

## Architecture Multi-Agents pour Surveiller la Qualité des Données de Consommation d'Énergie

José Octávio Cesário Pereira Pinto<sup>\*1,2</sup>, Gustavo Felipe Martin Nascimento<sup>1,3</sup>, Frédéric Wurtz<sup>1</sup>, Benoît Delinchant<sup>1</sup>, Miguel Moreto<sup>2</sup>, Patrick Kuo-Peng<sup>3</sup>, Nelson Jhoe Batistela<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP\*\*, G2Elab  
38000 Grenoble, France Bâtiment GreEn-ER, 21 Avenue des Martyrs, CS 90624,  
38031 GRENOBLE CEDEX 1

<sup>2</sup> Université Fédérale de Santa Catarina, EEL, LABSPOT  
Campus Universitaire João David Ferreira Lima, 88040-900, Florianópolis, Santa  
Catarina, Brésil

<sup>3</sup> Université Fédérale de Santa Catarina, EEL, GRUCAD  
Campus Universitaire João David Ferreira Lima, 88040-970, Florianópolis, Santa  
Catarina, Brésil

\*jocppa@outlook.com

---

*RESUME.* Les analyses des données de consommation énergétique des bâtiments intelligents, issues des systèmes de surveillance, sont nécessaire pour atteindre les performances souhaitées. Pourtant, des données obtenues sont souvent erronées, compromettant alors la fiabilité des systèmes de gestion. Nous proposons donc de développer des méthodes capables d'améliorer la fiabilité de ces systèmes. Dans cette perspective, les Systèmes Multi-Agents ont des caractéristiques intéressantes pour relever ces défis avec simplicité de mise en œuvre par plug-and-play. Cet article propose un système multi-agents avec l'architecture BDIs (Belief-Desire-Intention) pour surveiller la qualité des données du système de gestion du bâtiment GreEn-ER (Grenoble, France). Les résultats préliminaires attestent les contributions scientifiques attendues.

*MOTS-CLÉS.* Efficacité énergétique, multi-agents, smart-buildings, qualité de données.

---

---

*ABSTRACT.* Energy consumption data analyses of smart-buildings, originating from their monitoring systems, are important assets for these buildings to reach their full potential. However, data collected often have samples with some kind of data quality problem, compromising the reliability of these systems. In this perspective, Multi-Agent Systems have interesting characteristics to meet these challenges with simplicity of implementation and the possibility to develop a plug-and-play concept. This paper proposes a multi-agent system with BDIs (Belief-Desire-Intention) architecture to monitor the data quality of the GreEn-ER building management system (Grenoble, France). Preliminary results attest to the expected scientific contributions.

*KEYWORDS.* Energy efficiency, multi-agents, smart-buildings, data quality.

---

## 1 INTRODUCTION

Force est de constater que la consommation d'énergie ne cesse d'augmenter. Même dans les scénarios où une consommation plus efficace peut être obtenue, voire une réduction de la consommation mondiale d'énergie, l'utilisation de l'électricité augmente car elle apparaît aujourd'hui comme le vecteur énergétique incontournable. Dans ce contexte, l'énergie consommée dans les bâtiments correspond à une part importante de la consommation énergétique. En France, selon bilan RTE 2018 (Réseau de Transport d'Électricité, 2018), environ 67,8% de l'électricité est consommée dans les bâtiments, tant résidentiels que tertiaires. De cette façon, les actions d'efficacité énergétique dans les bâtiments peuvent avoir un grand impact sur la réduction de la consommation d'énergie, facilitant la réalisation des objectifs décrits dans la directive 2018/2002 du Parlement européen et du Conseil. (Le Parlement Européen and Le Conseil de L'Union Européenne, 2018)

Des études montrent (Wood et Newborough, 2003) qu'il est possible de réduire plus efficacement la consommation d'énergie quand on dispose des informations en temps réel, en comparaison à de simples factures mensuelles. La mesure et le traitement des données de consommation ont donc une grande importance.

De plus, des données mesurées peuvent également être utilisées comme base pour des algorithmes de *machine learning* afin d'employer des méthodes de prévision de la consommation ou de désagrégation de l'énergie. Cependant, les processus de *machine learning*, avec séries temporelles de mauvaise qualité contenant des anomalies, peuvent aboutir à de mauvais modèles (Chang et al., 1988). Il est donc important de bien identifier et de bien quantifier la qualité des données utilisées.

Cet article vise à présenter le concept d'un système de surveillance de la qualité des données de mesure de la consommation électrique basé sur une architecture multi-agents, en utilisant comme étude de cas des données de mesure d'un bâtiment intelligent (GreEn-ER), situé à Grenoble.

## 2 SYSTÈME DE MESURE DU BÂTIMENT GREEN-ER

Le GreEn-ER est un bâtiment situé au Polygone Scientifique, à la Presqu'île de Grenoble. Il regroupe l'école d'ingénierie Grenoble-INP Ense3, le laboratoire G2Elab et, aussi, des plateformes de formation et recherche. Le bâtiment a plus de 22.000 m<sup>2</sup> de surface qui sont divisés sur 6 étages et la toiture. Il y a environ 1.500 étudiants et quelques centaines de professeurs, chercheurs et personnels qui fréquentent le bâtiment. Comme il s'agit d'un grand bâtiment, sa consommation d'électricité est aussi importante. Dans des journées typiques, la puissance active peut s'élever à plus de 300 kW et la consommation moyenne peut être supérieure à 5.000 kWh par jour. C'est un bâtiment massivement surveillé et contrôlé avec plus de 1.500 capteurs dont environ 330 compteurs d'énergie électrique. Ces derniers mesurent la consommation des différentes charges du bâtiment, comme l'éclairage, les prises de courant, les Centrales de Traitement d'Air (CTAs), les groupes froids, les pompes, etc. (Delinchant et al., 2016). Les données mesurées sont utilisées pour contrôler les conditions internes et pour suivre la consommation du bâtiment.

Cependant, tous les systèmes de mesure peuvent présenter des dysfonctionnements qui rendent les échantillons moins fiables. Le système de GreEn-ER n'est pas différent et présente donc des problèmes de qualité de données. La détection et la quantification des problèmes de qualité des données mesurées constituent une étape importante dans le nettoyage de ces mesures en vue d'une utilisation future. Cependant, il n'y a pas qu'un seul type de problème de qualité des données. Dans la littérature (Kahn et al., 2002), les différents types de problèmes sont définis en fonction de leur nature. Dans les séries temporelles, la complétude, l'exactitude et l'actualité sont parmi les plus pertinentes. La complétude permet de mesurer si des données sont manquantes, l'exactitude mesure si les échantillons sont corrects et fiables, et l'actualité mesure si les informations sont à jour. La Fig. 1a présente un problème de complétude dans la série temporelle de la

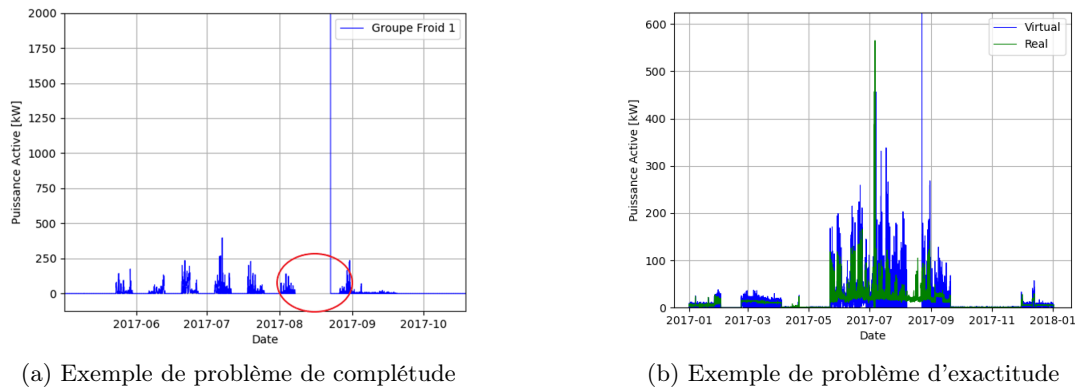


FIGURE 1. Exemples de problèmes de qualité des données

puissance active d'un groupe froid du bâtiment GreEn-ER, où une période d'absence de valeurs est mise en évidence. Au même temps, la Fig. 1b montre un exemple de problème d'exactitude. La courbe décrite comme "Real" représente un compteur et la courbe "Virtual" représente la somme des sous-compteurs liés à ce premier compteur. L'absence d'égalité entre ces mesures peut être considérée comme des problèmes d'exactitude.

Les sections prochaines visent donc à présenter une idée d'un système multi-agent capable de détecter et quantifier la qualité des données.

### 3 ARCHITECTURE MULTI-AGENTS DÉVELOPPÉ

Le système multi-agent proposé dans ce travail a été développé avec l'utilisation de l'outil JaCaMo, un *framework* qui permet le développement de systèmes multi-agents en tenant compte de leurs trois dimensions : l'organisation, les agents et les artefacts. Ainsi, la plateforme JaCaMo est une combinaison de trois autres plateformes, appelées MOISE (*Model of Organisation for multi-agent SystEms*), JASON et CaRTaGO (*Common ARTifact infrastructure for AGents Open environments*), qui sont utilisés, respectivement, pour le développement de l'organisation, des agents et des artefacts d'un système multi-agents. Comme le montre la Fig. 2, l'intégration de ces trois dimensions permet la création des systèmes multi-agents sophistiqués, dont l'organisation est capable de coordonner et d'optimiser les actions d'agents dans la poursuite de leurs objectifs, tandis que les artefacts permettent aux agents d'interagir avec l'environnement externe afin de réaliser leurs fonctions.

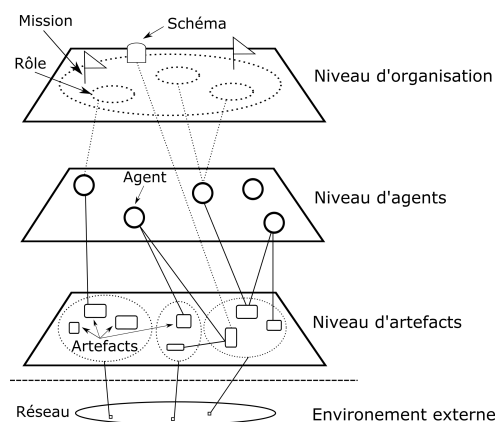


FIGURE 2. Dimensions d'un système multi-agent (Boissier et al., 2013)

L'organisation d'un système multi-agent est composée de schémas, missions et rôles, comme l'indique la Fig. 2. Un schéma c'est un arbre de décomposition d'un objectif global en plans et ob-

jectifs. Cet élément est responsable pour l'action collective des agents. Une mission représente un ensemble d'objectifs, dont un agent peut s'engager individuellement dans la poursuite d'un objectif global dans le contexte d'un schéma. Enfin, les rôles d'une structure organisationnelle sont les éléments qui définissent le comportement de l'agent au sein de l'architecture MAS (Multi-Agent Systems), en tenant compte des restrictions et des objectifs individuels établis pour l'organisation (Hübner et al., 2002). Le développement des agents à travers JASON est fait en utilisant l'architecture interne BDI (*Belief, Desire and Intentions*). Ce type d'architecture interne donne aux agents la capacité d'analyse et de prise de décision dans des situations complexes. Enfin, comme couche inférieure du diagramme de la Fig. 2, les artefacts représentent des ressources et des outils que les agents peuvent dynamiquement instancier, partager et utiliser pour soutenir leurs activités individuelles et collectives (Ricci et al., 2011). Les artefacts ont été développés en utilisant le CaRtAgO, qui est basé sur le méta-modèle Agents & Artefacts (A&A) destiné à la modélisation et la conception de systèmes multi-agents.

Le système multi-agents proposé a été conçu pour effectuer l'analyse des historiques de données obtenues du système de surveillance du bâtiment GreEn-ER, de sorte que les caractéristiques attendues de l'application MAS peuvent être attestées afin de développer un système de diagnostic et surveillance plus complexe et puissant à l'avenir. Les fonctionnalités offertes par le JaCaMo se sont avérées appropriées pour le développement de l'architecture multi-agents proposée, dont le fonctionnement et leurs dimensions sont présentés en détail dans les sous-sections suivantes.

### 3.1 NIVEAU D'ORGANISATION

L'organisation de l'architecture multi-agents proposée est représentée par le diagramme de la Fig. 3. Dans ce diagramme, il est possible d'observer la composition et la dynamique de fonctionnement de l'organisation mise en place. Le diagramme montre que, dans le groupe *mas greener*, il n'y a que deux rôles à jouer, où le rôle *organizer* doit être joué par un seul agent, tandis que le rôle *participant* peut être joué par autant d'agents que nécessaire. Ainsi, le système multi-agents proposé est initialement créé avec un seul agent, qui est déjà initialisé avec le rôle *organizer* du groupe *mas greener*. À partir de cette initialisation, l'agent *organizer* est chargé de créer tous les autres agents *participants*, puis de former tous les sous-groupes (zones) du système proposé, selon une liste de compteurs et de zones préalablement définis. Ainsi, le groupe *mas greener* est créé uniquement pour l'initialisation du système. Tous les agents de l'architecture MAS proposée feront partie de ce groupe, qui sera organisé en sous-groupes en fonction des spécifications et des besoins de l'application.

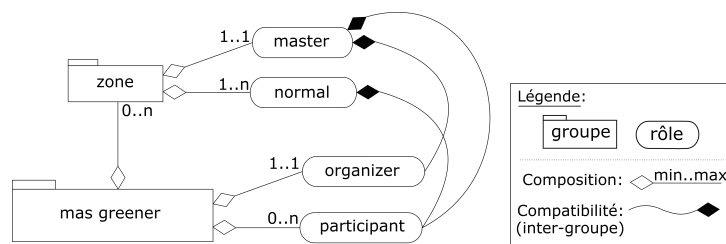


FIGURE 3. Diagramme de l'organisation du MAS proposée

Le lien de composition entre la représentation du groupe *mas greener* et la représentation de groupe *zone* dans le diagramme de la Fig. 3 indique que les groupes du type *zone* sont des sous-groupes du groupe type *mas greener*. Le diagramme montre aussi qu'il n'y a pas de limitation de quantité de groupes du type *zone*.

Un groupe de type *zone* présente deux types de rôles qui peuvent être joués : celui de *master* et le rôle *normal*. Le diagramme indique que chaque groupe peut avoir seulement un agent jouant le rôle *master*, alors qu'il n'y a pas de limite à la quantité d'agents jouant le rôle *normal*.

Enfin, la compatibilité inter-groupe entre les rôles présentés dans le diagramme est également

définie. On peut observer qu'un agent qui joue le rôle *participant* au groupe *mas greener* peut aussi jouer les rôles *master* et *normal* dans un groupe *zone*. De même, le diagramme indique qu'un agent qui joue le rôle *organizer* dans le groupe *mas greener* peut seulement jouer le rôle *master* dans un groupe du type *zone*.

Le schéma d'organisation proposé ne présente pas de compatibilité intra-groupe entre les rôles, c'est-à-dire qu'il ne permet pas à un agent d'avoir plus d'un rôle au sein du même groupe.

### 3.2 NIVEAU D'AGENTS

Les agents de l'architecture MAS proposée sont créés pour être positionnés chacun dans un compteur du système électrique à analyser. Ainsi, les paramètres locaux sont surveillés par les agents, qui interagissent en envoyant des messages pour effectuer l'analyse de la qualité des données proposée dans ce travail. L'interaction entre les agents est régie par l'organisation du MAS, en fonction de la zone dans laquelle se trouve l'agent et du rôle qu'il joue dans cette zone.

La Fig. 4 présente le schéma de positionnement des agents dans le système analysé. Dans ce diagramme, on peut voir qu'une *zone* sera composée de compteurs qui sont connectés directement entre eux par leur circuit électrique, de sorte qu'il existe un compteur général (Compteur 1) en amont et d'autres compteurs de branche en aval (Compteurs 2 à n), comme le montre la Fig. 4.

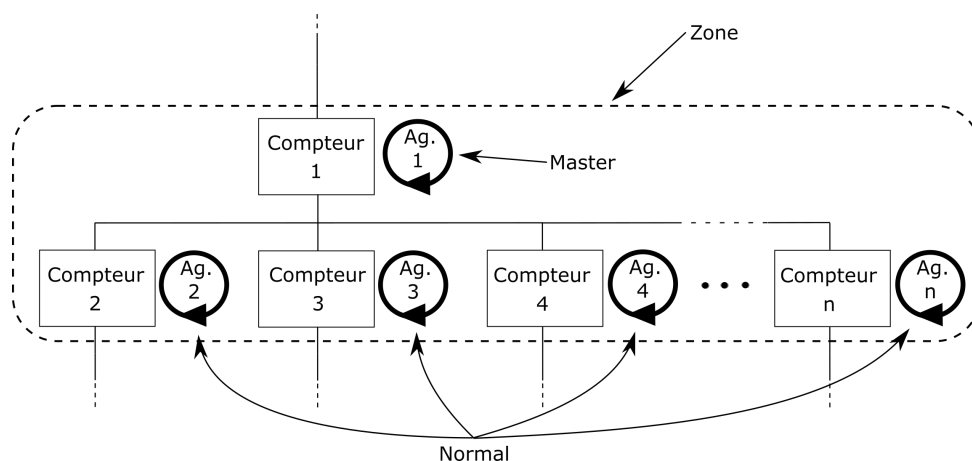


FIGURE 4. Positionnement des agents dans le réseau électrique analysé

La configuration et le fonctionnement du groupe de type *zone* formé dans la Fig. 4 sont assurés par les spécifications de l'organisation proposée. Dans ce diagramme, l'agent Ag. 1 joue le rôle *master*, tandis que les agents positionnés dans les compteurs en aval jouent le rôle *normal*.

La fonction d'un agent qui joue le rôle *normal* dans un groupe est d'effectuer l'analyse de complétude locale et d'envoyer la mesure obtenue de son compteur à l'agent *master* de son zone. Un agent qui joue le rôle *master*, à son tour, a trois fonctions : effectuer une analyse locale de complétude ; effectuer une analyse de complétude de sa zone ; et effectuer une analyse d'exactitude des mesures dans sa zone. Par exemple, si dans la figure 4, nous n'avions que le circuit composé des compteurs 1, 2, 3 et 4, les agents 2, 3 et 4 effectueraient l'analyse de complétude locale (uniquement des mesures de leurs compteurs respectifs) et enverraient chacun des échantillons obtenus à l'agent 1. Cet agent effectuerait la comparaison entre les mesures en amont et en aval pour chaque échantillon, afin d'évaluer le critère de exactitude.

Tous les agents ont le même code source. Leurs actions et leur prise de décision au sein de l'architecture MAS sont dynamiques et dépendent de leur fonctionnalité au sein de l'organisation proposée.

### 3.3 NIVEAU D'ARTEFACTS

Les artefacts ont été créés pour représenter les compteurs du système. C'est grâce aux artefacts que les agents du MAS ont accès aux mesures qui doivent être analysées. Pour chacun des compteurs analysés, un artefact a été créé. Comme le MAS a été appliqué dans un système hors ligne, les artefacts ont été conçus afin d'accéder aux fichiers qui contiennent l'historique des mesures de chaque compteur.

## 4 ÉTUDE DE CAS

La Fig. 5 montre un diagramme représentatif du système électrique du bâtiment intelligent GreEn-ER. Pour la validation de l'opération du MAS et des analyses de la qualité des données proposées, quatre compteurs ont été choisis pour l'étude. Ces compteurs mesurent la consommation d'électricité d'un système de refroidissement du bâtiment. Ce sont quatre capteurs, un mesure la consommation du tableau de distribution, deux d'entre eux mesurent la consommation de chaque groupe froide et d'autre mesure la consommation des charges auxiliaires, comme les pompes hydrauliques. Les compteurs à l'étude forment une zone selon les définitions présentées dans la Fig. 4, et ils sont mis en évidence dans la Fig. 5.

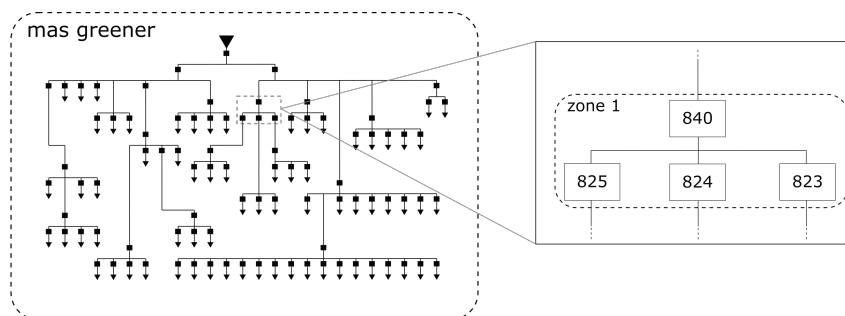


FIGURE 5. Compteurs choisis pour l'étude de cas

L'historique des mesures du compteur indique les valeurs de l'énergie consommée chaque heure, pendant une année complète. Les mesures ont été évaluées par le système multi-agents sur la base de critères d'exactitude et de complétude, définis selon les règles suivantes :

- Complétude : si une valeur de mesure numérique ne peut pas être obtenue, l'échantillon est considéré comme corrompu ;
- Exactitude : la valeur des échantillons de tous les compteurs en aval est additionnée à chaque moment et comparée à la valeur de l'échantillon mesuré par le compteur en amont. Le pourcentage d'erreur est donc calculé à partir de cette comparaison en considérant que les mesures du compteur en amont (le 840) sont corrects. Si le pourcentage d'erreur est supérieure ou égale à une tolérance spécifiée, les échantillons analysés sont considérés comme incorrects.

## 5 RÉSULTATS

Les résultats de l'évaluation des mesures par la MAS proposée sont présentés dans les tableaux 1 et 2. Au total, 8785 échantillons ont été évalués par compteur. Dans le Tableau 1, la quantité des échantillons qui ont été considéré corrects et incorrects selon les critères décrits dans la section 4, est exposée d'après la variation de tolérance. Il est à noter que les valeurs obtenues avec la plus basse tolérance sont pour la plupart considérées incorrectes (67,25%). Comme prévu, le pourcentage de mesures considérées correctes augmente en fonction de l'augmentation de la valeur de tolérance.

La grande quantité de mesures considérées incorrectes peut être attribuée à plusieurs facteurs, tels que l'imprécision dans le dimensionnement des compteurs, le mauvais fonctionnement des compteurs locaux, les problèmes de saisie et de stockage de ces mesures par le système central, entre autres. Le critère d'évaluation de la précision, puisqu'il est basé sur une valeur de tolérance en pourcentage, présente également des inconvénients en fonction des valeurs de l'échantillon évalué, puisque les valeurs les plus élevées ont des tolérances plus élevées, tandis que les valeurs proches de zéro présente une faible tolérance.

Tolérance [%]	Mesures Corrects		Mesures Incorrects	
	Échantillons	%	Échantillons	%
10	2877	32,75	5908	67,25
20	3566	40,59	5219	59,41
30	3929	44,72	4856	55,28
40	4441	50,55	4344	49,45
50	4854	55,25	3931	44,75
60	5190	59,08	3595	40,92
70	5468	62,24	3317	37,76
80	5791	65,92	2994	34,08
90	6002	68,32	2783	31,68
100	7362	83,80	1423	16,20

TABLE 1: Résultat de l'évaluation d'exactitude de mesures dans le zone 1 avec variation de tolérance

Les chiffres du Tableau 2 représentent les résultats d'analyse de complétude. Concernant la zone évaluée, les échantillons de chaque compteur en aval doivent être additionnés pour être comparés avec l'échantillon du compteur en amont. Si une valeur absente est détectée par l'un de ces compteurs, la comparaison n'est pas prise en considération et ces échantillons sont classifiés comme mesures non validées. Le tableau 2 montre que 4,12% des mesures sont considérées comme non valables. De plus, 3,09% des échantillons avec des valeurs manquantes ont été détectés.

Zone	Mesures Non Validés		Absence de Value	
	Échantillons	%	Échantillons	%
Zone 1	362	4,12	1086	3,09

TABLE 2: Résultat de l'évaluation de complétude par zone

Afin de valider notre approche et implémentation, une analyse du même historique des données a été effectuée par un algorithme développé en Python, en utilisant les mêmes critères d'évaluation, mais de manière centralisée. Les résultats obtenus sont les mêmes que ceux des Tableaux 1 et 2. Le développement de l'algorithme centralisé s'est avéré considérablement plus simple que le développement des codes de programmation pour la mise en œuvre de systèmes multi-agents. La durée d'exécution de l'analyse des données a également été considérablement plus courte. Cependant, l'objectif de ce travail est de proposer un système de contrôle décentralisé avec un haut degré d'autonomie et de fiabilité d'opération. Le prototype présenté peut être appliqué pour le suivi des mesures en temps réel, avec la capacité de détecter et de corriger les problèmes de manière autonome, et de générer des diagnostics précis à partir des informations décentralisées. En plus, le système peut être maintenu en fonctionnement par endroits lorsque des problèmes locaux surviennent.

Les critères choisis pour l'évaluation ont révélé des problèmes dans la qualité des données extraites des systèmes de surveillance, comme l'indique la littérature. Grâce à la modification du code source des agents, les règles d'évaluation peuvent être modifiées et de nouvelles règles peuvent être ajoutées pour effectuer des analyses plus approfondies. Le développement d'agents

avec une architecture interne BDI permet d’effectuer ces changements facilement, puisque le code source des agents présente des divisions claires entre leurs plans d’action.

## 6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le système multi-agent développé a démontré un potentiel élevé pour les applications de surveillance des mesures électriques distribuées, de gestion des ressources distribuées dans des bâtiments intelligents, et de résolution autonome des problèmes.

La flexibilité et la conformité du MAS proposé avec le concept plug-and-play rendent cette méthodologie intéressante pour une application dans des systèmes intelligents, car il peut être facilement s’adapter à des changements de topologie sans qu’il soit nécessaire de reprogrammer complètement un système centralisé. Il est également capable de fonctionner partiellement en cas de problèmes locaux dans le système, un facteur qui facilite la localisation des défauts et l’obtention de diagnostics précis.

Dans une perspective d’avenir, le système peut être développé pour effectuer des analyses de mesure en temps réel plus précis par l’utilisation de plusieurs critères d’évaluation. Le système peut également être adapté pour analyser d’autres grandeurs que les mesures d’électricité, et être amélioré pour effectuer la gestion des ressources locales et la génération de diagnostics précis des problèmes.

## RÉFÉRENCES

- Boissier, O., Bordini, R. H., Hübner, J. F., Ricci, A., et Santi, A. (2013). Multi-agent oriented programming with JaCaMo. *Science of Computer Programming*, 78(6) :747–761.
- Chang, I., Tiao, G., et Chen, C. (1988). Estimation of time series parameters in the presence of outliers. *Technometrics*, 30 :193–204.
- Delinchant, B., Wurtz, F., Ploix, S., Schanen, J., et Marechal, Y. (2016). Green-er living lab : A green building with energy aware occupants. In *2016 5th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems (SMARTGREENS)*, pages 1–8.
- Hübner, J. F., Sichman, J. S., et Boissier, O. (2002). A model for the structural, functional, and deontic specification of organizations in multiagent systems. In Bittencourt, G. et Ramalho, G. L., editors, *Advances in Artificial Intelligence*, pages 118–128, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.
- Kahn, B., Strong, D., et Wang, R. (2002). Information quality benchmarks : Product and service performance. *Commun. ACM*, 45 :184–192.
- Le Parlement Européen and Le Conseil de L’Union Européenne (2018). *Directive (UE) 2018/2002 du Parlement Européen et du Conseil du 11 décembre 2018 modifiant la directive 2012/27/UE relative à l’efficacité énergétique*. Journal officiel de l’Union européenne.
- Ricci, A., Piunti, M., et Viroli, M. (2011). Environment programming in multi-agent systems : an artifact-based perspective. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 23(2) :158–192.
- Réseau de Transport d’Électricité (2018). *Bilan Électrique 2018*. RTE - Direction innovation et données, 2019.
- Wood, G. et Newborough, M. (2003). Dynamic energy-consumption indicators for domestic appliances : Environment, behaviour and design. *Energy and Buildings*, 35 :821–841.