO_2$ , le Potentiel de Réchauffement Global<sup>4</sup> (PRG) [Houghton and Intergovernmental Panel on Climate Change, 1996]. Avec cette mesure, il est possible d'évaluer l'effet de serre induit par la production d'énergie des différentes centrales et donc leurs impacts sur l'environnement.

La principale difficulté de cette mesure vient du calcul de la quantité de gaz émis par les différents systèmes de production, mais des recherches ont été faites sur ce problème et il est actuellement possible de trouver la quantité émise en équivalent carbone pour un kilowatt-heure (kWh)[Weisser, 2007, (IEA), 2011].

### 3.3.2/ LE CRITÈRE ÉCONOMIQUE

L'aspect économique est déjà présent dans les réseaux d'énergie, mais il est important de définir l'ensemble des coûts qui peuvent intervenir tel que les investissements (CAPEX), les coûts opérationnels (OPEX), mais aussi les recettes dues aux investissements pour déterminer l'intérêt des problèmes à résoudre.

Les différents coûts et revenus dépendent du problème étudié. Comme énoncé dans la section 3.2.1, 3 principaux acteurs sont présents sur le marché de l'énergie avec des objectifs différents. Les producteurs sont les acteurs dont l'impact économique est le plus connu. Les principaux coûts de cet acteur sont les coûts d'entretien et les investissements dans de nouveaux systèmes de production d'énergie (par exemple, dans de nouvelles centrales). La distribution d'énergie actuelle gère la perte d'énergie lors du transport. La nouvelle distribution d'énergie devra prendre en compte l'ajout d'une intelligence dans le réseau, ce qui implique potentiellement une nouvelle infrastructure de communication bidirectionnelle. Pour les consommateurs, les principaux coûts sont l'abonnement, les taxes et le prix au *kWh*. Les deux premières peuvent varier en fonction de l'emplacement des consommateurs, tandis que la dernière varie en plus au cours du temps (par exemple, le système d'heure creuse).

Dans [(IEA), 2011], les auteurs décrivent l'ensemble des coûts et revenus du marché de l'énergie.

L'*Asia Pacific Energy Research Centre* [APE, 2000] fournit des indicateurs pour évaluer l'efficacité énergétique d'un point de vue économique. Ces indicateurs mesurent la quantité d'énergie consommée par rapport à la valeur économique/monétaire de l'activité consommatrice, ce qui fournit une valeur pécuniaire évaluable. Ces valeurs sont une extension de l'étude publiée par l'ADEME, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, qui propose trois alternatives pour une révision globale des tendances en matière d'efficacité énergétique à différent niveau [ADEME, 1999] :

- **l'intensité énergétique** : permet de vérifier que l'énergie est utilisée efficacement. L'analyse de l'intensité énergétique est généralement basée sur la comparaison établie à partir de références ou d'autres valeurs équivalentes.

---

4. en anglais : *Global Warming Potential (GWP)*

- **les ratios techno-économiques** : calculent, d'un point de vue technique, le coût de production à partir d'une unité d'énergie.
- **les indicateurs d'économie d'énergie** : mesurent les économies d'énergie réalisées par les consommateurs au cours d'une période de temps donnée.

Dans [Giordano et al., 2012], les auteurs fournissent un cadre d'évaluation basé sur les travaux effectués par l'EPRI, *Electric Power Research Institute* pour conduire des analyses de rentabilité des projets portant sur les *smart grids*.

### 3.3.3/ LA QUALITÉ DE SERVICE

Il est aujourd'hui impossible d'imaginer la vie quotidienne sans avoir un accès continu à l'énergie. Offrir ce service à un nombre de personnes grandissant constamment est un véritable défi. Par exemple, le transport de l'énergie doit rencontrer un certain nombre de contraintes pour assurer la qualité de l'énergie. Certains indicateurs statistiques évaluant la transmission et la distribution existent [Sullivan and Schellenberg, 2011, ERC, 2005], ils permettent d'évaluer la qualité de tels services, nous pouvons citer :

- **MAIFI** : *Momentary Average Interruption Frequency Index*, cet index représente le nombre moyen de pannes de moins d'un certain temps se produisant sur une période donnée pour un consommateur ;
- **ASIDI** : *Average System Interruption Duration Index*, cet index représente la durée moyenne de pannes de plus d'un certain temps se produisant sur une période donnée pour un consommateur ;
- **ASIFI** : *Average System Interruption Frequency Index*, cet index représente le nombre moyen de pannes de plus d'un certain temps se produisant sur une période donnée pour un consommateur ;
- **SAIDI** : *System Average Interruption Duration Index* cet index représente la durée moyenne de pannes pour un consommateur ;
- **SAIFI** : *System Average Interruption Frequency Index*, cet index représente le nombre moyen de pannes pour un consommateur ;
- **CAIDI** : *Customer Average Interruption Duration Index*, cet index représente la durée moyenne de pannes que tous les consommateurs d'un réseau ont eues ;
- **SISI** : *System Interruption Severity Index* représente le rapport de l'énergie non utilisée durant une certaine période sur la consommation lors du pic ;
- **FoT** : *Frequency of Trippings* mesure le nombre de coupures de ligne forcées (transitoires et permanentes) déclenchées automatiquement par un relais ;
- **FLC** : *Frequency Limit Compliance* désigne le pourcentage de temps pour lequel la fréquence du courant alternatif du système est dans la plage autorisée (par exemple,  $60\text{Hz} \pm 0,3$ ) ;
- **VLC** : *Voltage Limit Compliance* désigne le pourcentage du nombre de mesures qui ne dépasse pas 5% de la tension nominale.

De plus, des standards existent. IEEE définit des standards [515, 2009] qui proposent un outil de comparaison des résultats obtenus dans le cadre de



l'évaluation de la qualité de service des réseaux électriques. Le Conseil des Régulateurs Européens de l'Énergie (CEER) fournit une analyse de la qualité des fournisseurs d'énergie à travers toute l'Europe [CEE, 2012]. Il fournit également un ensemble d'indicateurs surveillant en continu la qualité de la tension et la qualité commerciale. Ces données sont utilisées pour développer un point de référence complet.

### 3.3.4/ L'INTÉGRATION DE L'HUMAIN

Du point de vue des consommateurs, les réseaux d'énergie restent des boîtes noires avec une capacité infinie d'énergie. Malheureusement, les sources d'énergie renouvelable dépendent généralement de facteurs environnementaux difficilement prédictibles et non contrôlables (soleil, vent, etc.), contrairement aux centrales classiques à base de combustibles fossiles ou nucléaires. Il ne suffit donc pas de remplacer ces centrales par de nouvelles sources dites « propres » pour assurer la transition énergétique. Les *smart grids* doivent aussi permettre aux consommateurs de changer leurs habitudes.

Ce changement d'habitude nécessite de nouvelles interfaces et de nouveaux moyens de contrôle pour les consommateurs. De nombreuses études ont montré l'impact de la présentation des informations énergétiques sur le comportement des utilisateurs [Johnson, 2009, Voolink and Meertens, 1999, Van Houwelingen and van Raaij, T., 1989, Staats et al., 2004, Faruqi et al., 2009, Becker, 1978]. Il apparaît que le comportement humain est influencé principalement par les facteurs suivants :

- des informations personnalisées spécifiques à l'utilisateur,
- des objectifs et engagements,
- un retour d'information constant, notamment par des mesures de progrès vers les objectifs,
- des incitations financières pour encourager les consommateurs à participer.

La Télésurveillance et Acquisition de Données<sup>5</sup> est une première étape vers une interface de contrôle qui aidera au changement de comportement des utilisateurs. L'IEC PC 118<sup>6</sup> travaille actuellement sur un standard couvrant l'architecture des interfaces utilisateurs pour *smart grids*, les fonctions et les exigences de performance des équipements, mais aussi des interfaces d'échange d'informations entre les systèmes/équipements. Ces travaux ont pour but l'intégration d'applications permettant, par exemple, de résoudre le problème du *Demand Response*.

---

5. en anglais : *Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)*

6. *International Electrotechnical Commission*, voir <http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:7:0:::>  
FSP\_ORG.ID,FSP\_LANG.ID:8701,25

## 3.4/ RÉCAPITULATIF

Ce cadre d'évaluation fournit quatre critères pour évaluer l'impact des réseaux intelligents sur la société. Dans cette section, nous allons résumer les critères numériques pour évaluer et comparer les approches qui résolvent le même problème dans une même structure. Les critères définis ci-dessous ne sont pas les seuls à évaluer la qualité d'un réseau, mais ils représentent les améliorations qui doivent être prises en compte pour le futur des réseaux.

- Le Potentiel de Réchauffement Global semble être le facteur existant le plus à même d'évaluer l'aspect environnemental d'un réseau intelligent.
- Le facteur économique dépend des objectifs des futurs réseaux, mais tous les aspects peuvent être rattachés au prix de l'énergie. L'argent (dollar, euro, etc.) est donc un facteur évident de comparaison de plusieurs réseaux.
- La qualité de service peut être séparée en deux parties. La première représente le ressenti des consommateurs par rapport aux contraintes que leur impose le futur réseau (avec des indicateurs tels que MAIDI, CAIDI, etc.). La seconde correspond à la qualité de l'énergie sur le réseau et donc la stabilité de celui-ci (avec des indicateurs tels que FLC, VLC, etc.). Ces deux parties peuvent être reliées, la première étant une conséquence de la seconde.
- L'intégration de l'humain est le critère le plus difficilement quantifiable. Un critère simple de comparaison peut être le nombre d'interactions possibles entre l'humain et le réseau. Ces interactions offrent une plus grande flexibilité à l'humain donc améliorent potentiellement son bien-être.

Avec ces différents critères, il est possible de classer et d'évaluer différentes approches pour les réseaux futurs. Cette évaluation est importante, car elle permet de mettre en évidence les avantages et les inconvénients des approches déployées actuellement qui prennent rarement plus de 2 critères en compte. Il est évidemment très complexe de développer une approche résolvant l'ensemble des critères de manière optimale. Si des approches avec des objectifs différents parvenaient à collaborer dans un même réseau, il serait possible d'améliorer significativement les résultats sur ces futurs réseaux.

## 3.5/ ÉVALUATION

Dans cette section, nous procédons à une étude comparative d'approches multi-agents pour les réseaux intelligents à l'aide de la qualification et de l'évaluation définies précédemment. Après plus de dix années de recherche, des progrès incontestables ont été réalisés. En effet, les approches récentes sont de plus en plus efficaces, mais les résultats des benchmarks montrent que de nombreux efforts sont encore nécessaires pour offrir une boîte à outils vraiment complète d'approches pour les réseaux intelligents.

La plupart des approches ne fournissent pas assez de données chiffrées pour être évaluées, car la dimension structurelle n'est pas suffisamment décrite. C'est

l'un des points mis en évidence par cette étude. Nous présentons ici différentes approches déployées pour créer des réseaux intelligents.

### 3.5.1/ GRIDAGENT™

Développée par Infotility, la suite *GridAgent™ Enterprise Agent Manager* est l'interface utilisateur principale qui fournit une gestion centralisée de l'information. GridAgent™ fournit également une série d'agents préconfigurés, d'éditeurs spécialisés, d'applications ainsi que des outils de rapport d'alerte centralisés qui incluent un ensemble d'éditeurs, de visuels et d'outils analytiques permettant de traiter l'information.

GridAgent™ implémente plusieurs types d'agent offrant des méthodes d'analyse pour calculer de manière optimale les comportements sur le réseau en fonction des variations de prix. Des agents de planification et d'optimisation sont fournis pour la gestion des producteurs d'énergie renouvelable décentralisée. La suite offre également de nombreux scénarii tels que des stratégies de contrôle optimales de *microgrids*. Les agents peuvent aussi stocker leurs informations dans des bases de données par l'intermédiaire de nombreux média, comme Internet ou d'autres systèmes multi-agents. Enfin la suite offre une interface hommes-machines et une protection pour l'échange de données par le réseau.

Cette suite est développée pour gérer les sources d'énergie distribuées mais peut être utilisée pour une intégration à grande échelle des énergies renouvelables et décentralisées dans un système de distribution réelle.

Le Tableau 3.2 présente son évaluation.

### 3.5.2/ HOMEBOTS

HOMEBOTS [Akkermans et al., 1996, Ygge et al., 1996] est une approche traitant la gestion des équipements intelligents distribués à l'intérieur d'une maison. Il est basé sur un système multi-agents, les agents étant directement liés à un matériel spécifique. Le processus de gestion est basé sur un marché théorique, qui peut être considéré comme un système multi-agents, impliquant d'autres types agents spécifiques.

Dans ce contexte, chaque charge est représentée par un agent interactif, les préférences et besoins de ces agents permettent de définir une fonction d'utilité. Les agents sont regroupés en tenant compte de la topologie du réseau électrique et le système de communication.

La fonction d'utilité est définie par un agent de service. Cela permet de fournir une interface entre l'utilisateur et le système de gestion même si les échelles de temps pour les différents types d'agents (charge et service) ne sont pas nécessairement les mêmes.

Le Tableau 3.3 présente son évaluation.

<b>Dimension Structurale</b>	
<i>Type de réseau</i>	Réel, Un exemple est présenté dans [James et al., 2006]
<i>Réseau physique</i>	Oui
<i>Topologie</i>	Agrégation de <i>microgrids</i> .
<i>Taille du réseau</i>	Le système a été développé pour gérer un réseau d'énergie fournissant 24 000 transformateurs dans 63 réseaux de distribution. Il doit gérer les producteurs d'énergie renouvelable décentralisée, les hautes tensions à courant continu (27kV, 33kV, 33+kV), les basses tensions, mais aussi des outils de déploiement d'énergies renouvelables dans les entreprises
<i>Systèmes de stockage</i>	(Dé)charge intelligent des véhicules électriques
<i>Sources</i>	Intégration des énergies renouvelables
<i>Charges</i>	Consommations des bâtiments (habitats et entreprises)
<i>Évolutivité</i>	De par l'utilisation des systèmes multi-agents, le système est évolutif
<i>Communication</i>	Les agents jouent des rôles qui peuvent envoyer et recevoir des messages en conformité avec la FIPA.
<i>Microgrids</i>	Le système permet de créer à la volée des groupes pour l'intégration au marché.
<i>Îlotés</i>	En cas de problème, le système peut créer un sous-réseau îloté.
<i>Marché</i>	Oui
<i>Prix dynamiques</i>	Le système propose un algorithme de DR basé sur les échanges sur le marché
<i>Calendrier</i>	Inconnu
<b>Familles de problèmes</b>	
<i>Demand Response (DR)</i>	Regroupement des consommations. Possibilité de décaler ou de réduire la consommation ou utiliser la production locale. On suppose que chaque agent a un cycle d'exécution planifié.
<b>Critères sociétaux</b>	
<i>Environnement</i>	Réduire la consommation lors des pics de consommation et l'utilisation des énergies renouvelables.
<i>Économie</i>	Chaque agent peut choisir parmi les options disponibles selon le critère du coût d'exploitation minimum.
<i>Qualité de service</i>	L'utilisation des énergies renouvelables permet d'avoir une puissance réactive (près de l'utilisateur) pour assurer la stabilité du réseau.
<i>Intégration de l'humain</i>	Le système est prévu pour fonctionner sur une large gamme de plates-formes matérielles (tels que les PDA) et des sites (Internet).

TABLE 3.2 – Évaluation de GridAgent™

<b>Dimension Structurale</b>	
<i>Type de réseau</i>	Dans [Ygge et al., 1996], les approches réelles et virtuelles sont mentionnées, mais seule la simulation est présentée.
<i>Réseau physique</i>	Non
<i>Topologie</i>	Ensemble de périphériques pour une maison.
<i>Taille du réseau</i>	d'une à plusieurs maisons
<i>Systèmes de stockage</i>	Inconnu
<i>Sources</i>	Inconnu, la seule source mentionnée est le réseau principal
<i>Charges</i>	L'ensemble des périphériques que l'on trouve dans l'habitat (machine à laver, lumières, etc.)
<i>Évolutivité</i>	Les périphériques peuvent s'ajouter dynamiquement au réseau.
<i>Communication</i>	La communication est faite indirectement par les échanges sur le marché virtuel.
<i>Microgrids</i>	Un habitat est par définition un <i>microgrid</i> , mais le terme n'est pas utilisé directement.
<i>Îlotés</i>	Non
<i>Marché</i>	Marché virtuel au niveau de la maison.
<i>Prix dynamiques</i>	HOMEBOOTS est basé sur un marché virtuel dynamique
<i>Calendrier</i>	Inconnu
<b>Familles de problèmes</b>	
<i>Demand Response (DR)</i>	Deux exemples d'adaptation au manque d'énergie sont présentés. Dans le premier, l'adaptation est réalisée grâce à la fonction d'utilité. Dans le second, l'adaptation est réalisée en agissant sur le prix de l'énergie.
<b>Critères sociétaux</b>	
<i>Environnement</i>	Inconnu
<i>Économie</i>	Minimiser le coût de l'énergie sur le marché virtuel.
<i>Qualité de service</i>	Non prise en compte.
<i>Intégration de l'humain</i>	Les interactions peuvent être faites grâce au le marché.

TABLE 3.3 – Évaluation d'HOMEBOOTS

### 3.5.3/ IDAPS

IDAPS [Pipattanasomporn et al., 2009] est un concept de réseaux intelligents distribués proposé par l'*Advanced Research Institute of Virginia Tech*. Les agents du système IDAPS collaborent afin de détecter les pannes en amont et réagir en conséquence pour permettre au *microgrid* de fonctionner de manière autonome dans un mode îloté, coupé du réseau principal. Ce système multi-agents se compose de :

- Un agent de contrôle qui surveille la tension du réseau, détecte les problèmes et envoie des signaux au réseau principal.
- Un agent DER qui est responsable du stockage d'informations, de la surveillance et du contrôle des niveaux de puissance des énergies renouvelables.
- Un agent utilisateur qui agit en tant que passerelle pour communiquer avec les clients (utilisateurs ou charges).
- Un agent de base de données qui est chargé de stocker l'information du système.

IDAPS est réalisé avec Zeus [Nwana et al., 1999], une plateforme multi-agents respectant la norme FIPA.

Ce travail vise à démontrer une utilisation pratique des systèmes multi-agents dans un réseau intelligent pour une gestion de la distribution. Il démontre également que les agents ont la capacité d'être une alternative logicielle à un système de protection localisé basé sur le matériel traditionnel pour isoler un *microgrid*. IDAPS sépare le système multi-agents (développé avec Zeus) du matériel présent sur le *microgrid* (développé sous Matlab®/Simulink®).

Le Tableau 3.4 présente son évaluation.

### 3.5.4/ IDEAS PROJECT

The IDEAS PROJECT met actuellement l'accent sur les familles de problèmes suivants :

- Le Chauffage domestique adaptatif ([Rogers et al., 2011])
- La prédiction de la demande ([Rose et al., 2011, Rose et al., 2012])
- *Demand-Side Management* ([Ramchurn et al., 2011a, Ramchurn et al., 2011b])
- Les véhicules électriques ([Gerding et al., 2011, Robu et al., 2011, Stein et al., 2012])
- Le marché de l'énergie ([Vytelingum et al., 2010a, Miller et al., 2012, Alam et al., 2011, Robu et al., 2010])
- Le stockage d'énergie décentralisé ([Vytelingum et al., 2010b, Voice et al., 2011])
- Les *Virtual Power Plants* ([Chalkiadakis et al., 2011])

À titre d'exemple, seules deux approches proposées par IDEAS PROJECT seront évaluées à l'aide de notre cadre. Le premier aborde un problème de gestion de

<b>Dimension Structurale</b>	
<i>Type de réseau</i>	Réel
<i>Réseau physique</i>	Oui
<i>Topologie</i>	Circuit 9 de <i>Virginia Tech</i> : un circuit de distribution résidentiel de 34 branches de 117 transformateurs.
<i>Taille du réseau</i>	Ce circuit de distribution possède des tensions égales ou inférieures à 12.47kV et permet de servir 780 clients.
<i>Systèmes de stockage</i>	Modèles de batterie de Matlab®Simulink®.
<i>Sources</i>	Panneaux photovoltaïques, éoliennes, microturbines, pile à combustibles.
<i>Charges</i>	Besoins résidentiels typiques : éclairages, congélateurs, réfrigérateurs, sèches-linge, cuisines, chauffe-eau, climatisations, etc.
<i>Évolutivité</i>	De par l'utilisation des systèmes multi-agents, le système est évolutif.
<i>Communication</i>	Les agents peuvent communiquer grâce au protocole TCP/IP ou d'autres protocoles Internet.
<i>Microgrids</i>	Le système est un <i>microgrid</i> .
<i>Îlots</i>	En cas de problème, le système peut créer un sous-réseau îloté.
<i>Marché</i>	Oui
<i>Prix dynamiques</i>	Oui, les prix peuvent varier chaque minute à chaque heure.
<i>Calendrier</i>	Les prises de décisions sont basées sur la variation du prix.
<b>Familles de problèmes</b>	
<i>Demand Response (DR)</i>	Un <i>microgrid</i> IDAPS emploie un panneau d'affichage qui représente un marché pour les acheteurs et les vendeurs d'énergie. Cependant, au lieu d'équilibrer l'offre et la demande, ce sont aux utilisateurs finals de prendre la décision, pour acheter l'énergie ou reporter leurs consommations selon les informations de tarification de l'énergie fournies en temps réel par les producteurs du réseau.
<b>Critères sociétaux</b>	
<i>Environnement</i>	Utilisation de producteurs d'énergie renouvelable.
<i>Économie</i>	Inconnu
<i>Qualité de service</i>	Il suffit de suivre la tension et la fréquence du réseau. Temps de réponse en un demi-cycle électrique (soit moins de 8 millisecondes pour un système 60 Hz) entre la détection de la faute et la stabilisation du réseau.
<i>Intégration de l'humain</i>	Un User Agent rend les fonctions d'un <i>microgrid</i> IDAPS accessibles aux utilisateurs. Cet agent surveille la tension, les puissances actives et réactives et le courant courant de toutes les charges critiques ou non. Il permet également aux utilisateurs de contrôler leurs périphériques en fonction des priorités qu'ils ont pré-définies. Il récupère également des informations en temps réel et affiche les informations pertinentes sur une interface accessible aux utilisateurs. Il peut s'agir de prix (\$/kWh), de la quantité (kWh) ou de la durée de l'énergie disponible à l'achat.

TABLE 3.4 – Évaluation d'IDAPS

la demande (DSM). Le second traite des *Virtual Power Plants*.

- **Demand-Side Management** : Un modèle de gestion de la demande décentralisée est proposé et évalué dans [Ramchurn et al., 2011a]. Ce modèle vise à optimiser le report de charges de façon à maximiser le confort à la maison et minimiser le coût de l'énergie.

Le Tableau 3.5 présente son évaluation.

- **Virtual Power Plants** : Bien que la production d'énergie par des producteurs d'énergie décentralisée peut réduire la dépendance aux centrales électriques conventionnelles (à énergie fossile ou nucléaire), ils n'ont pas la capacité, la flexibilité et la modularité pour participer à l'approvisionnement de la demande de manière efficace, tant dans le réseau physique d'électricité que dans celui du marché de l'énergie. La création de *Virtual Power Plants (VPP)*, qui consiste à avoir une entité virtuelle qui gère un ensemble de producteurs d'énergie renouvelable décentralisés, a été suggérée au cours des dernières années pour faire face aux inconvénients cités précédemment.

Dans [Chalkiadakis et al., 2011], des VPPs composées de producteurs d'énergie renouvelable de petites et moyennes tailles sont contrôlées par une approche utilisant la théorie des jeux qui utilise un mécanisme de contrôle des prix et un système de répartition des gains au sein d'un même VPP.

Le Tableau 3.6 présente son évaluation.

### 3.5.5/ POWERMATCHER

PowerMatcher [Kok et al., 2010] est l'un des résultats du projet européen FP7 *Smart House/Smart Grid*<sup>7</sup>. Il consiste en un mécanisme de coordination ayant pour objectif l'équilibre entre l'offre et la demande dans des *microgrids* (potentiellement à multi-niveaux) en intégrant des producteurs d'énergie décentralisée. Ces *microgrids* sont définis comme des regroupements de sources et des charges. Le mécanisme de PowerMatcher implémente l'équilibre de l'offre et de la demande (SDM) en utilisant un système multi-agents et une approche de contrôle basée sur le marché. La technologie de PowerMatcher peut donc être à la base de la mise en place de VPPs.

Le Tableau 3.7 présente son évaluation.

Dans un système multi-agents de PowerMatcher, les agents sont organisés en une arborescence logique. Les feuilles de l'arbre regroupent un certain nombre d'agents locaux et, éventuellement, un agent global ayant un objectif unique. La racine de l'arbre représente l'agent commissaire-priseur, un agent unique qui s'occupe de la gestion des prix, c'est-à-dire qu'il recherche un prix qui équilibrera l'offre et la demande.

Ci-dessous une description des trois pilotes du projet :

- **Pays-Bas** : Il est composé de 25 maisons qui intègrent des compteurs in-

7. <http://www.smarthouse-smartgrid.eu/>



<b>Dimension Structurale</b>	
<i>Type de réseau</i>	Simulé
<i>Réseau physique</i> <i>Topologie</i> <i>Taille du réseau</i>	Oui <i>Microgrid.</i> Réseau composé de 5000 maisons, en utilisant des profils de charge de 26M maisons au Royaume-Uni.
<i>Systèmes de stockage</i> <i>Sources</i> <i>Charges</i>	Non intégrés pour ce problème. Non intégrés pour ce problème. L'ensemble des périphériques que l'on trouve dans l'habitat (comme les machines à laver et les laves-vaisselle, les réfrigérateurs, chaudières et radiateurs, les éclairages ou encore les nécessaires de cuisine).
<i>Évolutivité</i>	Il est démontré dans l'article que l'approche proposée peut être évolutive.
<i>Communication</i> <i>Microgrids</i>	Inconnu Le réseau de base est un <i>microgrid</i> , mais les maisons sont d'autres <i>microgrids</i> .
<i>Îlotés</i>	Non, car il n'y a pas d'intégration d'énergie propre au <i>microgrid</i> .
<i>Marché</i> <i>Prix dynamiques</i>	Oui Les prix sont alloués dynamiquement, en utilisant le prix en temps réel basé sur le modèle macro-économique du marché britannique de l'électricité.
<i>Calendrier</i>	Une décision par jour et par agent.
<b>Familles de problèmes</b>	
DSM	L'approche proposée consiste à coordonner un grand nombre d'agents. Chaque agent contrôle et adapte les charges reportables d'une maison afin de maximiser le confort et minimiser les coûts de l'énergie. Le mécanisme d'adaptation embarqué dans chaque agent est composé de deux processus. Premièrement, un mécanisme d'apprentissage Widrow-Hoff est utilisé pour adapter progressivement le report des charges sur la base du prix de l'énergie prévu pour le lendemain. Deuxièmement, un mécanisme stochastique est utilisé pour optimiser de nouveau les profils de charge thermique sur un jour.
<b>Critères sociétaux</b>	
<i>Environnement</i>	Réduire les émissions de carbone.
<i>Économie</i>	Réduire le coût de l'énergie.
<i>Qualité de service</i>	Non prise en compte.
<i>Intégration de l'humain</i>	L'utilisateur peut choisir les charges qui peuvent être différées.

TABLE 3.5 – Évaluation d'IDEAS PROJECT : *Demand-Side Management*

<b>Dimension Structurale</b>	
<i>Type de réseau</i>	Simulé
<i>Réseau physique</i>	Oui
<i>Topologie</i>	Agrégation de producteurs d'énergie renouvelables.
<i>Taille du réseau</i>	Le réseau a une capacité nominale de 17,5 MW et peut fournir 12000 foyers.
<i>Systèmes de stockage</i>	Inconnu
<i>Sources</i>	Utilisation de 24 éoliennes simulées avec des profils à partir des données réelles d'une ferme expérimentale de Sotavento en Espagne
<i>Charges</i>	Inconnu
<i>Évolutivité</i>	Il y a toujours le même nombre de producteurs.
<i>Communication</i>	Les VPPs communiquent leurs productions au réseau.
<i>Microgrids</i>	les <i>microgrid</i> sont représentés par des VPP.
<i>Îlotés</i>	Non, car il n'y a pas d'intégration de consommation.
<i>Marché</i>	Oui
<i>Prix dynamiques</i>	Les prix sont attribués de manière dynamique entre les VPPs et le réseau de distribution.
<i>Calendrier</i>	Des créneaux d'une heure.
<b>Familles de problèmes</b>	
VPP	Les VPPs représentent des collections de sources d'énergie (comme les systèmes de stockage ou de producteurs d'énergie renouvelable) qui peuvent être utilisées plus efficacement pour répondre à la demande au sein d'un réseau d'approvisionnement en électricité. Plusieurs techniques basées sur la théorie des jeux sont proposées dans cet article pour former et maintenir des VPPs et pour leur permettre de communiquer de manière fiable leur production au réseau d'électricité.
<b>Critères sociétaux</b>	
<i>Environnement</i>	Utilisation d'éoliennes.
<i>Économie</i>	Optimisation des gains de production.
<i>Qualité de service</i>	Non prise en compte.
<i>Intégration de l'humain</i>	Non prise en compte.

TABLE 3.6 – Évaluation d'IDEAS PROJECT : *Virtual Power Plants*

<b>Dimension Structurelle</b>	
<i>Type de réseau</i>	Les approches réelles et virtuelles sont développées. Lors de simulation, le pas de simulation correspond à 1 seconde.
<i>Réseau physique</i>	Oui
<i>Topologie</i>	Différents suivant les projets.
<i>Taille du réseau</i>	Différentes suivant le réseau (voir la description 3.5.5).
<i>Systèmes de stockage</i>	Intégration de batteries.
<i>Sources</i>	Panneaux photovoltaïques, éoliennes, et sources d'énergie classiques, en fonction du projet.
<i>Charges</i>	Charges reportables, charges décalables et charges classiques en fonction du projet.
<i>Évolutivité</i>	C'est l'un des objectifs de la PowerMatcher.
<i>Communication</i>	La communication est mise en œuvre par les compteurs intelligents et via des web-services.
<i>Microgrids</i>	La structure inhérente définie par le PowerMatcher est hiérarchique et permet de décomposer un réseau en sous-réseaux qui interagissent entre eux.
<i>Îlotés</i>	C'est l'une des contraintes du troisième essai.
<i>Marché</i>	Oui
<i>Prix dynamiques</i>	Non
<i>Calendrier</i>	Les prix du marché sont prévus chaque jour pour le jour suivant.
<b>Familles de problèmes</b>	
<b>SDM</b>	Le mécanisme de base de PowerMatcher consiste à résoudre le problème de l'équilibre entre l'offre et la demande. La structure logique utilisée permet également de s'attaquer au problème de la gestion des VPPs.
<b>Critères sociétaux</b>	
<i>Environnement</i>	Les sources d'énergie renouvelable et les batteries ont été utilisées dans les projets. Quelques premiers résultats montrent que l'utilisation de PowerMatcher peut porter de 14% à 21% la réduction de $CO_2$ .
<i>Économie</i>	La réduction lors des pics de consommation a été évaluée à 4,49% (moyenne annuelle) pour le projet pilote grec.
<i>Qualité de service</i>	Inconnu
<i>Intégration de l'humain</i>	Les clients sont intégrés comme des acteurs réels par le concept de semi-professionnels. En effet, chaque maison du projet pilote aux Pays-Bas offre une gestion de l'énergie qui met en œuvre la stratégie locale de gestion de l'énergie de l'utilisateur.

TABLE 3.7 – Évaluation de PowerMatcher

telligents Itron. 12 d'entre elles intègrent la cogénération (CHP) avec des chaudières à haute efficacité énergétique de  $1kW$  fonctionnant au gaz naturel. Les 13 autres possèdent une pompe à chaleur hybride qui combine une pompe à chaleur air-eau avec des chaudières à condensation. Chaque maison dispose de douze mètres carrés de panneaux photovoltaïques pour une capacité totale de  $1400W$ . 10 maisons possèdent une machine à laver et un lave-vaisselle intelligent, Miele. Une des maisons dispose d'un véhicule hybride Toyota Prius et deux autres disposent d'une voiture Volkswagen Golf 100% électrique. Enfin, une maison dispose d'une batterie plomb-acide standard pour stocker l'énergie solaire pour une utilisation ultérieure.

- **Allemagne** : L'installation des compteurs intelligents a été faite au cours du printemps 2010. L'installation des premiers prototypes dans les locaux des clients a commencé dans les maisons. Puis déployés au cours d'octobre et novembre 2010, pour pouvoir commencer les opérations d'essais sur le terrain. Meltemi comprend 220 chalets entièrement habités en été (de mai à septembre) et vide en hiver. Un chalet typique correspond à un bâtiment de  $70m^2$  de surface. La plupart des chalets sont vieux de plus de 30 ans.
- **Grèce** : Tout le camp est alimenté par une station de moyenne à basse tension triphasée. La charge maximale du site est d'environ  $220kW$ . En outre, un générateur diesel de  $40kW$  est présent. Enfin, des systèmes photovoltaïques sont installés dans certaines maisons ainsi qu'à l'entrée du camping. La capacité totale installée est de  $6kWp$ .

### 3.6/ CONCLUSION

Ce chapitre présente un cadre pour la qualification et l'évaluation des approches de réseaux intelligents. Cette contribution est principalement basée sur une étude comparative qui est menée sur la base d'un cadre d'évaluation analysant chaque approche. La comparaison n'est possible que pour des approches ayant la même structure et le même objectif, donc le document met d'abord l'accent sur la dimension structurelle et la dimension des problèmes pour regrouper les approches comparables. Puis, les critères sociétaux permettent de comparer ces différentes approches.

Cette étude vise à définir une cartographie des contributions existantes et à analyser leurs forces et leurs faiblesses. Notre objectif n'était pas de déterminer quelle approche est la meilleure. Cependant, l'étude présentée dans ce chapitre devrait aider à la comparaison des caractéristiques définies. Le lecteur doit être conscient des limites suivantes :

- Les résultats présentés dans ce travail sont basés sur les documents disponibles (articles, rapports techniques, présentations, etc.). Il y a certainement quelques éléments qui ont pu nous échapper et nous ne pouvons pas être absolument sûrs que les informations présentées sont complètes.
- L'étude est théorique. Il n'y a aucune expérimentation effectuée, autre que

celles disponibles dans la littérature, pour tester les différentes approches.

- Les caractéristiques définies pour l'analyse et la comparaison ont été influencées par l'actuel état de l'art du domaine qui en est encore à ses balbutiements. Des travaux futurs pourront améliorer ces caractéristiques et aller plus loin dans l'analyse.

# II

## MODÉLISATION ET CONCEPTION



# UNE APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE POUR L'ANALYSE ET LA CONCEPTION DE BOUCLES DE RÉTROACTION

## 4.1/ INTRODUCTION

Certains systèmes logiciels, en particulier ceux qui font l'objet d'une analyse et conception à base de SMA, sont qualifiés de complexes. Cette complexité peut être liée à la dynamique partiellement prédictible de l'environnement et aux fonctionnalités déployées. Pour traiter ce genre de problématique, le domaine de l'Intelligence Artificielle Distribuée s'est inspiré de métaphores issues de la théorie du contrôle et de la biologie pour analyser et concevoir des systèmes. Parmi ces métaphores, on peut citer : les systèmes de colonies de fourmis, le système immunitaire artificiel, les essaims particuliers et les boucles de rétroaction.

L'objectif des boucles de rétroaction est, dans ce cas, de permettre de définir des systèmes qui s'auto-adaptent en fonction de leurs contextes. Le principe consiste en une action en retour d'un effet sur sa propre cause. Les enchaînements en séquence des causes et effets définissent une boucle (dite boucle de rétroaction). Les boucles de rétroaction ont déjà été utilisées dans le cadre des SMA, par exemple, pour des applications comme le contrôle d'industries manufacturières, la robotique collective, la simulation, la conception de systèmes d'information [Informatik et al., 2000, Wolf and Holvoet, 2007, Caprarescu and Petcu, 2009, Beurier et al., 2003, Schmickl et al., 2011].

Toutefois, même s'il existe un grand nombre d'expériences concluantes, ce type de systèmes reste difficile à analyser et concevoir pour tout type d'application. En effet, malgré les travaux importants dans le domaine, il n'existe pas d'approches qui permettent de définir les boucles de rétroaction comme des entités de première classe et qui les prennent en compte dans un cadre méthodologique rigoureusement défini [Brun et al., 2009]. Par entité de première classe, on entend ici un objet qui peut être utilisé et manipulé (identité intrinsèque) au sein des modèles d'analyse, de conception et d'implémentation.

Dans ce chapitre, nous proposons un ensemble d'abstractions et un cadre



méthodologique afin de pallier ce manque. Pour cela, nous nous appuyons sur la méthodologie ASPECS [Cossentino et al., 2010, Cossentino et al., 2013] qui est dédiée à l'analyse, la conception et l'implémentation de systèmes complexes par des SMA.

La méthodologie ASPECS est une des méthodologies les plus complètes concernant les SMA [Isern et al., 2011]. En effet, sur la base d'un framework organisationnel, ASPECS fournit les concepts nécessaires pour décomposer un système complexe. La réalisation de ces systèmes est, ensuite, simplifiée grâce à une plateforme JANUS [Gaud et al., 2009], qui facilite la mise en œuvre des concepts de la méthodologie.

Le principe général de l'approche proposée est d'utiliser une analyse ontologique du domaine du problème d'intérêt. Ce type d'approche a déjà été utilisé dans [Hilaire et al., 2012] afin d'analyser et concevoir des SMAs basés sur des intelligences en essaim [Dorigo and Birattari, 2007]. L'approche ontologique permet de conceptualiser le problème d'intérêt et d'identifier les éléments qui constituent une boucle de rétroaction. Ces éléments peuvent être par la suite concrétisés au sein des structures organisationnelles sous-jacentes au SMA et par des mécanismes internes des agents.

Cette analyse ontologique est ensuite intégrée à la méthodologie ASPECS comme une des activités initiales de la méthodologie. L'ontologie de domaine résultant de cette activité est ensuite exploitée pour définir les organisations et les rôles qui seront mis en œuvre par les agents.

Ce chapitre est organisé comme suit : la section 4.2 présente un aperçu de notre approche, la section 4.3 présente la méthodologie ASPECS, la section 4.4 en détaille les principes et la section 4.5 conclut le chapitre.

## 4.2/ APERÇU DE L'APPROCHE

Dans cette section, les éléments qui ont servi d'inspiration à notre approche pour l'ingénierie de boucles de rétroaction sont présentés. Ces éléments sont le modèle influence/réaction [Ferber and Müller, 1996, Michel, 2007] et les automates combinatoires [Mella, 2008].

### 4.2.1/ MODÈLE INFLUENCE/RÉACTION

L'action d'un agent au sein d'un SMA est généralement modélisée comme la transformation d'un état global [Ferber, 1995], c'est-à-dire la modification directe de certaines variables de l'environnement. Le cœur du modèle Influence-Réaction [Ferber and Müller, 1996, Michel, 2007] consiste à séparer l'action d'un agent de l'effet qu'elle produit. Dans ce modèle, chaque action d'un agent produit des influences sur son environnement et non des modifications directes de cet

environnement. L'influence représente le désir d'un agent de voir modifier l'environnement d'une certaine façon. Le résultat effectif de cette tentative de modification de l'environnement par un agent ne peut être calculé sans connaître l'ensemble des influences produites au même instant. Ce modèle se base en fait sur la distinction claire entre deux dynamiques qui sont combinées dans un système multi-agents [Michel, 2007] : (i) La dynamique au niveau de l'agent qui produit des influences. (ii) La dynamique au niveau du système qui calcule la réaction de l'environnement compte tenu de l'ensemble des influences émises simultanément. Pour calculer cette réaction, les influences sont considérées en fonction des lois de l'univers [Ferber and Müller, 1996].

#### 4.2.2/ LES AUTOMATES COMBINATOIRES

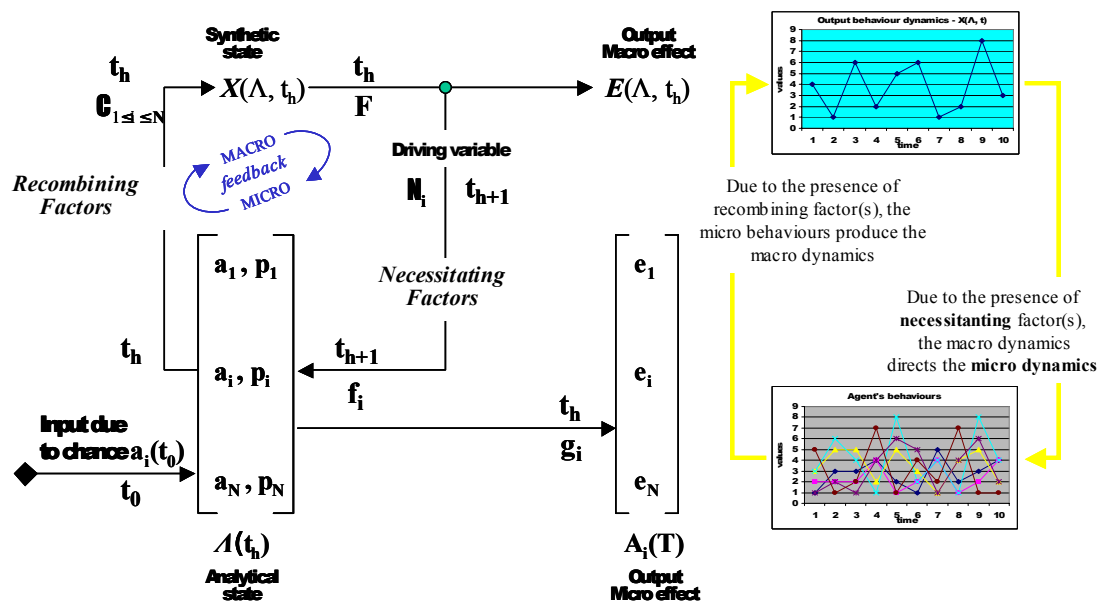


FIGURE 4.1 – Les automates combinatoires (extrait de [Mella, 2008])

Les principes que nous avons adoptés pour définir les primitives des boucles de rétroaction sont inspirés des travaux de Mella [Mella, 2008]. Dans ces travaux, l'auteur modélise les systèmes sous la forme d'automates dénommés automates combinatoires. Dans ces automates (voir figure 4.1), on distingue deux niveaux : le niveau micro et le niveau macro. Au niveau micro on a un ensemble d'entités exhibant un comportement et dénommées agents. Chaque agent possède un ensemble de caractéristiques pertinentes. L'ensemble de ces caractéristiques qualifie l'état du système à un instant donné. Chaque comportement d'agent est qualifié de micro-comportement ou micro-effet. Ces micro-comportements sont composés par le biais d'opérateurs, appelés opérateur de recombinaison (*Recombining factors*), afin de produire un ensemble d'influences sur l'état du système. Ces influences sont traitées au niveau macro et produisent par le biais d'un opérateur dit de « nécessité » qui crée le nouvel état par modification de l'ancien et crée,

par là même, les conditions propices à une boucle de rétroaction. Ce mécanisme est similaire au modèle influence/réaction [Ferber and Müller, 1996], mais introduit un niveau supplémentaire.

## 4.3/ ASPECS

ASPECS [Cossentino et al., 2010, Cossentino et al., 2013] est un processus d'ingénierie logicielle qui décrit pas à pas les étapes à suivre pour le développement de logiciels, en commençant par l'analyse des besoins jusqu'à la production du code et au déploiement de celui-ci sur une plate-forme spécifique. Il est basé sur le métamodèle CRIO<sup>1</sup> [Cossentino et al., 2007] qui est basé sur des théories organisationnelles et qui définit les principaux concepts pour l'analyse, la conception et l'implantation des SMA.

Dans le métamodèle CRIO, les rôles fournissent des comportements de base aux agents. Ces rôles précisent les attentes de l'organisation dans laquelle ils évoluent et les interactions qu'ils peuvent avoir avec les autres rôles de cette organisation. Cependant, afin d'obtenir des modèles génériques d'organisations, il est nécessaire de définir un rôle sans faire de suppositions sur l'agent qui le jouera. La capacité permet cette généralité. Un rôle impose aux agents qui le jouent des capacités spécifiques correctement définies. Un agent doit avoir toutes les capacités requises pour jouer un rôle.

### 4.3.1/ LES CONCEPTS

ASPECS est une méthodologie pour SMA qui est orienté vers l'analyse et la conception de systèmes complexes. Pour cela, l'orientation choisie est d'adhérer au postulat de Simon [Simon, 1996] qui considère que « L'arborescence est un des schémas structurels de base qu'utilise l'architecte de la complexité. » Par système hiérarchique (ou arborescent) ou arborescent, il entend un système composé de sous-systèmes inter-reliés, chacun d'entre eux ayant, à son tour, une structure arborescente, cela jusqu'à ce que nous atteignons le plus bas niveau des systèmes élémentaires. Pour ce faire, ASPECS propose d'associer les SMA et les systèmes holoniques. Les systèmes complexes sont ainsi modélisés au moyen d'une hiérarchie d'agents, d'une structure gigogne où les agents sont composés d'agents.

Cette notion d'agents composés d'agents est modélisée par le concept de *Holon*. Le terme *Holon* résulte de l'association du terme grec « holos » qui signifie le « tout » et du suffixe « -on » qui réfère à l'entité ou la particule comme dans neutron, proton ou électron. Ce terme fut introduit par le philosophe hongrois [Koestler, 1967] pour tenter d'unifier les visions holistique et réductionniste sur le

---

1. Capacité, Rôle, Interaction, Organisation

monde. Un holon est un élément qui peut être vu à la fois comme une partie composante d'un élément de niveau supérieur, et comme un tout composé d'autres holons. Par conséquent, la notion de holon est intrinsèquement récursive et permet de décrire naturellement des systèmes de nature hiérarchique. Ce concept a été adopté par la communauté de l'intelligence artificielle distribuée sous le nom de systèmes multi-agents holoniques [Gerber et al., 1999] (désigné par SMAH dans la suite de ce document). De nombreux exemples de holarchies peuvent être trouvés dans la vie quotidienne : le corps humain, les villes, ou encore les universités. Une représentation holarchique d'une université est donnée par la figure 4.2.

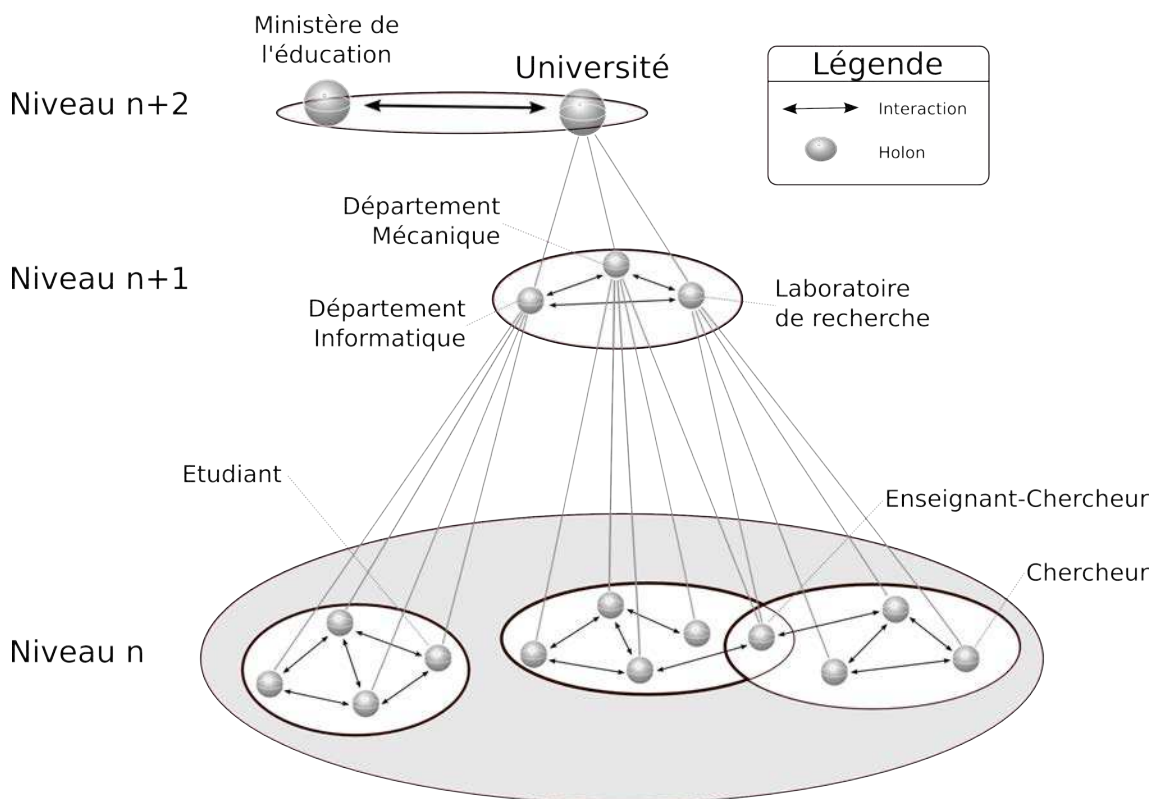


FIGURE 4.2 – Exemple de la structure holonique d'une université (tiré de [Gaud, 2007])

#### 4.3.2/ LES PHASES

Les phases du processus sont illustrées par la figure 4.3.

- L'analyse des besoins vise à fournir une description organisationnelle du système (décomposition hiérarchique du système). Elle doit également collecter les connaissances disponibles sur le domaine du problème et les organiser au sein d'une ontologie.
- La conception d'une société d'agents cherche à construire le modèle d'un SMA, dont le comportement global doit être en mesure de fournir une solu-

tion au problème décrit dans la phase précédente. Les connaissances sur le système sont affinées et intègrent les éléments spécifiques à la solution proposée.

- L'implémentation de la solution décrit l'architecture des agents impliqués dans la solution et doit fournir le code source de l'application.
- Le déploiement de la solution constitue la phase finale chargée du déploiement de l'application sur la plate-forme choisie. Le langage de modélisation adopté est UML. Afin de pleinement satisfaire les objectifs et les besoins spécifiques à l'approche orientée-agents, la sémantique et les notations d'UML ont été étendues, et de nouveaux profils UML ont notamment été introduits.

### 4.3.3/ LES ACTIVITÉS

#### 4.3.3.1/ DESCRIPTION DE L'ONTOLOGIE DE DOMAINE

L'objectif global de l'activité de description de l'ontologie du problème est de fournir une première description du contexte de l'application et du vocabulaire spécifique au domaine. Les utilisateurs et parties prenantes du système expriment naturellement leurs besoins avec leur langage propre et la connaissance implicite de leur propre travail [Sommerville, 2004]. Cette activité vise avant tout l'approfondissement de la compréhension du problème en complétant une éventuelle analyse des besoins par la description des concepts qui composent le domaine du problème, et leurs relations. Cette description est basée sur le vocabulaire et le langage spécifiques du domaine de l'application et des utilisateurs du système. Le résultat de cette activité peut d'ailleurs parfois induire des modifications dans l'analyse des besoins menée préalablement. L'analyse de l'ontologie du domaine intervient très tôt dans le processus méthodologique ASPECS. En effet, cette analyse ontologique joue un rôle crucial dans les activités qui en découlent dans la méthodologie, notamment pour faciliter les phases d'identification des organisations, des rôles et des capacités. Cet aspect a été utilisé dans [Hilaire et al., 2012] pour définir des structures organisationnelles pour des intelligences en essaim.

#### 4.3.3.2/ IDENTIFICATION DES ORGANISATIONS

L'objectif de l'identification des organisations est d'associer à chaque besoin ou fonctionnalité un comportement global capable de le satisfaire ou de la réaliser. Ce comportement global est modélisé par une organisation. Cette organisation est ensuite décomposée en un ensemble de sous-comportements en interaction dans l'activité suivante consacrée à l'identification des rôles et des interactions. Le contexte de ces organisations sera défini en se basant sur l'ontologie décrite dans l'activité précédente.

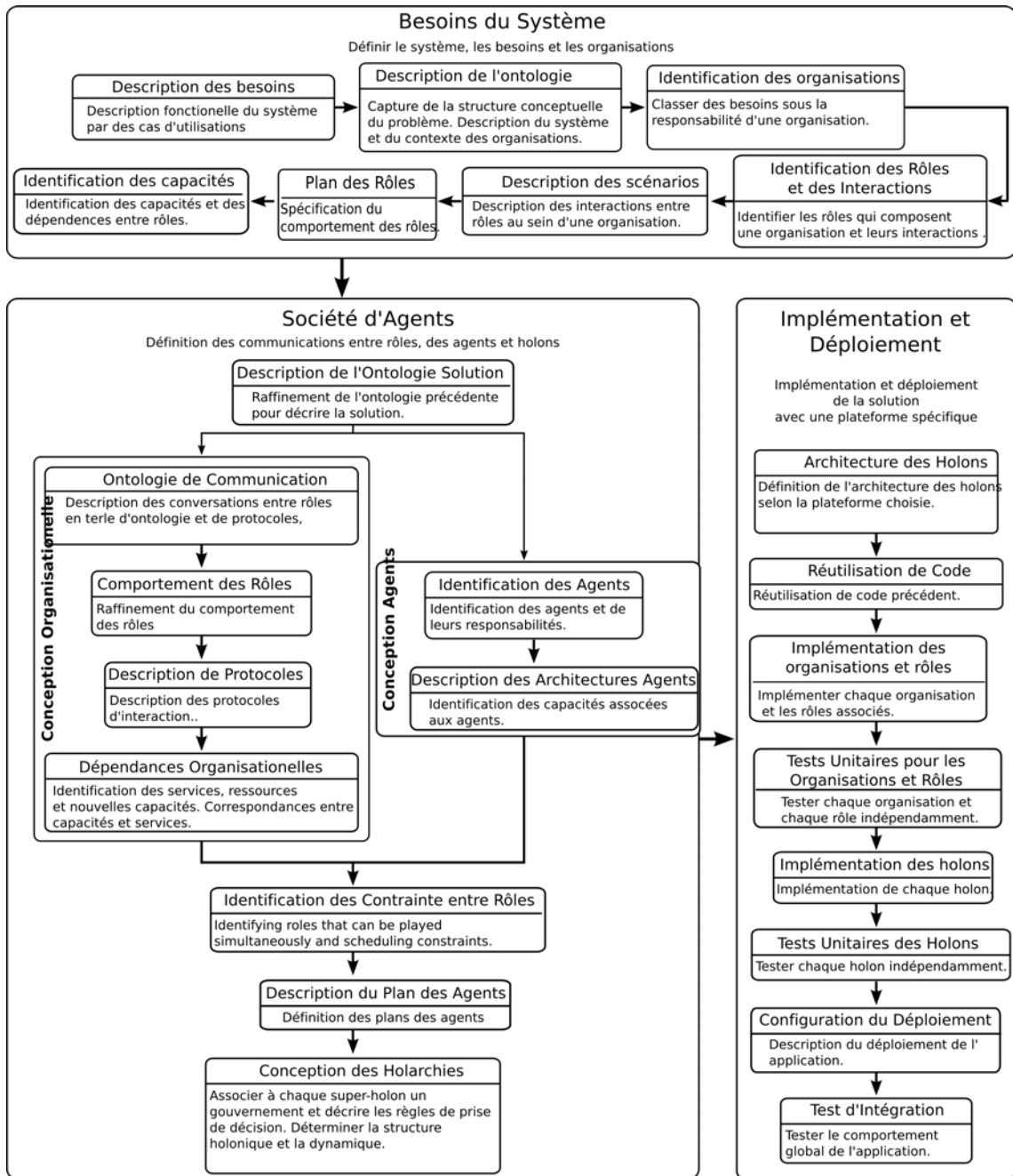


FIGURE 4.3 – Phases et activités d'ASPECS

#### 4.3.3.3/ IDENTIFICATION DES RÔLES ET DES INTERACTIONS

L'objectif de cette activité est double. Premièrement, associer à chaque organisation un ensemble de fonctionnalités et/ou des responsabilités (objectifs). Deuxièmement, définir le contexte de chacune d'elle à l'aide d'un ensemble de concepts de l'ontologie.

L'identification des interactions et des rôles vise à décomposer le comportement global incarné par une organisation en un ensemble de (sous-)comportements, plus simples, en interactions. Chacun de ces comportements, supposés de complexité inférieure, est représenté par un rôle. L'objectif de chaque rôle est de contribuer, pour partie, à la satisfaction du ou des objectifs associés à son organisation. Chaque rôle est également associé à un ensemble de concepts dans l'ontologie, généralement un sous-ensemble de ceux associés à son organisation. Cette activité a aussi pour objectif de compléter et d'affiner la délimitation du périmètre de l'application débutée dans l'activité de description des besoins.

#### 4.3.3.4/ DESCRIPTION DE SCÉNARIOS

Comme de nombreuses méthodologies, ASPECS intègre alternativement dans son processus des activités de description statique et dynamique du système à concevoir. Les scénarii sont issus de l'étude de la décomposition des organisations et donc des deux activités précédentes. Chaque scénario vise à détailler les interactions entre rôles et à partiellement valider la réalisation des objectifs d'une organisation par le biais des interactions des rôles qui la composent.

#### 4.3.3.5/ PLAN DES RÔLES

L'activité de description des plans de comportement des rôles vise à décrire le comportement de chaque rôle abstrait. L'objectif d'un rôle est de contribuer pour partie aux besoins assignés à l'organisation sur laquelle il est défini. Les responsabilités attribuées à chaque rôle ont été définies dans l'activité d'identification des interactions et des rôles puis raffinées lors de la description de scénarios. Le comportement associé à chaque rôle est ici décrit dans un plan de comportement. Ce dernier détaille l'ensemble des étapes nécessaires à un rôle pour satisfaire les objectifs qui lui sont attribués. Il décrit comment combiner et ordonner : les interactions, les événements extérieurs et les tâches (*RoleTask*) qui composent le comportement de chaque rôle pour satisfaire les objectifs d'une organisation. Dans une seconde itération, les tâches faisant usage de capacité pourront être décomposées. Enfin, cette activité vise également à raffiner l'association entre rôles et connaissances qu'ils manipulent (concepts de l'ontologie).

#### 4.3.3.6/ IDENTIFICATION DES CAPACITÉS

Le concept de capacité dans le métamodèle CRIO permet de modéliser les compétences d'une entité ou d'une organisation. La capacité dispose donc d'un double rôle dans ce modèle. Le premier consiste à faire l'interface entre le comportement des rôles et les entités susceptibles de les jouer. La définition du comportement du rôle est basée sur une description générique des compétences qu'il requiert pour toute entité désirant le jouer. Ces entités se doivent ensuite de fournir une réalisation de ces compétences génériques pour être en mesure d'accéder au rôle. Le second est relatif à sa relation avec la notion de service et à l'exploitation de compétences collectives d'un niveau hiérarchique donné pour accéder à une capacité plus complexe permettant à une entité de niveau supérieur de jouer des rôles inaccessibles à celles du niveau inférieur.

Ces deux aspects de la notion de capacité sont exploités dans le processus méthodologique d'ASPECS. Le premier est utilisé dans cette activité. Quant au second, il sera utilisé dans la phase de conception de la société agent, lors de la description des dépendances des organisations. L'activité d'identification des capacités vise en effet à obtenir des comportements « génériques » de rôles. L'objectif est donc de pouvoir définir ces comportements sans faire d'aprioris sur l'architecture des entités qui vont les jouer, et indépendamment de tous éléments extérieurs à la définition du rôle lui-même. Le principe consiste donc à identifier puis à décrire les compétences que requiert chaque rôle. L'objectif général est de clairement séparer les connaissances liées au rôle de celles de l'entité qui va le jouer.

Par exemple, l'une des tâches d'un rôle peut consister à effectuer un choix particulier entre divers éléments (par exemple : déterminer le meilleur collaborateur pour effectuer une tâche donnée). Le résultat de ce choix peut dépendre du réseau d'acointances de l'entité jouant le rôle (par exemple : je choisis en priorité les entités avec lesquelles j'ai déjà travaillé et parmi elles, celles dont le travail était satisfaisant). Dans ce cas, ce choix se doit d'être externalisé du rôle sous forme d'une capacité, car il dépend d'informations personnelles, et donc dépendant du contexte de l'entité le jouant. La manière d'effectuer ce choix peut également être fixée dans le comportement du rôle et être imposée à toute entité qui le joue.

La création d'une capacité dépend donc du niveau de dynamisme et de généricité que le concepteur souhaite apporter à son système ou à une de ses composantes. Le principe consiste à déterminer si l'on désire laisser une ou plusieurs possibilités d'implémentation pour une fonction donnée. Dans le premier cas, la fonction sera directement implémentée dans le comportement du rôle, et dans le second cas, une capacité sera créée pour décrire la fonction requise.



## 4.4/ ANALYSE DES BOUCLES DE RÉTROACTION

### 4.4.1/ CONCEPTUALISATION

Une fois les objectifs de l'application déterminés, l'ensemble des connaissances disponibles sur l'application et son contexte est conceptualisé dans l'ontologie du problème.

#### **Définition 4 : Ontologie [Guarino, 1998]**

Une ontologie est un ensemble de termes et de concepts structurés entre eux par des liens de divers types, chaque concept pouvant présenter plusieurs sens thématiques.

La description de l'ontologie du problème doit fournir une première définition du contexte de l'application et du vocabulaire spécifique au domaine. Elle vise à approfondir la compréhension du problème, en complétant l'analyse des besoins et les cas d'utilisation, avec la description des concepts qui composent le domaine du problème, et de leurs relations. L'ontologie joue un rôle crucial dans le processus de développement ASPECS. En effet, sa structure sera un élément déterminant pour l'identification des organisations. L'ontologie est décrite ici en termes de concepts, d'actions et de prédicats. Elle est représentée à l'aide d'un profil UML spécifique pour les diagrammes de classes. Ce profil est inspiré d'une spécification de la FIPA<sup>2</sup> [FIPA, 2001].

Les stéréotypes définis par ce profil sont :

- « concept » : pour désigner une entité du domaine,
- « action » : pour désigner une transformation d'un concept,
- « predicate » : pour désigner un prédicat relatif à un ensemble de concepts.

Chaque « concept » ou entité du domaine désigne une entité d'intérêt lors de la phase d'analyse. Ces entités peuvent représenter : des ressources, des acteurs, des objets manipulés, etc.. Chaque classe stéréotypée « concept » peut également être décrite par un ensemble d'attributs et d'opérations pour la caractériser.

Une « action » représente un traitement ou une transformation dans le domaine d'intérêt. Ce traitement ou cette transformation peut également être précisé par des attributs et des opérations. La classe représentant l'action peut, éventuellement, être liée par une association au « concept » qui effectue cette action. Cette association est nommée *Actor*. Une deuxième association, également optionnelle, permet de définir un lien entre l'action et un ensemble de « concepts » paramètres pour cette action. Cette association est nommée *Argument*.

Enfin, un prédicat permet de représenter une connaissance du domaine sous forme de propriété. Cette propriété s'exprime par un prédicat comme en logique

---

2. Foundation for Intelligent Physical Agents

du premier ordre. Un prédicat peut être associé à un ensemble de « concepts » qui sont les variables du prédicat.

Lors de l'analyse d'un système, et en particulier lors de la description de l'ontologie de domaine correspondant au résultat de l'activité POD, un certain nombre d'éléments sont à identifier pour l'analyse d'une boucle de rétroaction.

Une boucle de rétroaction nécessite tout d'abord la présence d'au moins deux niveaux de description : un niveau macro et un niveau micro. Ces deux niveaux sont matérialisés dans l'ontologie de domaine par une composition de concepts. Le concept correspondant au tout appartient au niveau macro et le concept composé appartient au niveau micro. Un exemple d'une telle composition est présenté dans la figure 4.4 par la composition entre le concept *A* et le concept *B*. *A* désigne le niveau macro et *B* le niveau micro.

#### Règle 1 :

Pour définir une boucle de rétroaction, il faut disposer de deux niveaux de description.

Dans chacun de ces niveaux, on doit distinguer des entités agissantes ou acteurs. Un acteur (ou un ensemble d'acteurs) appartient au niveau macro, *ActorMacro* dans la figure 4.4, et un ensemble d'acteurs appartiennent au niveau micro, *ActorMicro*. Chacun de ces types d'acteur peut exercer des actions. Les acteurs de niveau micro, *ActorMicro*, exercent l'action *necessitating* qui produit un ensemble de résultats (un par acteur) qui sont représentés par le concept d'*influence*. Ces *influences* sont les paramètres de l'action exercée par l'acteur *ActorMacro* de niveau macro. Cette action a pour nom *recombining*. Le résultat de *recombining* est représenté par le concept *reaction* qui est pris comme argument par l'action *necessitating*.

#### Règle 2 :

Une boucle de rétroaction implique la présence d'un ensemble d'actions du niveau micro qui impactent le niveau macro et qui résulte d'une action du niveau macro elle-même impactant le niveau micro.

La figure 4.5 présente un exemple d'ontologie de domaine pour un sous-problème du *Supply and Demand Matching* présenté au chapitre 5. Dans ce problème, on a notamment les concepts de *Grid* et de *Device*. Un *Grid* représente un réseau, éventuellement de type micro-réseau, et un *Device* représente un dispositif électrique qui consomme ou produit. Ces deux concepts sont de niveaux différents comme matérialisés par la composition de *Grid* vers *Device*. Le concept de *Grid* correspond donc au niveau macro et le concept *Device* au niveau micro. Au sein d'un *Grid*, la loi de Kirschhoff doit être respectée. La somme de tous les flux positifs et négatifs doit donc être nulle. Cette propriété est représentée par le prédicat *KirschhoffLaw*. Par ailleurs, les flux eux-mêmes sont représentés par les actions *FlowIn* et *FlowOut*. Ces deux actions constituent les influences du niveau micro.

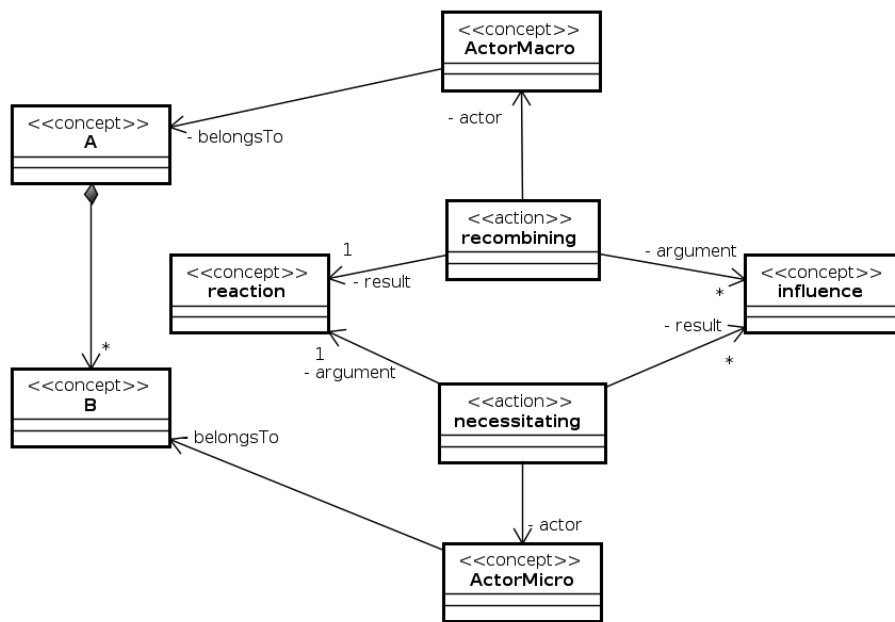


FIGURE 4.4 – Concepts nécessaires pour une boucle de rétroaction

Au niveau macro, on a un concept *Agregator* qui fixe le ou les prix de l'énergie par le biais de l'action *SetPrices*. Cette action est la réaction du niveau macro aux influences décrites précédemment.

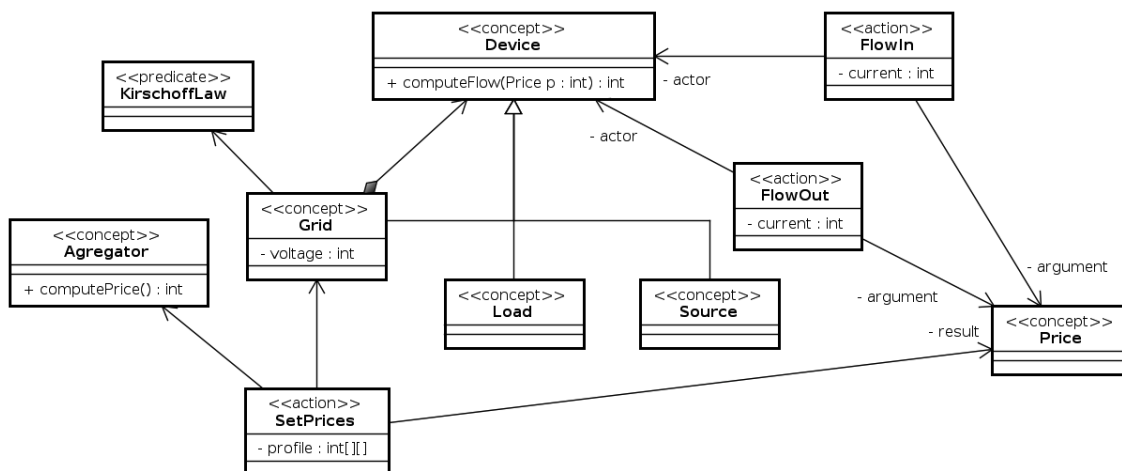


FIGURE 4.5 – Exemple d'ontologie de domaine

#### 4.4.2/ IDENTIFICATION DES ORGANISATIONS

L'activité suivant la définition de l'ontologie de domaine consiste à identifier les organisations qui vont être la base de la satisfaction des objectifs du système. La

figure 4.6, à partir des éléments de l'ontologie de domaine, propose un squelette de structure organisationnelle. Dans cette structure, le niveau macro et le niveau micro sont respectivement représentés par des organisations. L'organisation qui représente le niveau macro est liée à une autre organisation qui représente le niveau micro. Ce lien est matérialisé par une ligne en pointillé étiquetée « feedback » sur la figure 4.6. Réciproquement, l'organisation représentant le niveau micro est liée à celle représentant le niveau macro. Ce lien est étiqueté « contributes To ». Il n'y a pas de limites théoriques à l'inclusion en cascade de boucles de rétroaction.

### Règle 3 :

Une boucle de rétroaction implique la définition d'une structure organisationnelle à deux niveaux au moins dans laquelle une organisation de niveau  $i + 1$  intègre une (sous-)organisation de niveau  $i$ .

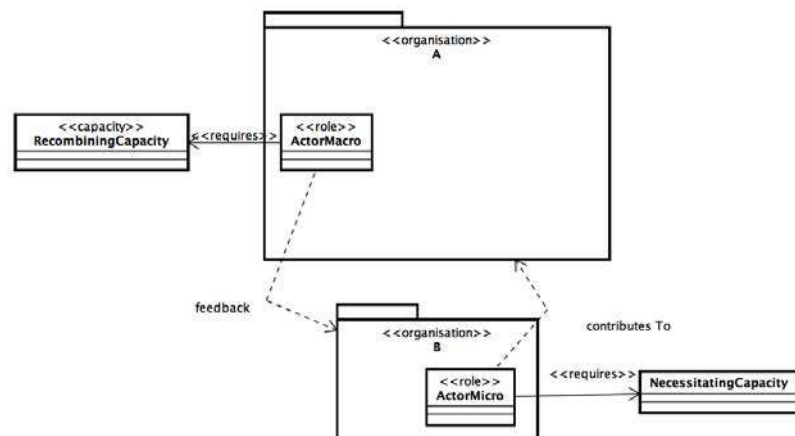


FIGURE 4.6 – Squelette d'organisations

#### 4.4.3/ IDENTIFICATION DES RÔLES ET DES INTERACTIONS

Une fois les organisations définies, l'analyste peut les peupler de rôles en interaction. Le principe est que chaque organisation possède un rôle (au moins). L'organisation A dans l'activité précédente, correspondant au niveau macro, possède le rôle *ActorMacro*. Ce rôle doit posséder la capacité correspondant au calcul de la réaction dans la boucle de rétroaction, soit *RecombiningCapacity*. L'organisation B, correspondant au niveau micro, possède le rôle *ActorMicro* qui doit posséder la capacité correspondant à l'émission d'influences dans le niveau micro, soit *NecessitatingCapacity*.

### Règle 4 :

Une boucle de rétroaction implique un rôle, au moins, au niveau macro et un rôle, au moins, au niveau micro. Le rôle au niveau macro (resp micro) correspond

au comportement mettant en oeuvre l'ensemble d'actions qui impacte le niveau micro (resp macro).

Il est bien évident que les organisations proposées ne sont pas complètes. Il peut être nécessaire d'ajouter des rôles et des interactions entre ces rôles afin de satisfaire l'ensemble des objectifs du système.

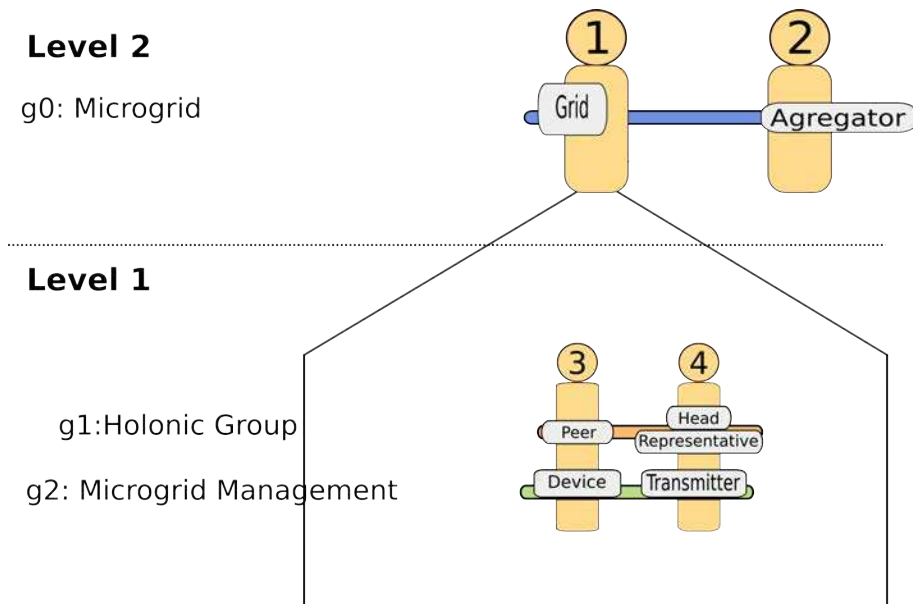


FIGURE 4.7 – La structure organisationnelle exemplifiée

#### 4.4.4/ SCÉNARIOS

À partir des organisations et des rôles identifiés, on peut également définir comme scénario de base le scénario décrit par la figure 4.8. Une nouvelle fois, ce scénario n'est pas forcément complet et d'autres rôles et interactions peuvent venir en supplément. Toutefois, la contrainte imposée par la boucle de rétroaction est que l'ordre des messages indiqués doit être respecté. D'autres messages peuvent, par contre, éventuellement s'entrelacer avec les quatre déjà définis.

#### 4.4.5/ IDENTIFICATION DE CAPACITÉS

L'organisation *A* dans l'activité précédente, correspondant au niveau macro, possède le rôle *ActorMacro*. Ce rôle doit posséder la capacité correspondante au calcul de la réaction dans la boucle de rétroaction, soit *RecombiningCapacity*. L'organisation *B*, correspondant au niveau micro, possède le rôle *ActorMicro* qui doit posséder la capacité correspondant à l'émission d'influences dans le niveau micro, soit *NecessitatingCapacity*.

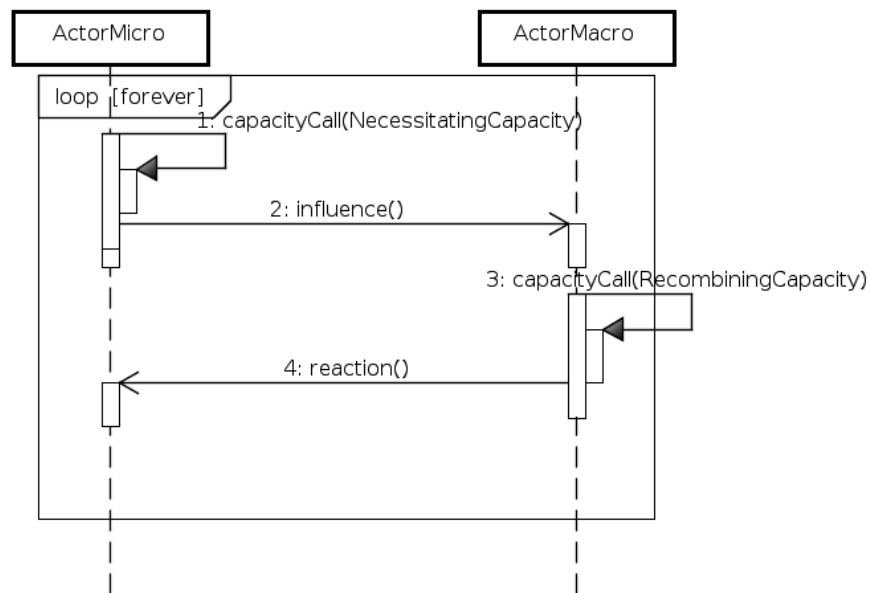


FIGURE 4.8 – Scénario de base

**Règle 5 :**

Une boucle de rétroaction implique, pour le rôle correspondant au niveau macro (resp micro), la présence d'une capacité apte à produire l'effet de « nécessité » (resp les micro-effets).

Ces capacités peuvent ensuite être implémentées de manière différente lors de la conception d'agents mettant en œuvre la structure organisationnelle définie lors de l'analyse. Une architecture possible d'agents correspondant à ce type de capacité est présentée dans le chapitre suivant. Celle-ci est basée sur des mécanismes d'apprentissage artificiel.

**4.5/ CONCLUSION**

Ce chapitre a présenté une approche qui définit un ensemble de concepts et un cadre méthodologique pour l'analyse et la conception de boucles de rétroactions au sein de SMA et en particulier de SMAH. L'idée générale est de réifier les concepts nécessaires à l'analyse et la conception de boucle de rétroactions et d'intégrer ces concepts dans le cadre d'une méthodologie.

Cette approche s'appuie sur la méthode ASPECS. L'idée est de s'appuyer sur l'analyse de l'ontologie de domaine pour identifier les propriétés minimales en terme de structure, de comportements individuels et d'interactions qui peuvent donner lieu à des boucles de rétroaction. Le résultat de ces activités est donc un squelette de structure organisationnelle associé aux interactions qui vont permettre de préciser le fonctionnement concret des boucles de rétroaction. Une fois

ces boucles identifiées, les activités suivantes les raffinent pour construire les composants des structures organisationnelles. Plus spécifiquement, il s'agit de décomposer ces organisations par des rôles en interaction qui vont être mis en oeuvre par des agents.

Cette approche méthodologique constitue notre proposition pour permettre d'aborder le domaine des *smart grids* et en particulier l'aspect contrôle. En effet, la décomposition en boucles de rétroaction à différents niveaux est une approche pour simplifier le traitement des différents problèmes soulevés par les *smart grids*. Ces problèmes, dont certains sont discutés au chapitre 3, sont de nature hétérogène, mais la plupart sont liés entre eux.

Les éléments présentés vont être mis en oeuvre, au chapitre 5, au sein d'une architecture d'agent qui repose sur un mécanisme d'apprentissage par renforcement.

# UN MODÈLE DE GESTION OFFRE-DEMANDE DANS UN MICROGRID

## 5.1/ INTRODUCTION

La méthodologie détaillée dans le chapitre 4 présente un cadre de définition de systèmes auto-adaptatifs, qui permet de définir les boucles de rétroaction comme des entités de première classe. Cette approche abstraite est la première étape vers la définition d'un problème multi-niveaux concret.

La gestion d'énergie se prête particulièrement bien à la définition d'un système auto-adaptatif permettant de réguler les flux d'énergie sur un réseau électrique. Un réseau électrique peut être découpé en différentes échelles, temporelles ou géographiques. De plus, les nombreux problèmes que pose la gestion d'énergie n'offrent pas de résolution unique et commune à l'ensemble des problèmes, certains problèmes proposant même des résolutions contradictoires (vendre le plus cher, acheter le moins cher). Enfin, avec l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques de nouveaux problèmes apparaissent. Par exemple, Il peut être compliqué de prédire la production d'énergie des panneaux photovoltaïques même en connaissant l'irradiation solaire de la zone dans laquelle ils sont implantés. Dans ce cas, ces complications viennent de perturbations extérieures éventuelles telles que des nuages pouvant réduire significativement la production d'énergie. Il est tout aussi compliqué de prévoir l'énergie produite par les éoliennes, comme le présentent les courbes de la figure 5.1.

Il est donc intéressant de définir une problématique multi-niveaux, incluant des boucles de rétroaction. Cela permet aux différents acteurs d'un réseau électrique d'atteindre leurs buts tout en assurant la viabilité du réseau. Dans cette partie, nous présenterons un modèle de gestion d'énergie multi-niveaux pour un *micro-grid*. Un *microgrid* représente une partie basse tension d'un réseau d'énergie électrique pouvant inclure des générateurs d'énergie décentralisée (et potentiellement renouvelable), des systèmes de stockage et une partie des usagers du réseau, il comprend donc, à une dimension plus faible, l'ensemble des acteurs pouvant être présent sur un réseau global. Cela nous permet donc de résoudre à une échelle plus faible un problème qui apparaît aussi sur de grands réseaux.



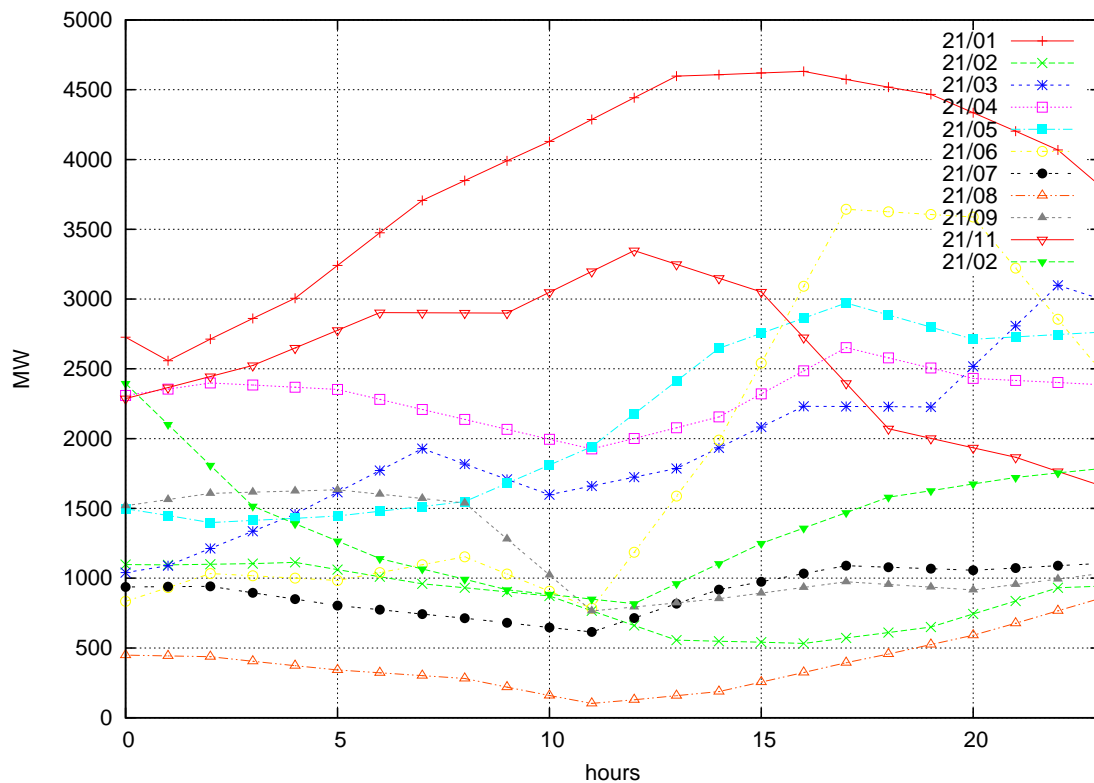


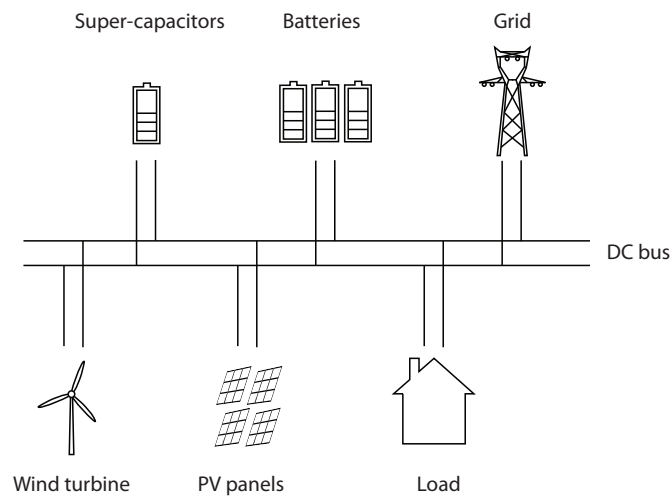
FIGURE 5.1 – Estimation de la production d'énergie éolienne française en 2012

Dans ce chapitre, nous définissons un problème de gestion d'énergie dans un *microgrid*. Ce problème a pour but de prendre en compte les critères définis dans la section 3.3 pour assurer la durabilité d'un réseau électrique.

La section 5.2 présente les problèmes liés à la gestion de *microgrids*, détaille l'ontologie du domaine, et intègre les boucles de rétroaction dans le processus de résolution des objectifs fixés. La section 5.3 formalise les sous-problèmes intervenant dans la gestion offre-demande dans un *microgrid*. Enfin, la section 5.4 présente les résultats obtenus en utilisant les systèmes multi-agents apprenants pour assurer la stabilité en temps réel d'un *microgrid* grâce aux systèmes de stockage.

## 5.2/ PRÉSENTATION DES PROBLÈMES DE GESTION D'UN MICROGRID

Comme énoncé précédemment, un *microgrid* est une partie basse tension d'un réseau d'énergie électrique pouvant inclure des générateurs d'énergie décentralisée (et potentiellement renouvelable), des systèmes de stockage et une partie des usagers du réseau, comme le présente la figure 5.2. Le problème de la gestion d'énergie dans un *microgrid* comprend de nombreux sous-problèmes

FIGURE 5.2 – Composants habituels d'un *microgrid*.

tels que la gestion de la demande, la gestion de la production, la gestion des systèmes de stockage et la stabilité du réseau [Vasiljevska et al., 2013].

Il existe de nombreuses solutions proposées pour la gestion d'énergie dans un *microgrid*, pour la planification de la production [Logenthiran et al., 2010], la qualité de l'énergie [Yokoyama et al., 2008, Colet-Subirachs et al., 2010, Ruiz-Alvarez et al., 2012], l'autocicatrisation [Moreira et al., 2007], l'adaptation de la consommation à la production [Logenthiran et al., 2012]. Dans tous les travaux actuels, la résolution de ces problèmes est encore réalisée de manière indépendante. Il n'existe pas pour l'instant de travaux envisageant de résoudre de manière unifiée un sous-ensemble de ces problèmes.

L'approche intégrant les boucles de rétroaction permet la mise en place d'une résolution à plusieurs niveaux de problème à l'intérieur d'un même réseau. Nous avons vu dans la section 3.3 qu'il était difficile de définir un problème unique pour un *smart grid*, car les critères environnementaux, économiques, et humains sont intrinsèquement liés par le concept de durabilité.

Pour prendre en compte l'ensemble des objectifs des *smart grids*, nous posons des contraintes sur le *microgrid*. Le côté environnemental est intégré au *microgrid* sur lequel nous travaillons en incluant exclusivement des sources d'énergie renouvelables. Cela permet de ne pas émettre de gaz à effet de serre ni d'autres types de rejet polluant. Pour permettre d'interagir avec les utilisateurs du réseau et principalement les consommateurs, les habitations connectées au *microgrid* contiendront un ensemble d'appareils contrôlables sur lesquels l'utilisateur aura une influence. Ces deux aspects sont donc résolus par des contraintes sur les périphériques connectés au réseau.

L'aspect économique se sépare naturellement en deux parties. Les producteurs veulent vendre l'énergie le plus cher possible. Les sources d'énergie renouvelable n'étant pas contrôlables, il est important de leur ajouter des systèmes de stockage

contrôlables qui vont permettre de modifier l'énergie qui sera émise sur le réseau. Comme le prix de l'énergie varie au courant du temps, la production doit varier en conséquence afin d'améliorer les bénéfices des producteurs. Les consommateurs, de leur côté, veulent réduire leurs factures. Pour cela, un système présent dans chaque habitation prendra en compte le prix de l'énergie pour allumer ou éteindre certains périphériques. Ces décisions doivent aussi prendre en compte les besoins des utilisateurs.

Enfin pour assurer la viabilité du réseau, un système de contrôle de la stabilité est déployé dans un *microgrid*. Ce système a pour but d'assurer en continu l'équilibre entre l'offre et la demande.

Grâce à ces contraintes, nous pouvons prendre en compte l'ensemble des critères de durabilité d'un *smart grid*. Il reste à définir comment regrouper ces contraintes à l'intérieur d'un même problème. Pour cela, nous devons définir une ontologie de ce problème.

### 5.2.1/ ONTOLOGIE DU PROBLÈME DE DURABILITÉ DANS UN MICROGRID

Il n'existe actuellement pas d'ontologies qui présentent les réseaux électriques de façon hiérarchique. Dans [van Dam, 2009], Van Dam présente le côté « socio-technique » d'un réseau électrique en détaillant ses différents acteurs qu'ils agissent sur le réseau électrique ou sur le marché de l'énergie. Une seconde ontologie nommée SynCity [Keirstead and van Dam, 2010] permet de définir les propriétés des composants de réseaux urbains, dont les réseaux électriques, mais ne propose pas de solution aux différents problèmes sociétaux présentés dans le chapitre 3.

Pour définir un problème général permettant de prendre en compte les différents problèmes posés à l'intérieur d'un *microgrid*, nous devons redéfinir un réseau électrique global. Le réseau électrique global est considéré comme un ensemble de *microgrid*. Un *microgrid* est défini comme étant un ensemble de périphériques. Ces périphériques peuvent être de différentes sortes : des sources, des charges, des systèmes de stockage (étant une source ou une charge en fonction de leurs comportements) ou encore un autre *microgrid*. Ces périphériques s'échangent de l'énergie pour répondre à leurs besoins. Cette énergie a un prix qui est fixé par un agrégateur sur le réseau global auquel le *microgrid* est connecté. Dans le cas d'un réseau îloté, le réseau global et le *microgrid* se confondent. Cet agrégateur fait partie d'un système global de gestion du réseau. Cette gestion a pour but d'équilibrer l'offre et la demande.

Du côté des périphériques, les systèmes de contrôle sont répartis en deux parties. La première gère la production d'énergie du réseau en fonction du prix de l'énergie. Ce système module la production des sources d'énergie renouvelable, non contrôlables, en utilisant des systèmes de stockage.

Cependant, la production et la consommation sont influencées par le prix de

l'énergie. Il est donc nécessaire d'avoir un contrôle sur le prix afin de réguler l'énergie sur le réseau. La seconde partie représente les consommateurs qui utilisent leurs périphériques en achetant de l'énergie aux producteurs.

Enfin, pour assurer la stabilité d'un *microgrid*, nous utilisons un système de contrôle de systèmes de stockage rapide qui devra compenser les écarts entre la production et la consommation pour assurer la viabilité du *microgrid* à tout moment.

Le diagramme 5.3 représente l'ontologie à l'aide d'un diagramme de classes UML.

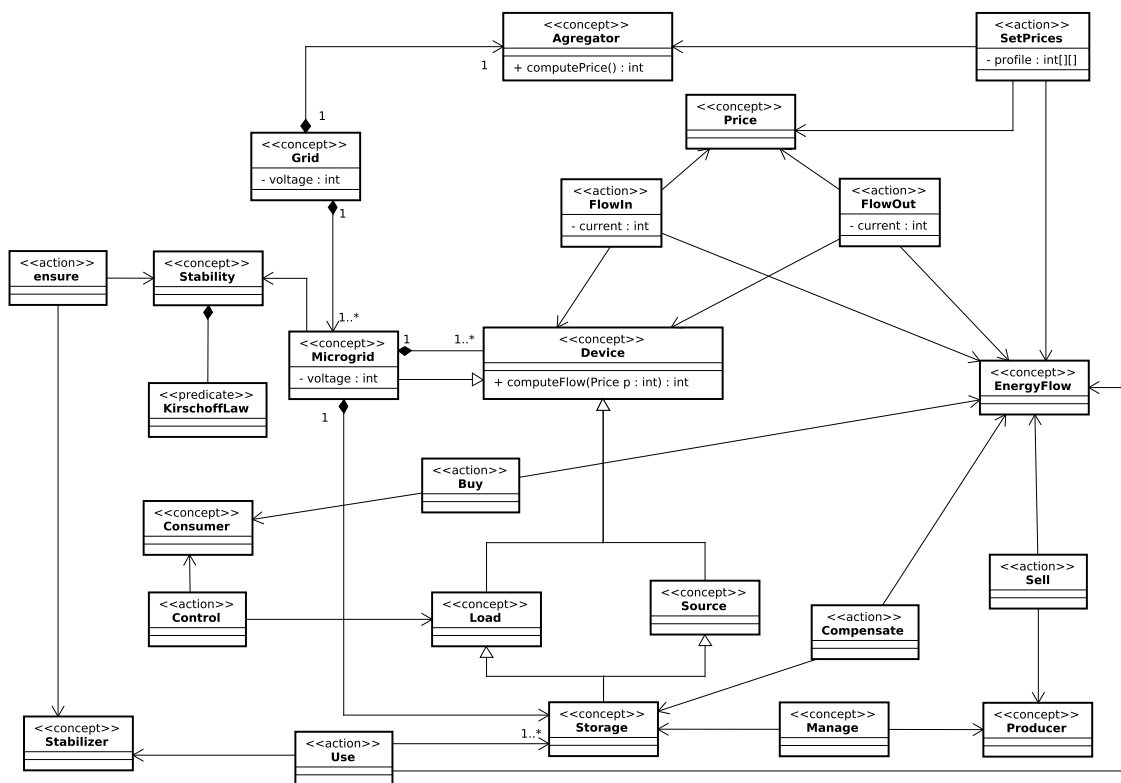
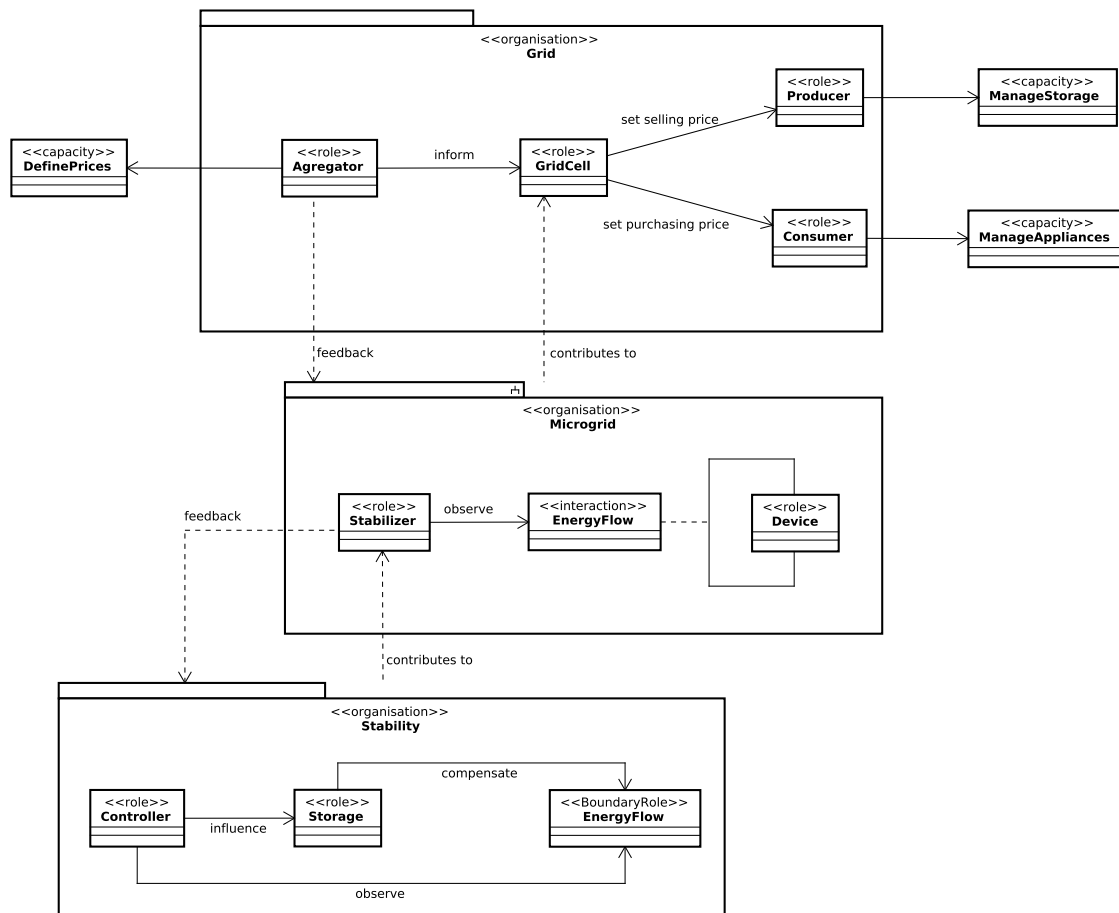


FIGURE 5.3 – Ontologie du problème de gestion offre-demande dans un *microgrid*

Cette ontologie nous permet également d'identifier des rôles pouvant résoudre les différents objectifs présentés précédemment. L'agrégateur a pour rôle de gérer le prix sur le réseau afin de réguler la production et la consommation des différents périphériques. Les producteurs et les consommateurs n'ayant pas les mêmes besoins, nous séparons le contrôle de la production de celui de la consommation. Il y aura donc deux rôles distincts, chacun gérant sa partie du réseau. Enfin, afin d'assurer la stabilité du réseau en temps réel, un autre rôle devra s'assurer que les contraintes du réseau sont bien satisfaites : c'est le rôle du stabilisateur.

## 5.2.2/ MISE EN ÉVIDENCE DES BOUCLES DE RÉTROACTION

FIGURE 5.4 – Organisations gérant le problème de *microgrid*

Le problème de gestion de *microgrids* intègre plusieurs boucles de rétroaction, comme le présente la figure 5.4. Les boucles de rétroaction apparaissent dans l'ontologie par composition entre le concept de Grid et celui de Microgrid, et entre le concept de Microgrid et de Device. Un réseau électrique est un ensemble de *microgrids* qui contiennent un ensemble de périphériques interconnectés.

La première boucle de rétroaction (organisations Grid – Microgrid) permet de définir le prix de l'énergie. Défini au niveau du réseau global, ce prix est fourni aux différents *microgrids* dont il est composé. Ce prix influe sur le comportement des utilisateurs (producteurs et consommateurs) de chaque *microgrid*. La modification de ces comportements va modifier directement les consommations des périphériques. Ces variations de consommations doivent être surveillées par l'agrégateur qui gère le prix du réseau afin d'obtenir un certain équilibre entre l'offre et la demande afin de ne pas créer de pannes sur le réseau.

Malgré cet échange d'information, il est impossible d'obtenir un équilibre parfait

entre l'offre et la demande en énergie. Afin d'obtenir cet équilibre, une seconde boucle de rétroaction est utilisée. Celle-ci se situe à l'intérieur d'un *microgrid* afin d'en assurer la stabilité (organisations Microgrid – Stability). Le gestionnaire du *microgrid* (le rôle Stabilizer) observe en continu les échanges d'énergie à l'intérieur du *microgrid*. Pour assurer la stabilité du réseau, il va modifier le flux d'énergie des systèmes de stockage dont il a le contrôle. Ces flux d'énergie font partie des flux observés par le gestionnaire afin de pouvoir les modifier dès que les autres périphériques modifient leurs comportements.

### 5.2.3/ FRÉQUENCES DE DÉCISION

Chaque rôle qui influe sur le réseau prend des décisions à différents intervalles de temps. L'agrégateur définit les différents prix de l'énergie sur le réseau pour une journée, en fonction des échanges d'énergie des journées précédentes. Les consommateurs et producteurs ajustent leurs comportements en fonction des variations du prix et des demandes utilisateurs. La fréquence des prises de décisions dépend des prix définis par l'agrégateur et des types de périphériques à contrôler. Ils sont de l'ordre de la minute ou de l'heure. Enfin, le gestionnaire du *microgrid* doit assurer la stabilité du réseau en continu, ces prises de décisions sont de l'ordre de la milliseconde.

## 5.3/ AGENTIFICATION DES BOUCLES DE RÉTROACTION

### 5.3.1/ HYPOTHÈSES DE TRAVAIL ET NOTATIONS

Avant de présenter l'agentification des boucles de rétroaction du problème de durabilité dans un *microgrid*, nous supposons que :

1. les conditions de fonctionnement d'un *microgrid* sont définies au sein d'un scénario simulant l'évolution du *microgrid* sur plusieurs jours d'une semaine ;
2. la fréquence des décisions prises est constante sur l'ensemble des jours ;
3. la production (resp. la consommation) totale idéale au sein du *microgrid* peut varier au cours d'une journée et cette courbe de variation peut différer d'une journée à l'autre pendant la période de simulation ;
4. un *microgrid* abrite des sources de production, des systèmes de stockage et des usagers ;
5. ces usagers du réseau vivent dans des *smart buildings*, des bâtiments possédant un système de contrôle de périphériques (voir point 8) ;
6. plusieurs *smart buildings* sont liés à un *microgrid* ;
7. les sources de production sont des sources renouvelables comme des panneaux photovoltaïques ou des éoliennes, qui sont stochastiques et non

contrôlables. Des systèmes de stockage sont combinés à ces sources de production afin de réguler leurs flux d'énergie. Ces systèmes de stockage sont contrôlables par le système de gestion de la production ;

8. Nous définissons plusieurs catégories d'appareils électriques pouvant être présents dans un *smart building* :
  - **Appareils contrôlables et commutables par créneaux** : Ces appareils (machine à laver, lave-linge, chauffe-eau, etc.) peuvent être uniquement mis en marche ou éteints. Le représentant d'un *smart building* fournit pour chacun d'eux un ensemble de périodes de marche et la durée de fonctionnement. Ces appareils peuvent consommer une quantité variable de puissance en fonction de leur mode de fonctionnement.
  - **Appareils contrôlables, commutables et paramétriques** : Ces périphériques (radiateur, climatiseur, etc.) peuvent être uniquement mis en marche ou éteints. Le représentant d'un *smart building* indique pour chacun de ces appareils une condition (sous forme de prédicat). Cette condition doit être constamment vérifiée lors de son fonctionnement. Par exemple, des préférences de confort peuvent être formulées indirectement en spécifiant à l'intention d'un climatiseur que la température intérieure ne doit pas dépasser 25 °C. Ces appareils peuvent également consommer une quantité variable de puissance en fonction de leur mode de fonctionnement.
  - **Appareils contrôlables et ajustables** : La consommation de ces appareils (véhicules électriques par exemple) peut être ajustée entre 0 (éteint) et leur puissance nominale. Le contrôle de chacun de ces appareils tient compte d'une condition (ou prédicat) spécifiée par le représentant d'un *smart building*. Cette condition doit être satisfaite tout au long du fonctionnement d'un appareil. Ce prédicat peut prendre en compte des paramètres internes ou externes à l'appareil.
  - **Appareils non contrôlables** : Ces appareils ne sont manipulés que par les habitants d'un *smart building*. Il s'agit par exemple de la télévision ou d'un ordinateur.
9. d'autres systèmes de stockage, en plus de ceux intégrés au système de gestion de la production, peuvent être raccordés au *microgrid* afin de stabiliser le réseau. Ces systèmes de stockage sont contrôlables par le gestionnaire du réseau.

Nous introduisons ci-dessous les notations les plus utilisées dans les sections suivantes :

- $N \in [7]$ <sup>1</sup> représente le nombre de journées de simulation dans une semaine,
- $T$  est l'espace de temps fini représentant les instants de prises de décision des périphériques électriques dans une journée,
- $R$  est le nombre de producteurs d'énergie renouvelable donc non contrôlables.
- $S_p$  est le nombre de systèmes de stockage contrôlés par le système de gestion de la production.

---

1. avec  $[M] = \{1, 2, \dots, M\}$

- $S_I$  est le nombre de systèmes de stockage contrôlés par le gestionnaire du réseau.

### 5.3.2/ BOUCLE OFFRE-DEMANDE

L'objectif de ce système est de faire varier le prix de l'énergie pour influencer sur le comportement des utilisateurs du réseau. L'approche consiste à définir une production idéale  $\mu \in \mathbb{R}^{N \times T}$  qui permet à l'agréateur de réguler les flux d'énergie sur le réseau. La production réelle à l'instant  $t$  de la journée  $n$  devrait se rapprocher au plus près de la production idéale  $\mu(n, t)$ . La consommation réelle à l'instant  $t$  de la journée  $n$  devrait se rapprocher au plus près de la consommation idéale  $-\mu(n, t)$ . La fonction de prix lors d'une journée varie au cours du temps. Il faut définir cette fonction chaque jour, en début de journée par exemple, en tenant compte du prix fixé les journées précédentes, des écarts entre la production idéale et la production réelle, et des écarts entre la consommation idéale et la consommation réelle.

#### 5.3.2.1/ SYSTÈME DE GESTION DE LA PRODUCTION

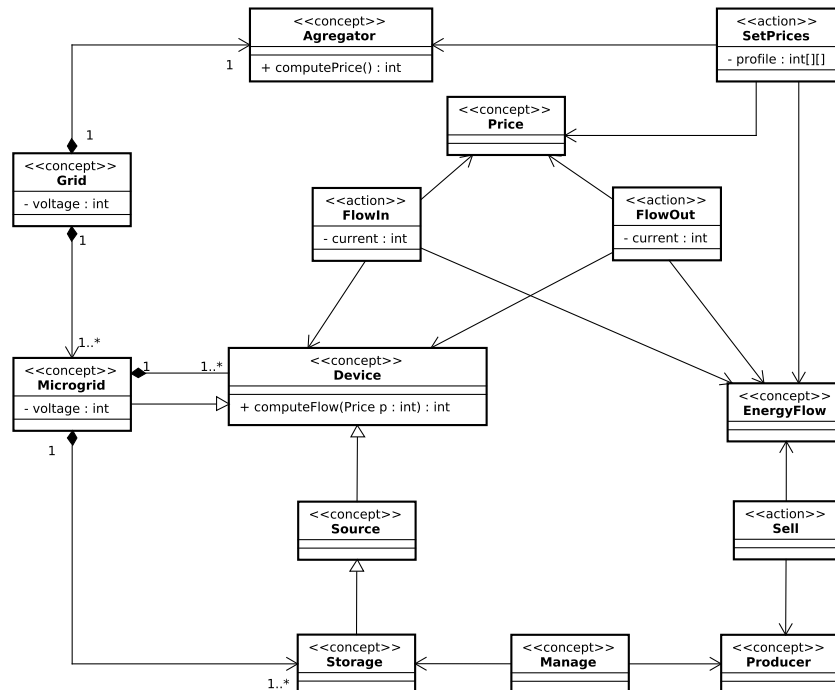


FIGURE 5.5 – Ontologie de solution de la gestion de la production

Ce système a pour but de gérer la production d'énergie renouvelable à l'aide de systèmes de stockage. Nous considérons que l'ensemble des systèmes de



stockage présents dans un *microgrid* est géré par un seul système de contrôle. La figure 5.5 présente la partie production de l'ontologie. Ce système de contrôle doit permettre aux systèmes de stockage de compenser la production réelle, en absorbant ou en délivrant de l'énergie, pour permettre de vendre l'énergie au prix  $PV(n)$  le plus cher possible à l'issue de chaque journée  $n$  pendant la durée d'un scénario (équation 5.1).

$$PV(n) = \max \left[ \sum_{t=0}^T PV(n, t) V_{dc}(n, t) \left( \sum_{r=1}^R D_r(n, t) + \sum_{s=1}^S D_s(n, t) \right) \right] \quad (5.1)$$

où :

- $PV(n, t)$  (€) : prix de vente d'un Watt à l'instant  $t$  du jour  $n$ ,
- $V_{dc}(n, t)$  (V) : tension sur la ligne du *microgrid* à l'instant  $t$  du jour  $n$ ,
- $D_r(n, t)$  (A) : intensité délivrée par la source d'énergie renouvelable  $r$  à l'instant  $t$  du jour  $n$ ,
- $D_s(n, t)$  (A) : intensité délivrée par le système de stockage  $s$  (contrôlée par le système de gestion de la production) à l'instant  $t$  du jour  $n$ .

Dans l'équation 5.1, le contrôle concerne les  $D_s(n, t)$ , c'est-à-dire les intensités délivrées par les systèmes de stockage. Les systèmes de stockage doivent être contrôlés en respectant les contraintes suivantes :

- $P_s(n, t) = V_{dc}(n, t) D_s(n, t)$ ,
- $P_{sto,s}^{min} \leq P_s(n, t) \leq P_{sto,s}^{max}$ ,
- $\dot{P}_{sto,s}^{min} \leq \dot{P}_s(n, t) \leq \dot{P}_{sto,s}^{max}$ ,
- $0 \leq E_s(n, t) \leq E_s^{max} \Leftrightarrow 0 \leq SOC_s(n, t) \leq 1$

avec :

- $P_{sto,s}^{min}$  (W) : puissance minimale pouvant être délivrée par le système de stockage  $s$
- $P_{sto,s}^{max}$  (W) : puissance maximale pouvant être délivrée par le système de stockage  $s$
- $\dot{P}_{sto,s}^{min}$  (W/s) : dynamique minimale du système de stockage  $s$
- $\dot{P}_{sto,s}^{max}$  (W/s) : dynamique maximale du système de stockage  $s$
- $E_s^{max}$  (J = Ah) : énergie maximale pouvant être stockée par le système de stockage  $s$

### 5.3.2.2/ SYSTÈME DE GESTION DE LA CONSOMMATION

Les consommateurs sont regroupés par *smart buildings*, un *smart building* est un bâtiment regroupant des périphériques, ou appareils, dont certains sont contrôlables par un système (voir 5.3.1 point 8 pour les différents types d'appa-

reils). Ce système devra donc modifier l'allumage des appareils qu'il contrôle afin de réduire la facture de l'habitant du *smart building*, et utilisateur du réseau. La figure 5.6 présente l'ontologie de la solution pour la gestion de la consommation, avec l'intégration des *smart buildings*.

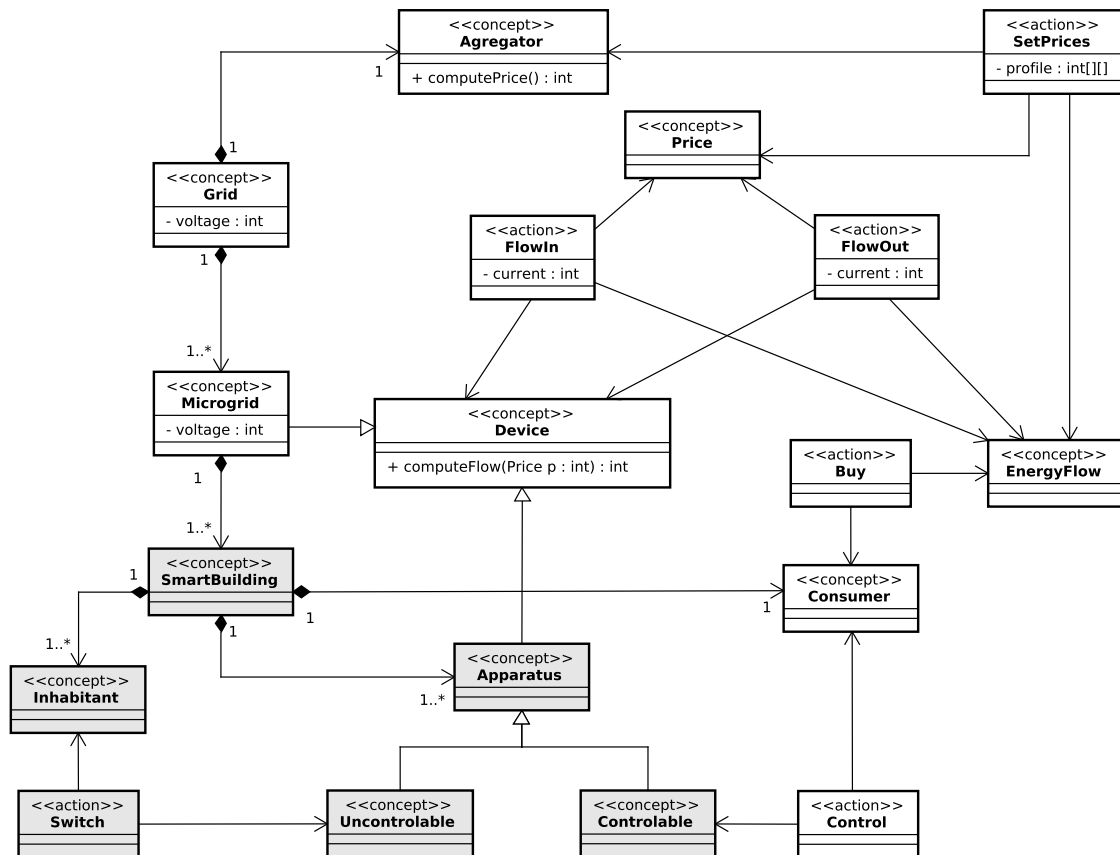


FIGURE 5.6 – Ontologie de solution de la gestion de la consommation

Un *smart building* possède donc deux acteurs qui influenceront sur la consommation de celui-ci. Le premier est l'habitant, et utilisateur du réseau. Cette personne allume et éteint les appareils dits non contrôlables. Le second est le système de contrôle du *smart building* qui a la charge d'allumer et d'éteindre les appareils contrôlables pour réduire la facture de l'utilisateur tout en prenant en compte ces besoins. La figure 5.7 met en évidence l'aspect holonique de gestion de la consommation tout en présentant les acteurs et leurs actions sur le réseau par le contrôle des appareils.

Le but est de consommer intelligemment de l'énergie pour que le coût d'achat  $CA(n)$  soit le moins cher possible à l'issue d'une journée  $n$  (équation 5.2).

$$CA(n) = \left( \sum_{t=0}^T CA(n, t) V_{dc}(n, t) C_k(n, t) \right) \quad (5.2)$$

où :

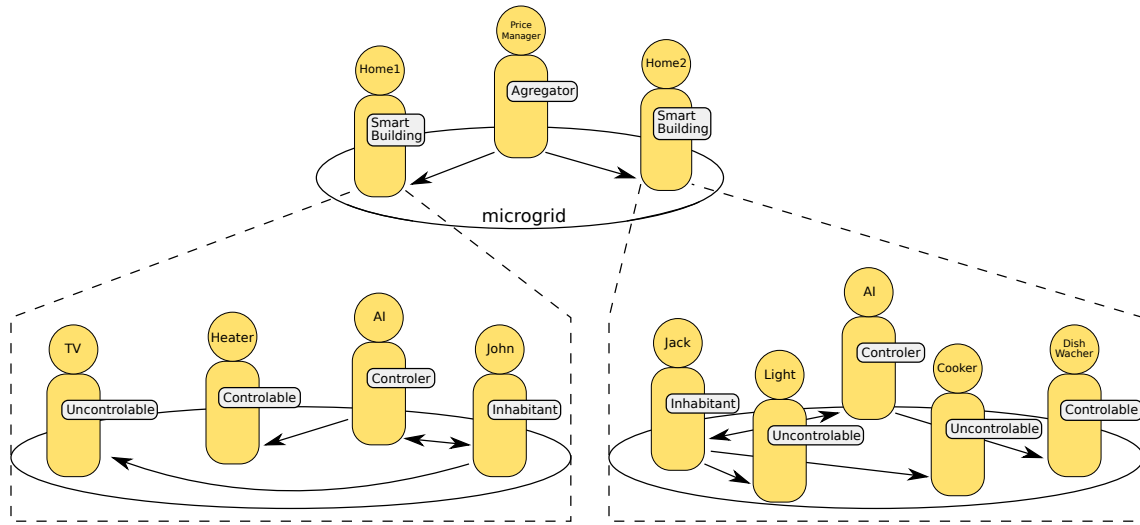


FIGURE 5.7 – Exemple d'une représentation d'un *microgrid* intégrant les *smart buildings*

- $CA(n, t)$  (€) : prix d'achat d'un Watt à l'instant  $t$  de la journée  $n$ ,
- $V_{dc}(n, t)$  (V) : tension sur la ligne du *microgrid* à l'instant  $t$  du jour  $n$ ,
- $C_k(n, t)$  : intensité totale requise par le *smart building*  $k$ .

Pour minimiser le prix, les consommateurs doivent gérer l'allumage de leurs appareils afin que ceux-ci s'allument aux moments adéquats. Les variables de décisions sont celles apparaissant dans chaque  $C_k(n, t)$  (l'intensité totale demandée par le *smart building*  $k$ ), telle que :

$$\begin{aligned}
 C_k(n, t) = & \sum_{i \in \mathcal{L}_k} x_{k,i,n,t} l_{k,i} + \sum_{i \in \mathcal{P}_k} y_{k,i,n,t} p_{k,i} \\
 & + \sum_{i \in \mathcal{A}_k} z_{k,i,n,t} a_{k,i} + \sum_{i \in \bar{\mathcal{C}}_k} c_{k,i,n,t} m_{k,i}
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

avec :

- $\mathcal{L}_k$  est l'ensemble des indices des appareils qui sont contrôlables et *commutables par créneaux* dans le *smart building*  $k$ .
- $\mathcal{H}_{k,i}$  (resp.  $ct_{k,i}$ ) est l'ensemble des créneaux (resp. le temps total d'achèvement) associé à un appareil  $i \in \mathcal{L}_k$  dans le *smart building*  $k$ .
- $\mathcal{P}_k$  est l'ensemble des indices des appareils qui sont contrôlables et *commutables par paramètres* dans le *smart building*  $k$ .
- $\mathcal{A}_k$  est l'ensemble des indices des appareils qui sont contrôlables et *ajustables* dans le *smart building*  $k$ .
- $\mathcal{C}_k = \mathcal{L}_k \cup \mathcal{P}_k \cup \mathcal{A}_k$  est l'ensemble des indices des appareils contrôlables dans le *smart building*  $k$ .

- $\bar{C}_k$  est l'ensemble des indices des appareils qui sont non contrôlables dans le *smart building*  $k$ .
- $X_{k,n} = (X_{k,n,1}, \dots, X_{k,n,T})$ ,  $Y_{k,n} = (Y_{k,n,1}, \dots, Y_{k,n,T})$ ,  $Z_{k,n} = (Z_{k,n,1}, \dots, Z_{k,n,T})$  désignent les commandes de contrôle, durant une journée  $n$ , des appareils contrôlables, appartenant respectivement à  $\mathcal{S}_k$ ,  $\mathcal{P}_k$  et  $\mathcal{A}_k$ , dans le *smart building*  $k$ .
- $X_{k,n,t} \in \mathcal{X}_k$ ,  $Y_{k,n,t} \in \mathcal{Y}_k$ ,  $Z_{k,n,t} \in \mathcal{Z}_k$  pour chaque  $t = 1, \dots, T$ .  $\mathcal{X}_k = \{0, 1\}^{|\mathcal{L}_k|}$ ,  $\mathcal{Y}_k = \{0, 1\}^{|\mathcal{P}_k|}$  et  $\mathcal{Z}_k = [0, 1]^{|\mathcal{A}_k|}$  sont les contrôles permis pour chaque appareil dans le *smart building*  $k$ .
- $x_{k,i,n,t}$  (respectivement  $y_{k,i,n,t}$  et  $z_{k,i,n,t}$ ) sont les contrôles pour les appareils  $i \in \mathcal{L}_k$  (respectivement  $i \in \mathcal{P}_k$  et  $i \in \mathcal{A}_k$ ) pour chaque  $t$  d'un jour  $n$ . Une valeur de 0 signifie que l'appareil est éteint, une valeur de 1 signifie que l'appareil  $i \in \mathcal{L}_k \cup \mathcal{P}_k$  est démarré ou l'appareil  $i \in \mathcal{A}_k$  consomme sa consommation maximale.
- $c_{k,i,n,t} \in \{0, 1\}$  indiquent si l'appareil  $i \in \bar{C}$  dans le *smart building*  $k$  est démarré ou éteint pour chaque temps  $t$  d'un jour  $n$ .
- $m_{k,i}$  est la puissance maximale pouvant être consommée par un appareil  $i \in \bar{C}$  dans un *smart building*  $k$ .
- $l_{k,i}$  est la puissance maximale pouvant être consommée par un appareil  $i \in \mathcal{S}$  dans un *smart building*  $k$ .
- $p_{k,i}$  est la puissance maximale pouvant être consommée par un appareil  $i \in \mathcal{P}$  dans un *smart building*  $k$ .
- $a_{k,i}$  est la puissance maximale pouvant être consommée par un appareil  $i \in \mathcal{A}$  dans un *smart building*  $k$ .

Ces consommations doivent être contrôlées en respectant les contraintes suivantes :

- Chaque appareil  $i \in \mathcal{L}_k$  doit être démarré pendant un des créneaux possibles dans l'ensemble des créneaux  $[\tau_{i,k,n}^b, \tau_{i,k,n}^e]$  définis par le propriétaire du *smart building*  $k$  pour un jour  $n$ .
- Chaque appareil  $i \in \mathcal{P}_k$  doit être contrôlé suivant les contraintes  $\mathcal{C}_{i,k,n}$  définies par le propriétaire du *smart building*  $k$  pour un jour  $n$ .
- Chaque appareil  $i \in \mathcal{A}_k$  doit être rempli au temps  $\tau_{i,k,n}$  défini par le propriétaire du *smart building*  $k$  pour un jour  $n$ .

### 5.3.3/ BOUCLE DE STABILITÉ

Ce problème consiste à contrôler en permanence et en temps réel l'équilibre entre la production et la consommation dans un *microgrid*. L'équilibre peut être établi à l'aide de systèmes de stockage, tels que des batteries et des supercondensateurs. La figure 5.8 présente la partie stabilité de l'ontologie.

Sachant que les énergies consommées sont considérées comme négatives et que les énergies produites sont positives, la somme des énergies arrivant sur le réseau doit alors être nulle. Le système de stabilité contrôle des systèmes de stockage afin que, à chaque instant  $t$  de chaque jour  $n$ , la condition d'équilibre définie par l'équation 5.4 suivante soit vérifiée :

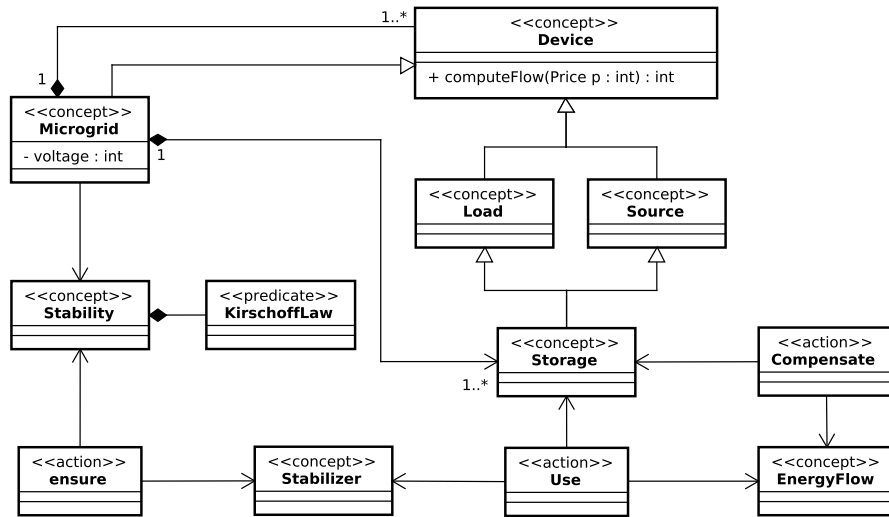


FIGURE 5.8 – Ontologie de solution de la gestion de la stabilité

$$V_{dc}(n, t) \left( \sum_{r=1}^R D_r(n, t) + \sum_{s=1}^{S_P} D_s(n, t) + \sum_{k=1}^K C_k(n, t) + \sum_{m=1}^{S_I} S_m(n, t) \right) = 0 \quad (5.4)$$

où :

- $V_{dc}(n, t)$  (V) : tension du bus DC à l'instant  $t$  du jour  $n$ ,
- $D_r(n, t)$  (A) : intensité délivrée par la source d'énergie renouvelable  $r$  à l'instant  $t$  du jour  $n$ ,
- $D_s(n, t)$  (A) : intensité délivrée par le système de stockage  $s$  (contrôlé par le système de gestion de la production) à l'instant  $t$  du jour  $n$ ,
- $C_k(n, t)$  (A) : intensité demandée par le *smart building*  $k$  à l'instant  $t$  du jour  $n$ ,
- $S_m(n, t)$  (A) : intensité délivrée par le système de stockage  $m$  (contrôlé par le gestionnaire du réseau) à l'instant  $t$  du jour  $n$ .

### 5.3.3.1/ PROCESSUS DE DÉCISION POUR LA STABILITÉ DANS UN MICROGRID

Nous présentons ci-après une technique basée sur un algorithme d'apprentissage par renforcement pour résoudre ce problème. Cette technique est validée par des expériences de simulation (voir section 5.4).

**Description du problème** Nous considérons un *microgrid* basé sur un bus DC. Afin de maintenir une tension stable, le réseau principal est supposé pouvoir délivrer ou recevoir une quantité infinie de puissance et d'énergie. Par exemple, lorsque les sources d'énergie renouvelable et les unités de stockage ne peuvent pas satisfaire la demande, le réseau fournit la puissance manquante, tandis que

s'il existe un surplus de puissance, celui-ci pourra être fourni complètement au réseau. La figure 5.9 présente l'aspect agent du problème détaillé.

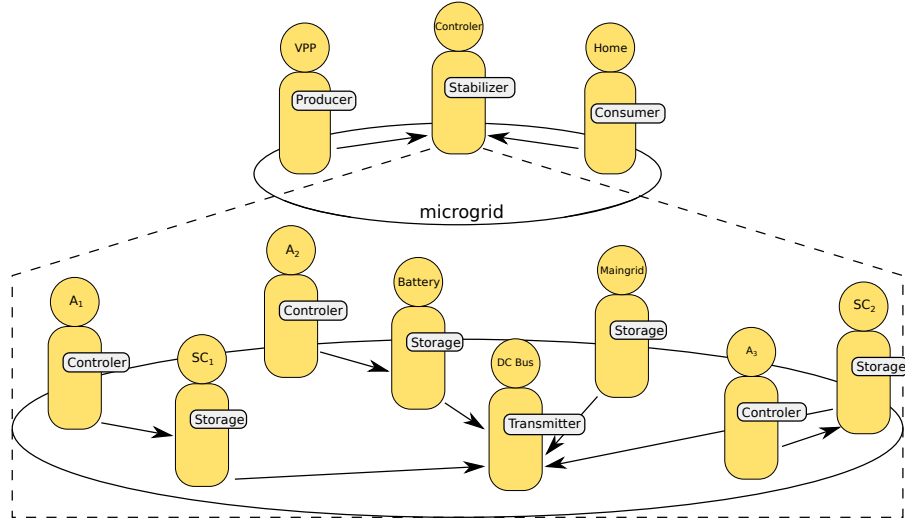


FIGURE 5.9 – Exemple d'une représentation de contrôle de la stabilité d'un *microgrid*

Le bus DC est supposé avoir une capacité qui satisfait l'équation suivante à chaque instant  $t$  :

$$I_{dc}(t) = -C \frac{dV_{dc}(t)}{dt} \quad (5.5)$$

où  $I_{dc}(t)$  est le courant sur le bus DC,  $C$  est sa capacité et  $V_{dc}(t)$  est sa tension. Pour que  $V_{dc}(t)$  soit stable, il doit vérifier à tout instant la contrainte suivante :

$$V_{dc}^{min} \leq V_{dc}(t) \leq V_{dc}^{max} \quad (5.6)$$

Le courant  $I_{dc}(t)$  est calculé à partir des courants délivrés par les appareils (charges, sources d'énergie renouvelable, unités de stockage et réseau principal) dans le *microgrid*, selon la loi de Kirschhoff :

$$\begin{aligned} \sum_k I_k(t) &= \sum_{a=1}^{n_{sto}} I_{sto,a}(t) + \sum_{b=1}^{n_{lo}} I_{lo,b}(t) \\ &\quad + \sum_{c=1}^{n_{res}} I_{res,c}(t) + I_{grid}(t) + I_{dc}(t) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (5.7)$$

où :

- $n_{sto}$ ,  $n_{lo}$ , et  $n_{res}$  sont le nombre de systèmes de stockage, de charges et de sources d'énergie renouvelable, respectivement.
- $I_{sto,a}(t)$ ,  $I_{lo,b}(t)$ ,  $I_{res,c}(t)$ ,  $I_{grid}(t)$  sont les courants délivrés par le système de stockage  $a$ , la charge  $b$ , la source d'énergie renouvelable  $c$ , et le réseau électrique principal, respectivement.

La tension du bus DC est calculée comme suit :

$$\begin{aligned} V_{dc}(t) &= V_{dc}^{init} - \frac{1}{C} \int I_{dc}(t) dt \\ &= V_{dc}^{init} + \frac{1}{C} \int \left( \sum_{a=1}^{n_{sto}} I_{sto,a}(t) + \sum_{b=1}^{n_{lo}} I_{lo,b}(t) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{c=1}^{n_{res}} I_{res,c}(t) + I_{grid}(t) \right) dt \end{aligned}$$

Chaque unité de stockage  $k$  est définie par les variables dynamiques suivantes :

– Sa puissance  $P_{sto,k}(t)$ , telle que :

$$P_{storage,k}(t) = \begin{cases} \frac{I_{sto,k} \cdot V_{dc}}{\eta_k} & \text{si } I_{sto,k} \geq 0 \\ I_{sto,k} \cdot V_{dc} \cdot \eta_k & \text{si } I_{sto,k} < 0 \end{cases}$$

où  $\eta_k$  est l'efficacité de conversion d'énergie.

– Son état de charge  $SOC_k(t)$ , calculé selon :

$$SOC_k(t) = SOC_k^{init} - \frac{\int_0^t P_{sto,k}(t) dt}{E_k}$$

où  $SOC_k^{init}$  est l'état de charge initial et  $E_k$  est sa capacité.

Chaque unité de stockage  $k$  doit satisfaire les contraintes suivantes :

– Contrainte C1 concernant la puissance :

$$P_{sto,k}^{min} \leq P_{sto,k}(t) \leq P_{sto,k}^{max}$$

$$\text{with } P_{sto,k}^{min} < 0 \text{ and } P_{sto,k}^{max} > 0$$

– Contrainte C2 concernant la dynamique de puissance :

$$\dot{P}_{sto,k}^{min} \leq \dot{P}_{sto,k}(t) \leq \dot{P}_{sto,k}^{max}$$

$$\text{with } \dot{P}_{sto,k}^{min} < 0 \text{ and } \dot{P}_{sto,k}^{max} > 0$$

– Contrainte C3 concernant les limites de l'état de charge :

$$0 \leq SOC_k^{min} \leq SOC_k(t) \leq SOC_k^{max} \leq 1$$

Pour simplifier la résolution du problème, la contrainte C3 peut être relâchée. Dans ce cas, il est supposé que la durée de vie de chaque unité de stockage est maximisée aussi longtemps que cette contrainte C3 est satisfaite.

Dans les équations précédentes, le courant arrivant au (resp. quittant le) bus DC est considéré comme positif (resp. négatif). Autrement dit, la puissance générée

par une source est positive et celle générée par une charge est négative. En particulier,  $I_{lo,b} \leq 0$  et  $I_{res,c} \geq 0$  pour chaque charge  $b$  et chaque source d'énergie renouvelable  $c$ . Il est également important de noter que les supercondensateurs et les batteries ne se distinguent que par un jeu de paramètres différents. Les supercondensateurs peuvent délivrer des quantités de puissance plus importante mais contiennent moins d'énergie que les batteries.

Gérer les flux de puissance dans un *microgrid* de manière optimale consiste à décider à chaque instant  $t$ , pour chaque unité de stockage  $k$  et pour le réseau principal, quelles quantités de courant  $I_{sto,k}(t)$  et  $I_{grid}(t)$  doivent être délivrées afin que la tension  $V_{dc}$  reste stable. Pour gérer le réseau localement, il faut également que le réseau principal soit sollicité le moins possible. Autrement dit, le problème consiste à minimiser la fonction objectif  $f$  suivante :

$$f = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T \gamma^t (I_{grid}(t))^2 dt \quad (5.8)$$

où  $\gamma \in [0; 1)$  est un facteur de pondération limitant la valeur de l'intégrale.

**Technique proposée : algorithme d'apprentissage par renforcement multi-agent décentralisé** Par rapport à l'apprentissage mono-agent (voir section 2.6.1), plusieurs approximations peuvent être envisagées pour résoudre le problème exposé précédemment. En effet, d'une part les espaces d'états, d'actions et de temps sont continus. D'autre part, plusieurs agents sont impliqués. L'algorithme présenté ci-après est basé sur les hypothèses suivantes : Les notations utilisées ci-dessous ont été présentées dans la section 2.6.

- *Groupe d'agents* : Nous supposons que les agents peuvent être groupés en un ensemble de classes d'équivalence. Tous les agents appartenant à la même classe exhiberont le même comportement. Soit  $\mathcal{G} = \{\mathcal{G}_1, \mathcal{G}_2, \dots, \mathcal{G}_N\}$  un ensemble de  $N$  classes d'agents, ou *taxons*.  $\mathcal{G}_i$  représente les indices des agents appartenant au taxon  $i$ . Chaque agent  $k \in \mathcal{G}_i$  apprend une politique et sélectionne ses actions en utilisant les valeurs  $Q$  associées au taxon  $\mathcal{G}_i$ . Comme ils exploitent les mêmes  $Q$ -valeurs, les agents appartenant au même taxon exhiberont donc le même comportement s'ils sont soumis aux mêmes perceptions. L'utilisation de taxons simplifie d'une part le problème, en suggérant que des agents du même type se comportent de manière similaire. D'autre part, cela permet de disposer plus facilement d'un système multi-agent ouvert et d'une coopération entre agents. Puisque les nouveaux agents insérés dans un taxon existant pourront bénéficier immédiatement de l'expérience des agents similaires, les agents pourront communiquer indirectement leur expérience individuelle aux autres par le partage de ces  $Q$ -valeurs.
- *Espace de temps* : L'espace de temps est discrétisé, pour que les appareils électriques contrôlables (unités de stockage et réseau principal) délivrent du courant à une fréquence suffisamment grande pour permettre au bus DC de rester stable. En particulier, les unités de stockage agissent l'un après l'autre. Le réseau est sollicité à chaque fois qu'une unité de stockage a pris sa décision,



en fournissant la puissance manquante, ce qui garantit la stabilité du bus DC à tout instant. Cet ordonnancement de l'exécution des agents est illustré à la figure 5.10.

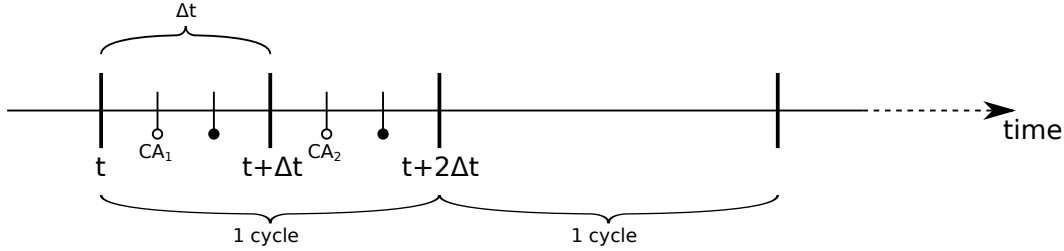


FIGURE 5.10 – Ordonnancement des actions de 2 agents. Les cercles pleins représentent les actions du réseau principal, les cercles vides les actions des unités de stockage (batteries et supercondensateurs). Un cycle consiste en une séquence d'actions qui se terminent lorsque chaque appareil contrôlable a pris sa décision.

- *Espace d'états* : Chaque appareil contrôlable  $k$  (batterie ou supercondensateur) observe les informations suivantes à chaque instant  $t$  :
  - Demande relative :  $D_k(t) = I_{lo}(t) + I_{res}(t) + I_{grid}(t)$
  - Courant :  $I_{sto,k}(t)$
  - Etat de charge :  $SOC_k(t)$
- *Espace d'actions* : Chaque appareil contrôlable  $k \in \mathcal{G}_i$  choisit à l'instant  $t$  une commande  $C_k(t) \in \mathcal{U}_i \subset [-1, 1]$  qui influence la variation du courant à délivrer comme suit :

$$\dot{I}_{sto,k}(t) = \begin{cases} C_k(t) \dot{I}_{sto,k}^{max} & \text{si } C_k(t) \geq 0, \\ -C_k(t) \dot{I}_{sto,k}^{min} & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.9)$$

où  $\dot{I}_{sto,k}^{min}$  et  $\dot{I}_{sto,k}^{max}$  sont respectivement la variation minimale et maximale de courant pour l'unité de stockage  $k$ , satisfaisant aux contraintes C1 et C2.

- *Fonction de récompense* : Chaque appareil contrôlable reçoit une récompense donnée par :

$$r_k(t) = -|I_{grid}(t)| \quad (5.10)$$

- *Approximation des fonctions  $Q$*  : Puisque l'espace d'états est continu, la fonction  $Q$  apprise par chaque agent doit être approximée. Pour des raisons théoriques de garantie de convergence, nous avons choisi d'approximer la fonction  $Q$  de chaque agent  $k \in \mathcal{G}_i$  de manière linéaire, comme suit :

$$\widehat{Q}_i(x, u) = \phi_i^T(x) \theta_{i,u}$$

avec :

- $u \in \mathcal{U}_i = \{-1, \dots, 0, \dots, 1\}$  est la commande choisie à partir de l'ensemble fini des commandes possibles  $\mathcal{U}_i$  associées au taxon  $i$ .
- $\phi_i(x) \in \mathbb{R}^n$  est le vecteur des *features* extraites à partir de l'état  $x$  en utilisant les informations définies pour le taxon  $i$ .

–  $\theta_{i,u} \in \mathbb{R}^n$  est le vecteur de poids associés au taxon  $i$  et à l'action discrète  $u$ .

Chaque agent  $k \in \mathcal{G}_i$  utilise  $Q(\lambda_i)$  avec une paramétrisation linéaire et la technique  $\epsilon$ -greedy pour apprendre les poids  $\theta_{i,u}$ .  $Q(\lambda)$  est une variante de l'algorithme  $Q$ -Learning avec des traces d'éligibilité (voir [Buşoniu et al., 2010, p. 61] pour  $Q(0)$ , la variante de  $Q$ -Learning sans trace d'éligibilité et [Sutton and Barto, 1998] pour le calcul de ces traces dans  $Q(\lambda)$ ). Les *features* furent extraites en utilisant l'algorithme CMAC [Albus, 1975].

Avec un approximateur de fonction linéaire,  $Q(\lambda_i)$  met à jour les poids  $\theta_{i,u}$  associés au taxon  $i$  et à l'action  $u$  réalisée dans l'état  $x$  comme suit :

$$\delta_i(x, u) \leftarrow r + \gamma_i \max_{u'} \hat{Q}_i(x', u') - \hat{Q}_i(x, u) \quad (5.11)$$

$$\Delta\theta_{i,u} \leftarrow \alpha_i \delta_i(x, u) \phi_i(x) e_i(x, u) \quad (5.12)$$

où  $x'$  et  $r$  sont respectivement l'état et la récompense observés après avoir réalisé l'action  $u$  dans  $x$ .  $e_i(x, u)$  est la trace d'éligibilité associée au taxon  $i$  et utilisée par chaque agent  $k \in \mathcal{G}_i$ .

L'algorithme 1 a été utilisé durant la phase d'apprentissage de chaque agent. Une fois que les fonctions  $Q$  ont été apprises, chaque agent  $k \in \mathcal{G}_i$  sélectionne l'action optimale à réaliser dans l'état  $x$  selon l'équation suivante :

$$h_k(x) = \operatorname{argmax}_{u \in \mathcal{U}} \hat{Q}_i(x, u) \quad (5.13)$$

---

**Algorithm 1** *Shared Q-Learning* utilisé par chaque agent  $k$

---

**REQUIRE:** Taxon  $i$  tel que l'agent  $k \in \mathcal{G}_i$ .

**REQUIRE:** Ensemble de poids  $\theta_{i,u}$  pour toutes les actions  $u \in \mathcal{U}_i$ .

**REQUIRE:** Facteur d'apprentissage  $\alpha_i$ .

**ENSURE:** Fonction  $\hat{Q}_i$ .

Observer état  $x$ .

**repeat**

Sélectionner l'action  $u \in \mathcal{U}_i$  dans  $x$  en utilisant une stratégie de sélection d'actions telle que  $\epsilon$ -Greedy.

Exécuter  $u$  et observer le nouvel état  $x'$  et la récompense  $r$ .

Mettre à jour les poids  $\theta_{i,u}$  en utilisant l'équation 5.12.

$x \leftarrow x'$ .

**until** Convergence est atteinte (voir [Buşoniu et al., 2010] pour de plus amples détails).

---

**Pertinence de l'approche** Le principal avantage de la technique proposée réside dans le fait que le contrôle de chaque appareil dans le *microgrid* est entièrement décentralisé, car chaque appareil existant ou chaque nouvel appareil appartenant à un taxon existant peut prendre des décisions sur la base de l'équation (5.13). La mémoire partagée permet deux améliorations. La première, réduire la quantité de mémoire utilisée pour l'apprentissage des comportements

de plusieurs agents. La seconde, accroître la vitesse d'apprentissage des politiques des agents. Une fois les  $Q$ -valeurs apprises, elles peuvent être déployées dans chaque appareil pour permettre leur contrôle dans le *microgrid*.

## 5.4/ RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

L'approche de gestion offre-demande n'a pas pu être réalisée à cause des difficultés inhérentes à l'obtention de données fiables pour calculer une production d'énergie renouvelable, mais également pour calculer la consommation liée aux appareils présents dans un *smart building*.

Nous avons donc décidé de traiter en priorité le problème de stabilité d'un *microgrid*, tel qu'il a été présenté ci-dessus.

Nous supposons que le *microgrid* fonctionne sur une période de deux jours consécutifs, qu'il est associé à un ensemble de consommateurs et de producteurs non contrôlables par le système. Nous avons donc des données globales de consommation et de production à l'échelle du *microgrid*.

Plusieurs expériences de simulations furent réalisées pour valider la robustesse de l'approche proposée, en utilisant 16 scénarios différents. Dans chaque scénario, le réseau principal ainsi que  $n_1$  batteries et  $n_2$  supercondensateurs furent utilisés, où  $n_1$  et  $n_2$  sont compris entre 0 et 4.

Une étape d'apprentissage et une étape d'évaluation furent réalisées successivement. Une étape d'apprentissage est composée de 200 épisodes pour chaque scénario, ce qui représente au total  $16 \times 200 = 3200$  épisodes d'apprentissage. Pendant un épisode d'apprentissage, chaque agent prend une séquence de décisions et met à jour la mémoire associée des  $Q$ -valeurs en utilisant les équations (5.11) et (5.12) à chaque fois qu'une action est réalisée. Pendant un épisode d'évaluation, l'apprentissage est désactivé pour tous les agents et l'équation (5.13) est utilisée par tous les agents pour sélectionner et réaliser l'action optimale. L'évaluation consiste à mesurer la contribution totale du réseau principal (équation (5.14)), ainsi que sa contribution moyenne (cf. table 5.3).

$$\int_{t \in T} |I_{grid}(t)| V_{dc}(t) dt \quad (5.14)$$

Des profils typiques de charges et de SER sur deux jours ont été utilisés à la fois pour la phase d'apprentissage et pour la phase d'évaluation. La durée d'un cycle a été fixée à une seconde, c'est-à-dire que  $\Delta t = 1s$  dans la Fig. 5.10, pour un total de 172800 décisions par épisode. Les paramètres de l'algorithme ainsi que ceux du *microgrid* sont indiqués dans les tableaux 5.1 et 5.2, respectivement. Les *features* utilisées par l'algorithme furent extraites en utilisant 60 grilles CMAC régulières, pour les deux types d'unités de stockage.

Les résultats du tableau 5.3 montrent que la contribution totale du réseau décroît avec le nombre d'agents. Par rapport aux batteries, les supercondensateurs

<i>Taxon <math>\mathcal{G}_1</math> (Batteries)</i>	<i>Taxon <math>\mathcal{G}_2</math> (Supercondensateurs)</i>
$\mathcal{U}_1 = \{-1, 0, 1\}$	$\mathcal{U}_2 = \{-1, -0.5, 0, 0.5, 1\}$
$\epsilon_1 = 0.2$	$\epsilon_2 = 0.2$
$\gamma_1 = 0.995$	$\gamma_2 = 0.995$
$\lambda_1 = 0.9$	$\lambda_2 = 0.9$
$\alpha_1 = 0.5$	$\alpha_2 = 0.5$
12 × 8 × 4 cellules par grille	12 × 8 × 6 cellules par grille

TABLE 5.1 – Paramètres de l'algorithme

<b>Paramètres du DC bus</b>	
$V_{dc}^{min} = 680 \text{ V}$ $V_{dc}(0) = 700$	$V_{dc}^{max} = 720 \text{ V}$ $C = 20 \text{ mF}$
<b>Paramètres des batteries</b>	
$V_{bat} = 400 \text{ V}$ $P_{bat}^{min} = -300 \text{ kW}$ $\dot{P}_{bat}^{min} = -2 \text{ kW/s}$ $E_{bat}^{tot} = 10 \text{ MWh} = 25 \text{ kAh}$	$P_{bat}^{max} = 300 \text{ kW}$ $\dot{P}_{bat}^{max} = 2 \text{ kW/s}$ $\eta_{bat} = 1$
<b>Paramètres des supercondensateurs</b>	
$V_{sc} = 400 \text{ V}$ $P_{sc}^{min} = -600 \text{ kW}$ $\dot{P}_{sc}^{min} = -10 \text{ kW/s}$ $E_{sc}^{tot} = 600 \text{ kWh} = 1500 \text{ Ah}$	$P_{sc}^{max} = 600 \text{ kW}$ $\dot{P}_{sc}^{max} = 10 \text{ kW/s}$ $\eta_{sc} = 1$

TABLE 5.2 – Paramètres du *microgrid*

Scénario	$(n_1, n_2)$	Contribution Totale du réseau (MWh)	Contribution Moyenne du réseau (kW)
$S_1$	(1, 0)	1.69 (0)	35.26 (0.03)
$S_2$	(2, 0)	0.1 (0.01)	1.99 (0.25)
$S_3$	(0, 1)	5.25 (0)	109.45 (0.01)
$S_4$	(0, 2)	4.87 (0)	101.54 (0.08)
$S_5$	(1, 1)	1.38 (0.01)	28.9 (0.29)
$S_6$	(2, 1)	0.17 (0.09)	3.51 (1.96)
$S_7$	(1, 2)	1.02 (0.12)	21.26 (2.49)
$S_8$	(2, 2)	0.1 (0)	2.03 (0.1)

TABLE 5.3 – Résultats. Les intervalles de confiance à 95% sont listés entre parenthèses.

peuvent délivrer une quantité plus importante de courant dans un laps de temps plus court. C'est ce qui explique que la contribution totale du réseau est plus importante lorsque des supercondensateurs sont impliqués à la place de batteries.

Lorsque des batteries sont utilisées avec des supercondensateurs, les résultats sont encore plutôt satisfaisants : la contribution totale du réseau décroît lorsque plus d'agents (particulièrement des batteries) sont impliqués.

Les stratégies apprises par les unités de stockage ainsi que les variations de leur état de charge sont indiquées dans les figures 5.11 à 5.16. Lorsque le *microgrid* est composé d'une batterie (figure 5.11), nous pouvons constater que la charge est alimentée par la batterie depuis le début de la simulation, sans interruption, jusqu'à ce que son état de charge atteigne le seuil minimum de 40%. La même conclusion peut être émise lorsqu'un seul supercondensateur doit alimenter la charge (figure 5.12), mais pour une plus courte période pour la raison exposée précédemment. Lorsque deux supercondensateurs sont utilisés, le temps pendant lequel la charge est alimentée par les unités de stockage est doublé. Lorsque deux batteries sont impliquées (figure 5.13), le réseau principal est très peu sollicité, car les unités de stockage possèdent la capacité cumulée requise pour complètement assurer l'alimentation de la demande. La stratégie jointe apprise n'est pas optimale du point de vue d'un ingénieur électrique. En effet, il n'est pas envisageable qu'une batterie soit utilisée pour en charger une autre. Cependant, la stratégie est optimale par rapport à la fonction de récompense formulée. Des travaux en cours sont en partie dédiés à la reformulation du problème pour éviter ce type de situations. Lorsque le *microgrid* est composé d'une batterie et d'un supercondensateur (figure 5.15), la contribution du réseau principal est maintenue autour d'une valeur très basse la plupart du temps, tant que les unités de stockage ont assez d'énergie. La puissance est principalement délivrée par le supercondensateur durant la première heure. Elle est ensuite délivrée par la batterie jusqu'à la trente-troisième heure. Ensuite, c'est le réseau principal qui alimente la charge jusqu'à la fin de la simulation. Lorsque deux batteries et deux supercondensateurs sont impliqués, le réseau principal est une fois de plus très peu sollicité puisque la capacité cumulée des unités de stockage le permet. Comme

dans la figure 5.13, le fait d'introduire des connaissances expertes permettra de gérer plus efficacement les flux entre batteries. Dans toutes les figures, les pics sont causés par la perte d'une ou de plusieurs unités de stockage.

En conclusion, nous pouvons constater que deux types d'unités de stockage, des batteries et des supercondensateurs, dont les capacités et les dynamiques de fonctionnement diffèrent, ont pu apprendre à alimenter conjointement une charge tout en minimisant la contribution du réseau principal. L'intégration de ce système dans un système de gestion globale de *microgrids*, permettra également de simplifier le problème, car le premier système de contrôle permettra de limiter les écarts entre l'offre et la demande. Les systèmes de stockage seront donc à même de compenser ces écarts.

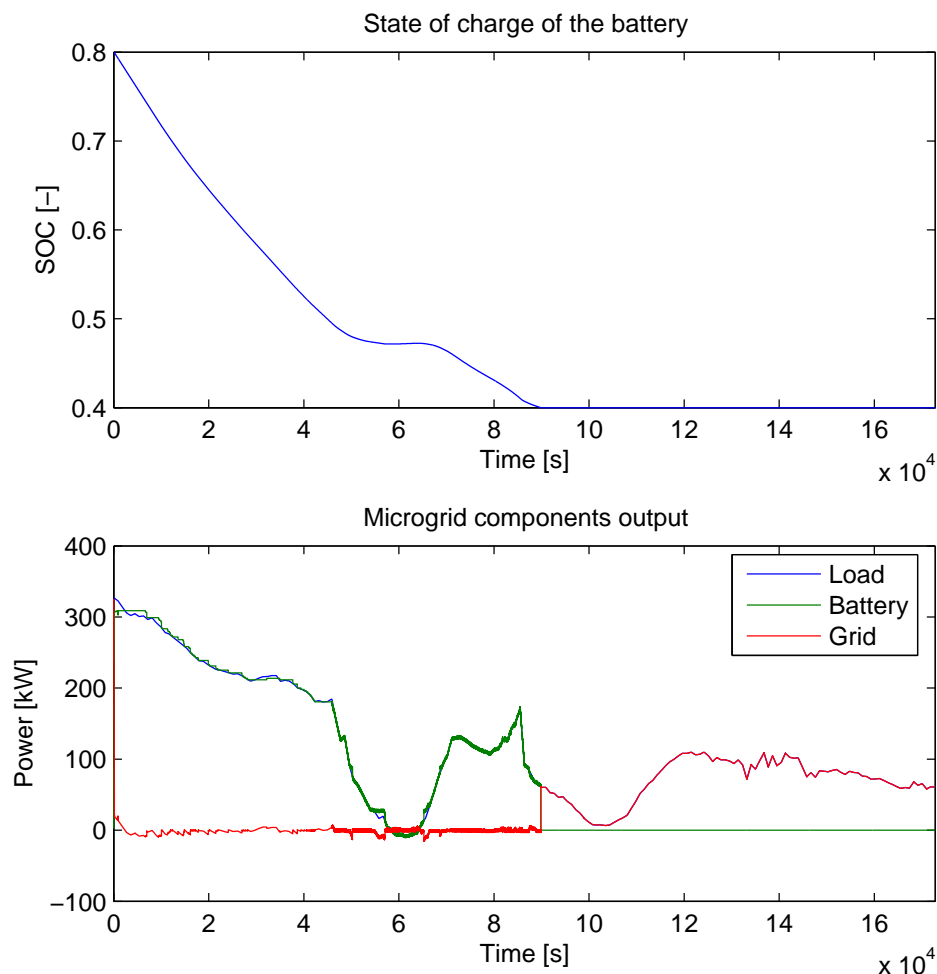


FIGURE 5.11 – Stratégies apprises par une batterie.

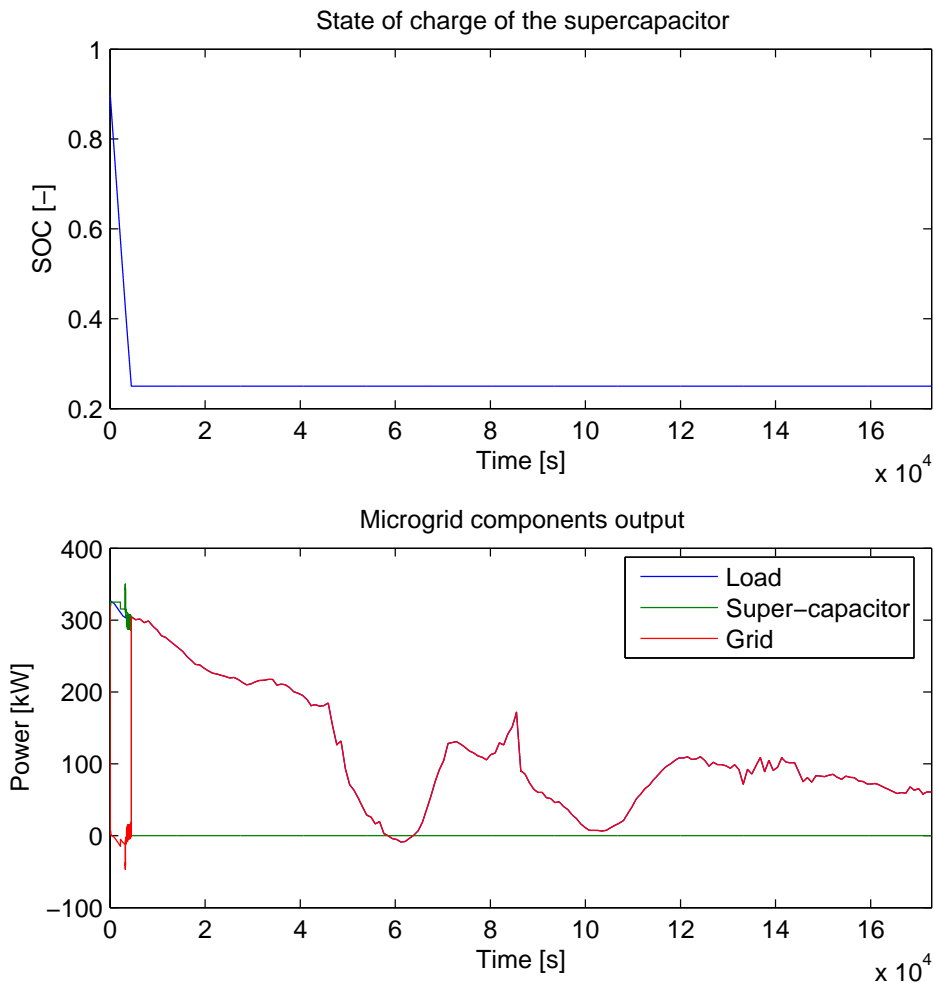


FIGURE 5.12 – Stratégies apprises par un supercondensateur.

## 5.5/ CONCLUSION

Ce chapitre aborde d'une nouvelle facette le problème de gestion d'énergie dans un réseau électrique. L'approche *microgrid*, bien que déjà existante, ne prend que très peu en compte l'ensemble des périphériques connectés au réseau. De plus, le fait de considérer l'ensemble des critères sociétaux dans la gestion d'un réseau n'est pas mis en avant dans les travaux de recherche actuels.

L'approche holonique associée aux boucles de rétroaction est une approche complètement nouvelle dans la résolution des problèmes liés aux *smart grids*. Elle permet de prendre en compte l'ensemble des critères sociétaux de façon indépendante, tout en assurant une interaction entre les différents problèmes.

Finalement, la gestion de la stabilité est le critère principal dans la gestion des réseaux électriques et plus particulièrement des *microgrids*. Nous avons donc proposé une solution utilisant les systèmes multi-agents apprenants. Les

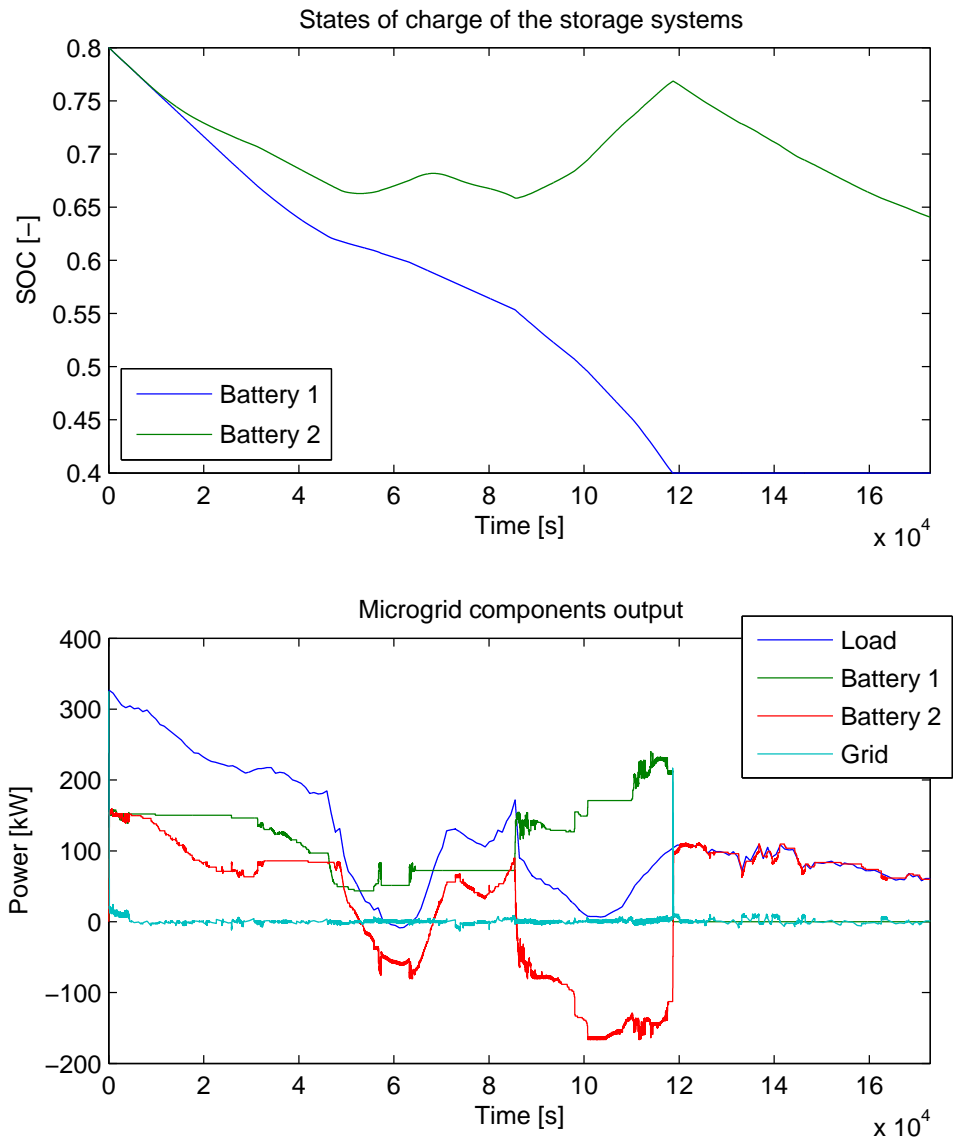


FIGURE 5.13 – Stratégies apprises par deux batteries.

systèmes multi-agents répondent aux besoins vitaux de pouvoir assurer la stabilité du réseau même si une panne locale venait à apparaître. L'apprentissage permet de faire évoluer le système en fonction des modifications du réseau, comme, par exemple, l'ajout de nouveaux périphériques.



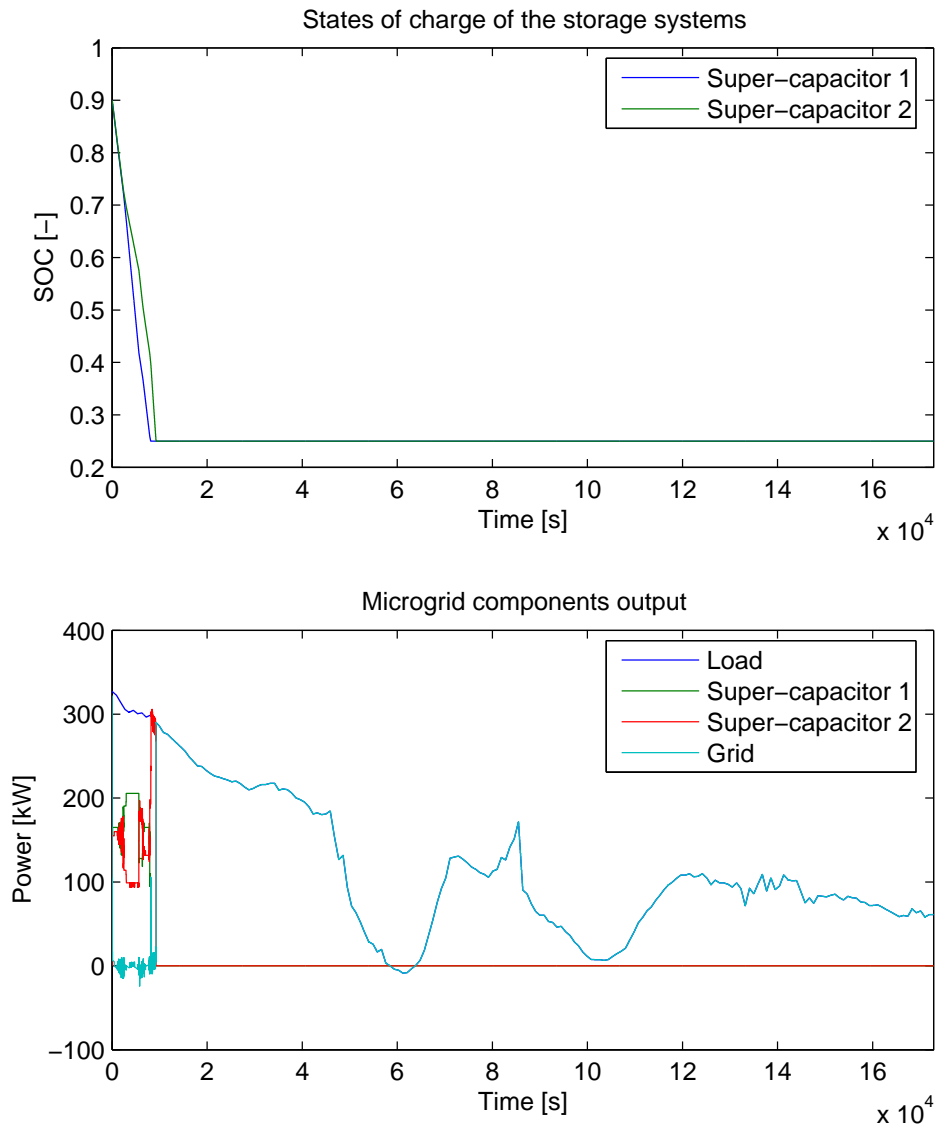


FIGURE 5.14 – Stratégies apprises par deux supercondensateurs.

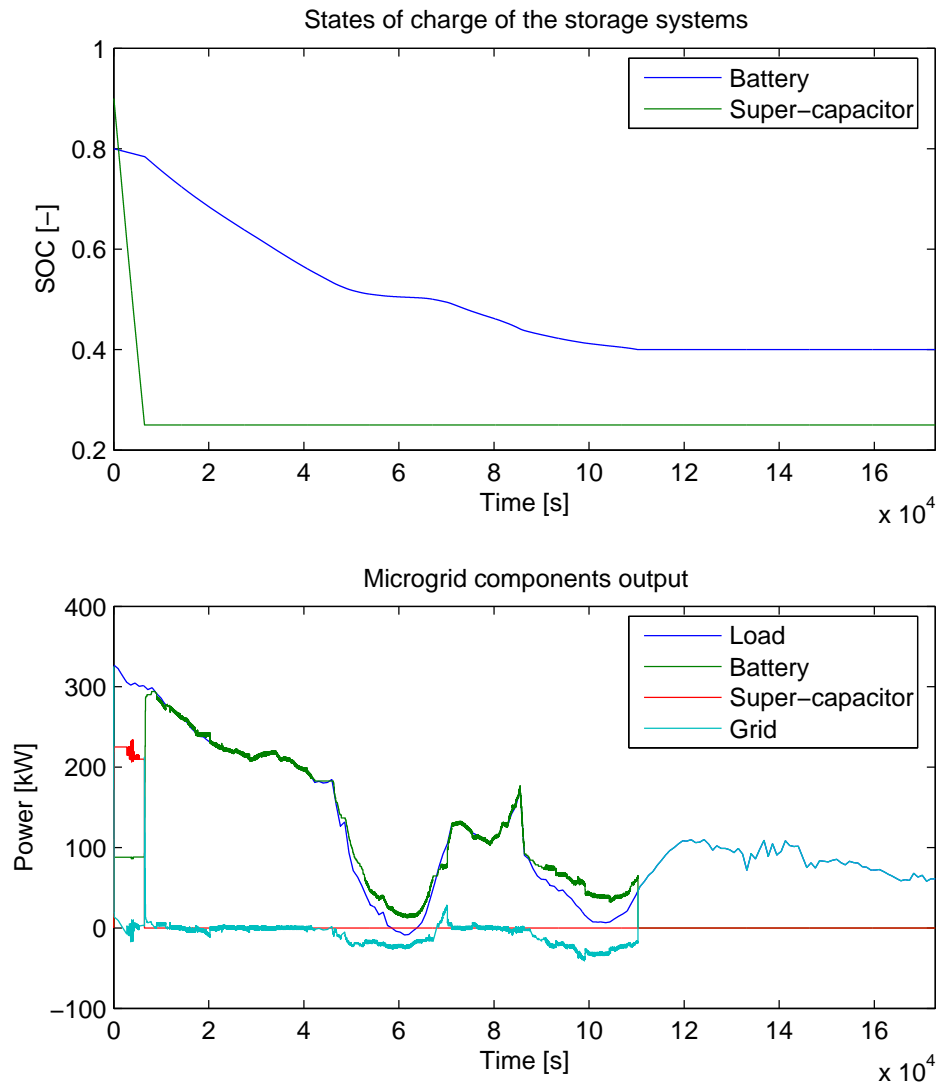


FIGURE 5.15 – Stratégies apprises par une batterie et un supercondensateur.

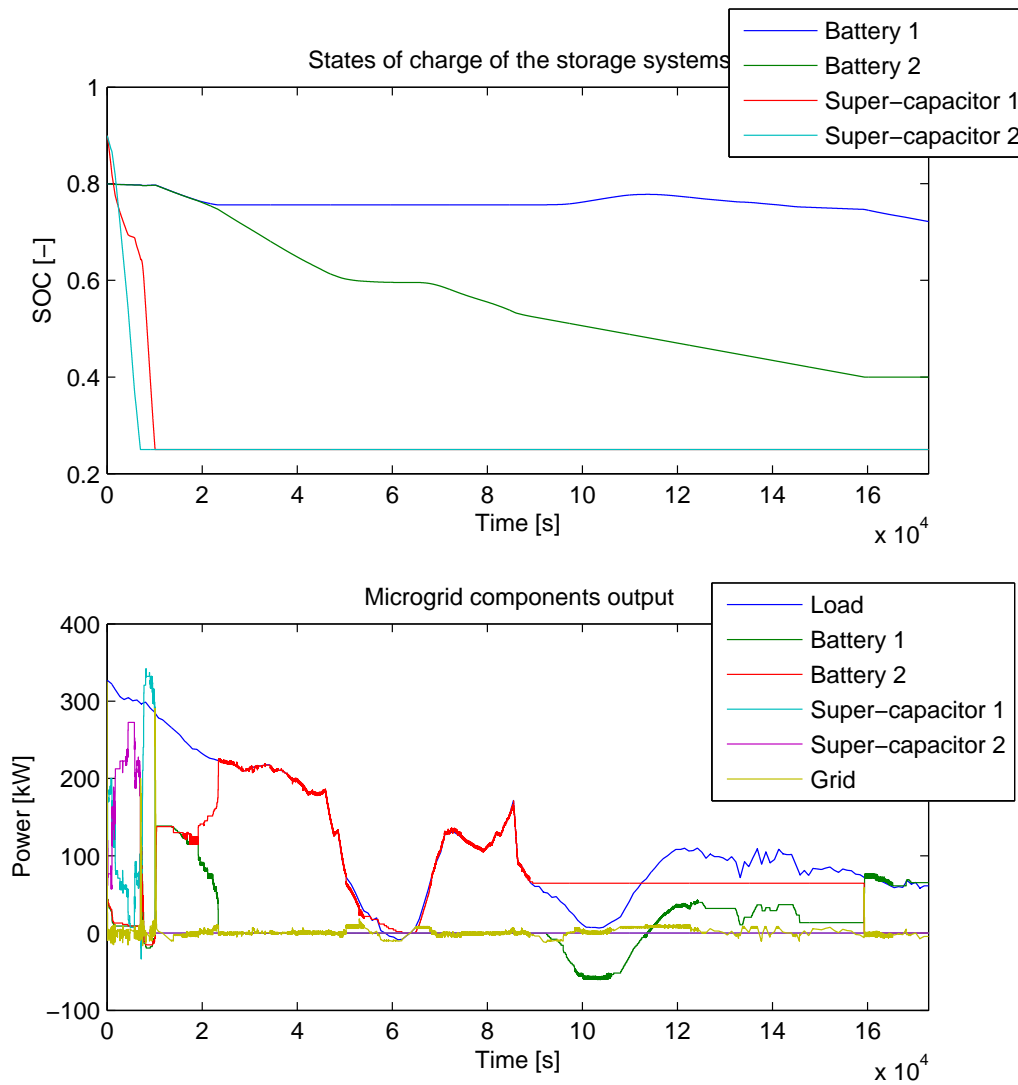


FIGURE 5.16 – Stratégies apprises par deux batteries et deux supercondensateurs.

# III

## IMPLÉMENTATION, EXPÉRIMENTATION ET RÉSULTATS



# UN SIMULATEUR MULTI-AGENTS DE MICROGRIDS

## 6.1/ INTRODUCTION

Nous avons présenté, dans la partie précédente, une méthodologie permettant de déployer une stratégie de contrôle collaboratif multi-niveaux dans un réseau électrique de type *microgrid*. L'objectif est de contrôler les périphériques présents dans le réseau afin d'optimiser l'échange d'énergie. Pour valider une telle stratégie, deux solutions sont envisageables. La première solution consiste à déployer cette stratégie sur un *microgrid* réel afin d'en observer les résultats. La deuxième solution consiste à définir et réaliser un simulateur de *microgrids* intégrant la stratégie de contrôle. Nous avons opté pour cette dernière solution pour des questions de coût et de souplesse dans la définition des composants du *microgrid*. En effet, l'utilisation d'un simulateur, dans un contexte énergétique notamment, permet :

- d'éviter la construction de nouvelles infrastructures et donc de réduire significativement les coûts d'investissement,
- de tester avec des configurations matérielles configurables « à volonté »,
- d'éviter d'endommager le réseau électrique réel.

Il est désormais habituel, dans de nombreux domaines, d'avoir recours à des simulations, en vue de tester et de valider des stratégies de contrôle potentiellement efficaces. Afin de garantir la pertinence de l'évaluation, ces stratégies de contrôle doivent être déployées dans des réseaux composés d'un nombre variable de périphériques et sous des conditions de fonctionnement différentes. Pour cette raison, il est important d'avoir un simulateur de gestion d'énergie offrant un contrôle dynamique des périphériques simulés.

Or, la complexité intrinsèque d'un réseau électrique de par son architecture, son grand nombre d'entités et leurs dynamiques, le rend difficile à simuler. La simulation multi-agents offre un cadre de simulation adéquat, car elle permet de décrire l'évolution interne des entités et leurs interactions dans un environnement évolutif.

Ce chapitre est organisé comme suit : la section 6.2 présente les simulateurs d'énergie existants, la section 6.3 présente les concepts sous-jacents de notre si-

mulateur, la section 6.4 pose les bases de l'analyse organisationnelle de ce simulateur, la section 6.5 détaille quelques expérimentations et la section 6.6 conclut.

## 6.2/ LES SIMULATEURS EXISTANTS

À l'heure actuelle, différents simulateurs de systèmes d'énergie sont disponibles. Dans la suite de cette section, nous décrivons les simulateurs les plus avancés et les plus utilisés.

OpenDSS [Dugan, 2009], développé par l'*Electric Power Research Institute* (EPRI), est un simulateur open source de systèmes de distribution. C'est une plate-forme de recherche flexible et extensible qui se veut le fondement de nouvelles applications d'analyses de distribution, particulièrement pour la production d'énergie distribuée. Il supporte l'analyse des hautes fréquences et possède une grande collection de modèles pour simuler la production d'énergie renouvelable.

Développé par l'*U.S. Department of Energy* (DOE) au *Pacific Northwest National Laboratory* (PNNL), GridLAB-D [Chassin et al., 2008] est un environnement de simulation de système de distribution. Il fournit à l'utilisateur des outils pour l'analyse de données, par exemple une modélisation basée sur les systèmes multi-agents ou encore une validation des grilles tarifaires grâce aux réactions des consommateurs. Le cœur de GridLAB-D utilise un algorithme avancé qui peut simultanément gérer des millions de périphériques différents, chacun d'eux étant décrit par plusieurs équations différentielles.

Le simulateur de PowerWorld<sup>1</sup> est un logiciel utilisé pour simuler les systèmes à haute tension. Grâce à cet outil, il est possible d'analyser le flux d'énergie sur un système composé de plus de 100000 bus. PowerWorld offre de nombreux modules permettant l'intégration, entre autres, de l'analyse de la stabilité de la tension du réseau, la modélisation et l'évaluation des perturbations géomagnétiques, etc..

Le logiciel PowerFactory<sup>2</sup>, développé par DlgSILENT, possède de nombreuses fonctionnalités. Notons, l'intégration fonctionnelle, la performance de la modélisation des réseaux T&D, de production et industriels, et les capacités d'analyse de l'interaction entre les réseaux. La version 15 de PowerFactory présente une étape supplémentaire dans l'intégration des fonctions et la gestion des données dans un environnement multi-utilisateur.

Nous tenons également à mentionner l'outil SimPowerSystems<sup>3</sup> de Matlab®/Simulink®. Cet outil est très utilisé dans la communauté scientifique. Il fournit des outils d'analyse et des bibliothèques de composants pour la modélisation et la simulation de systèmes d'alimentation électrique, notamment des machines à trois phases, des modules de commande électrique et des

---

1. <http://www.powerworld.com>

2. <http://www.digsilent.de/index.php/fr-products-powerfactory.html>

3. <http://www.mathworks.fr/products/simpower/>

composants d'applications tels que des systèmes de transmission de courant alternatif flexibles (FACTS) et des systèmes d'énergie renouvelable.

Ces simulateurs sont très utilisés pour l'analyse de données, mais n'ont pas été développés pour intégrer simplement et dynamiquement des stratégies de contrôle, et plus particulièrement des stratégies de contrôle distribuées. L'intégration de telles stratégies, pouvant contrôler les périphériques simulés en cours de simulation, est l'objectif principal de notre simulateur. L'idée sous-jacente est d'offrir à l'utilisateur une validation de ces stratégies qui pourront ainsi être intégrées à un système réel de distribution d'énergie de la vie quotidienne. Pour pouvoir être réaliste lors de son utilisation, le simulateur doit être capable d'intégrer ou de supprimer des (nouveaux) périphériques. L'ensemble des actions (contrôle, modification, ajout, suppression, etc.) pouvant intervenir en temps réel.

## 6.3/ LES GRANDS PRINCIPES DU SIMULATEUR

Le simulateur présenté dans ce chapitre repose sur trois grands principes. Le premier est une modélisation à base d'agents du simulateur lui-même. Le second principe repose sur l'utilisation du paradigme holonique [Koestler, 1967] afin de prendre en compte les multiples niveaux inhérents aux réseaux électriques. Enfin, le troisième principe est inspiré du modèle influence/réaction [Ferber and Müller, 1996, Michel, 2004] et propose une technique qui permet de gérer les actions simultanées, éventuellement conflictuelles, au sein des SMA. Les trois sous-sections suivantes décrivent respectivement ces grands principes.

### 6.3.1/ LE MODÈLE INFLUENCE/RÉACTION

Une des grandes problématiques de la simulation multi-agents est l'implémentation de la simultanéité des actions pourtant inhérente au paradigme agent. Ferber et Müller [Ferber and Müller, 1996] puis F. Michel [Michel, 2004] ont défini le modèle influence/réaction permettant de résoudre ce problème. Ce modèle considère que les agents ne peuvent que percevoir les effets que provoquent leurs influences sur l'environnement. L'ensemble des influences produites à un même instant, par un ou plusieurs agents, doit être connu pour pouvoir calculer le nouvel état du monde en étudiant la combinaison de celles-ci. Pour mettre en place ce modèle, la séparation de l'implémentation physique de l'environnement et de l'implémentation des intelligences est nécessaire. Dans [Michel, 2004], quatre concepts sont définis pour permettre une implémentation modulaire du modèle influence/réaction au sein d'un simulateur :

- **le comportement** : représente la partie décision de l'agent qui spécifie la manière dont un agent, à partir d'une perception, produit une influence sur l'environnement.
- **l'environnement** : représente l'implémentation physique indépendante des agents qui ne pourront qu'influencer son état (mais pas le contrôler ni le modi-



fier).

- **l'ordonnement** : permet de définir des politiques d'exécution temporelle des actions, et gère l'écoulement du temps dans la simulation.
- **les interactions** : désignent, dans la modélisation/simulation d'un système multi-agents, la dynamique engendrée par les influences qui sont concomitantes à un instant  $t$  de la simulation. Par extension, la gestion de l'interaction correspond à un calcul réalisé par une fonction (la réaction) tel qu'il permet de déterminer le nouvel état du monde étant donné un ensemble d'influences et l'état du monde courant.

### 6.3.2/ AGENTIFICATION DES SMART GRIDS

De par la nature des réseaux électriques, les systèmes multi-agents sont de bons candidats pour la modélisation et l'implémentation des composants intelligents des *smart grids* [McArthur et al., 2007a, McArthur et al., 2007b]. Un réseau électrique peut être vu comme un système multi-agents. Dans ce système, les périphériques sont vus comme des agents interagissant sur un réseau pour en équilibrer la production et la consommation d'énergie. En utilisant les propriétés d'un agent données par [Wooldridge and Jennings, 1995], un parallèle est décrit dans le Tableau 6.1.

L'approche holonique, en tant qu'extension des SMA [Brussel et al., 1998, Cossentino et al., 2010], apparaît comme une alternative encore plus aboutie pour les *smart grids*. En effet, les holons permettent de prendre en compte les différents niveaux d'un réseau. L'exemple le plus facile à comprendre est celui d'un habitat. Celui-ci est composé d'un ensemble de périphériques produisant ou consommant de l'énergie, mais il peut aussi être vu, de l'extérieur, comme un périphérique unique relié au réseau de distribution. Cet exemple peut être facilement généralisé à l'ensemble du réseau électrique.

La vision holonique des réseaux électriques et des *smart grids* n'est pas nouvelle. L'EPRI [Lee, 2009] voit dans les systèmes multi-agents holoniques un système permettant l'autocicatrisation des *smart grids*. Du fait de la décentralisation du contrôle de l'énergie, si une partie du réseau venait à se déconnecter, les autres intelligences du réseau pourraient équilibrer l'énergie. Cette approche ne serait par réalisable avec un système centralisé, qui s'il venait à se déconnecter créerait un black-out sur toute la partie du réseau qu'il gère. Le côté holarchique apparaît aussi pour s'organiser en différents cycles d'exécution gérant différents problèmes à différentes échelles de temps.

De leur côté, Negeri & Backen [Negeri et al., 2013] présentent les *smart grids* comme étant un système holonique offrant une collaboration de *prosumers*, des consommateurs produisant leur propre énergie, permettant une meilleure négociation avec le marché de l'énergie. Ils prônent aussi une association dynamique des périphériques qui peuvent changer de groupe si le besoin s'en fait sentir.

<i>Propriétés</i>	<i>Agents</i>	<i>Entités</i>
<i>autonomie</i>	Un agent se doit d'opérer sans une intervention directe de l'extérieur, et d'avoir un certain contrôle de ses actions et de son état interne.	Une entité d'un réseau électrique ne peut que fournir de l'énergie à d'autres entités, mais en aucun cas avoir un contrôle sur une autre entité.
<i>aptitudes sociales</i>	Les agents interagissent entre eux via un langage.	Dans un réseau, toutes les entités se doivent d'échanger de l'énergie, il s'agit d'échange de messages via l'environnement (le réseau).
<i>réactivité</i>	Les agents perçoivent leur environnement et répondent en temps opportun à ses changements.	Les entités reçoivent de l'énergie, mais peuvent également changer leurs comportements en fonction des observations faites sur le réseau.
<i>proactivité</i>	Les agents ne font pas que répondre aux changements de l'environnement, ils peuvent aussi avoir un comportement leur permettant d'agir par eux-mêmes.	Une entité peut changer d'état interne sans considération sur ce qu'il se passe sur son réseau.

TABLE 6.1 – Mise en parallèle entre les propriétés d'un agent et celles d'une entité d'un réseau

Bien que ces approches aient une vision différente des *smart grids* holoniques, il est possible de définir une généralisation des aspects présentés dans la section 6.3.1 pour les différents niveaux du système :

- **le comportement** : d'un holon permet de définir son objectif qui permettra de résoudre l'objectif global du niveau auquel il appartient,
- **l'environnement** : représente une partie (différente, suivant le niveau considéré) du réseau global,
- **l'ordonnement** : doit être défini de façon à résoudre les problèmes définis pour le niveau, il doit être très court pour les niveaux proches de la physique, les holons peuvent avoir un temps de réflexion plus important pour les niveaux plus proches du marché,
- **les interactions** : on entend ici les interactions entre les holons et l'environnement. D'un côté, un holon doit pouvoir influencer un périphérique pour changer sa production/consommation d'énergie, mais doit aussi pouvoir observer les différents périphériques de son niveau pour pouvoir adapter son comportement.

### 6.3.3/ LE MODÈLE HOLONIQUE

Un système multi-agents peut comprendre un grand nombre d'agents. Dans ce cas, il nécessite la capacité de former des groupes d'agents qui collaborent pour réaliser les objectifs du système. Diviser ce système en plusieurs sous-systèmes dont les problématiques sont plus facilement solvables est fréquent en informatique [Rodriguez, 2005].

Le modèle holonique présente un agent (ou holon) comme étant une entité auto-similaire composée de holons comme sous-structures (voir 4.3.1). Un holon peut être vu, en fonction du niveau d'observation, tantôt comme une entité atomique, tantôt comme un groupe de holons en interaction [Gaud, 2007].

Partant des aspects multi-agents définis par Michel [Michel, 2004], Gaud [Gaud et al., 2008] étend ces aspects pour définir des modèles adaptés aux simulations multi-niveaux. Il propose de séparer clairement les modèles de leurs implémentations et le système de l'environnement en définissant quatre modèles multi-niveaux. Le premier représente l'environnement du système, le second représente l'intelligence du système chacun associé à leur modèle d'exécution respectif.

Un réseau électrique de quartiers est actuellement un ensemble de maisons interconnectées qui reçoivent de l'énergie d'un producteur décentralisé. Une maison représente un unique consommateur dans ce réseau. A contrario, cette maison peut aussi être vue, de l'intérieur, comme un ensemble de périphériques connectés à un sous-réseau, consommant de l'énergie arrivant de l'extérieur. Le schéma 6.1 permet de mettre en évidence l'aspect holonique d'un réseau électrique de quartiers. Les réseaux électriques et, par extension, les *smart grids* apparaissent, à travers cet exemple simple et compréhensible, comme naturellement holoniques. En étendant cet exemple aux réseaux globaux, tels les réseaux

nationaux interconnectés, un réseau électrique apparaît comme un système holonique pouvant avoir un grand nombre de niveaux.

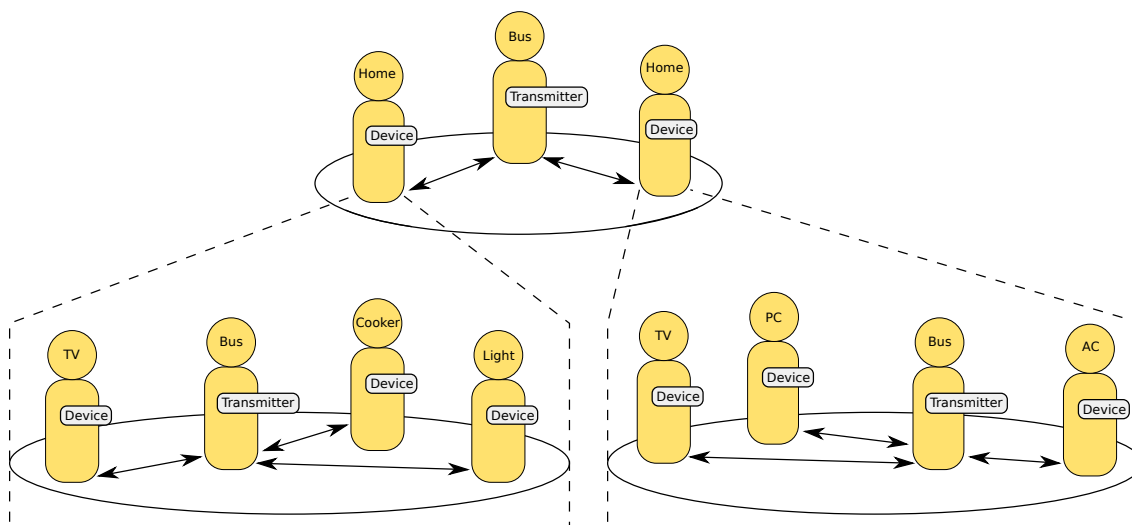


FIGURE 6.1 – Exemple d’une représentation holonique d’un réseau électrique

## 6.4/ ANALYSE ORGANISATIONNELLE DU SIMULATEUR

Cette section décrit l’analyse du simulateur. Cette analyse est faite selon la méthodologie ASPECS [Cossentino et al., 2010, Cossentino et al., 2013] décrite au chapitre 4. Les résultats des activités de cette méthode, présentés par la suite, permettent d’appréhender les concepts de base et l’architecture du simulateur.

### 6.4.1/ ONTOLOGIE DE DOMAINE

Pour concevoir le simulateur, il est nécessaire de formaliser les concepts relatifs au réseau électrique. Cette activité correspond à la définition de l’ontologie du domaine du problème au sein d’ASPECS. Nous définissons ci-après une ontologie (voir Figure 6.2) permettant de modéliser un réseau d’énergie électrique comme un ensemble de sous-réseaux interconnectés. Cette ontologie s’inspire des travaux similaires existants dans le domaine, à savoir, l’ontologie présentée dans [van Dam, 2009] et les travaux de la Commission Électrotechnique Internationale (CEI).

Différentes recherches ont été faites pour définir les différents concepts techniques et/ou sociétaux liés aux systèmes d’énergie. Van Dam détaille dans sa thèse [van Dam, 2009] un nombre important de recherches dans le domaine bien que principalement portée sur l’approche marché. Cette ontologie a pour objectif de développer une approche de modélisation intégrée pour les systèmes à infrastructure sociotechnique. L’objectif est de capturer la réalité physique et sociale

d'un système et leurs interactions avec d'autres systèmes dynamiques. L'objectif n'est pas seulement de définir une ontologie pour un domaine spécifique, mais de développer un cadre de modélisation pouvant être appliqué à tout système sociotechnique. Une application concrète pour les réseaux électriques a été décrite dans [van Dam and Lukszo, 2006], elle présente une modélisation générique et extensible d'une infrastructure de transport.

D'après la Commission Électrotechnique Internationale (CEI) un réseau d'énergie électrique est un ensemble d'ouvrages et de matériels destiné à produire, transporter et distribuer de l'énergie électrique. C'est également un ensemble défini de lignes électriques et de postes assurant le transport et la distribution d'énergie électrique. Un poste est une partie d'un réseau électrique, située en un même lieu, comprenant principalement les extrémités des lignes de transport ou de distribution, de l'appareillage électrique, des bâtiments, et, éventuellement, des transformateurs. Ces transformateurs servent à relier les différentes parties d'un réseau, ayant des caractéristiques différentes, entre elles.

En partant de ces travaux, nous définissons une ontologie pour la simulation des réseaux électriques. Le terme de périphérique est un terme générique permettant de regrouper l'ensemble des entités feuilles de la hiérarchie composant le réseau. Les périphériques peuvent être classés en deux catégories :

- les usagers, qui consomment de l'énergie,
- les générateurs, qui produisent de l'énergie.

Les systèmes de stockage sont considérés comme des usagers ou des générateurs en fonction de leur comportement. Lorsqu'un système de stockage se recharge, il est alors un usager du réseau et consomme de l'énergie. Lorsqu'il se décharge, il fournit de l'énergie au réseau et il est alors considéré comme un générateur. La consommation ou la production d'énergie par un système de stockage dépend de sa capacité à stocker de l'énergie. Un système de stockage « plein » (resp. « vide ») auquel on demanderait de consommer (resp., produire) de l'énergie, sera irrémédiablement endommagé et devra être remplacé.

Ces périphériques, pour échanger de l'énergie, doivent être connectés à des transmetteurs. Le terme de transmetteur n'est pas utilisé classiquement dans le domaine électrique. Nous l'avons introduit pour regrouper sous une seule dénomination les entités qui ont pour but de faire transiter de l'énergie, mais qui ne peuvent ni en créer ni en consommer, ce sont les nœuds du réseau. Les transmetteurs peuvent être classés en deux catégories :

- les transformateurs ou convertisseurs qui relient une ligne à une autre entité,
- les lignes électriques qui relient entre eux deux transformateurs/convertisseurs.

Lors du transport ou de la conversion d'énergie, des pertes peuvent apparaître. Ces pertes ne sont pas une consommation d'énergie même si le résultat est identique.

Suivant ces concepts, nous définissons un *microgrid* comme étant une partie basse tension d'un réseau d'énergie électrique pouvant inclure des générateurs d'énergie décentralisée (et potentiellement renouvelable), des systèmes de stockage et une partie des usagers du réseau.

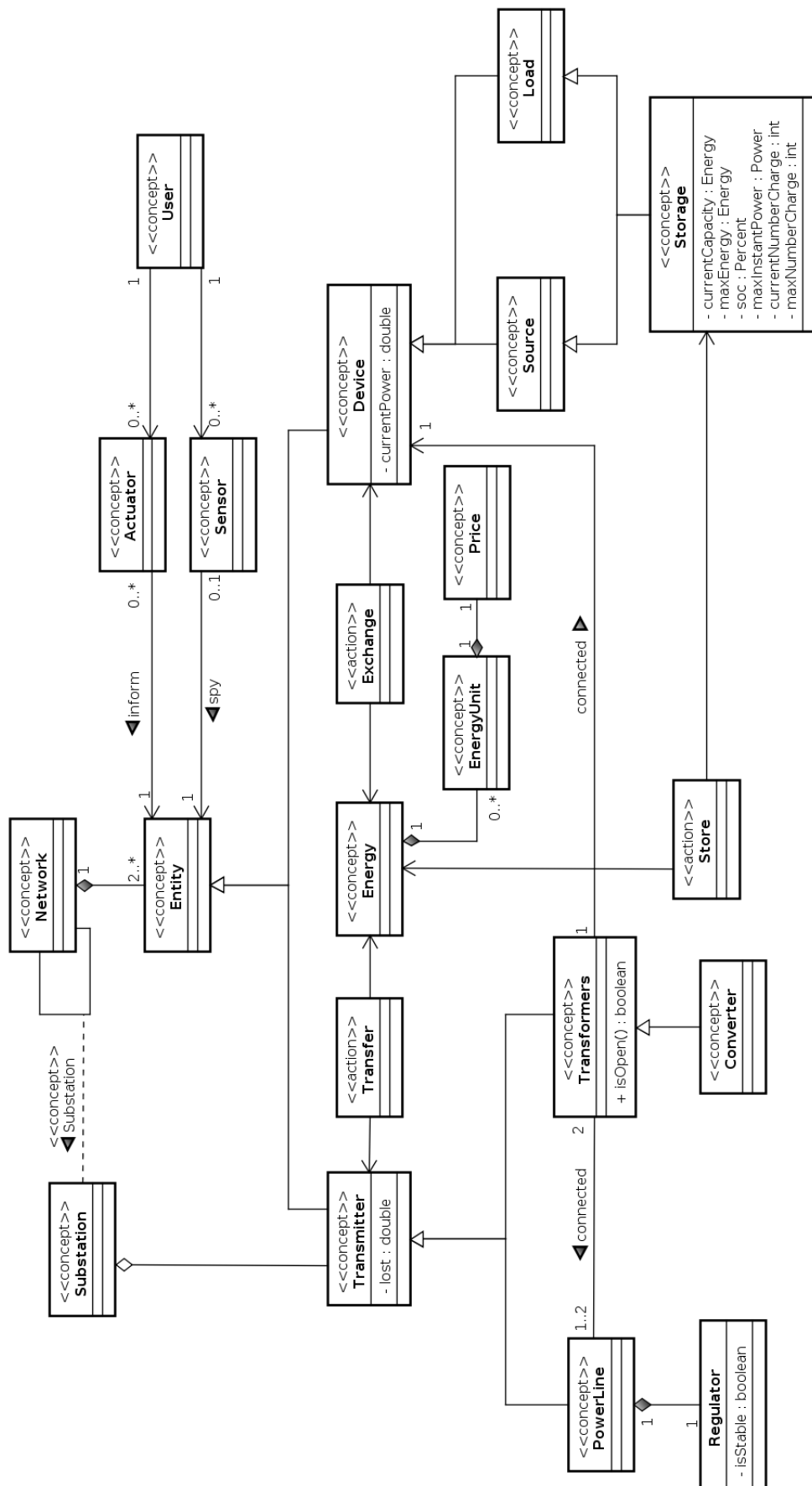


FIGURE 6.2 – Ontologie d'un réseau électrique

Afin de pouvoir connecter une stratégie de contrôle au sein de notre simulateur, nous avons également utilisé deux concepts : les capteurs, qui permettent l'observation externe des données d'un périphérique et les actionneurs qui permettent d'influencer le comportement des périphériques.

### 6.4.2/ IDENTIFICATION DES ORGANISATIONS

Nous allons présenter les quatre aspects identifiés par Michel [Michel, 2004] et introduits dans la section 6.3.1. Ces aspects sont : le comportement, l'environnement, l'ordonnancement et les interactions. Dans [Gaud et al., 2008], les auteurs étendent ces quatre aspects aux systèmes holoniques. Pour une simulation multi-niveaux, quatre modèles sont définis : le premier pour l'environnement, le deuxième pour le système de contrôle, les deux derniers étant leurs modèles d'ordonnancement respectifs comme le présente la figure 6.3. Nous présentons dans cette partie les différentes organisations présentes dans l'environnement ainsi que les implémentations conçues pour interagir avec les autres parties du modèle.

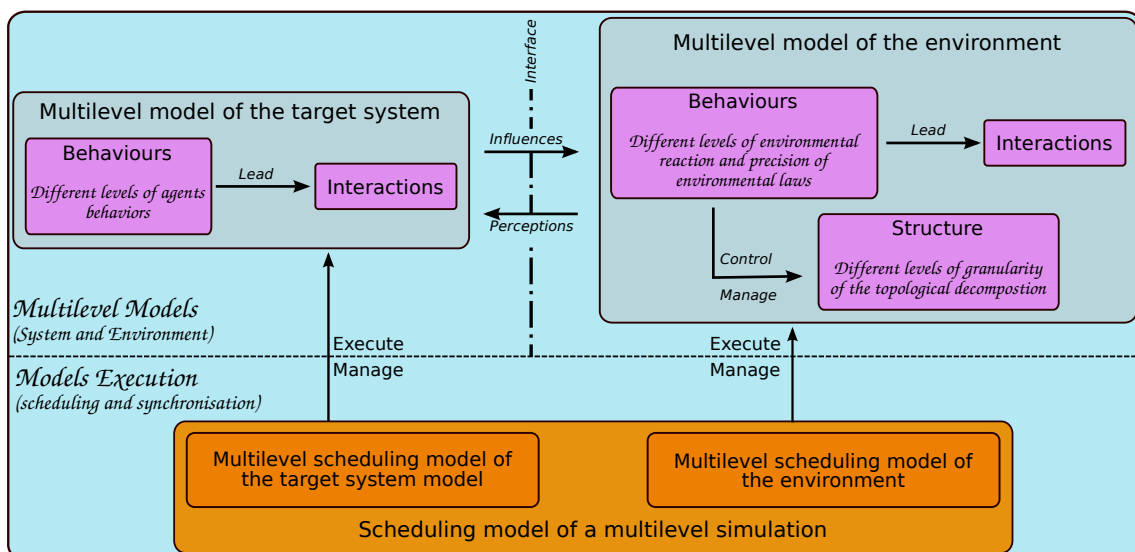
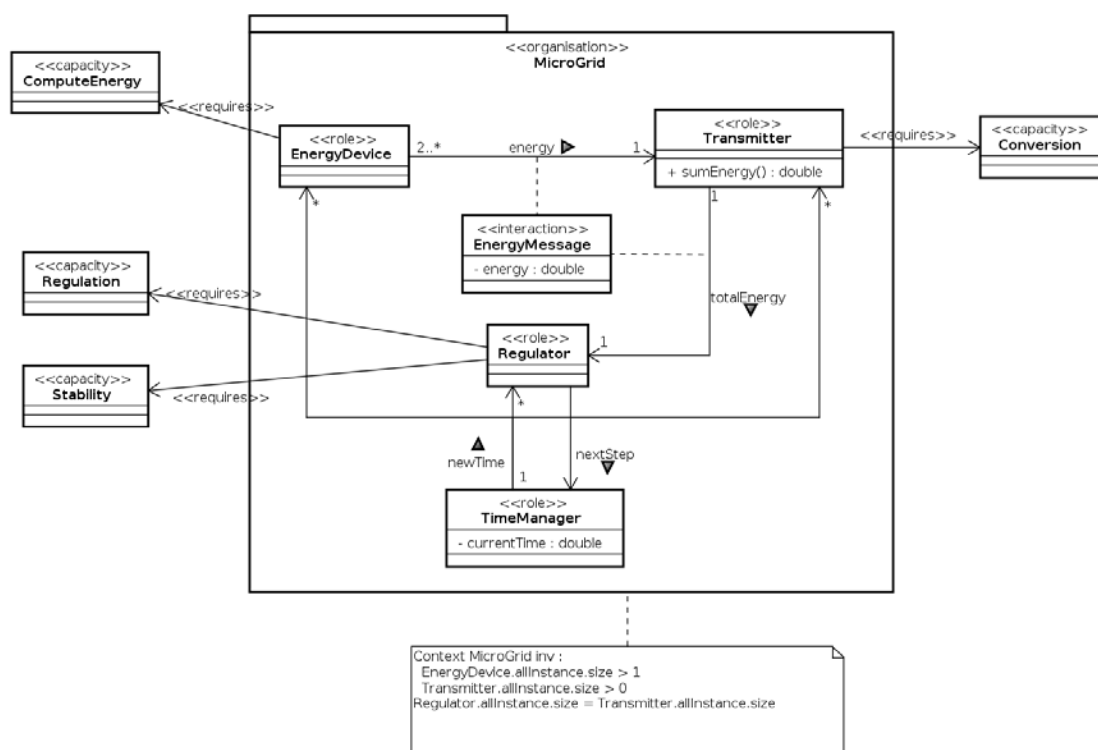


FIGURE 6.3 – Les différents aspects de la simulation multi-niveaux présentés dans [Gaud et al., 2008]

La section 6.4.2.1 présente l'organisation multi-niveaux de l'environnement. La section 6.4.2.2 présente la gestion du temps dans la simulation. Enfin, la section 6.4.2.3 présente le système d'influences/perceptions permettant une interaction entre la simulation et le système de contrôle. Ces aspects sont détaillés grâce aux modèles organisationnels présentés dans [Rodriguez, 2005].

## 6.4.2.1/ IDENTIFICATION DES RÔLES ET DES INTERACTIONS

L'échange d'énergie est le but principal d'un réseau électrique. La simulation de ces échanges représente donc une des difficultés lors de leur simulation. Pour simplifier, un réseau est décomposé en un ensemble de sous-réseaux interconnectés. Ces sous-réseaux sont définis par des caractéristiques qui permettent de simplifier l'échange d'énergie. Par exemple, on considère que, sur une même partie du réseau, l'ensemble des entités travaille avec la même tension. Cette hypothèse nous permet de représenter l'échange de façon plus simple dans une même organisation.

FIGURE 6.4 – Diagramme CRIO de l'organisation *microgrid*

L'organisation Microgrid (voir la Figure 6.4) représente un réseau électrique et permet l'échange d'énergie entre les différentes entités connectées à ce réseau. Elle est composée de quatre rôles :

- un rôle EnergyDevice doit être joué par tous les agents qui vont fournir de l'énergie. L'énergie fournie par l'agent peut être positive, si celui-ci est un générateur ou négative s'il s'agit d'un usager du réseau (une énergie négative est une énergie qui est consommée). Ces agents peuvent être de type générateur, comme un agent panneau photovoltaïque, ou un usager du réseau, comme un appareil ménager. Un agent pour pouvoir jouer le rôle EnergyDevice doit posséder la capacité ComputeEnergy, cette capacité permet à l'agent de définir l'énergie qu'il fournira au réseau. Ce rôle apparaît dans l'ontologie sous



le concept de périphérique,

- un rôle *Transmitter* doit être joué par un agent ayant pour but de transférer l'énergie entre différentes entités du réseau. Lorsqu'il a reçu l'ensemble des énergies fournies par les *EnergyDevices*, le transmetteur calcule les pertes lors du transfert d'énergie, via la capacité *Conversion* puis transfère l'énergie restante au rôle *Regulator*. Pour que le réseau soit stable, il faut que l'énergie fournie au *Regulator* soit le plus proche possible de 0 (loi de Kirschoff). Ce rôle apparaît dans l'ontologie sous le concept de transmetteur,
- un rôle *Regulator* fortement lié au rôle *Transmitter*, dont il doit vérifier l'énergie restante, non dissipée. Ce rôle permet de vérifier les différentes grandeurs du réseau telles que les tensions ou les puissances. Les deux capacités nécessaires pour pouvoir jouer ce rôle, *Regulation* et *Stability*, possèdent le même but, celui de vérifier la stabilité du réseau, mais possèdent des entrées différentes dépendantes de la caractéristique à vérifier. Ce rôle apparaît dans l'ontologie sous le concept de régulateur quand il est lié à une ligne électrique ou apparaît comme une fonction du concept de transformateur.
- un rôle *TimeManager* qui va garantir que le temps de la simulation reste cohérent durant toute la durée d'un scénario. Nous utilisons ici un modèle à événements discrets, tous les rôles d'une organisation *Microgrid* sont synchronisés via ce rôle par l'envoi d'un événement spécial, appelé *tic*, désignant la fin d'un pas de simulation (voir section 6.4.2.2).

La difficulté d'implémentation pour la simulation d'un réseau électrique apparaît dans la connexion entre les différentes parties d'un réseau. Généralement reliées par des postes, ces différentes parties du réseau possèdent des caractéristiques différentes. La plus connue étant la tension de ces lignes. Deux lignes de tensions différentes ne peuvent être reliées entre elles que par des transformateurs. Ces transformateurs incluent des pertes d'énergie, et doivent être placés à des endroits stratégiques dans le réseau.

Nous avons séparé la simulation d'échange d'énergie sur une partie d'un réseau, et le lien entre ces parties du réseau, par la création d'une holarchie (voir Figure 6.5).

L'organisation *Microgrid* permet à plusieurs périphériques d'échanger de l'énergie, comme présenté précédemment. En considérant un *microgrid* comme un périphérique fournissant la somme des énergies des périphériques qui le compose, il est aisé de définir un réseau de façon holarchique.

#### 6.4.2.2/ LA GESTION DU TEMPS DANS L'ORGANISATION

Pour la simulation, la gestion du temps est un point critique à cause des retards de synchronisation pouvant apparaître durant l'exécution et pouvant affecter les résultats de la simulation [Helleboogh et al., 2005].

D'après la classification donnée dans [Fujimoto, 2003], la gestion du temps dans notre simulateur peut être définie comme *conservative*, ou traditionnelle, avec une limite inférieure sur l'horodatage. Ce système utilise des mécanismes de blocage,

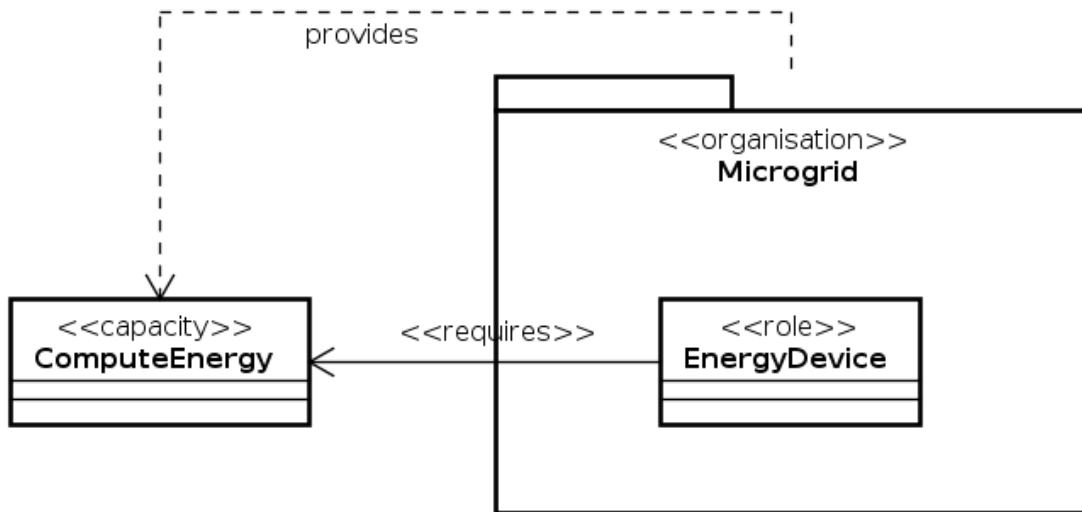


FIGURE 6.5 – Diagramme CRIO de l'aspect multi-niveau

basés sur le temps, afin de s'assurer qu'aucune erreur de synchronisation ne survient.

Cette approche ne permet pas à un agent de traiter un événement avant que celui-ci soit considéré comme sûr. Pour être sûr, un événement doit être déclenché durant le pas de temps courant de la simulation. Avec ce mécanisme, aucun message passé ou futur ne peut être traité. Enfin, si le temps est incrémenté en suivant le temps réel, le simulateur implémente alors l'écoulement du temps de façon réaliste, et donc la gestion d'événement, en temps réel.

Dans notre simulateur, un événement est considéré comme sûr s'il intervient durant le pas de temps durant lequel il a été généré. Ceci est rendu possible par le fait que les messages sont datés. La résolution de conflits, dans notre cas, revient à attendre que tous les périphériques aient fourni de l'énergie avant de vérifier la stabilité du réseau. Cela assure également que le pas de temps et l'unité de temps minimale au sein de la simulation. Le temps étant incrémenté une fois que l'ensemble des influences a été envoyé et que l'environnement ait résolu les conflits.

La gestion du temps est faite dans l'organisation *microgrid* par le rôle *TimeManager*. Après chaque pas de simulation, ce rôle informe les rôles *Device* qu'ils doivent envoyer de l'énergie, au rôle *Transmitter* auquel ils sont reliés. Ce rôle vérifie alors que toutes les informations sur l'énergie ont été reçues, sinon les informations du pas de temps précédent seront utilisées. L'ensemble des informations est ensuite envoyé au rôle *Regulator* qui va vérifier la stabilité du système. Enfin, le rôle *TimeManager* va incrémenter le pas de temps de la simulation. Cet échange de données est résumé par le diagramme de séquence de la figure 6.6.

Un des avantages annexes de la technique choisie est de pouvoir paramétrer la durée d'un pas de temps. Le simulateur peut donc s'exécuter en temps réel, ou

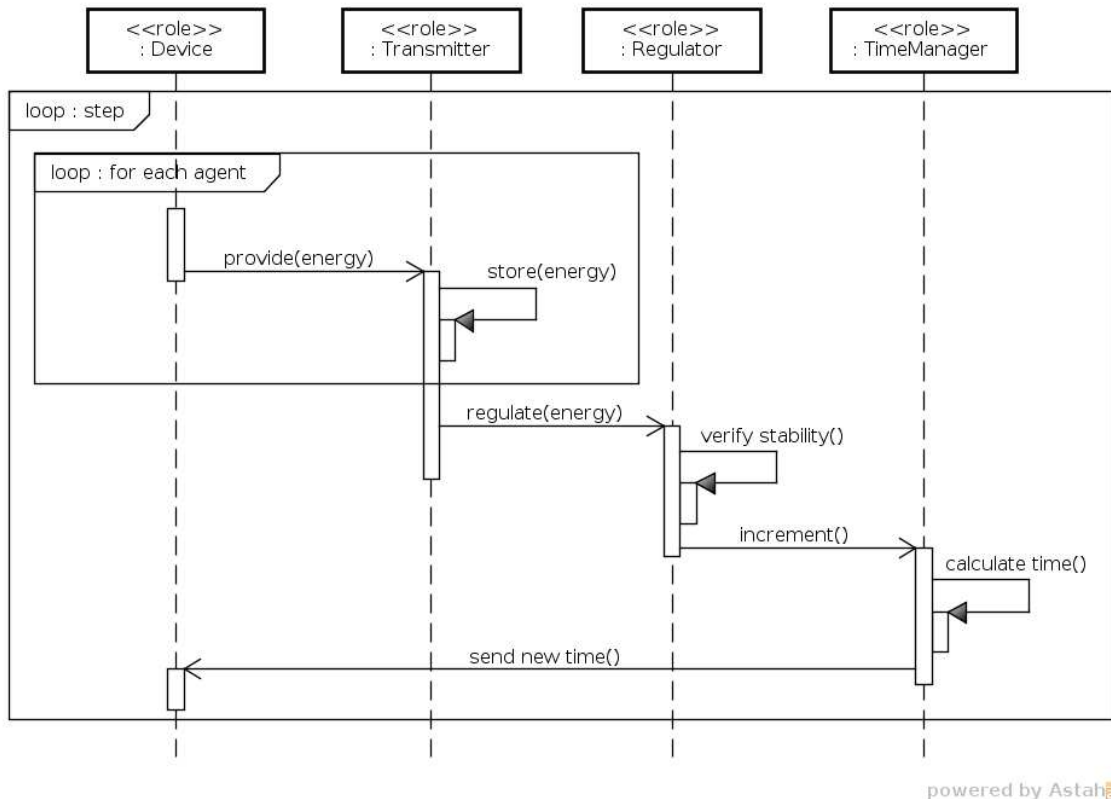


FIGURE 6.6 – Diagramme de séquence pour l'échange d'énergie

encore, aussi rapidement que le permet le matériel sur lequel il est déployé.

### 6.4.2.3/ INTÉGRATION DE L'ORGANISATION MICROGRID

La possibilité de faire communiquer le simulateur présenté avec des logiciels/matériels externes est une des exigences initiales. L'idée est de permettre à des stratégies de contrôle de venir influencer dynamiquement le comportement des périphériques. Un autre objectif est de pouvoir connecter/déconnecter des périphériques réels de manière transparente.

Les interactions avec le simulateur suivent le principe d'influence/réaction. L'intelligence externe représente l'esprit d'un agent, qui va donc donner des indications à son corps pour que celui-ci effectue les actions demandées. Le corps est, dans notre cas, un périphérique simulé. Cette influence est néanmoins limitée par les caractéristiques internes des périphériques. Par exemple, il n'est pas possible de modifier la production d'énergie d'un panneau photovoltaïque (hormis en le retirant du réseau) ou de modifier la consommation d'une machine à laver. Il est par contre possible de définir le cycle de la machine à laver. Celle-ci changera alors sa consommation en conséquence.

Bien que l'intelligence teste le réseau à sa convenance, le résultat n'est pas

forcément celui qui est attendu. Il est donc nécessaire de pouvoir observer les résultats de son influence sur le réseau au court de la simulation. Il ne s'agit pas d'une analyse a posteriori, mais bien d'observer au cours du temps l'évolution des données observables.

De plus, observer un périphérique peut modifier son comportement, ces changements sont rarement perceptibles, mais suivant la précision du contrôle voulu, il peut être nécessaire de prendre en compte ces changements.

Pour offrir toutes ces possibilités, une organisation *Communication* (voir Figure 6.7) a été définie, cette organisation reprend les concepts utilisés en électronique que sont les capteurs et les actionneurs.

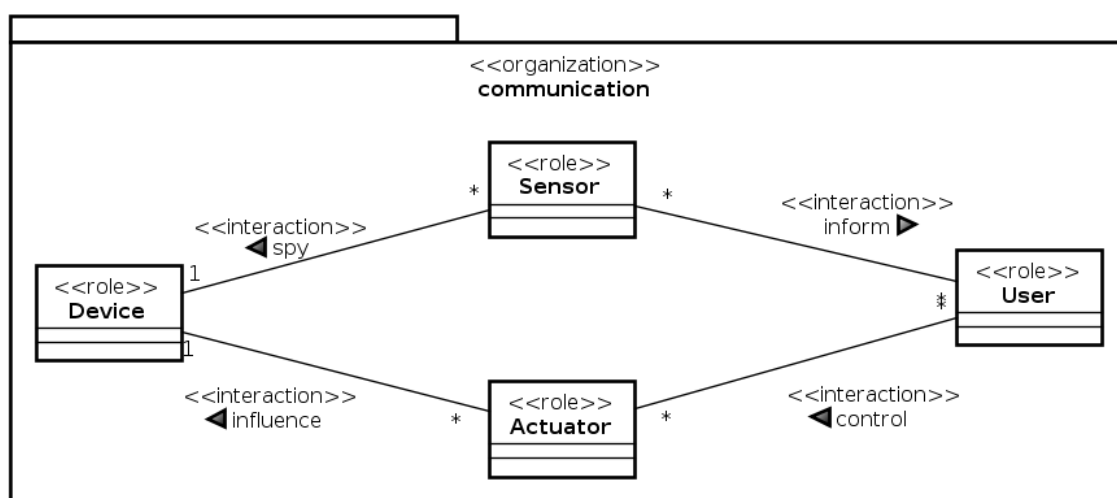


FIGURE 6.7 – Diagramme CRIO de l'organisation *communication*

Cette organisation est composée de quatre rôles :

- le rôle *Device* doit être joué par un agent dont le comportement peut être influencé ou dont les données internes sont observables de l'extérieur,
- le rôle *User* doit être joué par un agent modélisant une intelligence externe, ce rôle est l'entrée du simulateur pour les stratégies de contrôle,
- le rôle *Sensor* permet d'espionner les données internes d'un agent jouant le rôle *Device* pour les transmettre au rôle *User*,
- le rôle *Actuator* permet d'envoyer les influences du rôle *User* au rôle *Device*.

Prenons comme exemple une stratégie de contrôle qui veut changer la production d'énergie d'une pile à combustible pour correspondre à la consommation d'une maison. Pour ce faire, ce système mettant en place cette stratégie doit jouer deux rôles : *User* dans deux organisations *Communication* différentes. Le premier, pour observer la consommation de la maison via un capteur qui jouera le rôle de *Sensor*. Le second, pour influencer la production de la pile via un actionneur qui jouera le rôle d'*Actuator*. Chacun des deux périphériques jouera le rôle de *Device* dans l'organisation qui permet de communiquer avec lui.

## 6.5/ EXPÉRIMENTATIONS ET PREMIERS RÉSULTATS

### 6.5.1/ SCÉNARIO

La fiabilité de notre simulateur a été validée en comparant les résultats d'un scénario lancé sur celui-ci avec le même scénario développé avec SimPowerSystems.

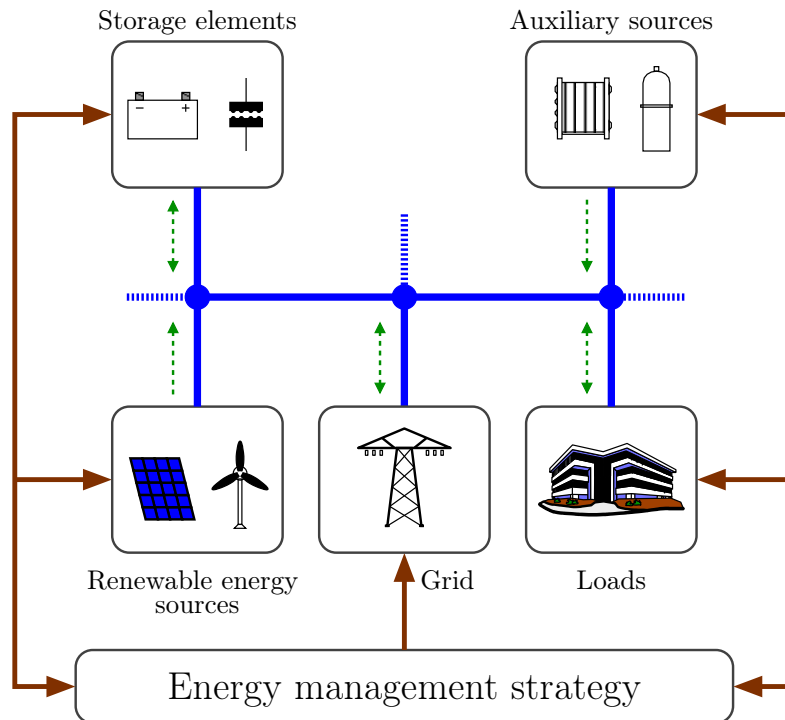


FIGURE 6.8 – Représentation schématique du *microgrid* utilisé pour la validation

Dans ce scénario, le *microgrid* est composé d'un bus DC (avec une capacité de  $20mF$ ), d'un ensemble de producteurs d'énergie renouvelable (panneaux photovoltaïques et éoliennes), d'une charge non contrôlable (d'une consommation équivalente à 50 maisons), d'un système de stockage rapide, un ensemble de supercondensateurs (de puissance  $P_{sc}$ , avec une dynamique de puissance de  $dP_{sc}/dt$ , et une capacité énergétique de  $E_{sc}$ , voir table 6.2), d'un système de stockage lent, un ensemble de batteries (de puissance  $P_{bat}$ , avec une dynamique de puissance de  $dP_{bat}/dt$ , et une capacité énergétique de  $E_{bat}$ , voir table 6.2). Enfin, ce *microgrid* est connecté au réseau principal considéré ici, avec une capacité énergétique et une dynamique infinies, pour permettre d'assurer la stabilité de ce micro-réseau. La durée du scénario a été fixée à deux jours.

La stratégie de contrôle développée pour vérifier l'utilisabilité du simulateur est très simple. L'objectif principal de celle-ci consiste uniquement à assurer la stabilité du système et donc d'assurer que la tension du Bus DC reste constante. Pour cela, le stockage lent est sollicité en priorité pour délivrer l'énergie nécessaire à

<b>Paramètres des stockages lents</b>
$P_{bat} = 300kW$ $dP_{bat}/dt = 2kW/s$ $E_{bat} = 2MWh = 5kAh$
<b>Paramètres des stockages rapides</b>
$P_{sc} = 600kW$ $dP_{sc}/dt = 10kW/s$ $E_{sc} = 100kWh = 250Ah$

TABLE 6.2 – Paramètres des systèmes de stockage

la stabilité du réseau. Si l'énergie nécessaire ne peut être atteinte, le stockage rapide tente de compenser. Enfin si la somme n'est toujours pas suffisante, le réseau principal fournit l'énergie manquante.

### 6.5.2/ RÉSULTATS

La figure 6.9 montre le résultat obtenu par notre simulateur et la figure 6.10 présente les résultats obtenus par l'outil SimPowerSystems. Dans les deux figures, le premier graphique présente l'intensité délivrée par les périphériques. Le second graphique présente les variations de tension du Bus DC. Enfin, le dernier graphique présente les états de charge des systèmes de stockage.

La comparaison de ces graphiques permet de mettre en évidence un comportement globalement équivalent entre nos périphériques et les périphériques développés à l'aide de l'outil SimPowerSystems. À tout instant de la simulation, la comparaison numérique (uniquement sur les périphériques contrôlables, les autres périphériques étant des entrées du système) entre les deux simulateurs montre que :

- pour les batteries, la moyenne des différences des intensités est de 0.24A, l'écart type est de 5.74A et le coefficient de corrélation entre les données est de 99,9%,
- pour les supercondensateurs, la moyenne des différences des intensités est de 0.29A, l'écart type est de 5.88A et le coefficient de corrélation entre les données est de 98,3%,
- pour le réseau principal, la moyenne des différences des intensités est de 0.30A, l'écart type est de 7.57A et le coefficient de corrélation entre les données est de 99,1%.

## 6.6/ CONCLUSION

Ce chapitre propose un simulateur capable de reproduire les comportements d'appareils électriques afin de tester des approches de contrôle intelligent

pour la gestion des *smart grids*. Ce simulateur est comparé à Matlab®/ Simulink® SimPowerSystems qui est, dans la communauté de l'énergie, un simulateur bien connu et largement utilisé. Les premiers résultats de cette expérience montrent que les sorties du simulateur présentées sont très proches de SimPowerSystems. Cependant, les architectures des deux simulateurs sont radicalement différentes. SimPowerSystems est basé sur une architecture centralisée. Tandis que notre simulateur est basé sur une architecture agent pure qui permet simplement de distribuer et d'ouvrir le système.

De plus, les principes présentés permettent de remplacer les périphériques simulés par des dispositifs réels sans changer la partie de contrôle du *smart grid*. En effet, l'un des objectifs de ce simulateur est de permettre le prototypage d'approches multi-agents dédiées à la gestion des *smart grids*. Le simulateur a été conçu selon une méthodologie multi-agents spécifique, ASPECS [Cossentino et al., 2010]. Cette méthodologie est basée sur les concepts organisationnels et est supportée par une plateforme de développement, nommée JANUS [Gaud et al., 2009], qui facilite la mise en œuvre des concepts de la méthodologie.

Ce nouveau simulateur est une première étape vers le développement d'une bibliothèque de dispositifs permettant de créer une grande variété de scénarii. L'idée est de permettre de tester des stratégies de gestion intelligentes pour les réseaux électriques. On peut ainsi tester plusieurs techniques sur un ensemble de critères pour l'apprentissage, ou simplement tester de nouvelles approches de contrôles dynamiques. Actuellement, le simulateur contient quelques implémentations d'appareils électriques et il permet de les connecter à des bus en courant continu.

À l'avenir, nous prévoyons d'évaluer différentes approches multi-agents pour les réseaux intelligents afin de mettre en évidence des approches efficaces. Ces systèmes seront testés dans le simulateur puis sur de véritables réseaux. Plus spécifiquement, l'approche détaillée dans le chapitre 5 sera testée. Enfin, la réalisation d'un bus en courant alternatif est prévue.

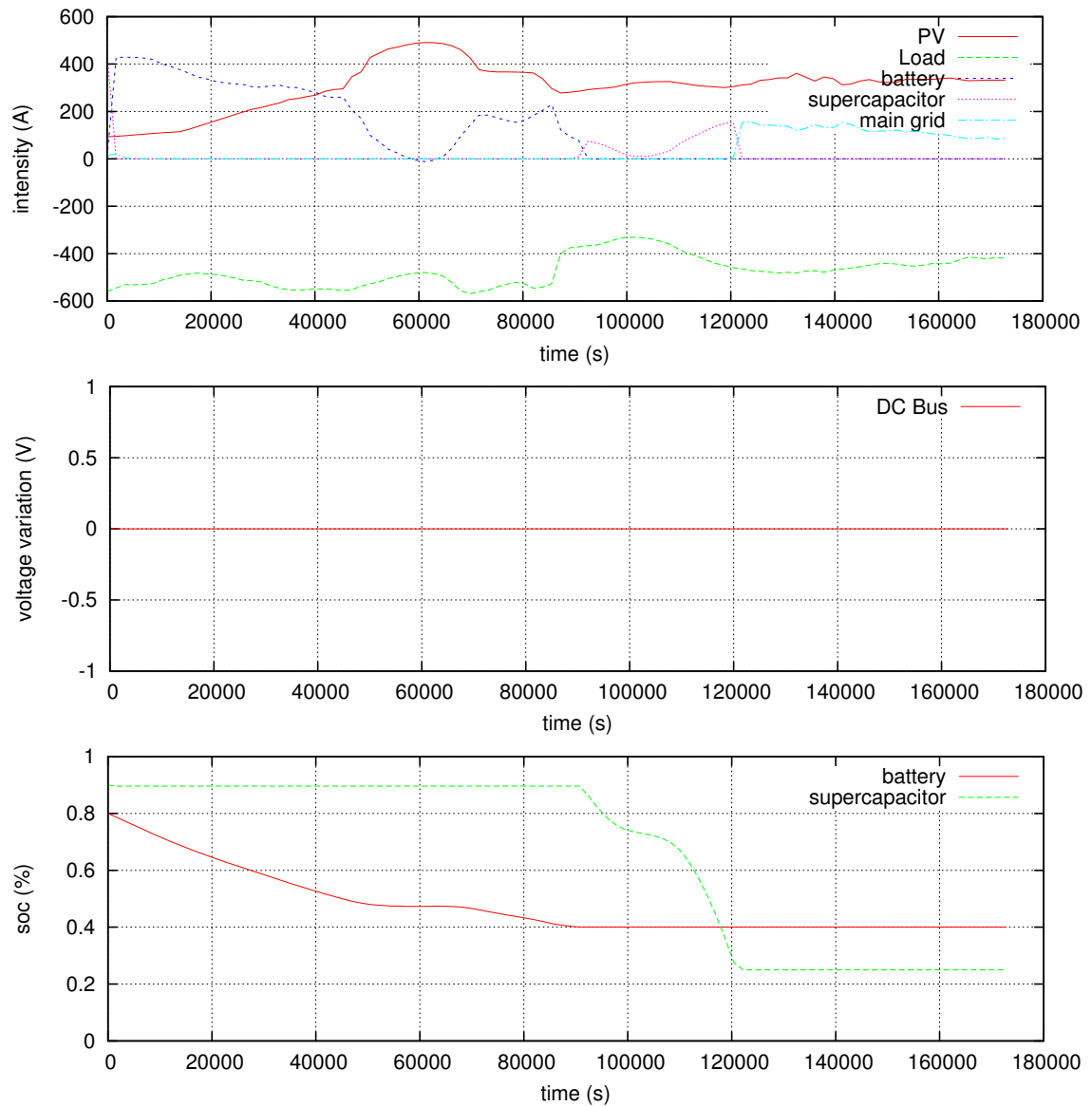


FIGURE 6.9 – Résultats (Intensité - Tension - États de charge) obtenus par le simulateur présenté dans ce chapitre



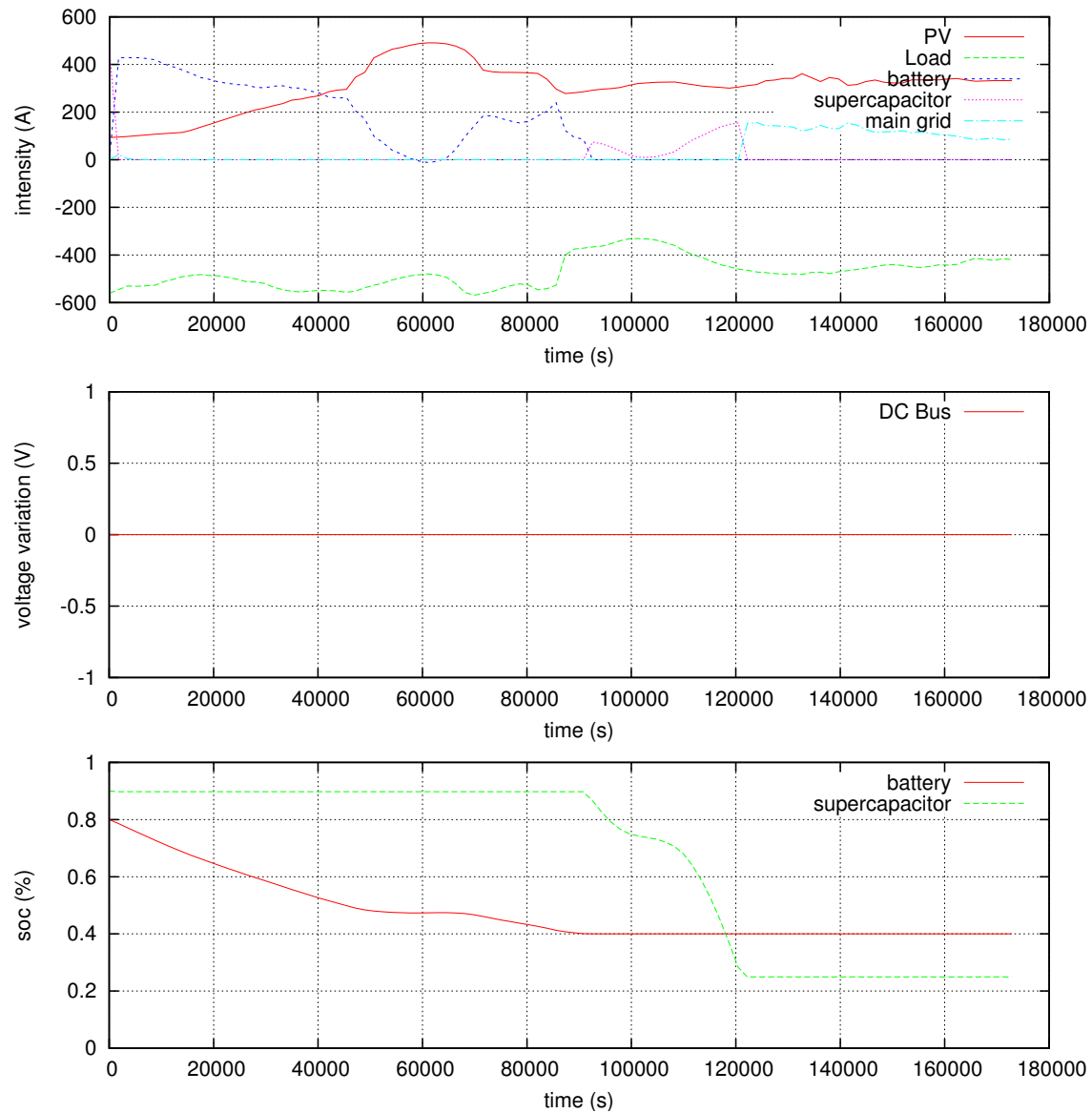


FIGURE 6.10 – Résultats (Intensité - Tension - États de charge) obtenus par le simulateur développé avec l'outil SimPowerSystems

## CONCLUSION

### 7.1/ BILAN DES TRAVAUX

Cette thèse a pour but de mettre en place une base méthodologique pour le développement de systèmes de contrôle distribués de réseaux électriques intelligents. Les problèmes posés par les réseaux impliquent de développer un modèle dynamique, modulaire, ouvert et réutilisable pour pouvoir modéliser la complexité de tels réseaux. Cette modélisation se retrouve dans deux parties :

- Le contrôle des réseaux électriques : de par la quantité importante des périphériques connectés aux réseaux, il est nécessaire de décomposer un réseau en un ensemble d'entités interagissant entre elles afin d'améliorer leurs comportements.
- La simulation des réseaux électriques : de par la complexité des réseaux, il est nécessaire de décomposer un réseau électrique en sous-réseaux afin de mieux prendre en compte les spécificités distribuées de ces réseaux.

Cette thèse commence par donner les définitions nécessaires à la compréhension des *smart grids* et des systèmes multi-agents qui sont un moyen reconnu pour contrôler les périphériques présents sur les réseaux électriques. Afin d'appréhender l'ensemble des travaux effectués sur les *smart grids*, nous avons mis en place un cadre d'évaluation des approches pour *smart grids*. Ce cadre a été développé pour positionner les approches les unes par rapport aux autres et ainsi comparer des approches à base d'agents. Les approches ont été classées selon deux critères : la dimension structurelle, qui représente l'infrastructure du réseau étudié, et la dimension du problème, qui définit les différentes classes de problèmes que doit résoudre un *smart grid*. L'évaluation est ensuite effectuée suivant quatre critères qui sont, l'impact environnemental du réseau, l'aspect économique du réseau, la qualité de service présente sur le réseau et enfin l'intégration de l'humain dans le réseau.

Suite à ce travail, nous nous sommes rendu compte qu'il n'existait pas encore de travaux prenant en compte l'ensemble des critères principaux des *smart grids*. Ceci est dû à la complexité des réseaux électriques, mais aussi à la variété des critères. Certains critères impliquent une modification globale du réseau tandis que d'autres ont un impact local.

Sur la base de ce principe, nous avons défini une approche mettant en œuvre des boucles de rétroaction. Une boucle de rétroaction apparaît dans les systèmes complexes qui peuvent être définis avec plusieurs niveaux d'abstraction. Au niveau micro, un ensemble d'agents possède des comportements qualifiés de micro-comportements ou micro-effets. Ces micro-comportements sont composés par le biais d'opérateurs de recombinaison (*Recombining factors*), afin de produire un ensemble d'influences sur l'état du système. Ces influences sont traitées au niveau macro et produisent par le biais d'un opérateur, dit de « nécessité », le nouvel état par modification de l'ancien et crée par là même les conditions propices à une boucle de rétroaction. Cette boucle de rétroaction permet de séparer les comportements des différentes entités du système sur plusieurs niveaux. Chaque niveau possède donc son propre comportement en interaction avec d'éventuels niveaux supérieurs et/ou inférieurs.

Cette approche a ensuite été utilisée pour définir un problème de gestion offre-demande sur un *microgrid*. Ce problème prend en compte l'ensemble des critères détaillés dans le cadre d'évaluation en utilisant deux niveaux. Le niveau macro prend en compte la qualité de service du réseau en contrôlant le prix de l'énergie afin d'influencer le comportement des agents présents sur le réseau. Ces agents du niveau micro doivent de leurs côtés modifier le comportement des périphériques auxquels ils sont connectés afin de maximiser leurs économies. Les deux critères, environnemental et humain, sont résolus par le choix des périphériques que l'on connectera au réseau. L'environnement est amélioré par la présence exclusive de producteurs d'énergie renouvelable. L'intégration de l'humain sur le réseau est offerte par la possibilité d'influencer la prise de décision.

Une application utilisant un système multi-agents apprenants est ensuite utilisée pour assurer à tout instant la stabilité sur un *microgrid* en utilisant des systèmes de stockage. Ce *microgrid* est basé sur un bus DC et est composé de sources d'énergie renouvelable (panneaux photovoltaïques, éoliennes, etc.), d'unités de stockage (supercondensateurs et batteries), un point d'accès au réseau principal et une charge représentant l'ensemble des appareils électriques consommateurs d'une habitation.

Afin de pouvoir tester les différentes approches permettant le contrôle de *smart grids*, il est nécessaire d'avoir un simulateur permettant le contrôle dynamique de ces périphériques ainsi qu'un retour d'information pour un observateur humain ou agent afin d'évaluer la totalité, ou une partie, de l'approche. Ce simulateur repose sur trois grands principes. Le premier est une modélisation à base d'agents du simulateur lui-même, pour représenter la complexité des réseaux électriques. Le second principe repose sur l'utilisation du paradigme holonique afin de prendre en compte les multiples niveaux inhérents aux réseaux électriques. Enfin, le troisième principe est inspiré du modèle influence/réaction et propose une technique qui permet de gérer les actions simultanées, éventuellement conflictuelles, au sein des simulations à base d'agents.

Certains des travaux exposés dans ce mémoire ne sont pas encore finalisés et plusieurs points devront être approfondis. La section suivante recense quelques-

unes des améliorations possibles qui pourront faire l'objet de futures recherches.

## 7.2/ PERSPECTIVES ET TRAVAUX FUTURS

Deux axes majeurs peuvent être distingués pour guider les extensions des travaux présentés dans cette thèse :

- L'axe « contrôle et gestion de réseaux électriques » consiste à exploiter le potentiel des systèmes multi-agents et des boucles de rétroaction pour résoudre les problèmes liés aux *microgrids*. Nous avons en effet défini, dans cette thèse, la formulation du problème d'équilibre offre-demande, mais actuellement nous n'avons pas proposé d'implémentation prenant en compte la complexité du problème dans son ensemble. L'objectif consiste à développer les différentes stratégies de contrôle puis les faire interagir entre elles afin d'obtenir un contrôle global d'un *microgrid*.
- L'axe « simulation de réseaux électriques » consiste à utiliser les systèmes multi-agents holoniques pour modéliser la complexité des réseaux électriques ainsi que la multitude de périphériques pouvant être connectés à ces réseaux. Le simulateur développé dans ce but possède un certain nombre de périphériques, mais l'enrichissement des modèles proposés et l'implémentation de nouveaux modèles est un point important dans le développement du simulateur. Le second point consiste à continuer la validation du simulateur et de ces modèles que ce soit par la comparaison avec d'autres simulateurs ou avec des systèmes réels.

### 7.2.1/ VERS UN CONTRÔLE MULTI-NIVEAUX DE RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

Une première approche pour gérer la stabilité du réseau en temps réel a été présentée. Le développement de systèmes de contrôle sur les systèmes de production et de consommation dans un *microgrid* est l'étape suivante dans la réalisation de l'approche.

Il existe actuellement plusieurs problèmes prenant en compte le prix de l'énergie dans le contrôle de la production d'énergie. Actuellement, le problème est défini pour inclure les producteurs d'énergies renouvelables associés à des systèmes de stockage. Celui-ci peut être étendu en prenant en compte les systèmes de productions décentralisés comme les piles à combustible. L'introduction de systèmes contrôlables implique de nouveaux problèmes qui sont définis sous le terme *Unit Commitment*. Ce problème possède déjà des solutions, mais le couplage avec des systèmes de production non contrôlables implique une nouvelle définition. Un premier point serait d'adapter les stratégies de contrôle existantes aux problèmes pour tester leur adaptation au problème multi-niveaux. Dans un second temps, une nouvelle stratégie de contrôle, utilisant les systèmes multi-agents apprenants, pourrait être développée afin de s'adapter au mieux au problème.

Le problème de la gestion de la consommation qui s'exprime actuellement sous les termes *Demand Side Management* ou *Demand Response* possède également des solutions. L'intégration du bien-être utilisateur dans la prise de décision automatique de décisions est actuellement peu traitée.

Les *smart buildings* sont de nouvelles habitations intelligentes adaptant leurs consommations aux utilisateurs afin de minimiser leurs factures sans nuire au bien-être de celui-ci. Ces habitations sont actuellement à l'étude. Il serait intéressant de reprendre les idées déployées dans ces *smart buildings* pour les adapter de manière plus large aux problématiques des *smart grids*. La communication entre les différents *smart buildings* est aussi un point qu'il serait intéressant de définir pour améliorer localement la consommation d'un *micro-grid*. Finalement, il serait intéressant de déployer sa propre intelligence en suivant le problème actuellement défini, tout comme l'intelligence déployée pour le système de production, un système multi-agents apprenant pourrait s'adapter au problème. De plus, l'utilisation d'un système holonique permettrait de gérer les interactions au niveau des *smart buildings*, mais également au niveau des périphériques qu'ils contiennent, une boucle de rétroaction pourrait être ici définie pour mettre en avant l'influence de la consommation d'un périphérique au niveau de plusieurs *smart buildings*.

### 7.2.2/ VERS UN SIMULATEUR CYBERPHYSIQUE DE RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

L'ensemble de ces nouvelles approches devra être testé de nombreuses fois sur des simulateurs afin d'être validé puis déployé sur des réseaux tests. L'utilisation d'un simulateur cyberphysique est une étape importante dans le déploiement de techniques d'intelligence artificielle sur les réseaux réels.

Pour cela, le développement d'un grand nombre de périphériques, comme, par exemple, l'ensemble de ceux pouvant se trouver dans une habitation, doit être développé. Cela permettra de simuler un nombre conséquent d'habitations différentes, y compris avec un nombre limité de périphériques réels. Pour simuler de manière exhaustive des réseaux électriques, il faudrait également définir des habitudes de vie représentant des types de comportements humains crédibles de consommations.

La prise en compte des interférences physiques, par exemple les pertes d'énergies sur un réseau, est aussi un point important à développer afin de reproduire le fonctionnement des périphériques de manière plus réaliste et cohérente.

Enfin, le développement de nouvelles lignes de distribution, par exemple celle en courant alternatif, est aussi un point crucial dans le développement du simulateur. Ceci afin de respecter l'existant et avoir des conditions proches du réel pour que les stratégies de contrôle puissent être testées le plus rigoureusement possible.

Le passage du virtuel au réel ne pourra se faire qu'à l'aide d'une communication formalisée. L'importance du respect des spécifications, comme les normes

IEEE/IEC sont un point important dans la réalisation d'un simulateur de *smart grids*, virtuel, réel ou cyberphysique.



# BIBLIOGRAPHIE

- [APE, 2000] (2000). Energy efficiency indicators, a study of energy efficiency indicators for industry in apec economies. Technical report, Asia Pacific Energy Research Centre, Institute of Energy Economics, Tokyo.
- [ERC, 2005] (2005). Performance incentive scheme. Technical report, Energy Regulatory Commission, Philippines.
- [515, 2009] (2009). IEEE recommended practice for monitoring electric power quality. *IEEE Std 1159-2009 (Revision of IEEE Std 1159-1995)*, pages c1 –81.
- [CEE, 2012] (2012). 5th CEER Benchmarking Report on the Quality of Electricity Supply 2011. Technical report, Council of European Energy Regulators (CEER).
- [Aabakken, 2006] Aabakken, J. (2006). *Power Technologies Energy Data Book*. U.S. Department of Energy.
- [ADEME, 1999] ADEME (1999). *Energy Efficiency Indicators : The European Experience*. ADEME Editions, Paris.
- [Akkermans et al., 1996] Akkermans, J., Ygge, F., and R., G. (1996). Homebots : Intelligent decentralized services for energy management. In *Fourth International Symposium on the Management of Industrial and Corporate Knowledge, ISMICK '96, Rotterdam*, pages 128–142. Ergon Verlag.
- [Alam et al., 2011] Alam, M., Rogers, A., and Ramchurn, S. (2011). A negotiation protocol for multiple interdependent issues negotiation over energy exchange. *IJCAI Workshop on AI for an Intelligent Planet, Barcelona*.
- [Albus, 1975] Albus, J. (1975). A new approach to manipulator control : The cerebellar articulation model controller (cmac). *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 97(3).
- [Amin, 2001] Amin, M. (2001). Towards self-healing energy infrastructure systems. *IEEE Computer Applications in Power*, 14 :20–28.
- [Asmus, 2010] Asmus, P. (2010). Microgrids, virtual power plants and our distributed energy future. *The Electricity Journal*, 23(10) :72 – 82.
- [Basso et al., 2013] Basso, G., Gaud, N., Gechter, F., Hilaire, V., and Lauri, F. (2013). A framework for qualifying and evaluating smart grids approaches : Focus on multi-agent technologies. *Smart Grid and Renewable Energy*, 4(4).
- [Becker, 1978] Becker, L. (1978). Joint effect of feedback and goal setting on performance : A field study of residential energy conservation. *Journal of Applied Psychology*, 63(4).



- [Beurier et al., 2003] Beurier, G., Simonin, O., and Ferber, J. (2003). Un modèle de système multi-agent pour l'émergence multi-niveau. *Technique et Science Informatiques*, 22(4) :235–247.
- [Bossart and Bean, 2011] Bossart, S. and Bean, J. (2011). Metrics and benefits analysis and challenges for smart grid field projects. In *Energytech, 2011 IEEE*, pages 1 –5.
- [Brun et al., 2009] Brun, Y., di Marzo Serugendo, G., Gacek, C., Giese, H., Kienle, H. M., Litoiu, M., Muller, H. A., Pezze, P., and Shaw, M. (2009). *Engineering self-adaptive systems through feedback loops*. Lecture Notes in Computer Science. Springer.
- [Brussel et al., 1998] Brussel, H. V., Wyns, J., Valckenaers, P., Bongaerts, L., and Peeters, P. (1998). Reference architecture for holonic manufacturing systems : Prosa. *Computers in Industry*, 37 :255–274.
- [Buşoniu et al., 2008a] Buşoniu, L., Babuška, R., and De Schutter, B. (2008a). A comprehensive survey of multiagent reinforcement learning. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C : Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, 38(2) :156–172.
- [Buşoniu et al., 2008b] Buşoniu, L., Babuška, R., and De Schutter, B. (2008b). Multi-agent reinforcement learning : An overview. In Srinivasan, D. and Jain, L., editors, *Innovations in Multi-Agent Systems and Applications – 1*, volume 310 of *Studies in Computational Intelligence*, chapter 7, pages 183–221. Springer, Berlin, Germany.
- [Buşoniu et al., 2010] Buşoniu, L., Babuška, R., De Schutter, B., and Ernst, D. (2010). *Reinforcement Learning and Dynamic Programming Using Function Approximators*. CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, USA, 1st edition.
- [Caprarescu and Petcu, 2009] Caprarescu, B. and Petcu, D. (2009). A self-organizing feedback loop for autonomic computing. In *Future Computing, Service Computation, Cognitive, Adaptive, Content, Patterns, 2009. COMPUTATIONWORLD '09. Computation World* :, pages 126–131.
- [Carvallo and Cooper, 2011] Carvallo, A. and Cooper, J. (2011). *The advanced smart grid : Edge power driving sustainability*. Artech House.
- [Chalkiadakis et al., 2011] Chalkiadakis, G., Robu, V., Kota, R., Rogers, A., and Jennings, N. (2011). Cooperatives of distributed energy resources for efficient virtual power plants. *10th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS), Taipei, Taiwan*, pages 787–794.
- [Chassin et al., 2008] Chassin, D., Schneider, K., and Gerkenmeyer, C. (2008). Gridlab-d : An open-source power systems modeling and simulation environment. In *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. T&D. IEEE/PES*, pages 1 –5.
- [Clement-Nyns et al., 2010] Clement-Nyns, K., Haesen, E., and Driesen, J. (2010). The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 25(1) :371–380.

- [Clement-Nyns et al., 2011] Clement-Nyns, K., Haesen, E., and Driesen, J. (2011). The impact of vehicle-to-grid on the distribution grid. *Electric Power Systems Research*, 81(1) :185 – 192.
- [Colet-Subirachs et al., 2010] Colet-Subirachs, A., Ruiz-Alvarez, A., Gomis-Bellmunt, O., Alvarez-Cuevas-Figuerola, F., and Sudria-Andreu, A. (2010). Control of a utility connected microgrid. In *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010 IEEE PES*, pages 1 –7.
- [Coll-Mayor et al., 2007] Coll-Mayor, D., Paget, M., and Lightner, E. (2007). Future intelligent power grids : Analysis of the vision in the european union and the united states. *Energy Policy*, 35(4) :2453 – 2465.
- [Cornuéjols and Miclet, 2010] Cornuéjols, A. and Miclet, L. (2010). *Apprentissage artificiel – Concepts et algorithmes*. Eyrolles.
- [Cossentino et al., 2007] Cossentino, M., Gaud, N., Galland, S., Hilaire, V., and Koukam, A. (2007). A holonic metamodel for agent-oriented analysis and design. In *HoloMAS*, pages 237–246.
- [Cossentino et al., 2010] Cossentino, M., Gaud, N., Hilaire, V., Galland, S., and Koukam, A. (2010). ASPECS : an agent-oriented software process for engineering complex systems - how to design agent societies under a holonic perspective. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 2(2) :260–304.
- [Cossentino et al., 2013] Cossentino, M., Hilaire, V., Molesini, A., and Seidita, V., editors (2013). *The ASPECS process*, chapter 4, pages 216–236. Springer, 1 edition.
- [Dorigo and Birattari, 2007] Dorigo, M. and Birattari, M. (2007). Swarm intelligence. *Scholarpedia*, 2(9) :1462.
- [Dugan, 2009] Dugan, R. (2009). Open source software for simulating active distribution systems. *Active Distribution Management Tutorial*.
- [Farhangi, 2010] Farhangi, H. (2010). The path of the smart grid. *Power and Energy Magazine, IEEE*, 8(1) :18 –28.
- [Faruqui et al., 2009] Faruqui, A., Sergici, S., and Sharif, A. (2009). The impact of informational feedback on energy consumption : A survey of the experimental evidence. *Energy*.
- [Ferber, 1995] Ferber, J. (1995). *LES SYSTÈMES MULTI-AGENTS Vers une intelligence collective*. IIA. InterEditions.
- [Ferber and Müller, 1996] Ferber, J. and Müller, J.-P. (1996). Influences and reaction : a model of situated multiagent systems. In *ICMAS'96*.
- [FIPA, 2001] FIPA (2001). Fipa rdf content language specification. Technical Report XC00011B.
- [Fujimoto, 2003] Fujimoto, R. M. (2003). Parallel simulation : distributed simulation systems. In *Winter Simulation Conference*, pages 124–134.
- [Gaud, 2007] Gaud, N. (2007). *Holonic Multi-Agent Systems : From the analysis to the implementation. Metamodel, Methodology and Multilevel simulation*. PhD thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Belfort, France.

- [Gaud et al., 2008] Gaud, N., Galland, S., Gechter, F., Hilaire, V., and Koukam, A. (2008). Holonic multilevel simulation of complex systems : Application to real-time pedestrians simulation in virtual urban environment. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 16(10) :1659–1676.
- [Gaud et al., 2009] Gaud, N., Galland, S., Hilaire, V., and Koukam, A. (2009). An organisational platform for holonic and multiagent systems. In Hindriks, K., Pokahr, A., and Sardina, S., editors, *Programming Multi-Agent Systems*, volume 5442 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 104–119. Springer Berlin / Heidelberg.
- [Gellings and Chamberlin, 2008] Gellings, C. and Chamberlin, J. (2008). *Demand-side management : Concepts and methods*.
- [général du débat national sur la transition énergétique, 2013] général du débat national sur la transition énergétique, S. (2013). Circulaire du 30 janvier 2013 sur l'organisation du débat national de la transition énergétique.
- [Gerber et al., 1999] Gerber, C., Siekmann, J., and Vierke, G. (1999). Holonic multi-agent systems. Research Report RR-99-03, DFKI.
- [Gerding et al., 2011] Gerding, E., Robu, V., Stein, S., Parkes, D., Rogers, A., and Jennings, N. (2011). Online mechanism design for electric vehicle charging. *10th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS), Taipei, Taiwan*, pages 811–818.
- [Giordano and Bossart, 2012] Giordano, V. and Bossart, S. (2012). Assessing smart grid benefits and impacts :eu and u.s. initiatives. Technical report, European Commission, Joint Research Centre (JRC), Institute for Energy and Transport and US Department of Energy-DOE, Office of Electricity and Energy Reliability.
- [Giordano et al., 2012] Giordano, V., Onyeji, I., Fulli, G., Jiménez, M. S., and Filiou, C. (2012). Guidelines for conducting cost-benefit analysis of smart grid projects. JRC Reference Reports, European Commission.
- [Guarino, 1998] Guarino, N. (1998). Formal ontology and information systems. In Guarino, N., editor, *Formal Ontology in Information Systems (FOIS)*, pages 3–18. IOS Press, Amsterdam.
- [Hassan and Radman, 2010] Hassan, R. and Radman, G. (2010). Survey on smart grid. In *IEEE SoutheastCon 2010 (SoutheastCon), Proceedings of the*, pages 210–213.
- [Helleboogh et al., 2005] Helleboogh, A., Holvoet, T., Weyns, D., and Berbers, Y. (2005). Extending time management support for multi-agent systems. In Davidsson, P., Logan, B., and Takadama, K., editors, *Multi-Agent and Multi-Agent-Based Simulation*, volume 3415 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 37–48. Springer Berlin / Heidelberg.
- [Herter et al., 2011] Herter, K., O'Connor, T., and Navarro, L. (2011). A systematic approach for assessing plans to benefit customers and the environment. Technical report, Herter Energy Research Solutions, Environmental Defense Fund.

- [Hilaire et al., 2012] Hilaire, V., Cossentino, M., Gechter, F., Rodriguez, S., and Koukam, A. (2012). An approach for the integration of swarm intelligence in mas : an engineering perspective. *Expert Systems with Applications*, (0).
- [Houghton and Intergovernmental Panel on Climate Change, 1996] Houghton, J. and Intergovernmental Panel on Climate Change (1996). *Climate change 1995 : the science of climate change*. Climate change 1995 / [Intergovernmental Panel on Climate Change]. Cambridge University Press.
- [(IEA), 2011] (IEA), I. E. A. (2011). *CO2 emissions from fuel combustion*. OECD / IEA, Paris. Available online.
- [Informatik et al., 2000] Informatik, I. F., naturwissenschaftlichen Fakultät, M., inf, H. D., and Br, S. A. (2000). Return from the ant - synthetic ecosystems for manufacturing control.
- [Isern et al., 2011] Isern, D., Sánchez, D., and Moreno, A. (2011). Organizational structures supported by agent-oriented methodologies. *The Journal of Systems and Software*, 84(2) :169–184.
- [James et al., 2006] James, G., Cohen, D., Dodier, R., Platt, G., and Palmer, D. (2006). A deployed multi-agent framework for distributed energy applications. In *Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems, AAMAS '06*, pages 676–678, New York, NY, USA. ACM.
- [Johnson, 2009] Johnson, P. M. (2009). Human centered information integration for the smart grid. Technical Report CSDL-09-15, Collaborative Software Development Laboratory, University of Hawaii at Manoa.
- [Keirstead and van Dam, 2010] Keirstead, J. and van Dam, K. H. (2010). A comparison of two ontologies for agent-based modelling of energy systems. In *Proceedings of the First Int. Workshop on Agent Technologies for Energy Systems (ATES 2010)*, pages 21–28.
- [Koestler, 1967] Koestler, A. (1967). *The Ghost in the Machine*. Hutchinson.
- [Kok et al., 2010] Kok, J. K., Scheepers, M. J. J., and Kamphuis, I. G. (2010). Intelligence in electricity networks for embedding renewables and distributed generation. In Negenborn, R. R., Lukszo, Z., and Hellendoorn, H., editors, *Intelligent Infrastructures*, volume 42 of *Intelligent Systems, Control and Automation : Science and Engineering*, pages 179–209. Springer Netherlands.
- [Lasseter and Paigi, 2004] Lasseter, R. and Paigi, P. (2004). Microgrid : a conceptual solution. In *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*, volume 6, pages 4285 – 4290 Vol.6.
- [Lee, 2009] Lee, S. (2009). Vision for a holistic power supply and delivery chain. Technical Report 1018587, Electric Power Research Institute, EPRI.
- [Logenthiran et al., 2010] Logenthiran, T., Srinivasan, D., Khambadkone, A., and Aung, H. (2010). Multi-agent system (mas) for short-term generation scheduling of a microgrid. In *Sustainable Energy Technologies (ICSET), 2010 IEEE International Conference on*, pages 1 –6.

- [Logenthiran et al., 2012] Logenthiran, T., Srinivasan, D., Khambadkone, A. M., and Aung, H. N. (2012). Multiagent system for real-time operation of a microgrid in real-time digital simulator. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, PP(99) :1 –9.
- [McArthur et al., 2007a] McArthur, S., Davidson, E., Catterson, V., Dimeas, A., Hatzigiargyriou, N., Ponci, F., and Funabashi, T. (2007a). Multi-agent systems for power engineering applications - part i : Concepts, approaches, and technical challenges. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 22(4) :1743 –1752.
- [McArthur et al., 2007b] McArthur, S., Davidson, E., Catterson, V., Dimeas, A., Hatzigiargyriou, N., Ponci, F., and Funabashi, T. (2007b). Multi-agent systems for power engineering applications - part ii : Technologies, standards, and tools for building multi-agent systems. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 22(4) :1753 –1759.
- [Mella, 2008] Mella, P. (2008). Observing collectivities. the combinatory systems approach in social sciences. *The International Journal of Interdisciplinary Social Sciences*, 3 :213–223.
- [Michel, 2004] Michel, F. (2004). *Formalisme, outils et éléments méthodologiques pour la modélisation et la simulation multi-agents*. PhD thesis, Université Montpellier II.
- [Michel, 2007] Michel, F. (2007). Le modèle irm4s. de l'utilisation des notons d'influences et de réaction pour la simulation de systèmes multi-agents. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 21(5-6) :757–779.
- [Miller et al., 2012] Miller, S., Ramchurn, S. D., and Rogers, A. (2012). Optimal decentralised dispatch of embedded generation in the smart grid. *11th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS)*.
- [Momoh, 2012] Momoh, J. (2012). *Smart grid : fundamentals of design and analysis*. IEEE Press Series on Power Engineering.
- [Moreira et al., 2007] Moreira, C. L., Resende, F. O., and Lopes, J. A. P. (2007). Using low voltage microgrids for service restoration. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 22(1) :395 –403.
- [Negeri and Baken, 2012] Negeri, E. and Baken, N. (2012). Architecting the smart grid as a holarchy. In *SMARTGREENS'12*, pages 73–78.
- [Negeri et al., 2013] Negeri, E., Baken, N., and Popov, M. (2013). Holonic architecture of the smart grid. *Smart Grid and Renewable Energy*, 4.
- [Nwana et al., 1999] Nwana, H. S., Ndumu, D. T., Lee, L. C., and Collis, J. C. (1999). Zeus : A toolkit for building distributed multiagent systems. *Applied Artificial Intelligence*, 13(1-2) :129–185.
- [Padhy, 2004] Padhy, N. (2004). Unit commitment-a bibliographical survey. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 19(2) :1196 – 1205.
- [Panait and Luke, 2005] Panait, L. and Luke, S. (2005). Cooperative multi-agent learning : The state of the art. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 11(3) :387–434.

- [parlement européen, 2009] parlement européen, L. (2009). Objectif "zéro énergie" pour tous les bâtiments construits à partir de 2019. Technical report, Committee on Industry, Research and Energy.
- [Pipattanasomporn et al., 2009] Pipattanasomporn, M., Feroze, H., and Rahman, S. (2009). Multi-agent systems in a distributed smart grid : Design and implementation. In *Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE '09. IEEE/PES*, pages 1–8.
- [Pullins, 2009] Pullins, S. (2009). West Virginia Smart Grid Implementation Plan. Technical Report DOE/NETL-2009/1386, West Virginia Division of Energy, National Energy Technology Laboratory, U.S. Department of Energy.
- [Ramchurn et al., 2011a] Ramchurn, S., Vytelingum, P., Rogers, A., and Jennings, N. (2011a). Agent-based control for decentralised demand side management in the smart grid. *The Tenth International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2011), Taipei, Taiwan*, pages 5–12.
- [Ramchurn et al., 2011b] Ramchurn, S., Vytelingum, P., Rogers, A., and Jennings, N. (2011b). Agent-based homeostatic control for green energy in the smart grid. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 5.
- [Ramchurn et al., 2011c] Ramchurn, S., Vytelingum, P., Rogers, A., and Jennings, N. (2011c). Putting the "smarts" into the smart grid : A grand challenge for artificial intelligence. *Communications of the ACM*.
- [Robu et al., 2011] Robu, V., Stein, S., Gerding, E., Parkes, D., Rogers, A., and Jennings, N. (2011). An online mechanism for multi-speed electric vehicle charging. *Second International Conference on Auctions, Market Mechanisms and Their Applications (AMMA), New York, USA*.
- [Robu et al., 2010] Robu, V., Vetsikas, I., Gerding, E., and Jennings, N. (2010). Addressing the exposure problem of bidding agents using flexibly priced options. *19th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI), Lisbon, Portugal*, pages 581–586.
- [Rodriguez, 2005] Rodriguez, S. A. (2005). *From analysis to design of holonic multi-agent systems : A framework, methodological guidelines and applications*. PhD thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard and Université de Franche-Comté.
- [Rogers et al., 2011] Rogers, A., Maleki, S., Ghosh, S., and Jennings, N. R. (2011). Adaptive home heating control through gaussian process prediction and mathematical programming. *Second International Workshop on Agent Technology for Energy Systems (ATES 2011), Taipei, Taiwan*, pages 71–78.
- [Rose et al., 2011] Rose, H., Rogers, A., and Gerding, E. H. (2011). Mechanism design for aggregated demand prediction in the smart grid. *AAAI Workshop on Artificial Intelligence and Smarter Living : The Conquest of Complexity, San Francisco*.
- [Rose et al., 2012] Rose, H., Rogers, A., and Gerding, E. H. (2012). A scoring rule-based mechanism for aggregate demand prediction in the smart grid. *The 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2012), Valencia, Spain*.

- [Ruiz-Alvarez et al., 2012] Ruiz-Alvarez, A., Colet-Subirachs, A., Alvarez-Cuevas Figuerola, F., Gomis-Bellmunt, O., and Sudria-Andreu, A. (2012). Operation of a utility connected microgrid using an iec 61850-based multi-level management system. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, PP(99) :1 –8.
- [Russell et al., 1995] Russell, S. J., Norvig, P., Canny, J. F., Malik, J. M., and Edwards, D. D. (1995). *Artificial intelligence : a modern approach*, volume 74. Prentice hall Englewood Cliffs.
- [Salam, 2007] Salam, S. (2007). Unit commitment solution methods. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, (35).
- [Schmickl et al., 2011] Schmickl, T., Stradner, J., Hamann, H., Winkler, L., and Crailsheim, K. (2011). Major feedback loops supporting artificial evolution in multi-modular robotics. In Doncieux, S., Bredèche, N., and Mouret, J.-B., editors, *New Horizons in Evolutionary Robotics*, volume 341 of *Studies in Computational Intelligence*, pages 195–209. Springer Berlin Heidelberg.
- [Schneider et al., 2008] Schneider, K. P., Chen, Y., Chassin, D. P., Pratt, R. G., Engel, D. W., and Thompson, S. (2008). *Modern grid initiative : Distribution taxonomy final report*. Pacific Northwest National Laboratory.
- [Simon, 1996] Simon, H. A. (1996). *The Science of Artificial*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 3rd edition.
- [Sommerville, 2004] Sommerville, I. (2004). *Software Engineering*. International Computer Science Series. Addison Wesley, Pearson Education, seventh edition.
- [Staats et al., 2004] Staats, H., Harland, P., and Wilke, H. (2004). Effecting durable change : A team approach to improve environmental behavior in the household. *Environment and Behavior*.
- [Stein et al., 2012] Stein, S., Gerding, E., Robu, V., and Jennings, N. (2012). A model-based online mechanism with pre-commitment and its application to electric vehicle charging. *11th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS), Valencia, Spain*.
- [Sullivan and Schellenberg, 2011] Sullivan, M. and Schellenberg, J. (2011). Smart grid economics : The cost-benefit analysis. *Renew Grid*.
- [Sutton and Barto, 1998] Sutton, R. and Barto, A. (1998). *Reinforcement Learning : An Introduction*. The MIT Press.
- [Team, 2011] Team, S. (2011). Smart grid maturity model. Technical Report CMU/SEI-2011-TR-025.
- [US Department of Energy, 2006] US Department of Energy (2006). Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them. *Report to the United States Congress*.
- [van Dam and Lukszo, 2006] van Dam, K. and Lukszo, Z. (2006). Modelling energy and transport infrastructures as a multi-agent system using a generic ontology. In *Systems, Man and Cybernetics, 2006. SMC '06. IEEE International Conference on*, volume 1, pages 890–895.

- [van Dam, 2009] van Dam, K. H. (2009). *Capturing socio-technical systems with agent-based modelling*. PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands.
- [Van Houwelingen and van Raaij. T., 1989] Van Houwelingen, J. H. and van Raaij. T., W. F. (1989). The effect of goal-setting and daily electronic feedback on in-home energy use. *The Journal of Consumer Research*, 16(1).
- [Vasiljevska et al., 2013] Vasiljevska, J., Lopes, J. P., and Matos, M. (2013). Integrated micro-generation, load and energy storage control functionality under the multi micro-grid concept. *Electric Power Systems Research*, 95(0) :292 – 301.
- [Voice et al., 2011] Voice, T., Vytelingum, P., Ramchurn, S., Rogers, A., and Jennings, N. (2011). Decentralised control of micro-storage in the smart grid. *AAAI-11 : Twenty-Fifth Conference on Artificial Intelligence, San Francisco, USA*, pages 1421–1426.
- [Voolink and Meertens, 1999] Voolink, T. and Meertens, R. (1999). The effectiveness of electronic feedback on energy and hot water use by householders. Technical report, Maastricht University.
- [Vytelingum et al., 2010a] Vytelingum, P., Ramchurn, S. D., Voice, T. D., Rogers, A., and Jennings, N. R. (2010a). Trading agents for the smart electricity grid. *The Ninth International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS), Toronto, Canada*, pages 897–904.
- [Vytelingum et al., 2010b] Vytelingum, P., Voice, T., Ramchurn, S., Rogers, A., and Jennings, N. (2010b). Agent-based micro-storage management for the smart grid. In *AAMAS*, pages 39–46.
- [Wakefield, 2010] Wakefield, M. (2010). Methodological approach for estimating the benefits and costs of smart grid demonstration projects. Technical report, Electric Power Research Institute (EPRI).
- [Weiss, 1999] Weiss, G. (1999). *Multiagent Systems : A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. The MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- [Weisser, 2007] Weisser, D. (2007). A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. *Energy*, 32(9) :1543 – 1559.
- [Wolf and Holvoet, 2007] Wolf, T. D. and Holvoet, T. (2007). Designing self-organising emergent systems based on information flows and feedback-loops. In *SASO*, pages 295–298. IEEE Computer Society.
- [Wooldridge and Jennings, 1995] Wooldridge, M. and Jennings, N. R. (1995). Intelligent agents : theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*, 10(02) :115–152.
- [Ygge et al., 1996] Ygge, F., Gustavsson, R., and Akkermans, H. (1996). Homebots : Intelligent agents for decentralized load management. *DA/DSM 96 Europe Distribution Automation & Demand Side Management Vienna, Austria,,* (8-10).



- [Yokoyama et al., 2008] Yokoyama, R., Niimura, T., and Saito, N. (2008). Modeling and evaluation of supply reliability of microgrids including pv and wind power. In *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, pages 1 –5.

# TABLE DES FIGURES

2.1	Évolution de la consommation mondiale (Source : <a href="http://www.eia.gov">http://www.eia.gov</a> )	10
4.1	Les automates combinatoires (extrait de [Mella, 2008])	47
4.2	Exemple de la structure holonique d'une université (tiré de [Gaud, 2007])	49
4.3	Phases et activités d'ASPECS	51
4.4	Concepts nécessaires pour une boucle de rétroaction	56
4.5	Exemple d'ontologie de domaine	56
4.6	Squelette d'organisations	57
4.7	La structure organisationnelle exemplifiée	58
4.8	Scénario de base	59
5.1	Estimation de la production d'énergie éolienne française en 2012	62
5.2	Composants habituels d'un <i>microgrid</i>	63
5.3	Ontologie du problème de gestion offre-demande dans un <i>microgrid</i>	65
5.4	Organisations gérant le problème de <i>microgrid</i>	66
5.5	Ontologie de solution de la gestion de la production	69
5.6	Ontologie de solution de la gestion de la consommation	71
5.7	Exemple d'une représentation d'un <i>microgrid</i> intégrant les <i>smart buildings</i>	72
5.8	Ontologie de solution de la gestion de la stabilité	74
5.9	Exemple d'une représentation de contrôle de la stabilité d'un <i>microgrid</i>	75
5.10	Ordonnancement des actions de 2 agents. Les cercles pleins représentent les actions du réseau principal, les cercles vides les actions des unités de stockage (batteries et supercondensateurs). Un cycle consiste en une séquence d'actions qui se terminent lorsque chaque appareil contrôlable a pris sa décision.	78
5.11	Stratégies apprises par une batterie.	83
5.12	Stratégies apprises par un supercondensateur.	84

5.13	Stratégies apprises par deux batteries. . . . .	85
5.14	Stratégies apprises par deux supercondensateurs. . . . .	86
5.15	Stratégies apprises par une batterie et un supercondensateur. . .	87
5.16	Stratégies apprises par deux batteries et deux supercondensateurs.	88
6.1	Exemple d'une représentation holonique d'un réseau électrique . .	97
6.2	Ontologie d'un réseau électrique . . . . .	99
6.3	Les différents aspects de la simulation multi-niveaux présentés dans [Gaud et al., 2008] . . . . .	100
6.4	Diagramme CRIO de l'organisation <i>microgrid</i> . . . . .	101
6.5	Diagramme CRIO de l'aspect multi-niveau . . . . .	103
6.6	Diagramme de séquence pour l'échange d'énergie . . . . .	104
6.7	Diagramme CRIO de l'organisation <i>communication</i> . . . . .	105
6.8	Représentation schématique du <i>microgrid</i> utilisé pour la validation	106
6.9	Résultats (Intensité - Tension - États de charge) obtenus par le simulateur présenté dans ce chapitre . . . . .	109
6.10	Résultats (Intensité - Tension - États de charge) obtenus par le simulateur développé avec l'outil SimPowerSystems . . . . .	110

# LISTE DES TABLES

2.1	Comparaison des réseaux classiques et des <i>smart grids</i> (inspiré de [Schneider et al., 2008]) . . . . .	13
2.2	Classification des SMA par type d'interactions et degré de conscience des agents [Buşoniu et al., 2008b] . . . . .	18
3.1	Questions pour l'analyse d'une approche <i>smart grid</i> . . . . .	26
3.2	Évaluation de GridAgent™ . . . . .	33
3.3	Évaluation d'HOMEBOTS . . . . .	34
3.4	Évaluation d'IDAPS . . . . .	36
3.5	Évaluation d'IDEAS PROJECT : <i>Demand-Side Management</i> . . . . .	38
3.6	Évaluation d'IDEAS PROJECT : <i>Virtual Power Plants</i> . . . . .	39
3.7	Évaluation de PowerMatcher . . . . .	40
5.1	Paramètres de l'algorithme . . . . .	81
5.2	Paramètres du <i>microgrid</i> . . . . .	81
5.3	Résultats. Les intervalles de confiance à 95% sont listés entre parenthèses. . . . .	82
6.1	Mise en parallèle entre les propriétés d'un agent et celles d'une entité d'un réseau . . . . .	95
6.2	Paramètres des systèmes de stockage . . . . .	107



# ABSTRACT

Energy management is, nowadays, a subject of uttermost importance. Indeed, we are facing growing concerns such as petroleum reserve depletion, earth global warming or power quality (e.g. avoiding blackouts during peak times). Smart grids is an attempt to solve such problems, by adding to power grids bidirectional communications and ICT capabilities in order to provide an intelligent autonomic management for the grid.

This thesis focuses on the management of microgrids thanks to multiagent systems (MAS). Microgrids are low-power networks, composed of small and decentralized energy producers (possibly renewable) and consumers. These networks can be connected to the main grid or islanded, this make them more complex. Due to their complexity and their geographical distribution, smart grids and microgrids can not be easily managed by a centralized system. Distributed artificial intelligences especially MAS appear to be a solution to resolve problems related to smart grids.

Firstly we defined an approach implementing feedback loops. These feedback loops exist in complex systems which can be defined with several abstraction levels. Two levels are interacting. The micro-level contains a set of agents owning behaviours that can be combined. The result of the combination impact the state of the system. The macro-level processes these influences to define a new state of the system which will impact the agents behaviours at the micro-level. This feedback loop separates behaviours on several levels. This approach is used to defined a demand and supply matching problem in microgrid. This problem afford to manage a set of goals which currently are independently processed. Finally, an application is developed using MAS that ensures grid stability thanks to storage systems. This application was thought to be integrated to the approach detailed above.

Secondly, a grid simulator is developed. This simulator allows dynamic control of devices. It is based on three main principles.

- An agent-based model of the simulator to represent the complexity of electrical networks.
- The use of the holonic paradigm to take into account the multiple levels inherent to power grids.
- The use of the influence/reaction model and offers a technology that can manage simultaneous actions, possibly conflicting, in MAS.

**Keywords** smart grid, microgrid, multiagent system, simulation, feedback loop, reinforcement learning







## Résumé :

La gestion d'énergie est un sujet de plus en plus important dans notre société. Nous faisons actuellement face à un nombre croissant de problèmes tels que l'épuisement des réserves pétrolières, le réchauffement climatique ou encore la diminution de la qualité de l'énergie (principalement due aux coupures pendant les pics de consommation). Les *smart grids* sont une des solutions à ces problèmes. En ajoutant une communication bidirectionnelle et de nouvelles capacités en matière de technologies de l'information et de la communication, il est possible de créer un système autonome de gestion intelligente de l'énergie.

Les travaux décrits dans ce mémoire s'intéressent particulièrement à la gestion des *microgrids* à l'aide de systèmes multi-agents (SMA). Les *microgrids* sont des réseaux de faibles puissances, composés de petits producteurs d'énergie décentralisés (éventuellement renouvelables) et de consommateurs. Ces réseaux peuvent être reliés (ou non) au réseau global ce qui ajoute à leur complexité. De par leurs complexités et leurs répartitions géographiques, les *smart grids*, comme les *microgrids*, ne peuvent pas être gérés facilement par des systèmes centralisés. Les intelligences artificielles distribuées et plus particulièrement les SMA apparaissent comme un moyen cohérent de résoudre les problèmes liés aux *smart grids*.

Dans un premier temps, nous avons défini une approche mettant en œuvre des boucles de rétroaction. Une boucle de rétroaction apparaît dans les systèmes complexes qui peuvent être définis avec plusieurs niveaux d'abstraction. Deux niveaux sont ainsi en interaction. Le niveau micro regroupe un ensemble d'agents ayant des comportements qui, une fois combinés, influenceront sur l'état du système. Le niveau macro traite ces influences pour définir un nouvel état du système qui influera sur le comportement des agents du niveau micro. Cette boucle de rétroaction permet de séparer les comportements sur plusieurs niveaux. Cette approche est utilisée pour définir un problème de gestion offre-demande dans un *microgrid*. Ce problème permet de prendre en compte un ensemble d'objectifs qui sont actuellement traités de manière indépendante. Enfin, une application utilisant un SMA a été développée. Cette approche peut s'intégrer dans ce problème. Elle a pour but d'assurer la stabilité du réseau à tout instant grâce au contrôle de systèmes de stockage.

Dans un second temps, un simulateur de réseau électrique permettant le contrôle dynamique des périphériques a été développé. Ce simulateur repose sur trois grands principes. Le premier est une modélisation à base d'agents du simulateur lui-même, pour représenter la complexité des réseaux électriques. Le second principe repose sur l'utilisation du paradigme holonique afin de prendre en compte les multiples niveaux inhérents aux réseaux électriques. Enfin, le troisième principe est inspiré du modèle influence/réaction et propose une technique qui permet de gérer les actions simultanées, éventuellement conflictuelles, au sein des SMA.

**Mots-clés :** smart grid, microgrid, système multi-agent, simulation, boucle de rétroaction, apprentissage par renforcement

The logo for SPIM (École doctorale SPIM) features the letters 'S', 'P', 'I', and 'M' in a large, white, sans-serif font. A blue horizontal bar is positioned to the left of the 'S'.