



**HAL**  
open science

# Approche distribuée basée sur un système multi-agent pour l'optimisation énergétique d'un micro-réseau de distribution DC.

Karem Hafsi

► **To cite this version:**

Karem Hafsi. Approche distribuée basée sur un système multi-agent pour l'optimisation énergétique d'un micro-réseau de distribution DC.. Energie électrique. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2024. Français. NNT : 2024GRALT004 . tel-04584332

**HAL Id: tel-04584332**

**<https://theses.hal.science/tel-04584332v1>**

Submitted on 23 May 2024

**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.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES**

École doctorale : EEATS - Electronique, Electrotechnique, Automatique, Traitement du Signal (EEATS) Spécialité : Automatique - Productique  
Unité de recherche : Laboratoire de conception et d'intégration des systèmes

**Approche distribuée basée sur un système multi-agent pour l'optimisation énergétique d'un micro-réseau de distribution DC.**

**A distributed approach based on a multi-agent system for energy optimization of a DC distribution microgrid.**

Présentée par :

**Karem HAFSI**

Direction de thèse :

**Jean Marc THIRIET**

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université Grenoble Alpes

Directeur de thèse

**Denis GENON-CATALOT**

MAITRE DE CONFERENCES, Université Grenoble Alpes

Co-directeur de thèse

Rapporteurs :

**Anne-Lise GEHIN**

MAITRESSE DE CONFERENCES, Université de Lille

**Thierry VAL**

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université de Toulouse Jean-Jaurès

Thèse soutenue publiquement le **30 janvier 2024**, devant le jury composé de :

**Bertrand RAISON**

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université Grenoble Alpes

Président du jury

**Jean Marc THIRIET**

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université Grenoble Alpes

Directeur de thèse

**Denis GENON-CATALOT**

MAITRE DE CONFERENCES, Université Grenoble Alpes

Co-directeur de thèse

**Christophe BATARD**

MAITRE DE CONFERENCES, Université de Nantes

Examineur

**Anne-Lise GEHIN**

MAITRESSE DE CONFERENCES, Université de Lille

Rapporteuse

**Thierry VAL**

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université de Toulouse Jean-Jaurès

Rapporteur

Invités :

**Stéphane FOLLIC**

Actuators & command manager, Schneider Electric





# Résumé

L'apport scientifique de cette thèse se concentre sur la résolution des défis particuliers liés à la stabilité et à l'optimisation des réseaux de distribution en courant continu (DC). Cette recherche vise à élaborer des stratégies de contrôle et des algorithmes d'optimisation avancés afin de maximiser l'intégration des sources d'énergies renouvelables en courant continu tout en minimisant les pertes d'énergie dans le but d'atteindre l'auto-consommation. L'architecture matérielle proposée dans ce travail s'appuie sur deux technologies de distribution électrique en courant continu, à savoir le Power over Ethernet (PoE) et le Power over Data Line (PoDL). Grâce à ces deux technologies, il est possible d'obtenir une amélioration d'au moins 7 % en termes d'efficacité énergétique lorsque la source d'énergie est en courant continu, comme c'est le cas pour l'énergie photovoltaïque ou l'énergie stockée dans des batteries. L'intégration de ces technologies dans les bâtiments crée un système de distribution plus flexible, permettant l'incorporation de charges dans la stabilisation du micro-réseau. Le PoE alimente les appareils via Ethernet, tandis que le PoDL permet la communication IP et l'injection d'énergie par l'intermédiaire de l'infrastructure de câblage électrique existante.

L'architecture logicielle que nous avons proposée dans ce travail est basée sur une communication réactive entre les acteurs du réseau DC, garantissant ainsi la stabilité et la sécurité. La méthode s'appuie sur un système multi-agents coordonné pour des décisions contextuelles, maximisant les avantages du réseau DC tout en garantissant un fonctionnement stable et économe en énergie.

La mise en œuvre d'un système de distribution électrique réactif est un défi majeur. La nature décentralisée de ce système nécessite un protocole de communication capable de répondre aux exigences de latence et de flexibilité. Par conséquent, après avoir évalué plusieurs protocoles, nous avons confirmé que le protocole Data Distribution Service (Data Distribution Service (DDS)) se distingue par ses performances en temps réel, offrant une latence bien délimitée et contrôlée. Grâce à sa structure distribuée et à ses capacités avancées de gestion des données, le DDS peut assurer une communication en temps réel fiable et prévisible.

En plus du protocole de communication réactif, nous avons utilisé une approche multi-agent pour ses avantages tels que la gestion de l'incertitude, la flexibilité, l'extensibilité et la prise de décision distribuée. Cependant, leur mise en œuvre dans un contexte où la réactivité et la stabilité des micro-réseaux sont essentielles représente un défi particulier. Dans ce contexte spécifique, nous avons développé une architecture de système multi-agents basée sur la coordination avec des interactions bien définies. De plus, nous avons proposé une méthode d'optimisation basée sur le cycle hamiltonien de la théorie des graphes afin d'optimiser les temps de latence des agents dans leurs tâches. L'approche multi-agents et les algorithmes d'optimisation proposés visent à répondre simultanément aux exigences de réactivité du système de contrôle et aux défis liés à l'optimisation de la gestion de l'énergie dans le micro-réseau DC.

**Mots-clés** Micro-réseau DC, Architecture Distribuée, Sécurité, Auto-consommation, PoE, PoDL, Optimisation énergétique, Systèmes multi-agents.



---

## Abstract

The scientific contribution of this thesis focuses on addressing specific challenges related to the stability and optimization of direct current (DC) distribution networks. This research aims to develop control strategies and advanced optimization algorithms to maximize the integration of renewable energy sources in DC while minimizing energy losses in order to achieve self-sufficiency. In pursuit of this objective, we have proposed in this work a hardware and a software architecture. The hardware architecture relies on two DC electrical distribution technologies, namely Power over Ethernet (PoE) and Power over Data Lines (PoDL). With these two technologies, it is possible to achieve at least a 7% improvement in energy efficiency when the energy source is in DC, such as photovoltaic energy or energy stored in batteries. Integrating these technologies into buildings creates a more flexible distribution system, allowing for the incorporation of loads in microgrid stabilization. PoE powers devices via Ethernet, while PoDL enables IP communication and power injection through the existing electrical wiring infrastructure.

The software architecture that we have proposed in this work is based on reactive communication among the actors of the DC network, thus ensuring stability and safety. The method relies on a coordinated multi-agent system for context-aware decisions, maximizing the benefits of the DC network while ensuring stable and energy-efficient operation.

Implementing a reactive electrical distribution system is a major challenge. The decentralized nature of this system requires a communication protocol capable of meeting latency and flexibility requirements. Therefore, after evaluating several protocols, we have validated that the Data Distribution Service (DDS) protocol stands out for its real-time performance, offering well-bounded and controlled latency. Due to its distributed structure and advanced data management capabilities, DDS can ensure dependable and anticipatable real-time communication.

In addition to the reactive communication protocol, we have used a multi-agent approach for its benefits like uncertainty management, flexibility, scalability, and distributed decision-making. However, their implementation in a context where microgrid reactivity and stability are essential represents a particular challenge. Within this specific context, we have developed a coordination-based multi-agent system architecture with well-controlled interactions and latencies. Furthermore, we have proposed an optimization method based on the Hamiltonian cycle from graph theory to optimize the latencies of the agents in their tasks. The proposed multi-agent approach and optimization algorithms aim to simultaneously address the reactivity requirements of the control system and the challenges related to optimizing energy management in the DC microgrid.

**Keywords** DC micro-grid, Distributed system, Security, Self-sufficiency, PoE, PoDL, Optimisation, Multi-agents systems



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction et contributions</b>	<b>1</b>
1.1	Introduction générale . . . . .	2
1.2	Empreinte carbone et consommation énergétique de bâtiments . . . . .	4
1.2.1	Empreinte carbone et énergie grise . . . . .	4
1.2.2	Consommation et charges électriques dans les bâtiments . . . . .	6
1.3	Motivations pour les micro-réseaux DC . . . . .	9
1.3.1	Généralités sur les micro réseaux électriques . . . . .	9
1.3.2	Courant continu (DC) vs courant alternatif (AC) . . . . .	11
1.4	Contexte et Contributions . . . . .	13
<b>2</b>	<b>Architecture de distribution électrique DC</b>	<b>15</b>
2.1	Introduction . . . . .	16
2.2	Les technologies PoE et PoDL . . . . .	16
2.2.1	La technologie PoE . . . . .	16
2.2.2	La technologie SPE/PoDL . . . . .	22
2.3	Les micro-réseaux DC . . . . .	25
2.3.1	Les normes associées aux micro-réseaux DC . . . . .	26
2.3.2	Les niveaux de tensions dans les micro-réseaux DC . . . . .	27
2.3.3	La conversion de tensions . . . . .	28
2.3.4	Les structures de distribution DC . . . . .	29
2.3.5	La protection des réseaux DC . . . . .	32
2.4	Les systèmes d'alimentation de Classe 4 . . . . .	34
2.4.1	Aperçu des circuits de puissance de classe 4 . . . . .	35
2.4.2	La sécurité . . . . .	36
2.4.3	Les défis pour les systèmes d'alimentation de classe 4 . . . . .	36
2.4.4	Exemple de système de classe 4 . . . . .	37
2.5	Une nouvelle architecture décentralisée 380 VDC et PoE/PoDL . . . . .	38
2.5.1	Présentation . . . . .	38
2.5.2	Le système PoE pour les charges à faible puissance . . . . .	40
2.5.3	Le routage d'énergie entre les Smart Nodes et les drivers . . . . .	41
2.5.4	Résultats et interprétations . . . . .	42
2.6	Conclusion . . . . .	46
<b>3</b>	<b>Communication</b>	<b>48</b>
3.1	Introduction . . . . .	49
3.2	Communications micro-réseau - protocoles et normes . . . . .	49

3.2.1	Communication SNL-Drivers . . . . .	50
3.2.2	Le protocole MQTT . . . . .	52
3.2.3	Communication entre Smart Nodes (SNs) . . . . .	55
3.2.4	Courant Porteur en Ligne (CPL) . . . . .	56
3.2.5	PowerLink . . . . .	66
3.2.6	Le protocole Data Distribution Service (DDS) . . . . .	72
3.3	Modélisation d'un micro-réseau DC basé sur une architecture de communication DDS . . . . .	81
3.3.1	Modèle de communication entre les Smart Nodes (SNs) . . . . .	81
3.3.2	Tests et résultats . . . . .	81
3.3.3	Discussion . . . . .	85
3.4	Conclusion . . . . .	89
<b>4</b>	<b>Optimisation et contrôle à l'aide d'un SMA</b>	<b>90</b>
4.1	Introduction . . . . .	91
4.2	Système Multi-Agent (SMA) . . . . .	91
4.2.1	Définition d'un agent . . . . .	91
4.2.2	Définition d'un Système Multi-Agent (SMA) . . . . .	92
4.2.3	Le système multi-agent centralisé . . . . .	93
4.2.4	Le système multi-agent distribué . . . . .	93
4.2.5	Le système multi-agent décentralisé . . . . .	94
4.2.6	L'utilisation des systèmes multi-agents . . . . .	94
4.2.7	Interactions entre agents . . . . .	95
4.2.8	Exemple de plateforme pour les systèmes multi-agents : Volttron . . . . .	97
4.2.9	Concept d'intelligence dans les systèmes multi-agents . . . . .	99
4.2.10	Le comportement des systèmes multi-agents . . . . .	101
4.2.11	La modélisation des systèmes multi-agents . . . . .	101
4.3	Algorithmes d'optimisation . . . . .	102
4.3.1	Coopération avec la Société Ubiant . . . . .	103
4.3.2	Algorithme de contrôle niveau 1 . . . . .	105
4.3.3	Algorithme de contrôle niveau 2 . . . . .	108
4.3.4	Simulation micro-réseau . . . . .	109
4.3.5	Discussion . . . . .	109
4.4	Système multi-agent temps réel . . . . .	110
4.4.1	Modélisation des agents pour le contrôle/commande du micro-réseau . . . . .	112
4.4.2	Coordination entre les agents . . . . .	113
4.4.3	Optimisation en utilisant le graphe hamiltonien . . . . .	117
4.5	Conclusion . . . . .	123
<b>5</b>	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>124</b>
5.1	Conclusion générale . . . . .	125
5.2	Perspectives . . . . .	126
<b>A</b>	<b>Back-tracking algorithm</b>	<b>143</b>

# Table des figures

1.1	Les émissions CO2 par secteur dans le monde 1990-2019 [8] . . . . .	5
1.2	Consommation d'énergie globale par secteur en 2017[9] . . . . .	5
1.3	Empreinte carbone d'un bâtiment [3] . . . . .	6
1.4	Principaux objectifs de réduction des émissions de GES et des consommations énergétiques pour le secteur immobilier en France [3] . . . . .	6
1.5	Consommation d'électricité résidentielle par usage en France en 2019 [11] . .	7
2.1	Système PoE . . . . .	17
2.2	Composition typique d'un système PoE [34] . . . . .	18
2.3	PD à signature unique [34] . . . . .	19
2.4	PD à double signature [34] . . . . .	19
2.5	Structure physique de la technologie PoDL . . . . .	23
2.6	Structure typique de couplage SPE/PoDL . . . . .	25
2.7	Nouvelle structure de couplage SPE/PoDL . . . . .	25
2.8	La structure de distribution radiale . . . . .	29
2.9	La structure de distribution à cage . . . . .	30
2.10	La structure de distribution circulaire/en anneau . . . . .	31
2.11	La structure de distribution maillée . . . . .	31
2.12	Influence du courant sur le corps humain en fonction de la durée, source ( IEC/TR 60479-5) . . . . .	33
2.13	Courant AC vs Courant DC . . . . .	33
2.14	Représentation simplifiée d'un système de distribution FMPS . . . . .	35
2.15	Recommandations de l'UL 1400-1 pour l'évaluation du courant de défaut [55]	37
2.16	Système de distribution de puissance Voltserver [56] . . . . .	38
2.17	Une nouvelle architecture décentralisée 380 VDC et PoE . . . . .	39
2.18	Architecture de distribution de l'énergie du bâtiment N8B . . . . .	40
2.19	Données de PSE sur la consommation de chaque Port . . . . .	41
2.20	Répartition des drivers et des Switchs PoE dans un étage du bâtiment N8B .	43
2.21	Vue globale du bâtiment N8B . . . . .	44
2.22	Pertes énergétiques AC vs PoE vs PoDL . . . . .	45
2.23	Test de couplage SPE/PoDL . . . . .	45
2.24	Pertes de paquets en fonction des longueurs des câbles et du couplage PoDL	46
3.1	Architecture de communication . . . . .	51
3.2	Délai de communication MQTT et MQTT sécurisé pour QoS 0 . . . . .	54
3.3	Délai de communication MQTT et MQTT sécurisé pour QoS 1 . . . . .	55

3.4	Délai de communication MQTT avec 74 clients . . . . .	55
3.5	CPL porté par un réseau AC . . . . .	57
3.6	CPL porté par un réseau DC [72] . . . . .	57
3.7	Schéma fonctionnel d'un transmetteur-récepteur OFDM [72] . . . . .	59
3.8	Trame Physique G3-PLC [72] . . . . .	61
3.9	Modèle OSI du protocole G3-PLC [72] . . . . .	62
3.10	Scénario de test G3-PLC . . . . .	62
3.11	Communication CPL avec les cartes ATSAM4CP . . . . .	63
3.12	Durée de transmission en mode QPSK . . . . .	64
3.13	Durée de transmission en mode Robuste . . . . .	64
3.14	Durée de transmission en mode BPSK . . . . .	65
3.15	Modèle OSI PowerLink[28] . . . . .	67
3.16	Cycle PowerLink [82] . . . . .	68
3.17	Communication par PDO [82] . . . . .	70
3.18	Trame PowerLink [82] . . . . .	70
3.19	Banc de test pour une communication PowerLink . . . . .	71
3.20	Résultats des tests concernant le cycle minimum de communication PowerLink. . . . .	72
3.21	Modèle OSI de protocole DDS . . . . .	74
3.22	La structure producteur/consommateur dans DDS . . . . .	74
3.23	Entités DDS . . . . .	75
3.24	Echange de données via RTPS . . . . .	79
3.25	Fonctionnement du processus de Découverte des entités par EDP . . . . .	80
3.26	Modélisation de la communication entre les SN . . . . .	82
3.27	Calcul de latence . . . . .	82
3.28	Test du protocole DDS avec les noeuds SN . . . . .	83
3.29	Évolution de la latence maximale et du délai moyen pour une communication DDS utilisant TCP . . . . .	84
3.30	Évolution de la latence maximale et du délai moyen pour une communication DDS utilisant TCP avec 4 SN . . . . .	85
3.31	Évolution de la latence maximale et du délai moyen pour une communication DDS utilisant UDP avec 2 SN . . . . .	85
3.32	Évolution de la latence maximale et du délai moyen pour une communication DDS utilisant UDP avec 4 SN . . . . .	86
3.33	Évolution de la latence maximale et du délai moyen pour une communication DDS multicast avec RTPS-UDP . . . . .	86
3.34	Test avec 10 nœuds DDS . . . . .	87
3.35	Évolution de la latence maximale et du délai moyen pour une communication DDS utilisant UDP avec 10 SN . . . . .	87
3.36	Évolution de la latence maximale et du délai moyen pour une communication DDS utilisant TCP avec 10 SN . . . . .	88
3.37	Évolution de la latence maximale et du délai moyen pour une communication DDS utilisant RTPS-UDP Multicast avec 10 SN . . . . .	88
4.1	Fonctionnement d'un agent dans son environnement . . . . .	93
4.2	Exemples de types d'interactions entre les agents dans un SMA . . . . .	95
4.3	Architecture Volttron [109] . . . . .	97
4.4	Fonctionnement du protocole RabbitMQ . . . . .	100

---

4.5	Architecture globale de gestion du micro-réseau . . . . .	104
4.6	Algorithme SNL . . . . .	106
4.7	Évolution de la consommation électrique des SNL . . . . .	106
4.8	L'effet de C sur l'évolution de la consommation de chaque SNL. . . . .	107
4.9	Routage de puissance basée sur la puissance permis et la priorité de chaque driver. . . . .	108
4.10	Simulation algorithme SNL . . . . .	110
4.11	Modélisation des agents pour le contrôle/commande du micro-réseau . . . . .	113
4.12	Diagramme de séquence pour l'agent SNS . . . . .	115
4.13	Diagramme de séquence pour l'agent SNST . . . . .	116
4.14	Diagramme de séquence pour l'agent SNGE . . . . .	117
4.15	Diagramme de séquence pour l'agent SNL . . . . .	118
4.16	Exemple d'un cycle hamiltonien . . . . .	119
4.17	Exemple d'une chaîne hamiltonienne. . . . .	119
4.18	Modélisation des délais d'interactions entre les agents . . . . .	120
4.19	Graphe des latences pour les agents SNS, SNST, SNGE, SNL1 et SNL2 . . . . .	121
4.20	Cycle minimal pour l'Agent SNS . . . . .	122



# Liste des tableaux

1.1	Comparaison entre les systèmes de distribution AC et DC [18][19][20][21][22].	12
2.1	Les différentes normes de la technologie PoE . . . . .	17
2.2	Les classes de puissance dans un système PoE . . . . .	19
2.3	IEEE 802.3at/af : Élévation de la température dans les faisceaux de câbles sur toutes les paires (°C) . . . . .	21
2.4	Spécifications des normes de la technologie SPE. . . . .	23
2.5	Les différentes classes des PD. . . . .	24
2.6	Consommation en mode inactif de divers équipements présents au sein du bâtiment N8B . . . . .	43
3.1	Comparaison entre différents protocoles IoT . . . . .	52
3.2	Équipements utilisés pour les tests MQTT. . . . .	54
3.3	Caractéristiques du standard Homeplug Av. . . . .	58
3.4	Standards HD-PLC et UPA . . . . .	58
3.5	Bande de fréquences et Modulations [72] . . . . .	60
3.6	Paramètres de l'équation de la durée . . . . .	61
3.7	Comparaison entre des protocoles de communication synthétisée à partir de [75, 76, 77, 78, 79, 80, 81] . . . . .	66
3.8	Caractéristiques des noeuds SN . . . . .	83
3.9	Résultats de test pour une communication DDS unicast avec une couche de transport TCP . . . . .	84
4.1	Services Volttron [111]. . . . .	98
4.2	Latence entre chaque paire d'agents ( $\mu$ s) . . . . .	120
4.3	Synthèse des traits distinctifs des cycles de divers agents. . . . .	122



# Chapitre 1

## Introduction et contributions

### Sommaire

---

<b>1.1</b>	<b>Introduction générale . . . . .</b>	<b>2</b>
<b>1.2</b>	<b>Empreinte carbone et consommation énergétique de bâtiments</b>	<b>4</b>
1.2.1	Empreinte carbone et énergie grise . . . . .	4
1.2.2	Consommation et charges électriques dans les bâtiments . . . . .	6
<b>1.3</b>	<b>Motivations pour les micro-réseaux DC . . . . .</b>	<b>9</b>
1.3.1	Généralités sur les micro réseaux électriques . . . . .	9
1.3.2	Courant continu (DC) vs courant alternatif (AC) . . . . .	11
<b>1.4</b>	<b>Contexte et Contributions . . . . .</b>	<b>13</b>

---

## 1.1 Introduction générale

Les bâtiments jouent un rôle crucial dans la consommation d'électricité à la fois au niveau mondial et en France. En effet, ces structures abritent nos résidences, nos lieux de travail, nos établissements commerciaux et nos infrastructures publiques, et ils sont de plus en plus nombreux dans notre paysage urbain. Cette croissance exponentielle a entraîné une augmentation significative de la demande en énergie, ce qui pose des défis majeurs en termes de développement, de durabilité et d'efficacité énergétique.

Au niveau mondial, les bâtiments sont responsables d'une part importante de la consommation totale d'électricité. Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), ils représentent près de 40% de la consommation mondiale d'énergie et environ un tiers des émissions de gaz à effet de serre [1]. Cette empreinte énergétique considérable est principalement due au chauffage, à la climatisation, à l'éclairage et aux appareils électriques utilisés dans les bâtiments.

En France, les bâtiments jouent également un rôle majeur dans la consommation d'électricité. Selon le ministère de la Transition écologique, ils représentent environ 45% de la consommation d'énergie finale [2] et contribuent de manière significative aux émissions de gaz à effet de serre du pays. Avec un parc immobilier diversifié comprenant des maisons individuelles, des immeubles résidentiels et des bâtiments commerciaux, la France est confrontée au défi de réduire la consommation d'électricité tout en garantissant des conditions de vie et de travail confortables.

Face à ces enjeux, de nombreux pays, y compris la France, ont pris des mesures pour promouvoir l'efficacité énergétique dans les bâtiments. Des réglementations ont été mises en place pour encourager la construction de bâtiments à basse consommation d'énergie, la rénovation énergétique des structures existantes et l'utilisation de sources d'énergie renouvelables. Ces efforts visent à réduire l'empreinte environnementale des bâtiments, à diminuer la dépendance aux énergies fossiles et à améliorer la durabilité globale du secteur de la construction.

Dans cette perspective, il est essentiel de comprendre les défis et les opportunités liés à la consommation d'électricité dans les bâtiments, à la fois au niveau mondial et en France. En adoptant des pratiques de construction et de rénovation durables, en investissant dans des technologies innovantes et en sensibilisant les occupants à l'importance de l'efficacité énergétique, nous pouvons créer des bâtiments plus respectueux de l'environnement, réduire notre empreinte carbone et bâtir un avenir plus durable. Parmi les technologies innovantes et durables, on trouve les approches basées sur le courant continu (Direct Current (DC)). En effet, plus d'un siècle plus tard, le courant continu fait son retour dans la bataille qui opposait Edison et Tesla. Poussé par les avancées technologiques notamment la production photovoltaïque, les terminaux d'éclairage (LED), les terminaux informatiques, les smartphones, les tablettes, les écrans et l'évolution de l'électronique de puissance qui permet des conversions avec des rendements de plus en plus élevés, le courant continu revient en force. Nous constatons aussi que les bâtiments modernes ont désormais une certaine connectivité et ont évolué vers des systèmes de contrôle industriel avec l'intégration des technologies basées sur l'Internet Protocole (IP) et comprenant des capteurs, des contrôleurs et des logiciels de supervision.

Une autre forme d'énergie généralement négligée dans le bilan énergétique des bâtiments est l'énergie grise, également connue sous le nom d'énergie incorporée. Celle-ci fait référence

à l'énergie nécessaire pour toutes les étapes du cycle de vie d'un bâtiment : fabrication, construction, rénovation et démolition, ainsi qu'à l'extraction, au transport et à la transformation des matériaux utilisés [3]. L'énergie grise est souvent exprimée en termes d'énergie primaire, c'est-à-dire l'énergie utilisée directement ou indirectement pour produire une quantité donnée d'énergie finale. Elle inclut les combustibles fossiles, l'électricité, le bois et d'autres sources d'énergie. La mesure de l'énergie grise permet donc d'évaluer l'impact environnemental long terme d'un bâtiment.

En tenant compte de ces trois points (retour du courant continu, connectivité des bâtiments et importance de la réduction de la consommation et de l'énergie grise) l'objectif de cette thèse est d'apporter une réponse à l'optimisation de la consommation électrique des bâtiments en s'appuyant sur un réseau électrique DC. Deux stratégies concernant la distribution électrique nous semblent pertinentes. La première concerne la technologie PoE (Power Over Ethernet) qui permet d'opérer sur des câbles réseaux et de s'affranchir du déploiement d'un double câblage pour la puissance et la communication, en utilisant l'infrastructure réseau pour la distribution de la puissance. La seconde stratégie est relative à la technologie PoDL (Power over Data Line) qui opère seulement avec une paire de fils électriques et permet, à l'inverse, de réutiliser les infrastructures de puissance existantes et de les utiliser pour la communication. Ces deux approches sont complémentaires et une partie de cette contribution de thèse a pour objectif de les comparer, d'étudier leurs faisabilités et de vérifier leurs performances. Etant donné la complexité et l'étendue des architectures distribuées de puissance et de communication dans des bâtiments réels, l'architecture de commande envisagée dans notre travail sera basée sur une stratégie multi-agent, qui permet de prendre des décisions globales ou locales en fonction des contextes [4] [5] [6]. En effet, la plupart des micro-réseaux DC adaptent une stratégie de contrôle basé sur la méthode droop-control, cette méthode est utilisée pour maintenir la tension du système dans une plage spécifiée en contrôlant la puissance de sortie de chaque source en fonction de la déviation de la tension du système. L'idée de base de la Droop control est que chaque source du micro-réseau DC reçoit un point de consigne ou une tension de référence, et que la puissance de sortie est ajustée en fonction de la différence entre le point de consigne et la tension réelle. La puissance de sortie de chaque source est diminuée lorsque la tension augmente au-dessus de la valeur de consigne, et augmentée lorsque la tension chute en dessous de la valeur de consigne. Les systèmes multi-agent sont beaucoup plus flexible et plus adaptés pour ce genre d'opérations ; Thomas et al. [98] par exemple, ont proposé une stratégie de contrôle multi-agent pour coordonner le partage de l'énergie entre des dispositifs de stockage hétérogènes répartis dans un micro-réseau DC. Sans nécessiter de contrôleur central, la stratégie de contrôle proposée est basée sur la coopération entre des agents qui contrôlent les batteries et des agents qui contrôlent des supercondensateurs afin de répondre au dynamisme des charges à hautes fréquences et diminuer les cycles de charges/décharges des batteries. Morstyn et al. [99] ont proposé une nouvelle utilisation du contrôle par mode coulissant multi-agent pour l'équilibrage de l'état de charge entre les systèmes de stockage d'énergie par batterie distribués en micro-réseaux DC. De même, Rwegasira et al. [100] ont proposé un système multi-agents pour le contrôle d'un micro-réseau DC en utilisant la plateforme REPAST. Le système permet à la fois le délestage et l'échange d'énergie avec la grille principale. Trois agents ont été utilisés : un agent solaire pour la gestion de l'énergie du micro-réseau, un agent de stockage pour surveiller la quantité d'énergie disponible au niveau de la batterie et un agent de charge pour connecter/déconnecter la charge du micro-réseau et vendre l'énergie inutilisée. Ainsi, la décision

d’opter pour un système multi-agent repose d’une part sur la capacité intrinsèque de cette technologie à offrir une grande flexibilité et à favoriser la collaboration entre les divers acteurs du réseau électrique (producteurs et consommateurs). Ceci vise à accomplir la gestion et la stabilité d’un micro-réseau, contrairement à l’approche du contrôle par méthode droop qui se limite uniquement aux sources d’énergie. Cette méthode n’est pas optimale, particulièrement lorsqu’il s’agit de promouvoir l’autoconsommation. D’autre part, cette sélection a également été influencée par la nécessité d’assurer une harmonie avec le système Hemis [7], élaboré par la société Ubiant, qui a soutenu financièrement cette thèse du 15 avril 2020 au 16 octobre 2022.

Dans ce document, nous commençons par exposer les raisons qui nous incitent à migrer vers un micro-réseau en courant continu. Ensuite, nous introduisons une nouvelle architecture pour un bâtiment connecté qui repose sur les technologies PoE et PoDL, ainsi qu’un bus 380 VDC. Nous présentons également les mises en place, les expérimentations réalisées, ainsi que les résultats obtenus pour évaluer les performances et les capacités de ces technologies.

Ensuite, nous détaillons l’architecture de communication choisie en fonction des cas de figure, ainsi que le protocole de communication utilisé puis nous présentons les tests et les résultats de performances de ce protocole.

Enfin, nous abordons la partie consacrée à l’optimisation énergétique, mettant en avant l’utilisation d’un contrôle/commande décentralisé à l’aide d’un système multi-agent.

## 1.2 Empreinte carbone et consommation énergétique de bâtiments

### 1.2.1 Empreinte carbone et énergie grise

La principale cause du changement climatique est la croissance du CO<sub>2</sub> notamment dans le secteur de la production électrique qui a atteint 13600 MT dans le monde en 2017, comme le montre la figure 1.1. Le secteur mondial du bâtiment a consommé plus de 125 EJ en 2017, soit près de 30 % de la consommation totale d’énergie finale [8], comme présenté dans la figure 1.2.

L’Accord de Paris vise à limiter le réchauffement climatique à 2°C d’ici la fin du siècle par rapport à l’ère préindustrielle. Cela implique de réduire les émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) de 40% à 70% en 2050 par rapport à 2010, et atteindre des niveaux d’émission proches de zéro en 2100 [10]. La mobilité et l’énergie en exploitation sont pour l’instant les 2 principaux facteurs d’émission. Cependant, en France la Stratégie nationale bas carbone rappelle que les émissions liées à la construction vont gagner en importance par rapport aux émissions pendant la phase d’usage. Pour un bâtiment, les émissions sur l’ensemble du cycle de vie sont dues à 50% à la construction. A l’échelle du secteur immobilier, les émissions de gaz à effet de serre se concentrent dans la fabrication des matériaux plus que dans l’usage final ce qui définit la perte en énergie grise, comme nous l’avons évoqué précédemment.

Selon l’association Bâtiment Bas Carbone, chaque m<sup>2</sup> de bâtiment construit représente 1,5 tonne de CO<sub>2</sub> émis sur l’ensemble de son cycle de vie (conception, réalisation, exploitation et démolition). L’électricité n’est pas une énergie primaire. On ne la trouve pas à l’état

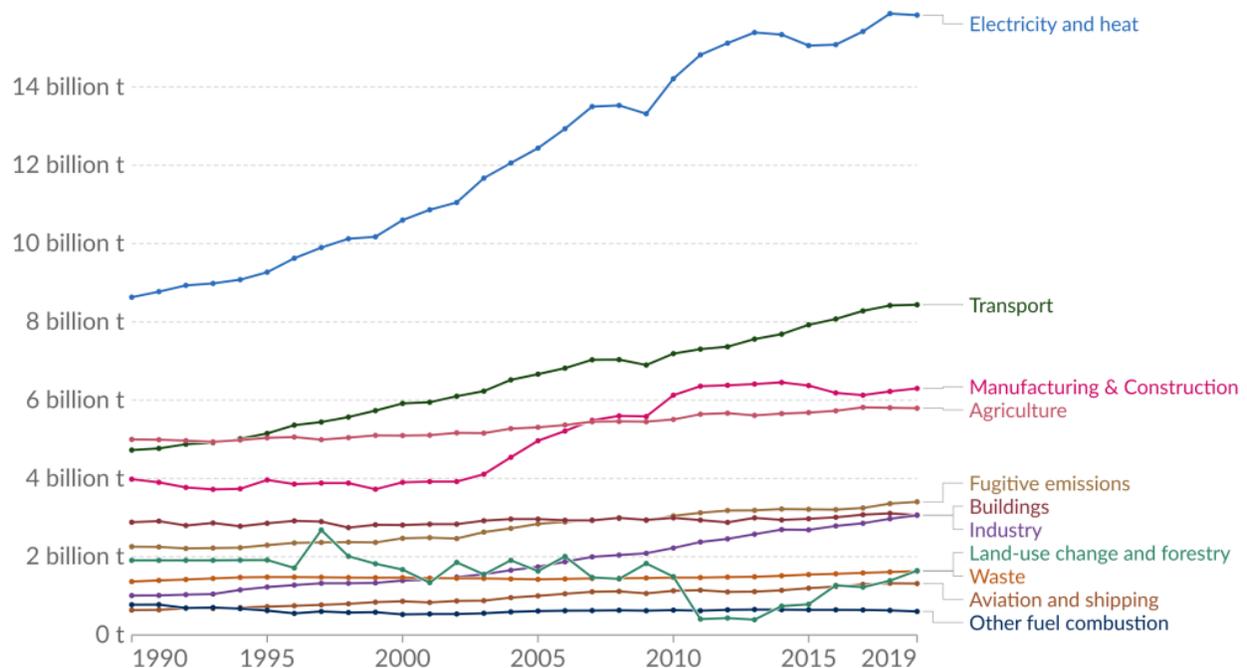


FIGURE 1.1 – Les émissions CO2 par secteur dans le monde 1990-2019 [8]

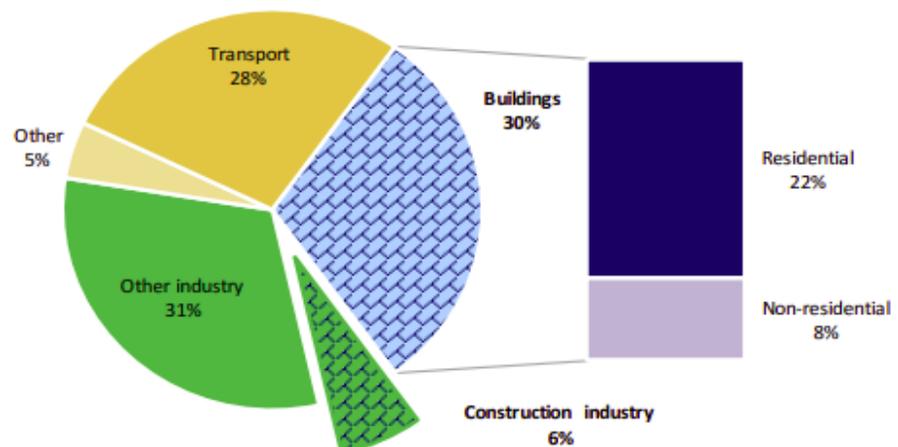


FIGURE 1.2 – Consommation d'énergie globale par secteur en 2017[9]

naturel. Il est donc nécessaire de la fabriquer. Ainsi, pour la comptabiliser, il convient de convertir l'énergie consommée en énergie primaire en appliquant à chaque kWh consommé un facteur de conversion qui va prendre en compte l'utilisation des ressources naturelles utilisées pour fabriquer, transporter et distribuer l'électricité. Ce coefficient, proche de 3 dans la réalité, est, par convention, fixé en France de 2,58. Quand le consommateur paie 1 kWh, il en a en réalité consommé 2,58. L'utilisation de l'électricité doit par conséquent être bien gérée dans les bâtiments afin de minimiser la consommation, tant en termes d'énergie d'ex-

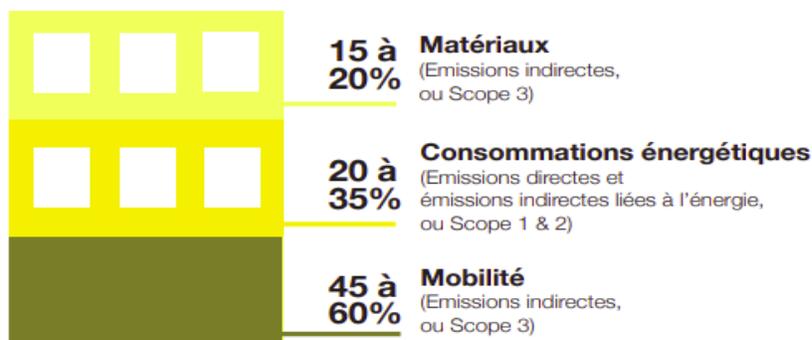


FIGURE 1.3 – Empreinte carbone d'un bâtiment [3]

plaitation que d'énergie grise, cette dernière étant fortement liée à la construction (mobilité et matériaux).

La figure 1.4 présente les objectifs fixés par l'état pour la réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) et des consommations énergétiques pour le secteur immobilier en France.

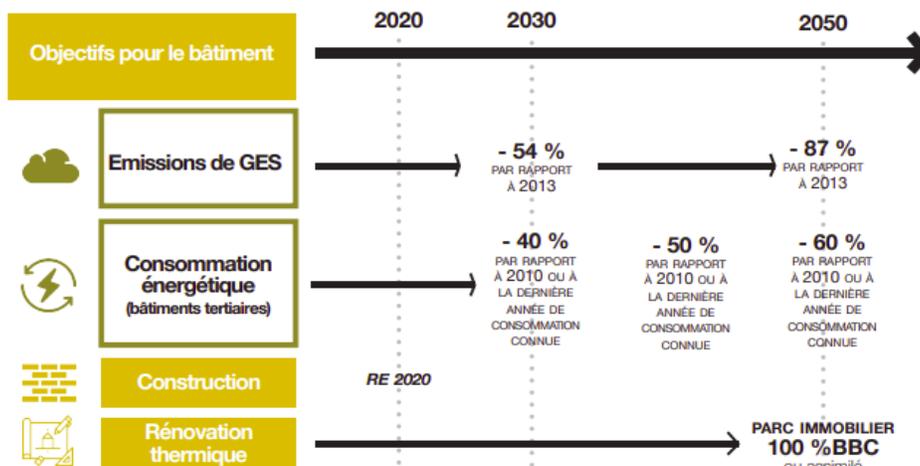


FIGURE 1.4 – Principaux objectifs de réduction des émissions de GES et des consommations énergétiques pour le secteur immobilier en France [3]

## 1.2.2 Consommation et charges électriques dans les bâtiments

Nous avons vu dans la section précédente l'impact de l'énergie grise sur l'empreinte carbone dans les bâtiments, dans cette partie nous nous intéressons à l'énergie consommée dans les bâtiments sous sa forme finale. Nous allons commencer à décrire les principaux facteurs de consommation d'énergie dans les bâtiments tels que :

- le confort thermique dans les bâtiments,

- la production d'eau chaude sanitaire et le stockage de chaleur,
- l'éclairage,
- le stockage de l'énergie.

Nous allons discuter par la suite l'intérêt d'avoir des charges pilotables pour pouvoir gérer la consommation individuelle de chaque charge ainsi que la consommation globale du bâtiment ou du micro-réseau.

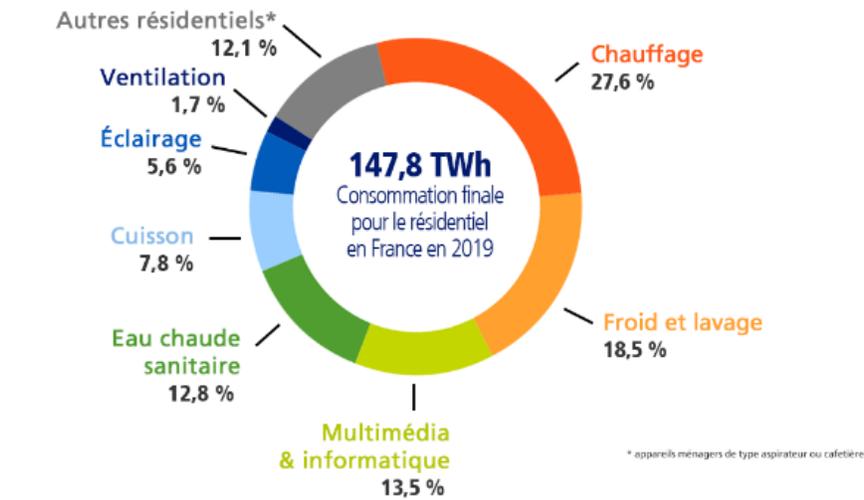


FIGURE 1.5 – Consommation d'électricité résidentielle par usage en France en 2019 [11]

### Gestion du confort thermique dans les bâtiments

Avec l'accroissement de la température, l'utilisation croissante des climatiseurs dans les foyers et les bureaux du monde entier sera l'un des principaux moteurs de la demande mondiale d'électricité au cours des trois prochaines décennies, selon une nouvelle analyse américaine de l'Agence internationale de l'énergie qui souligne la nécessité urgente d'une action politique pour améliorer l'efficacité des systèmes Chauffage, Ventilation, Climatisation (CVC).

Un examen plus approfondi de la consommation mondiale d'énergie par les équipements de CVC montre que ceux-ci représentent plus de 50 % de l'énergie des bâtiments consommée aux États-Unis. En Chine, la consommation d'énergie dans les bâtiments a augmenté d'environ 10 % par an au cours des 20 dernières années et représentait environ 20,7 % de la consommation nationale totale d'énergie en 2004. En Europe, environ 40 % de la consommation d'énergie est causée par les systèmes CVC dans les bâtiments commerciaux et résidentiels. En Australie, 70 % de la consommation d'énergie dans les bâtiments non résidentiels est utilisée pour les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation [12].

Les charges liées au confort thermique (ventilation, chauffage, climatisation) représentent donc entre 30 et 50 % de la consommation d'énergie dans les bâtiments résidentiels et tertiaires, la part d'énergie électrique étant non négligeable. L'utilisation de l'inertie thermique des bâtiments peut permettre de délester ces charges pendant un certain temps sans altérer

le confort des occupants. Les bâtiments peuvent être préchauffés ou pré-refroidis en prévision de contraintes sur le réseau ou durant les périodes où le prix de l'énergie est bas ou durant les périodes de productivité des systèmes de production des énergies renouvelables. Ainsi, ce type de charge offre des possibilités de pilotage très intéressantes du fait de sa flexibilité.

## Production d'eau chaude sanitaire et stockage de chaleur

L'inertie thermique des ballons d'eau chaude sanitaire offre un degré de liberté intéressant dans l'optique de la gestion de la consommation et les rend facilement pilotables. En France, il existe un système de facturation adapté au mode de fonctionnement de ces charges (option Heures Pleines/Heures Creuses). L'apport des nouvelles technologies de l'information et de la communication (mesures et contrôle) devrait permettre d'ajuster les réglages en fonction des signaux tarifaires et sécuritaires.

## Éclairage

L'éclairage représente environ un cinquième de la consommation mondiale d'électricité. Pour la consommation d'énergie dans les bâtiments, le système d'éclairage peut atteindre 30 % de la consommation totale.

Les progrès récents de la technologie des diodes électroluminescentes (LED) ont rendu l'utilisation commerciale généralisée de l'éclairage à LED très optimal. Les nouveaux éclairages LED offrent de nombreux avantages par rapport aux éclairages fluorescents ou incandescents. Tout d'abord, les LED durent jusqu'à 5 fois plus longtemps que les ampoules fluorescentes traditionnelles, et près de 50 fois plus que les ampoules à incandescence. En outre, les nouvelles ampoules LED consomment moitié moins d'électricité que les ampoules fluorescentes compactes, et moins d'un quart de l'électricité utilisée par les ampoules à incandescence. Le principal inconvénient de la technologie LED était le prix qui est un peu élevé. Cependant, les utilisateurs d'ampoules à LED peuvent récupérer ces frais généraux élevés en économisant de l'énergie au fil du temps, ce qui permet de réaliser des économies à long terme. Les LED ont des caractéristiques intéressantes telles que :

- Haute efficacité lumineuse (90-100 lm/W).
- Pertes plus faibles dans la distribution du flux lumineux contrôlé par rapport aux lampes traditionnelles (n'émettant qu'un faisceau de 120°, au lieu de 360°).
- Entièrement sans variation de couleur.
- Lumière colorée sans filtre.
- Contrôle dynamique des couleurs.
- Dimensions extrêmement réduites et donc plus grande souplesse d'utilisation.
- Bon rendu des couleurs (Color Rendering Index, CRI80).
- Large gamme de températures de couleur.
- Allumage instantané.

Ces nouvelles lampes, par rapport aux lampes traditionnelles, ont un coût légèrement plus élevé. Les avantages de cette technologie sont exploités dans des applications où les caractéristiques particulières des LED (petite taille, couleur de lumière ou dynamique) sont utilisées. Par conséquent, les sources lumineuses traditionnelles sont remplacées par des LED pour des raisons d'économie d'énergie, d'effets financiers, de meilleures performances, de tolérance élevée à l'humidité, de fonctionnement à froid, de durée de vie prolongée et d'efficacité élevée.

Plusieurs recherches [13] ont été menées sur l'éclairage LED, qui ont montré qu'un système d'éclairage LED à courant continu est plus efficace en termes d'énergie qu'un système d'éclairage fluorescent. Pour un niveau de lux similaire, le système LED consomme 13,5 % d'énergie de moins que son homologue. Une économie d'énergie supplémentaire de 10 % est réalisée lorsque la valeur de référence en lux du système d'éclairage à LED est fixée à 500 lux, l'éclairage standard pour les bureaux se situant entre 300 et 500 lux. Avec l'utilisation de capteurs et un algorithme de contrôle de la gradation, le système d'éclairage à LED peut économiser jusqu'à 44% d'énergie par rapport au système fluorescent [13].

### Le stockage de l'énergie

Face au développement rapide et durable des énergies renouvelables, qui sont dépendantes des phénomènes climatiques exploités (soleil, température extérieure ou vent), le stockage de l'énergie électrique est devenu nécessaire. En effet, à l'échelle d'un micro-réseau il contribuera à la gestion efficace des systèmes énergétiques, notamment en cas de surproduction, de sous-production et surtout en cas de panne. Par ailleurs, le développement des moyens de stockage de l'énergie offrirait la possibilité d'agir directement sur les signaux du marché de l'électricité. Par conséquent, le stockage est l'une des clés de la maîtrise de la demande énergétique. Il permettrait de :

- Participer à l'équilibre entre production et consommation.
- Contribuer au développement des énergies renouvelables (une batterie peut être chargée avec l'énergie du PV et déchargée lorsque les prix de l'électricité sont élevés).
- Pallier les ruptures de production d'énergie renouvelable.
- Lisser les pics de consommation (peak-shaving).
- Éviter d'investir dans de nouvelles centrales et limiter les arrêts/démarrages des groupes thermiques.
- Lisser la production intermittente.
- Contribuer au service système.
- S'affranchir des coupures de courant.
- Améliorer la qualité de la tension.

Le pilotage de charges à l'échelle d'un micro-réseau est aujourd'hui désormais indispensable, cela permet de contrôler la consommation des charges électriques internes. Cependant, toutes les charges d'un micro-réseau ne peuvent pas être contrôlées de la même façon et certaines présentent plus de facilité ou d'intérêt à être pilotées que d'autres (Protocole de communication, API, sécurité...).

## 1.3 Motivations pour les micro-réseaux DC

### 1.3.1 Généralités sur les micro réseaux électriques

Un micro-réseau représente une unité autonome intégrée dans un système capable de gérer la distribution d'énergie et de s'associer à une unique charge opérationnelle. Il implique l'utilisation de générateurs distribués limités pour alimenter des charges dotées d'équipements électroniques de puissance tels que des onduleurs, des dispositifs de stockage d'énergie, un réseau de distribution électrique, des liaisons de communication et un centre de contrôle

chargé de surveiller et de gérer le fonctionnement global du système. Les sources d'énergie solaire et éolienne sont les plus fréquemment employées en tant que sources d'énergie renouvelable dans les micro-réseaux. De plus, la connexion d'un micro-réseau aux services publics principaux et aux systèmes de stockage d'énergie peut renforcer sa fiabilité.

En ce qui concerne la classification des micro-réseaux, ils peuvent être classés en deux modes distincts : le mode isolé et le mode connecté. Le mode isolé se caractérise par le fonctionnement autonome du micro-réseau, indépendamment de son rattachement au réseau électrique principal. En revanche, en mode connecté, le micro-réseau est relié au réseau principal et peut injecter de l'énergie dans la ligne de distribution.

Trois conditions doivent être remplies pour qu'une production distribuée alimente efficacement les réseaux locaux :

- Existence de limites électriques clairement définies pour les charges présentes sur le réseau.
- Existence d'un centre de contrôle qui contrôle/supervise le fonctionnement du système.
- La capacité installée de la production distribuée doit être supérieure à la taille de la charge critique de pointe qu'il dessert afin qu'il soit possible de fonctionner d'une manière autonome, sans le soutien des autres systèmes d'énergie électrique.

Avec le développement des énergies renouvelables notamment l'énergie photovoltaïque et l'exigence de l'efficacité énergétique des bâtiments, l'idée d'un micro-réseau intelligent a fait son apparition. Il s'agit d'un réseau avec une consommation réduite à l'échelle d'un bâtiment (maison, immeuble, bureaux), d'un groupe de bâtiments, au sein duquel plusieurs systèmes de production cohabitent avec différents types de charges et moyens de stockage. Ces différents éléments communiquent entre eux et sont pour la plupart commandables. Ces micro-réseaux offrent plusieurs avantages :

- Le contrôle des systèmes de production décentralisés permet de diminuer leur impact sur le réseau électrique et d'en augmenter les taux de pénétration.
- Le fonctionnement autonome d'un micro-réseau permet d'éviter les conséquences d'un black-out du réseau électrique.
- La proximité entre systèmes de production et consommateurs facilite l'exploitation de la cogénération, ce qui permet d'améliorer le rendement énergétique global.
- Le pilotage des charges, couplé à des moyens de stockage énergétique, permet de minimiser le recours au réseau électrique et/ou aide à maintenir le réseau fonctionnel aux moments de pic d'appels de courant.

Ce type de réseau n'est réalisable qu'au prix d'un système de contrôle/supervision des différents flux énergétiques. Plusieurs stratégies peuvent être adoptées. Une des possibilités est de chercher à favoriser l'autonomie, c'est-à-dire l'autoconsommation. Pour cela, il est nécessaire de maximiser le recours à l'énergie renouvelable produite localement, ce qui permet par conséquent de minimiser la quantité d'énergie soutirée au réseau électrique.

Une autre solution est de minimiser le coût économique de la gestion/exploitation des ressources, ce coût étant lié à la tarification en vigueur. Il est alors possible de basculer d'une stratégie à une autre en fonction des tarifs d'achats et de revente de l'énergie, proposés par le fournisseur du réseau.

### 1.3.2 Courant continu (DC) vs courant alternatif (AC)

De nombreuses études ont été réalisées sur les micro-réseaux. La plupart de ces études ont été réalisées sur le bus AC. Par contre sur les bus DC, des études ont été réalisées sur des centres de données avec un système d'alimentation électrique de 380 VDC [14, 15]. En effet, le laboratoire de recherche Lawrence Berkley National Laboratory (LBNL) a commencé à étudier l'efficacité de la distribution d'énergie dans les centres de données. Ils ont étudié l'efficacité des alimentations électriques dans les équipements informatiques et les systèmes d'alimentation sans coupure. Ils ont remarqué le faible rendement de ces composants et ont introduit le concept d'élimination de certaines conversions d'énergie. Cela a conduit à une démonstration de centre de données en courant continu, parrainée par le programme de recherche d'intérêt public sur l'énergie de la Commission californienne de l'énergie. Une démonstration publique a été organisée avec l'aide de 16 autres organisations et 14 autres parties prenantes. Les résultats ont été stupéfiants : une amélioration de 28 % de l'efficacité de la distribution de courant par rapport à l'efficacité moyenne actuelle aux États-Unis [15].

La recherche et le développement ultérieurs ont permis d'articuler pleinement les avantages et les bénéfices du 380 VDC pour les centres de données :

- 28 % plus efficace que les systèmes 208 VAC
- 7 % plus efficace que 415 VAC
- 15 % de réduction des coûts d'investissement initiaux en volume de production
- 33 % de surface de plancher en moins
- Coût de la vie réduit de 36 %.
- 20-100x moins de cuivre que 48 VDC
- Pas d'harmoniques

Dans le monde entier, les centres de données adoptent le 380 VDC et valident les affirmations qui ont été faites. Une autre étude est proposée par Y. Yoshida et al. [16] concernant un système de distribution 380 VDC interconnecté avec un système de production d'énergie solaire au Texas, aux États-Unis. L'objectif de la démonstration était de montrer qu'un système d'alimentation électrique de 380 VDC permet d'économiser plus d'énergie qu'un système d'alimentation électrique en courant alternatif. Cette démonstration a permis d'obtenir environ 17 % de réduction de la consommation d'énergie par rapport à un système d'alimentation en courant alternatif ayant le même niveau de fiabilité. Pour une même tension, le système à courant alternatif a un potentiel de tension inférieur à celui du système à courant continu selon [17]. Par exemple, si un système est conçu pour 230 VAC, il peut supporter 325 VDC sans user l'isolant. La distribution DC a donc des avantages car elle présente moins de quantités de matières (cuivre), de faibles pertes, plus d'efficacité et à moindre coût [12]. La publication de Hebner et al. [17] compare également les différentes configurations des systèmes AC et DC. Pour la normalisation de la tension, ils utilisent une approche fondée sur la stratégie du réseau électrique. Cette approche propose trois réglementations de la tension permettant le développement de systèmes DC à basse tension efficaces et flexibles. Les résultats de la simulation montrent que la puissance consommée dans les systèmes DC est bien inférieure à la puissance consommée dans les systèmes AC. Les pertes des convertisseurs sont également beaucoup moins importantes dans le cas du réseau DC. Chacun de ces objectifs peut être tenu grâce à l'utilisation d'un réseau DC souvent à moindre coût et avec une plus grande efficacité que le grand réseau maillé en AC. Le tableau 1.1 présente une synthèse comparative des systèmes de distribution AC et DC.

TABLEAU 1.1 – Comparaison entre les systèmes de distribution AC et DC [18][19][20][21][22].

Facteurs	Système de distribution AC	Système de distribution DC
Transmission d'énergie sur courte distance	Perte de puissance importante en ligne, donc le système AC est moins efficace	Meilleure efficacité
Stabilité et synchronisation	Les perturbations externes affectent la stabilité du système, un système de synchronisation est requis entre le système de distribution et la "Distributed Grid" (DG)	Les perturbations de niveau de tension peuvent affecter la stabilité du système en affectant le flux de puissance réel sur la ligne de distribution, pas de problème de synchronisation
Réductance	Toujours présente dans une ligne AC	Pas de réductance ce qui permet de transmettre plus de puissance
Fréquence (préoccupations)	La surveillance du système AC est nécessaire car il subit des fluctuations en continu du fait de l'inductance de la ligne et des commutations qui présentent un problème de stabilité transitoire	La surveillance de la fréquence est inutile car le DC a une fréquence nulle. Absence de problème de stabilité transitoire
Résistance	Dans le système AC, la résistance de ligne est élevée et composé d'une partie active et une partie réactive ce qui complique la régulation du niveau de tension.	Une résistance plus faible en éliminant l'effet inductif et capacitif de la ligne.
Transmission longue distance	Le courant alternatif peut être transmis sur de longues distances avec l'existence des transformateurs de haute tension	Manque d'équipements pour pouvoir transmettre l'énergie avec des tensions élevées
Puissance réactive	Besoin de surveiller la puissance réactive en continu	Pas de puissance réactive en DC
Effet de peau	Besoin d'un conducteur de section plus grand à cause de l'effet de peau	Aucun effet de peau sur le système DC, le courant passe dans la totalité de conducteur
Maintenance	Difficile et coûteuse	Facile et peu coûteuse
Effet Capacitance/Inductance	Pertes de puissance sur les lignes sans charge / circuit ouvert	Pas d'effet Capacitance/Inductance
Pollution électromagnétique (EM) et interférence	Le système AC présente des interférences de télécommunications / réseau sans fil ainsi c'est un facteur de pollution EM dans le cas de non utilisation de câbles blindés	Pas de fréquence, pas de pollution EM, pas d'interférence
Bruit et danger	Plus bruyant et plus dangereux	Moins bruyant et moins dangereux

## 1.4 Contexte et Contributions

Les travaux présentés dans ce document s’appliquent au secteur du bâtiment, du fait de sa position de premier consommateur d’énergie. Une voie très prometteuse dans la maîtrise de la consommation est la gestion intelligente de la demande via, notamment, le pilotage de charges. De plus, le recours à des moyens de stockage locaux permettrait de pallier l’intermittence de la production d’énergie renouvelable. Ces stratégies visent à instaurer un équilibre entre l’offre et la demande, présentant ainsi une alternative à la nécessité de transformer les micro-réseaux électriques internes qui tendent à devenir de plus en plus complexes. La transition vers un système de distribution électrique en courant continu introduit un changement de paradigme dans l’alimentation électrique, ajoutant ainsi à la complexité existante. Le passage au DC présente certaines limites en termes de capacité. Ces limitations découlent principalement des contraintes techniques des convertisseurs AC/DC lorsqu’un système est connecté au réseau électrique principal, ainsi que d’autres limitations lorsqu’un système n’est pas connecté au réseau, telles que la capacité des batteries ou la capacité de production locale, comme l’énergie solaire photovoltaïque (PV) ou l’énergie éolienne. Dans un système de distribution en courant alternatif (AC), la stabilité du réseau est généralement assurée par le fournisseur d’électricité, ce qui n’est pas le cas dans un réseau de distribution en courant continu. La stabilité du bus DC est un point critique, car un déséquilibre entre la production et la consommation d’énergie peut entraîner une défaillance du système d’alimentation. De nombreux travaux de recherche ont été réalisés sur l’équilibre et le contrôle pour garantir la stabilité du bus DC dans le cadre d’un système de distribution décentralisé.

De plus, des études de recherche distinctes ont exploré les domaines des algorithmes visant à améliorer l’efficacité énergétique. Parmi ces approches, on peut citer les algorithmes d’optimisation qui reposent sur des méthodes de contrôle prédictif, communément désignés sous l’acronyme MPC (Model Predictive Control). [23, 24, 25, 26], On trouve aussi, des algorithmes génétiques (GA) [27, 28, 29, 30], des algorithmes d’optimisation par essaims de particules (PSO)[31], des algorithmes de décalage de charge (Load shifting) [32, 33], etc. La contribution de cette thèse réside dans une approche globale qui vise à assurer à la fois la stabilité du bus DC et l’optimisation énergétique du système. Cette approche cherche à équilibrer la production et la consommation d’énergie de manière optimale, en prenant en compte les contraintes de stabilité et les objectifs d’efficacité énergétique.

Ce travail de recherche vise à résoudre les défis spécifiques liés à la stabilité et à l’optimisation dans les réseaux de distribution DC. Il cherche à développer des stratégies de contrôle et des algorithmes d’optimisation avancés qui permettent d’assurer un fonctionnement fiable et efficace du système tout en maximisant l’utilisation des sources d’énergie renouvelable et en minimisant les pertes d’énergie.

Cette thèse apporte deux contributions principales. Premièrement, il introduit des technologies de communication et de distribution électrique comme le PoE et le PoDL dans le bâtiment. Deuxièmement, il propose une approche complète qui intègre à la fois la stabilité du bus DC et l’optimisation énergétique dans le système de distribution.

L’approche proposée se base sur un système de communication très réactif entre les différents acteurs sur le bus DC. Cela permet d’assurer la stabilité du bus d’une part et la sécurité des biens et des personnes d’autres part. L’approche est également basée sur un système multi-agent coopératif qui permet de prendre des décisions globales ou locales en fonction des contextes. Cette approche permet d’exploiter au mieux les avantages du réseau

de distribution DC tout en garantissant un fonctionnement stable et une utilisation efficace de l'énergie. L'introduction de technologies de communication et de distribution électrique comme le PoE et le PoDL dans le bâtiment permet de créer un système de distribution plus efficace et plus flexible. Le PoE permet d'alimenter les appareils électriques via le réseau Ethernet, tandis que le PoDL permet une communication IP et l'injection de puissance en exploitant l'infrastructure électrique. L'approche complète qui intègre à la fois la stabilité du bus DC et l'optimisation énergétique dans le système de distribution permet d'assurer un fonctionnement stable du réseau et une utilisation efficace de l'énergie. Le système de communication très réactif permet de détecter rapidement les perturbations sur le bus DC et d'y réagir de manière appropriée.

Le prochain chapitre (2) se divise en deux parties. Dans la première partie, nous aborderons l'étude et la présentation des technologies PoE et SPE/PoDL, qui nous permettront d'obtenir une flexibilité significative dans la gestion et le contrôle de diverses charges sur notre micro-réseau DC. De plus, ces technologies nous offriront une réduction considérable de l'énergie grise. Dans la deuxième partie, nous proposons une architecture basée sur deux niveaux de tension : 380 VDC pour la distribution et 56 VDC pour les systèmes PoE et SPE/PoDL. Le troisième chapitre (3) traite de l'état de l'art et de l'étude menée sur les protocoles de communication, ainsi que du choix d'adopter le protocole DDS pour cette application. Le quatrième chapitre (4) explore l'état de l'art en ce qui concerne les algorithmes d'optimisation et les méthodes utilisées dans la régulation d'un micro-réseau DC. Il aborde également les deux algorithmes d'optimisation proposés, ainsi que le système multi-agent mis en place pour le contrôle/commande de l'ensemble, en détaillant la modélisation des interactions entre les agents sous contraintes temps réel. De plus, il présente la méthode proposée pour optimiser les latences des actions des différents agents développées. Enfin, le dernier chapitre 5 conclut ce travail en résumant les résultats obtenus et en discutant des perspectives futures.

# Chapitre 2

## Architecture de distribution électrique DC

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>16</b>
<b>2.2</b>	<b>Les technologies PoE et PoDL</b>	<b>16</b>
2.2.1	La technologie PoE	16
2.2.2	La technologie SPE/PoDL	22
<b>2.3</b>	<b>Les micro-réseaux DC</b>	<b>25</b>
2.3.1	Les normes associées aux micro-réseaux DC	26
2.3.2	Les niveaux de tensions dans les micro-réseaux DC	27
2.3.3	La conversion de tensions	28
2.3.4	Les structures de distribution DC	29
2.3.5	La protection des réseaux DC	32
<b>2.4</b>	<b>Les systèmes d'alimentation de Classe 4</b>	<b>34</b>
2.4.1	Aperçu des circuits de puissance de classe 4	35
2.4.2	La sécurité	36
2.4.3	Les défis pour les systèmes d'alimentation de classe 4	36
2.4.4	Exemple de système de classe 4	37
<b>2.5</b>	<b>Une nouvelle architecture décentralisée 380 VDC et PoE/PoDL</b>	<b>38</b>
2.5.1	Présentation	38
2.5.2	Le système PoE pour les charges à faible puissance	40
2.5.3	Le routage d'énergie entre les Smart Nodes et les drivers	41
2.5.4	Résultats et interprétations	42
<b>2.6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>46</b>

---

## 2.1 Introduction

Dans le contexte des défis climatiques et énergétiques, il devient essentiel de réduire la consommation d'énergie dans tous les secteurs, en particulier celui du bâtiment. Une approche prometteuse pour maîtriser cette consommation est la gestion intelligente de la demande, notamment grâce au pilotage des charges. De plus, l'utilisation de solutions de stockage local pourrait compenser l'intermittence de la production d'énergie renouvelable. Ces approches visent à établir un équilibre entre la production et la demande, et elles constituent une alternative à la complexification des micro-réseaux électriques internes. La première partie de ce chapitre se concentre sur l'étude et la présentation des technologies PoE et SPE/PoDL, qui offrent une flexibilité importante pour le contrôle de différentes charges sur notre micro-réseau en courant continu. De plus, elles permettent une réduction significative de l'énergie grise. Dans la deuxième partie, nous proposons une architecture basée sur deux niveaux de tension : 380 VDC pour la distribution et 56 VDC pour les systèmes PoE et SPE/PoDL.

## 2.2 Les technologies PoE et PoDL

Dans le domaine des bâtiments intelligents et de l'efficacité énergétique, les technologies PoE (Power over Ethernet) et PoDL (Power over Data Lines) jouent un rôle de plus en plus important. Ces technologies offrent une solution novatrice pour la distribution de l'énergie électrique, permettant d'alimenter non seulement les dispositifs de communication, mais également les appareils et les équipements dans les bâtiments. Dans cette introduction, nous explorons la technologie PoE et la technologie SPE/PoDL, en mettant en évidence leurs caractéristiques, leurs champs d'applications et leur impact sur le secteur du bâtiment.

### 2.2.1 La technologie PoE

La technologie PoE, ou alimentation électrique par câble Ethernet, utilise les câbles Ethernet RJ45 pour alimenter en électricité les équipements PoE en même temps que la transmission des trames Ethernet.

Depuis la ratification de la première norme PoE en 2003, l'utilisation du PoE a considérablement augmenté et couvert de nouvelles applications. PoE offre d'énormes avantages en termes de facilité d'installation, d'économie des dépenses d'investissement, des dépenses d'exploitation, et fournit une norme d'alimentation unifiée et sûre pour une utilisation dans le monde entier. Le principal facteur limitant l'utilisation du PoE dans les nouvelles applications est la quantité d'énergie disponible. Alors que 15,4 W à la source d'alimentation est suffisante pour la plupart des téléphones IP et des points d'accès 802.11a / b / g, elle n'est pas suffisante pour les visiphones IP, 802.11n et les caméras IP. Pour cette raison, l'Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens, ou IEEE, a publié la norme IEEE 802.3at en 2009, spécifiant 30 W à la source PoE. En 2019, l'IEEE 802.3bt a été publié en tant que standard PoE, ce dernier autorise une augmentation de la puissance fournie via Ethernet afin de prendre en charge davantage d'appareils connectés au réseau Ethernet. Ces appareils incluent notamment les terminaux de points de vente, les points d'accès 802.11ac et 802.11ax, ainsi que les dispositifs d'éclairage LED connectés (Figure 2.1).

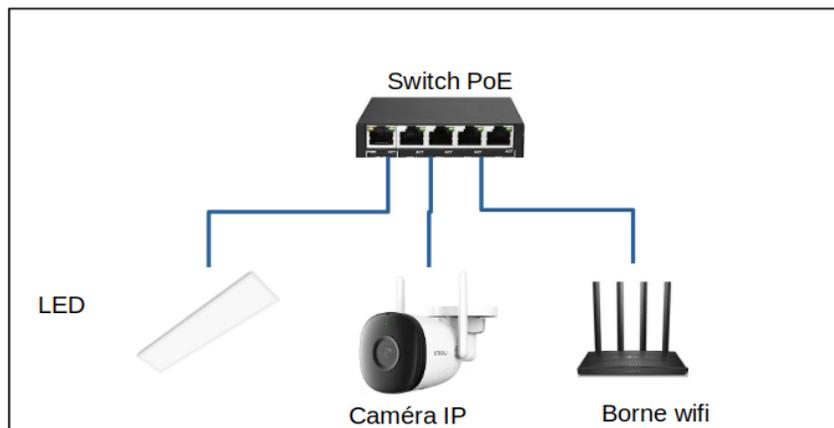


FIGURE 2.1 – Système PoE

Le tableau 2.1 présente les diverses normes PoE ainsi que leurs spécifications respectives.

TABLEAU 2.1 – Les différentes normes de la technologie PoE

Désignation	Norme	Puissance fournie à l'appareil PD	Puissance max. par port	Nombre de paires	Appareils supportés
PoE	IEEE 802.3af	12.95 W	15.4 W	2 paires	Caméras de surveillance statiques, téléphones VoIP (Voice Over Internet Protocol), points d'accès sans fil...
PoE+	IEEE 802.3at	25.5 W	30 W	2 paires	Caméras de surveillance , téléphones IP vidéo, systèmes d'alarme
PoE++	IEEE 802.3bt (Type 3)	51 W	60 W	4 paires	Équipement de vidéoconférence, points d'accès sans fil multiradio
PoE++	IEEE 802.3bt (Type 4)	71.3 W	90 W	4 paires	Ordinateurs portables, écrans plats

### La norme IEEE 802.3bt

La nouvelle norme IEEE 802.3bt augmente la puissance PoE maximale disponible principalement en utilisant les quatre paires de câblage structuré. IEEE 802.3bt étend les informations de classification de puissance échangées lors de la négociation initiale permettant une capacité de gestion de l'alimentation significative pour la prise en charge de plusieurs

classes PoE, tout en assurant une compatibilité descendante. Ces améliorations résolvent le défi des systèmes d'alimentation PoE plus puissants et plus efficaces.

Le premier appel à manifestation d'intérêt de l'IEEE 802.3bt a commencé début 2013 et la ratification de la norme a eu lieu en septembre 2018. La nouvelle norme répond aux besoins existants du marché et est considérée comme un catalyseur majeur de la croissance du marché PoE, car elle facilite l'expansion des cas d'utilisation PoE en repoussant la limite de puissance des équipements d'alimentation PSE (Power Sourcing Equipment) et appareils alimentés PD (Powered Device) à 90 W. Un système PoE comprend généralement un PSE chargé d'injecter de la puissance et un PD destiné à recevoir cette puissance. La figure 2.2 présente une illustration courante de la configuration d'un système PoE. Le standard PoE définit des procédures obligatoires, telles que la signature et la classification, qui doivent être effectuées avant que le PSE ne commence à injecter de la puissance.

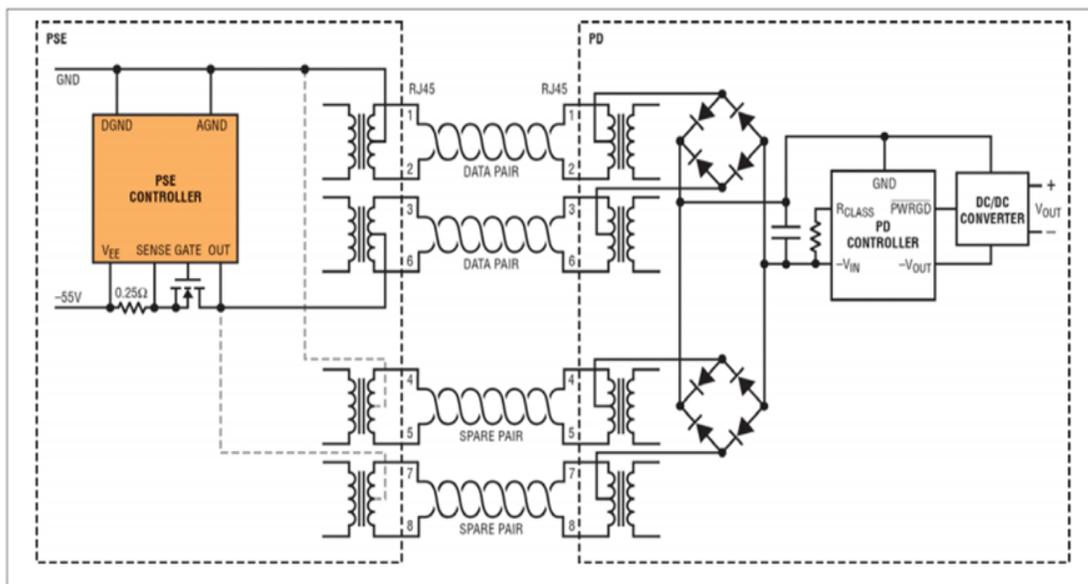


FIGURE 2.2 – Composition typique d'un système PoE [34]

## Classification

La capacité d'un équipement d'alimentation PSE à interroger un dispositif alimenté PD afin de déterminer les besoins en énergie de ce PD est appelée classification. La fonction de classification de l'alimentation est destinée à établir une identification mutuelle et peut également être utilisée pour des fonctions avancées telles que la gestion de l'alimentation. La négociation de la classification se fait à des niveaux de tension (entre 15 V et 20 V) et de courant (entre 50 mA et 100 mA) sûrs et faibles. Les tensions et les courants associés au PoE ne sont pas appliqués tant que le processus de négociation de la classification PSE-PD n'est pas terminé. Les dispositifs alimentés de type 1, 2, 3 et 4 tirent une tension d'entrée continue maximale de 57 V.

TABLEAU 2.2 – Les classes de puissance dans un système PoE

Power Class	1	2	3	4	5	6	7	8
PSE Power ( PoE )	4.0W	7.0W	15.4W	-				
PSE Power ( PoE+ )	4.0W	7.0W	15.4W	30.0W				
PSE Power ( PoE++ )					45W	60W	75W	90-100W

### Signature

La norme distingue deux types de PD à quatre paires : PD à signature unique et PD à double signature. La mise en œuvre de chaque alternative est illustrée dans les figures 2.3 et 2.4 suivantes.

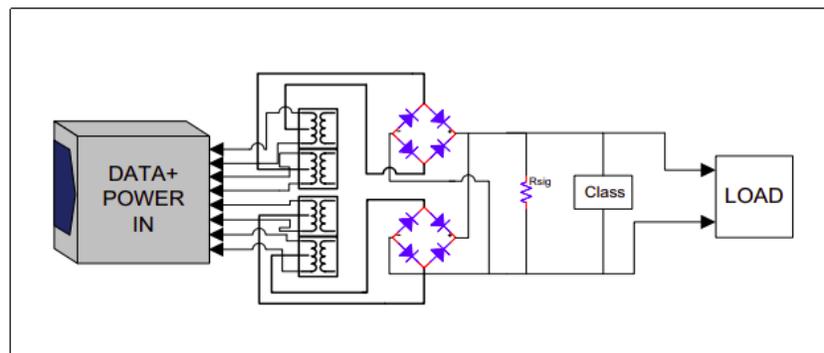


FIGURE 2.3 – PD à signature unique [34]

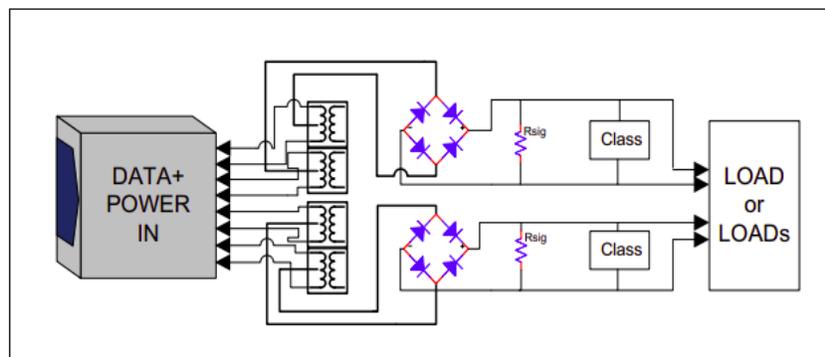


FIGURE 2.4 – PD à double signature [34]

Un PSE IEEE 802.3bt identifiera le type de PD et réglera la puissance en conséquence. En fonction de la nature de l'application, les PD à signature unique ou à double signature

peuvent être mis en œuvre. La prise en charge des deux architectures est idéale, car elle permet d'obtenir plus d'applications devant être alimentées par le PoE. Les PD à double signature permettent de supporter deux charges indépendantes, chacune avec une classe de puissance, par exemple, dans une caméra de surveillance construite avec un PD à double signature, une paire peut être connectée à la caméra et l'autre paire peut être exploitée par une autre application.

### Autoclasse

la norme IEEE 802.3bt introduit une nouvelle fonctionnalité appelée autoclasse. L'autoclasse permet à un PD de tirer la puissance maximale qu'il consommera peu de temps après la mise sous tension. Le PSE mesure la puissance réelle que le PD consommera et ajuste l'allocation de puissance en conséquence. Par exemple, un PD peut demander une puissance de classe 8 (90 W), mais ne consommer que 80 W dans l'application réelle. En utilisant autoclasse, le PSE mesure la consommation réelle du PD et dispose de 10 W de puissance supplémentaire à fournir à d'autres PD dans le système. Bien qu'il ait été introduit dans les normes PoE précédentes, le protocole de découverte de la couche de liaison (LLDP) est encore plus complexe à mettre en œuvre. Depuis de nombreuses années, les réseaux Ethernet utilisent le protocole LLDP pour permettre aux commutateurs et aux routeurs de découvrir divers détails du système en communiquant sur la couche de données à l'aide de paquets LLDP spéciaux. Le PoE ajoute une extension au LLDP pour que le PSE et le PD communiquent également des informations via des paquets LLDP. L'une des principales caractéristiques de LLDP est la capacité du PSE et du PD à renégocier la puissance par incréments d'un dixième de watt, ce qui permet de libérer de la puissance pour le PSE ou d'accorder un peu plus de puissance au PD.

### Câbles et standards

Pour augmenter la puissance disponible pour les PD, il est nécessaire d'augmenter le courant circulant dans le câblage (600 mA pour le PoE+ contre 350 mA pour le PoE, sur deux paires), ce qui fait chauffer le câblage et donc dégrade les performances de transmission de l'information. Par conséquent, pour limiter cette dégradation, il a été décidé que l'augmentation de la température au cœur d'un brin de 100 câbles, tous alimentés par PoE+, ne devait pas dépasser 10°C, ce qui a permis de définir la limite des 600 mA. C'est le comité ISO (International Standard Organisation), qui normalise depuis 1995 les catégories de câblage, qui a réalisé des tests en laboratoire et publié un rapport technique sur le sujet. Ce rapport intitulé ISO TR 29125 "Telecommunications cabling requirements for remote powering" ("VDI cabling requirements for remote powering") indique que : plus la catégorie d'un câble augmente, plus le diamètre de ses conducteurs augmente et, par conséquent, ses performances thermiques s'améliorent en raison de l'augmentation du nombre de conducteurs. Les performances thermiques s'améliorent en fait en raison de la diminution de la production de chaleur. Plus le nombre de câbles dans un toron est élevé, plus la production de chaleur est importante. Ces deux points sont illustrés dans le tableau 2.3 :

La norme PoE++ (90 W) transmet jusqu'à 1700 mA, sur 4 paires. Cela dit, la norme de câblage pour le support de l'alimentation sur quatre paires "TSB-184-A" (Telecommunications Systems Bulletin) recommande que les températures d'un câble ne dépassent pas 15°C

TABLEAU 2.3 – IEEE 802.3at/af : Élévation de la température dans les faisceaux de câbles sur toutes les paires (°C)

Nombre de câbles dans le faisceau /Catégorie	CAT 5	CAT 6	CAT 6A	CAT 7	CAT 7A
1	0.8	0.6	0.6	0.6	0.6
7	1.4	1.1	1.0	1.0	0.9
19	2.6	2.1	1.8	1.8	1.6
37	4.7	3.7	3.2	3.2	2.9
61	6.9	5.5	4.8	4.8	4.4
91	9.7	7.7	6.7	6.7	6.2
127	13.1	10.4	9.0	9.0	8.3

au centre du faisceau. Les facteurs qui contribuent à l'élévation de la température sont :

- la taille du faisceau (nombre des câbles),
- le courant circulant dans les paires de fils et le nombre de paires sous tension,
- le calibre des câbles.

La norme ANSI/TIA-568.2-D publiée par l'association de l'industrie des télécommunications (TIA) reconnaît officiellement les cordons de raccordement de 28 AWG comme étant conformes aux normes et sûrs pour toutes les normes PoE, à condition que la taille du faisceau soit inférieure à 100 câbles.

### Les avantages de la technologie PoE dans l'écosystème du bâtiment

Le PoE a donc des avantages en termes d'économies, de contrôle, de sécurité et de fiabilité. Les principaux avantages du PoE sont décrits ci-dessous.

#### 1. Economies de coûts

L'un des plus grands avantages de la technologie PoE est la réduction des coûts. L'installation de PoE est moins chère que les travaux électriques traditionnels, les coûts d'exploitation sont plus faibles au cours de la durée de vie du PoE et les données peuvent éclairer les décisions ultérieures pour réduire les coûts, tout cela sans sacrifier la qualité de l'éclairage pour les utilisateurs.

#### 2. Une installation basse tension facile

Comme le PoE est une option d'alimentation à basse tension (maximum 56 V), les installations ne nécessitent pas de conduit ou de revêtement métallique. Cela rend les installations plus rapides, réduit les risques associés aux travaux électriques typiques et réduit considérablement le coût global de l'installation.

#### 3. Flexibilité et contrôle accrus

Une fois installés, les dispositifs contrôlés par PoE peuvent être déconnectés, déplacés et reconnectés à un nouveau système PoE avec un temps d'arrêt minimal. En outre, les utilisateurs ont un meilleur contrôle sur les écosystèmes de leurs bâtiments car les données du réseau circulent entre tous les appareils connectés. Une seule application peut être utilisée pour gérer et contrôler d'innombrables appareils individuels et environnements personnalisés...

#### 4. Analyse des données

Les données donnent vie à la technologie des bâtiments intelligents, permettant de collecter des informations et d'effectuer des optimisations intelligentes. Comme les données circulent dans les deux sens sur un câble Ethernet, le logiciel PoE n'envoie pas seulement des données et des commandes aux appareils, mais il collecte également des données provenant des appareils pour fournir des informations utiles, des économies supplémentaires et des possibilités d'améliorer la qualité de vie des occupants.

#### 5. Avantages sociaux

En plus d'avoir un intérêt commercial, l'éclairage PoE et d'autres technologies de construction intelligente peuvent apporter d'autres avantages aux occupants d'un bâtiment en optimisant les niveaux d'éclairage, en équilibrant les couleurs de la lumière et en renforçant la sécurité. En outre, les plateformes d'éclairage LED PoE réduisent considérablement les demandes d'énergie des lumières et des appareils connectés au système PoE, ce qui apporte des avantages environnementaux à la société tout en minimisant l'exposition d'un bâtiment aux fluctuations des coûts énergétiques.

#### 6. Robustesse, sécurité et fiabilité

Contrairement aux appareils qui dépendent de la technologie sans fil, le cordon Ethernet permet une grande flexibilité tout en maintenant un système connecté de manière fiable. Le PoE élimine le risque d'interruption de la connexion sans fil et permet aux utilisateurs d'activer des fonctions de sécurité supplémentaires.

### Faiblesses

La norme IEEE 802.3 a fixé la distance maximale du câble Ethernet pour alimenter les équipements distants afin de tenir compte des pertes induites par la résistivité du câble. Cette limitation physique tend à augmenter le coût total d'acquisition d'une infrastructure donnée par l'ajout de câbles supplémentaires, de commutateurs, d'intermédiaires, etc. pour atteindre les équipements distants. L'augmentation de la puissance entraîne une modification des matériaux utilisés pour fabriquer les câbles. Les matériaux utilisés pour les câbles et les connecteurs doivent suivre l'augmentation de la puissance.

### 2.2.2 La technologie SPE/PoDL

La technologie Power over Data Lines (PoDL) est très semblable à la technologie PoE avec le même principe de fonctionnement en injectant de la puissance sur les lignes de données. La configuration physique de la technologie SPE/PoDL est similaire à celle de la PoE, reposant sur un PSE et un PD pour le transfert d'énergie (Figure 2.5).

Cette technologie a été standardisée en 2016 afin de fonctionner avec la technologie Single Pair Ethernet (SPE) avec la norme 802.3bu. Cette technologie a été créée à l'origine pour le secteur automobile, mais avec l'émergence de la norme IEEE 802.3cg 10Base-T1 de la technologie SPE qui permet des transmissions sur des câbles allant jusqu'à 1000 m, cette technologie est devenue pertinente pour le secteur de la construction et du bâtiment.

#### SPE (Single Pair Ethernet)

SPE est une technologie qui permet la transmission de données par réseau Ethernet avec seulement une paire de conducteurs tout en permettant l'alimentation électrique des périphé-

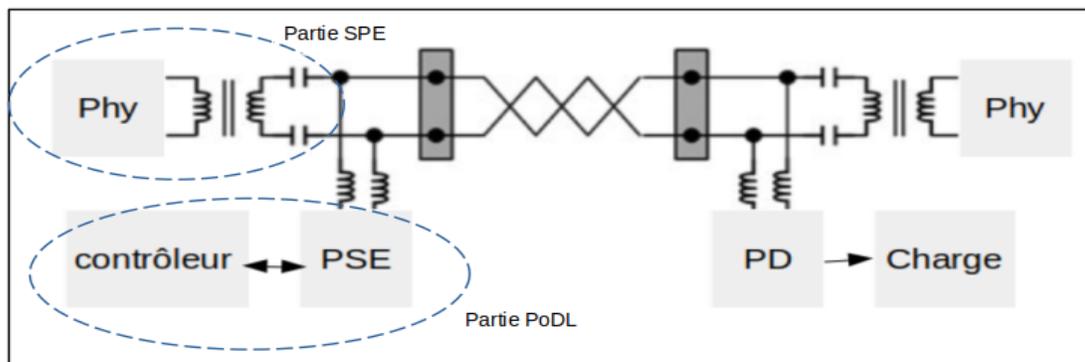


FIGURE 2.5 – Structure physique de la technologie PoDL

riques via la technologie PoDL. Sur la base des nouvelles normes IEEE 802.3, la technologie SPE s’immerge dans le monde de l’automobile et de la robotique afin de remplacer les systèmes classiques utilisés tel que le bus CAN, LIN, etc.

Le système SPE présente plusieurs avantages :

- Compatibilité avec la norme IEEE 802.3 : le Single Pair Ethernet permet une communication homogène, basée sur Ethernet du capteur jusqu’au cloud.
- Intégratif : Utilisation de câblage existant et de l’infrastructure déjà en place.
- Flexible : Utilisation transversale des applications, grâce à des portées jusqu’à 1000 m et des débits de transmission jusqu’à 1 Gbit/s.
- Économique et écologique : réduction du poids et de matière en passant de 4 paires à une seule paire.

Les spécifications et les normes de la technologie SPE sont présentées dans le tableau 2.4.

TABLEAU 2.4 – Spécifications des normes de la technologie SPE.

Protocole	Standard IEEE	Débit	Distance	Structure	Publication
100Base-T1	802.3bw	100 Mbit/s	15 m	pp (point à point)	2015
1000Base-T1 Type A	802.3bp	1000 Mbit/s	15 m	pp	2016
1000Base-T1 Type B	802.3bp	1000 Mbit/s	40 m	pp	2016
10Base-T1L	802.3cg	10 Mbit/s	1000 m	pp	2020
10Base-T1S	802.3cg	10 Mbit/s	15 m	pp	2020
10Base-T1S	802.3cg	10 Mbit/s	25 m	multipoint	2020

### Power over Data Lines (PoDL)

La technologie PoDL est approuvée par le Conseil des normes de l'IEEE-SA le 7 décembre 2016. Cette norme définit la méthodologie de l'injection de la puissance électrique via une seule paire torsadée vers l'équipement terminal de données connecté avec des interfaces IEEE 802.3. La technologie PoDL comme la technologie SPE est destinée au déploiement dans les secteurs de l'automobile, de l'automatisation industrielle, du transport et d'autres environnements qui utilisent les protocoles 10Base-T1, 100Base-T1, 1000Base-T1 ou tout autre protocole de données sur une seule paire. La structure physique de la technologie PoDL est comparable à celle de la PoE, elle est basée sur un PSE et un PD pour l'échange de l'énergie.

Le PSE teste la liaison en cherchant la diode Zener de 4 V avec un courant de 10 mA, c'est la phase de détection qui teste l'existence d'un PD à l'autre bout de la ligne avant l'injection de courant. Après cette phase, une phase de classification se déroule entre le PSE et le PD via le protocole Serial Communications Classification Protocol (SCCP) afin de déterminer la classe de PD et la puissance à injecter.

Le tableau 2.5 présente les classifications de puissance au dispositifs alimentés par PoDL :

TABLEAU 2.5 – Les différentes classes des PD.

Classe	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Tension (V)	5.5- 18	5.5- 18	14- 18	14- 18	12- 36	12- 36	26- 36	26- 36	48- 60	48- 60	20- 30	20- 30	20- 30	50- 58	50- 58	50- 58
Courant (A)	0.1	0.22	0.25	0.47	0.1	0.34	0.21	0.46	0.73	1.3	0.092	0.240	0.632	0.231	0.600	1.579
Puissance PD (W)	0.5	1	3	5	1	3	5	10	30	50	1.32	3.2	8.4	7.7	20	52

Le couplage physique classique du SPE et du PODL est illustré dans la figure 2.6. Le PSE injecte le courant à travers les deux inducteurs L1 et L2, les deux condensateurs C1 et C2 couplent la couche physique Ethernet (SPE) à la ligne et la self de mode commun (Common Mode Chokes (CMC) 1) pilote le signal et le niveau de puissance. Les inducteurs L3 et L4 sont utilisés du côté du PD pour alimenter la charge, et le CMC 2 filtre le niveau de bruit [35]. Le couplage physique classique du SPE et du PODL est illustré dans la figure 2.6. Le circuit de couplage PoDL a un impact crucial sur les paramètres opérationnels des applications SPE. Il doit répondre à de nombreuses exigences contraires et difficiles, qui affectent :

- la qualité de la liaison (par exemple la perte de retour, l'équilibre),
- les paramètres liés à la puissance (pertes, courant et tension maximaux),
- la température nominale et choix des composants.

Le choix des différents composants utilisés dans le circuit de couplage de puissance est une tâche minutieuse. Par exemple, les inductances de couplage doivent avoir à la fois une inductance suffisante pour répondre à l'exigence RL minimale aux basses fréquences de fonctionnement et une (SRF) suffisamment élevée pour répondre à l'exigence RL minimale en fonctionnement à hautes fréquences [36, 37, 38]. Un autre problème lié au couplage PoDL est la self CMC, car le couplage typique (figure 2.7) n'est pas adapté aux nouvelles classes PoDL qui autorisent des puissances plus élevées et donc des courants plus importants. Le CMC

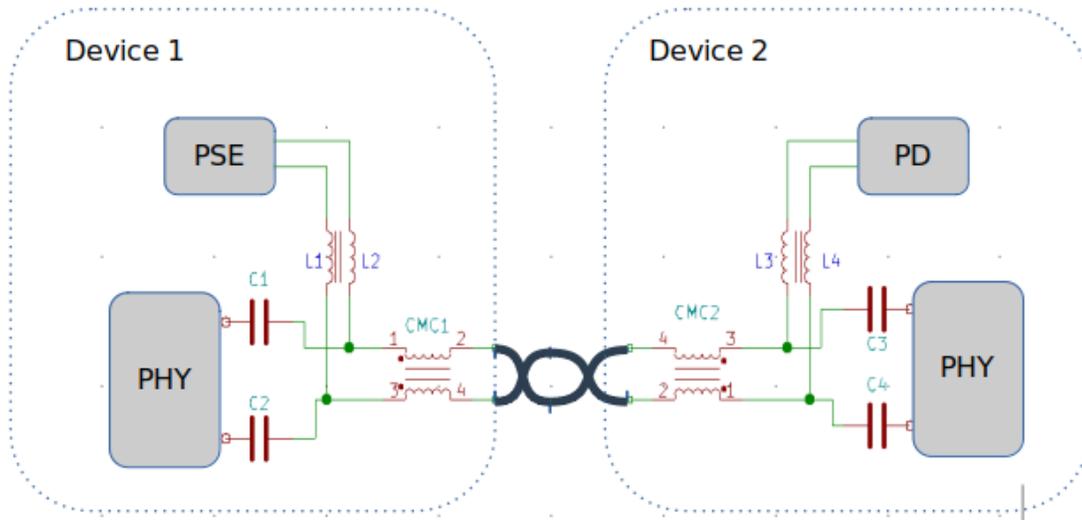


FIGURE 2.6 – Structure typique de couplage SPE/PoDL

typique utilisé pour Ethernet ne peut pas supporter plus de 130 mA à cause de la chaleur et de la saturation. La solution n'est pas de faire passer le courant nécessaire au PD par la self CMC, mais d'utiliser une autre méthode de couplage pour un échange de puissance plus important (Figure 2.7).

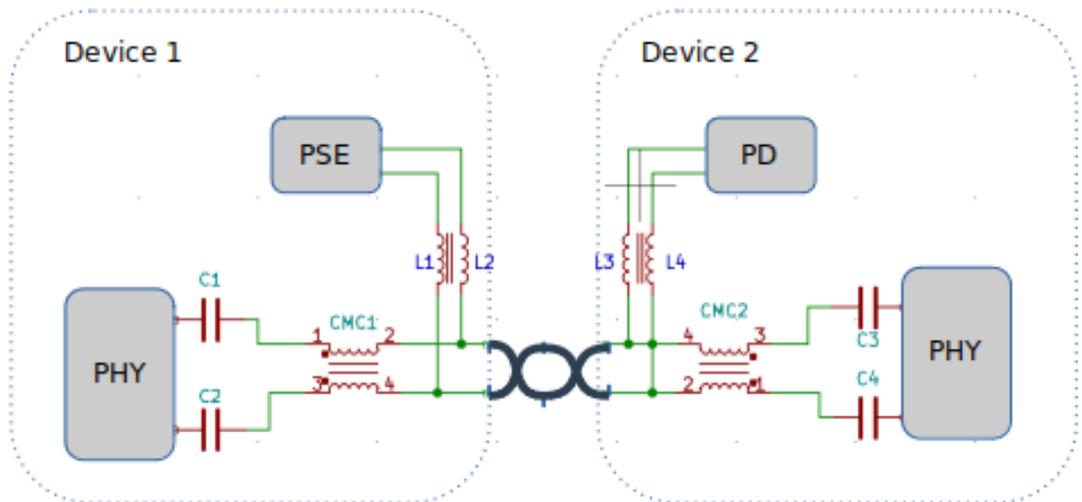


FIGURE 2.7 – Nouvelle structure de couplage SPE/PoDL

## 2.3 Les micro-réseaux DC

L'idée de mélanger des sources variables de production et de stockage dans un bâtiment, un groupe de maisons voire un quartier, dans un micro-réseau, est une idée forte qui émerge depuis 2002 avec pour objectif une réponse à la demande énergétique. Ces micro-réseaux

peuvent se connecter au réseau électrique des fournisseurs d'énergie (grid-connected) ou se mettre hors réseau et fonctionner de manière autonome (off-grid). Nous avons vu précédemment que nous pouvons distinguer deux types de micro-réseaux : les micro-réseaux fonctionnant en courant alternatif (AC) et les micro-réseaux fonctionnant en courant continu (DC). Dans la suite, nous nous intéressons qu'aux micro-réseaux DC.

Un micro-réseau DC a en effet l'avantage d'être beaucoup plus simple à réaliser et à commander autour de la tension d'un bus commun. Le micro réseau DC relie sur un bus commun des générateurs avec une interface d'équilibrage de la tension DC. La commande est une régulation qui permet de maintenir une tension constante sur le bus afin de maintenir l'équilibre entre la production et la consommation (demande/réponse). La méthode de régulation la plus utilisée, 'Droop control', repose sur une mesure et une correction de la tension du bus sur un élément du réseau [39]. Cette méthode de régulation relativement simple présente des inconvénients majeurs, notamment le manque de résilience en cas de fort appel de courant surtout quand il n'y a pas de lien de communication entre les éléments [40]. Pour pallier ce problème, certains auteurs proposent d'ajouter des appareils intermédiaires de mesure et de correction appelés 'controllers' ajoutés sur le ou les bus du micro-réseau [41]. Les 'controllers' sont reliés entre eux par un réseau de communication pour échanger leurs données. La problématique d'équilibrage de ces 'controllers' est aujourd'hui un domaine étudié avec la recherche d'algorithmes d'optimisation globale [42]. L'un des inconvénients majeurs de la boucle de régulation 'Droop control' est qu'il n'est pas possible de coordonner des composants de production, de consommation ou de stockage selon des scénarios d'usage (jour, nuit, écrêtage de la demande sur le réseau d'énergie, tarifs d'achat/tarif de vente...). Il n'est pas prévu dans ce type de boucle de privilégier un scénario tel que par exemple le stockage ou la décharge suivant les périodes de la journée ou en fonction de l'état de charge des batteries.

En outre, il y a la question de la sécurité des individus en raison de l'absence d'équipements de protection différentielle analogiques, tels qu'on en trouve dans les systèmes en courant alternatif. De plus, il est essentiel de mettre en place des mécanismes de détection et d'élimination des défauts sur le bus DC afin de maintenir la continuité du service et d'assurer la fiabilité du système. L'objectif principal est de concevoir un système capable de résoudre tous ces problèmes tout en garantissant l'objectif initial d'obtenir un bilan énergétique positif global. Cela nécessite un contrôle individuel ainsi qu'un échange d'informations entre tous les équipements, dans le but d'équilibrer la tension et la puissance du bus de puissance tout en assurant la sécurité des biens et des personnes.

### 2.3.1 Les normes associées aux micro-réseaux DC

Les micro-réseaux DC sont en pleine expansion, mais de nombreuses étapes doivent encore être franchies pour une adoption massive de ces technologies. Si l'on met de côté les problèmes de sécurité, la standardisation est une barrière qui doit être franchie. Le standard européen ETSI EN 300 132-3-1 offre un cadre pour des installations avec une tension DC inférieure à 400 VDC [43]. L'alliance Emerge (USA) est une association d'industriels qui promeuvent les micro-réseaux DC dans les immeubles tertiaires et les datacenters [44].

L'alliance a ébauché une norme qui utilise une tension de base de 380 VDC pour le bus principal. C'est de loin la norme la plus prometteuse. Récemment, le comité IEEE DC@Home a réuni un groupe d'experts des micro-réseaux dans le but de faire émerger aussi un standard.

Le NEC (National Electrical Code) américain, homologué à notre C15-100, inclut des chapitres complets pour l'utilisation d'un bus DC pour les micro-réseaux [45]. La norme IEEE 1547 peut s'appliquer dans le cas des micro-réseaux DC. Initialement prévu pour l'AC, ses principes font référence dans le monde des micro-réseaux.

### 2.3.2 Les niveaux de tensions dans les micro-réseaux DC

Dans l'ensemble du bâtiment tertiaire, les tensions qui apparaissent le plus souvent en DC sont 12 V, 24 V et 48 V. A partir de 380 V voire plus on les retrouve le plus souvent en sortie des panneaux photovoltaïques. La tension dépend du cas d'usage et de l'application. Dans les études qui ont été menées par [46], on peut avoir plusieurs bus DC dans un bâtiment. On s'aperçoit que ce type de distribution est inapproprié à notre étude en effet en augmentant la quantité de câble, les pertes au niveau du câble augmenteront ainsi que son prix.

C'est dans cette optique d'optimisation que nous avons cherché à déterminer une tension et donc un bus unique qui pourrait être standardisé pour la distribution en courant continu. On observe plusieurs études qui répondent à cette problématique. Parmi celles-ci, la publication [46] présente une étude comparative de différentes architectures de distribution en courant continu et des structures de bus DC. La sélection du niveau de tension est également discutée pour maximiser l'efficacité des systèmes et accroître leur flexibilité. Une partie de l'étude se penche sur différents niveaux de tension continue dans le but de déterminer une tension capable d'alimenter l'ensemble des terminaux, ce qui permettrait de regrouper tous les convertisseurs DC/DC en un seul dispositif. L'étude montre également que plus la puissance d'emploi est grande, meilleure sera le rendement du convertisseur.

Lorsqu'il s'agit de choisir une tension pour un système de distribution, une tension de 700 VDC ou  $\pm 350$  VDC semble être la plus adaptée pour maximiser l'efficacité énergétique. Cependant, il est important de noter que cette solution présente des risques considérables en termes de sécurité. De plus, la Commission internationale d'électrotechnique (IEC - International Electrotechnical Commission) classe les basses tensions (BT) et très basses tensions (TBT) en plusieurs ensembles, et chaque ensemble de tensions est associé à des applications précises. Pour des tensions inférieures ou égales à 60 VDC, des puissances allant jusqu'à 100 W peuvent être gérées. Ces tensions sont couramment utilisées pour l'éclairage, la ventilation, les actionneurs dans les systèmes automatisés, ainsi que dans les circuits de commande en courant alternatif. Elles sont également utilisées dans des technologies combinant communication et alimentation électrique, comme le PoE, le PoDL et l'USB-C.

Dans la plage de tensions de 60 à 230 VDC, on retrouve des applications telles que l'alimentation des bureaux et des micro-réseaux en courant continu, notamment dans les régions isolées. Pour des tensions situées entre 350 et 450 VDC, on trouve des charges typiques de l'industrie légère, des centres de données, des véhicules électriques, etc. Les puissances gérées dans cette plage peuvent atteindre jusqu'à 500 kW.

Les standards PoE sont multiples selon les classes et les puissances allant de 4 W jusqu'à 90 W avec la norme la plus récente IEEE 802.3bt [8]. De même pour le PoDL, on distingue

différentes normes selon les classes et les puissances allant de 0.5 W jusqu'à 52 W avec la norme 802.3bu [9]. Les systèmes de distribution PoE et PoDL sont dédiés à l'alimentation des charges à moyenne/faible consommation  $< 100$  W. Utiliser un système d'alimentation basé sur un seul niveau de tension ( $< 60$  VDC) semble inapproprié et inefficace vu les grandes pertes en lignes que cela va engendrer. En nous basant sur plusieurs études [14, 15, 16, 47, 48, 49, 50] pour le choix de niveau de tension pour notre architecture, nous avons choisi le 380 VDC pour ses avantages en termes de gain des câbles, sa capacité à alimenter des charges à moyennes et fortes puissances telles que les véhicules électriques et surtout la disponibilité des convertisseurs DC-AC-DC fonctionnant à ce niveau de tension.

### 2.3.3 La conversion de tensions

#### Les convertisseurs AC/DC

On les retrouve dans les terminaux fonctionnant en courant continu à l'exemple de l'éclairage led. Dans les petites puissances de l'ordre de 20 – 50 W, ils ont un rendement faible (70 – 80%) comparé au rendement des mêmes convertisseurs pour de plus grandes puissances (85 – 95%) [51]. Plusieurs fabricants proposent des convertisseurs AC/DC entre 15 W et 960 W avec de très hauts rendements mais ils sont un peu chers (2 à 3 fois plus chers). Ces convertisseurs peuvent être montés en série ou en parallèle afin d'augmenter le courant ou la tension pour atteindre de plus hautes puissances. Mais plus on associe de convertisseurs à un système plus le rendement global décroît.

#### Les convertisseurs DC/DC

Leur utilisation dans un réseau DC permettra d'injecter directement la production photovoltaïque dans la distribution du bâtiment en se passant de la conversion DC/AC. Ils pourraient également permettre d'assurer la liaison réversible entre batterie de stockage et bus de distribution. Leur rendement est fonction de la puissance transitée comme dans le cas du convertisseur AC/DC : plus la puissance transitée est importante, meilleure sera le rendement d'où l'intérêt de centraliser la conversion DC/DC. Leur rendement varie entre 80 et 98% [52]. Actuellement la limite maximale de puissance transitée dans ces convertisseurs est de 10 kW.

#### Les convertisseurs DC/AC

Malgré la convergence des terminaux vers un fonctionnement interne en courant continu, certains terminaux ne pourraient être alimentés par ce courant. Le convertisseur DC/AC permettra donc de revenir au courant alternatif en local. Deux scénarios apparaissent, une première distribution hybride constituée d'un bus DC pour les terminaux en courant continu et d'une distribution AC en local uniquement pour les terminaux en courant alternatif. Une seconde constituée d'un bus DC et d'une conversion en alternatif au plus près des terminaux. Le premier scénario n'est pas envisageable du fait des longueurs de câbles qui seront théoriquement le double du second scénario ce qui rajouterait significativement des coûts à l'installation. Cela implique donc l'utilisation de convertisseurs DC/AC à haut rendement dans le bâtiment. Contrairement aux convertisseurs DC/DC et AC/DC, les convertisseurs

DC/AC présentent une large gamme de puissances, diverses tensions d'entrée et des rendements pouvant atteindre 95%.

### 2.3.4 Les structures de distribution DC

Un système de distribution DC peut être considéré comme un bus DC connecté à diverses sources (le réseau AC, les énergies renouvelables et les systèmes de stockage d'énergie) et les charges (électronique, éclairage, variateurs de vitesse, etc.). Généralement, le réseau électrique en courant continu constitue la principale source d'approvisionnement en électricité. Cependant, dans certains scénarios, la présence de multiples producteurs et consommateurs d'électricité crée un véritable défi en ce qui concerne la sélection de la topologie et la configuration optimale du réseau [53]. Quatre structures de bus DC différentes sont décrites dans cette section [46]. La fiabilité, la sécurité et le coût sont les principaux facteurs pris en compte pour déterminer la structure du bus pour une demande de distribution.

#### La structure radiale

La structure de distribution radiale est la plus simple et la plus économique en termes de mise en œuvre. Le bus DC va d'une extrémité à l'autre, les sources et les charges étant connectées à n'importe quel endroit en fonction de leur emplacement, comme le montre la figure 2.8. La fiabilité du système est très faible par rapport aux autres bus car un défaut sur le bus DC entraînera l'arrêt de tout le système.

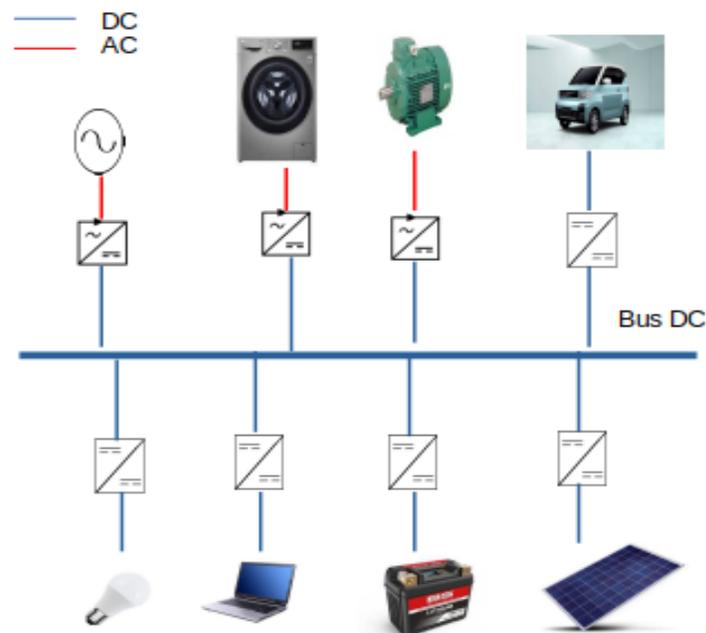


FIGURE 2.8 – La structure de distribution radiale

### La structure à cage

Dans cette structure, le bus DC a la forme d'une cage, cette structure augmente la fiabilité du système mais aux dépens d'un coût important.

Comme on peut voir sur la figure 2.9, lorsqu'un défaut se produit en un point quelconque du système, la zone en défaut du bus peut être isolée du reste du système à l'aide d'un dispositif de commutation approprié.

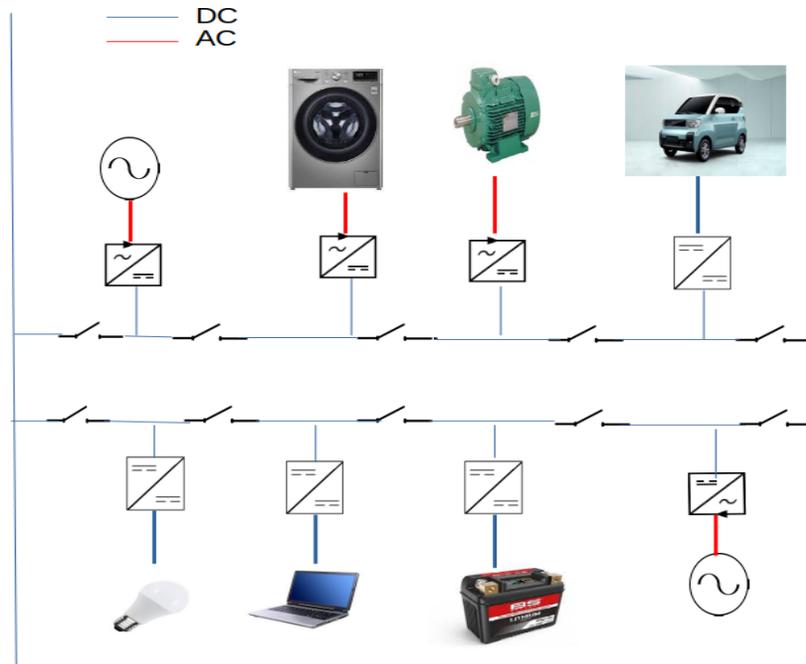


FIGURE 2.9 – La structure de distribution à cage

### La structure circulaire

Comme son nom l'indique, dans cette structure, le bus DC se présente sous la forme d'un anneau. Cette structure de bus est plus chère que la structure radiale car elle contient plus de cuivre. Comme le montre la figure 2.10, le bus DC est divisé en deux sections à l'aide d'un appareillage de commutation. Ainsi, lorsqu'il y a un défaut sur le bus DC, le dispositif de commutation peut être utilisé pour isoler le bus DC défectueux, assurant ainsi la continuité du fonctionnement sur les segments du système.

### La structure maillée

La structure de bus maillée illustrée à la figure 2.11 est une structure de bus en anneau modifiée obtenue lorsque de multiples structures en anneau sont réunies. La structure de bus maillée est la plus fiable par rapport aux trois autres structures. Cette structure est évidemment la plus coûteuse car elle nécessite plus de cuivre.

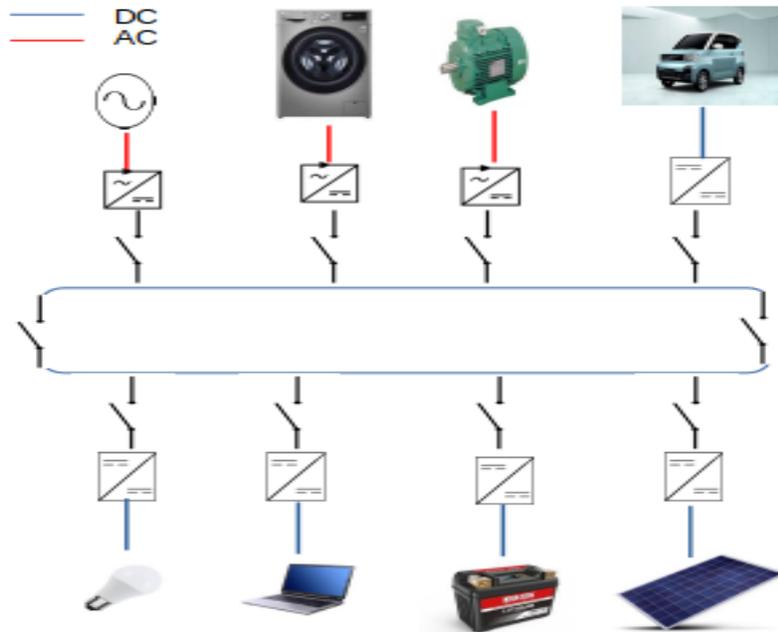


FIGURE 2.10 – La structure de distribution circulaire/en anneau

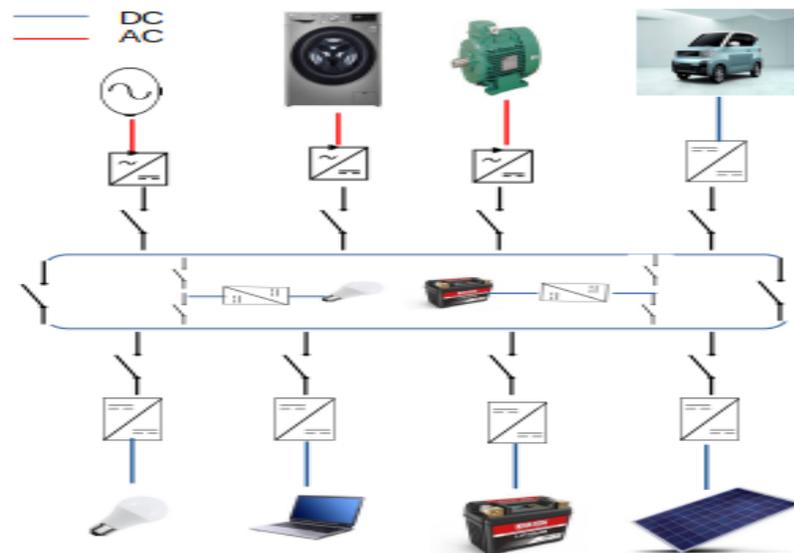


FIGURE 2.11 – La structure de distribution maillée

Comme il est clair, le coût d'une structure est proportionnel à sa fiabilité. Par conséquent, le choix de la structure du bus sera basé sur les niveaux de fiabilité et de criticité requis du système.

### 2.3.5 La protection des réseaux DC

Les équipements de protection des réseaux en courant continu sont la réelle problématique de ce type de distribution. En effet la contrainte se trouve autour du disjoncteur différentiel. On souhaite avoir la même structure de protection qu'en courant alternatif en utilisant des appareils qui protègent les personnes contre les contacts indirects conformément à la norme CEI/EN 61008 ou CEI/EN 61009. Cependant, en partant du principe que les parties actives dangereuses ainsi que les parties conductrices ne seront pas accessibles (faux planchés – faux plafonds) et qu'il n'y a pas de mise à la terre dans les réseaux DC, le Dispositif Différentiel à Courant résiduel (DDR) devient une mesure de protection complémentaire facultative.

Un micro-réseau DC est très sensible aux perturbations et aux défauts. Les perturbations sont dues principalement aux fluctuations de la charge, les variations de la puissance d'entrée, des changements dans les proportions de partage de la charge, les défaillances/retards de communication, les perturbations du réseau AC, etc. Ces facteurs peuvent se dégrader et sont considérés comme des défis techniques.

En fait, la régulation de la tension du bus DC est réalisée en contrôlant chaque convertisseur dans le bus DC, donc il faut bien considérer les stratégies de contrôle et les protocoles de communication utilisés.

#### La protection des personnes

Afin d'évaluer les exigences de protection et de sécurité des micro-réseaux DC, il est important de comprendre les effets du courant continu. L'effet d'un choc électrique dépend de l'intensité du courant, de sa durée, de l'impédance corporelle (qui dépend de conditions d'environnement, environnement sec, environnement humide et environnement salin), du cheminement du courant et du type de tension (AC ou DC).

Parmi tous les effets possibles du choc électrique, la fibrillation ventriculaire est la plus dangereuse. Par conséquent, afin d'éviter toute perte de vies humaines, une protection adéquate doit être assurée. La figure 2.12 présente une courbe caractéristique du courant corporel (DC et AC) en fonction de la durée du flux de courant selon l'IEC. Wang et al [54], ont conclu dans leur étude qu'à partir des tensions  $> 72$  V, le DC commence à être dangereux et la mise en place de dispositions de protection des personnes est indispensable.

Le grand problème aujourd'hui pour la protection des personnes en DC est l'inexistence d'équipements de protection différentielle analogique (mécanique).

Le graphique est divisé en quatre régions en fonction des effets sur le corps humain :

Dans les 2 premières régions (I et II) il n'y a aucun danger pour les personnes. Dans la 3ème (III) région, les conséquences pour l'homme peuvent être une contraction musculaire ou des problèmes respiratoires temporaires. Dans la dernière situation, (IV) les effets sont critiques et mortels.

#### La protection des appareils

Les dispositifs de protection tels que les disjoncteurs et les fusibles sont similaires pour les systèmes AC et DC. Cependant, dans le cas des systèmes à courant continu, ils doivent tolérer plus de stress tout en coupant le courant dû à la nature persistante de l'arc.

En fait, le courant continu présente des problèmes différents de ceux du courant alternatif

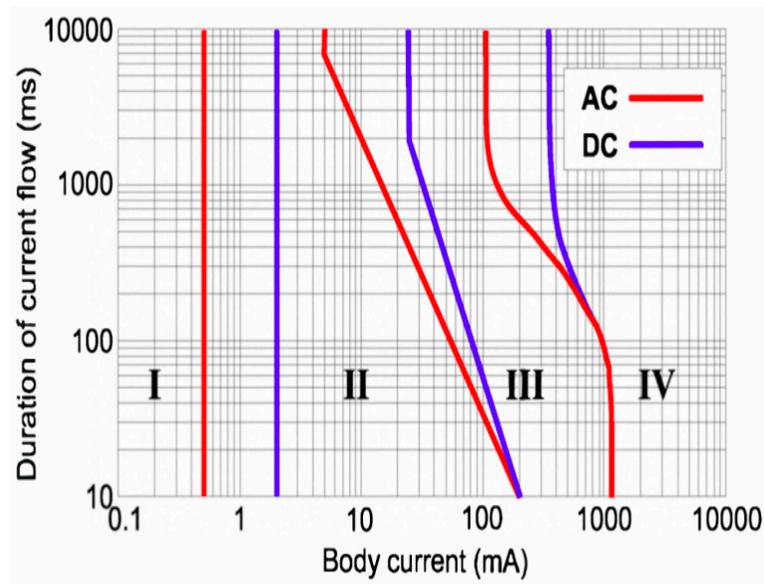


FIGURE 2.12 – Influence du courant sur le corps humain en fonction de la durée, source ( IEC/TR 60479-5)

en ce qui concerne les phénomènes associés à l'interruption des courants de grande valeur, car l'extinction de l'arc électrique s'avère particulièrement difficile. Comme le montre la figure 2.13, avec le courant alternatif, il y a un passage naturel du courant par zéro à chaque demi-cycle, ce qui correspond à l'extinction de l'arc pendant l'ouverture du circuit. Avec le courant continu, il n'y a pas un tel passage naturel et donc, pour garantir l'extinction de l'arc, le courant doit diminuer à zéro (en forçant le passage de courant par zéro).

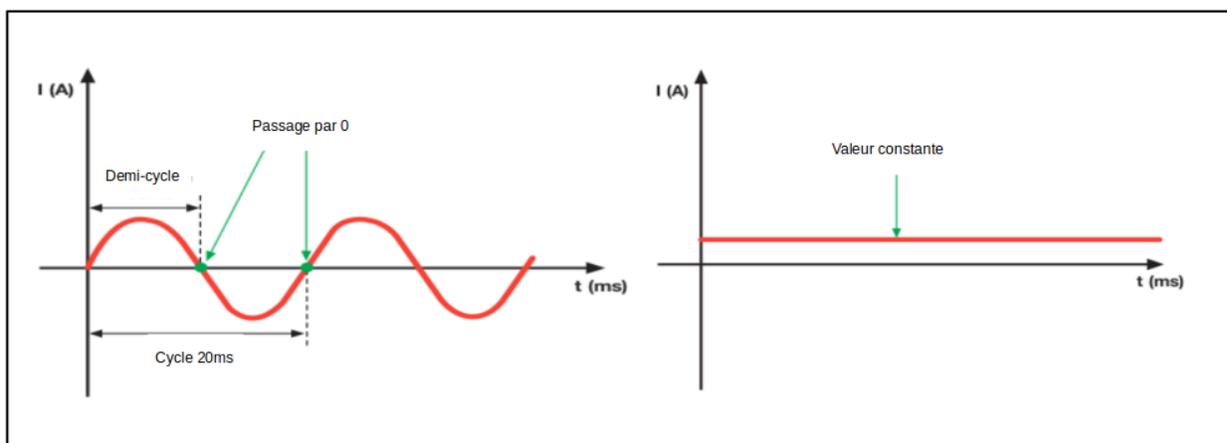


FIGURE 2.13 – Courant AC vs Courant DC

Pour les bâtiments à courant continu, les disjoncteurs sont couramment utilisés à la place des fusibles car ils peuvent être réinitialisés lorsque la panne est éliminée. Comme la tension

et le courant nominal des disjoncteurs sont inférieurs pour un système à courant continu par rapport à un système à courant alternatif, les mêmes caractéristiques des composants peuvent être utilisés pour la protection des côtés AC et DC d'un système. De plus, les convertisseurs individuels sont généralement équipés d'une protection contre les courts-circuits et peuvent détecter le défaut en observant la tension du bus DC. Dans ce cas, lorsque le bus DC tombe en dessous d'un certain seuil, le contrôleur peut identifier un court-circuit et arrêter le système.

Les nombreux avantages des systèmes de distribution de courant continu stimulent actuellement la croissance de ce marché. La protection des équipements étant une préoccupation majeure, de nombreuses entreprises sont à la recherche de dispositifs de protection contre le courant continu. Actuellement, de grandes entreprises comme ASEA Brown Boveri (ABB), Carling Technologies, Schneider, Nader, Siemens, etc., fournissent des disjoncteurs et des fusibles à utiliser en courant continu à des fins de sécurité et de protection dans les systèmes de distribution de courant continu.

Le choix des équipements de protection des biens et des personnes dépend de la topologie et de la structure de distribution mais il dépend aussi de la méthode de mise à la terre choisie.

### Les méthodes de la mise à la terre

La mise à la terre est une exigence obligatoire dans les systèmes de distribution car elle assure la sécurité des personnes et réduit les risques d'incendie. Elle réduit également les dommages causés aux équipements et les interruptions de service en cas de court-circuit. Parmi les autres avantages de la mise à la terre, citons la réduction du rayonnement et de la conduction des émissions électromagnétiques, ce qui permet de tolérer les décharges électrostatiques et les interférences dues à la foudre.

## 2.4 Les systèmes d'alimentation de Classe 4

Les classes 1, 2 et 3 reposent toutes sur l'approche qui consiste à limiter la puissance et/ou la tension maximales des circuits pour atténuer les risques potentiels pour les personnes et les biens, la classe 2 s'imposant comme la norme la plus répandue pour les déploiements commerciaux et résidentiels. Cependant, la limitation de la puissance et de la tension peut restreindre les avancées technologiques, en particulier lorsque les ingénieurs et les inventeurs recherchent des conceptions à haute puissance. C'est là que la classe 4 entre en jeu. Le dernier ajout au NEC adopte une approche différente de celle de ses prédécesseurs et peut permettre aux ingénieurs et aux électriciens de poursuivre des applications qui étaient auparavant hors de portée.

L'alimentation de classe 4 utilise des systèmes d'alimentation à gestion de défaut (Fault Managed Power Systems (FMPS)) pour limiter le courant dans des conditions de défaut plutôt que de limiter la puissance globale d'un circuit. Les capacités avancées de détection, de surveillance et de contrôle des FMPS gardent un œil sur les fonctions du circuit en vérifiant les interruptions des centaines (ou des milliers) de fois par seconde. Si le FMPS détecte un défaut, il est conçu pour limiter l'énergie dans le circuit à un niveau qui contribue à atténuer

les risques pour les personnes et/ou les biens. Il en résulte un moyen plus sûr et plus fiable d'alimenter des charges importantes jusqu'à une tension maximale de 450 V .

La technologie FMPS permet non seulement de vérifier les interruptions génériques, mais aussi d'identifier le type de défaut qui se produit. Ces systèmes peuvent faire la différence entre les charges et les interférences humaines, réagir aux défauts ligne à ligne et ligne à la terre, identifier les arcs en série et en parallèle, et reconnaître les défauts ligne à ligne et série-résistifs. En cas de défaut, le FMPS coupe presque instantanément l'alimentation de l'émetteur. Une fois le défaut éliminé, l'émetteur peut recommencer à fournir de l'énergie.

### 2.4.1 Aperçu des circuits de puissance de classe 4

Un format amélioré d'électricité appelé alimentation à gestion de défauts (FMPS ou Classe 4) modifie la façon dont les systèmes technologiques sont alimentés. La version 2023 du Code Américain de l'électricité (NEC) comprend le nouvel article 726, qui introduit pour la première fois l'alimentation de classe 4 (également appelée FMPS) dans le NEC. Les systèmes FMPS comportent deux éléments clés : l'émetteur et le récepteur. L'émetteur est alimenté par une source d'énergie et crée un circuit d'alimentation de classe 4. L'émetteur délivre l'énergie sur le circuit de classe 4 au récepteur. Le récepteur prend l'énergie et la convertit en la forme d'énergie dont la charge a besoin. Le récepteur peut être un dispositif autonome qui fournit de l'énergie à l'appareil final ou le récepteur peut être intégré dans l'appareil final. Une représentation simplifiée d'un système de distribution électrique basé sur l'architecture FMPS est illustrée dans la figure 2.14.

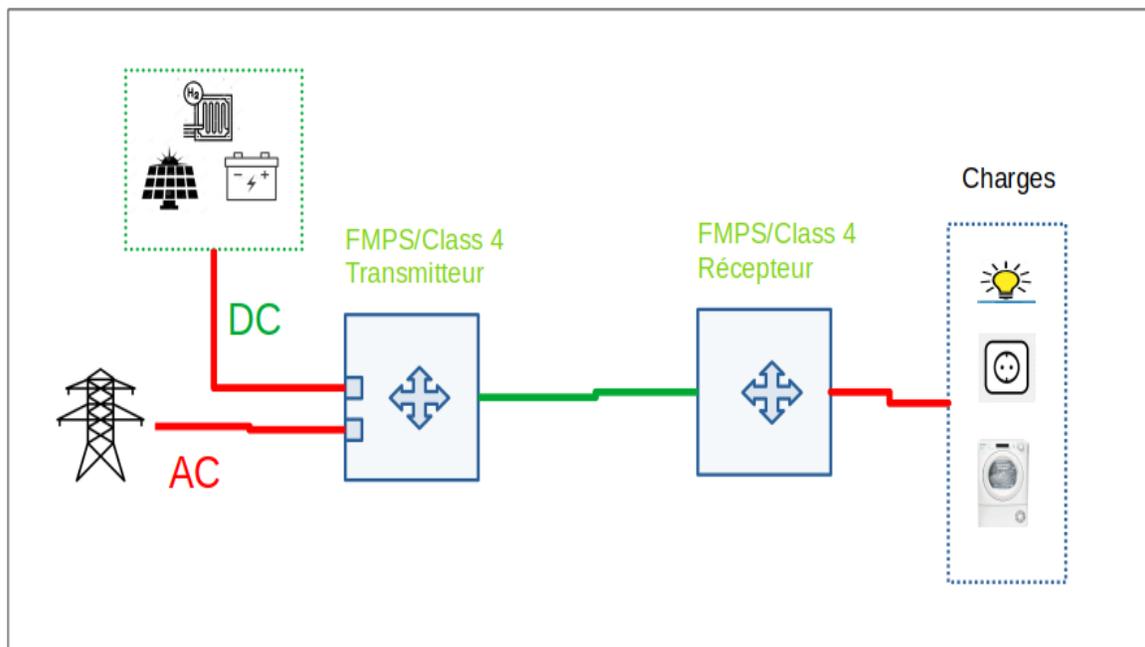


FIGURE 2.14 – Représentation simplifiée d'un système de distribution FMPS

### 2.4.2 La sécurité

Les systèmes de classe 4 sont caractérisés par des mécanismes de surveillance et de contrôle sophistiqués qui surveillent le circuit pour détecter les défauts et contrôlent la puissance transmise pour s'assurer que l'énergie délivrée dans un défaut (fuite, court circuit, corps humain...) est limitée. Les systèmes d'alimentation de classe 4 ne sont pas limités en puissance à la source mais sont limités en puissance en ce qui concerne les risques d'électrocution et d'incendie entre la sortie du transmetteur de classe 4 et l'entrée du récepteur de classe 4. Le plan d'enquête pour les systèmes de classe 4 ou FMPS (Fault-Managed Power Systems) fait partie des exigences de sécurité, la norme UL 1400-1 [55], datée du 19 décembre 2022, décrit les recommandations en terme de sécurité pour les systèmes d'alimentation avec des tensions supérieures à 30 VAC ou 60 VDC et des niveaux de puissance supérieurs à 100 W. Les circuits de classe 4 peuvent être à courant alternatif ou continu et atteindre 450 V. Ces circuits sont surveillés en permanence pour détecter les défaillances. Malgré les tensions plus élevées, les FMPS présentent un risque similaire d'incendie et d'électrocution aux circuits à puissance limitée (Classe 2 et 3), car les FMPS limitent l'énergie du défaut. Par exemple, si une personne entre involontairement en contact avec les fils, elle peut percevoir un choc, mais le système limitera l'énergie dans la personne à des niveaux qui empêcheront les blessures dues au choc et lui permettront de lâcher le circuit. Ces systèmes sont dotés d'une électronique capable de couper l'alimentation du circuit en l'espace de quelques millisecondes. Les limites sont précisées par l'UL 1400-1 section 5.4.2 limitation du courant de défaut.

Le processus d'évaluation du courant de défaut comprend plusieurs étapes. L'évaluation est effectuée sur une forme d'onde de courant de défaut obtenue en mesurant le courant et la tension à travers une résistance d'essai d'impédance de corps choisie pour simuler un chemin de courant de défaut particulier. L'évaluation du courant de défaut se fait en plusieurs étapes comme le montre le diagramme présenté dans la figure 2.15.

### 2.4.3 Les défis pour les systèmes d'alimentation de classe 4

Bien que cette technologie ait le potentiel d'ouvrir une nouvelle vague d'innovation pour l'industrie des télécommunications, le bâtiment, la fabrication, l'urbanisme, les loisirs et bien d'autres domaines, le changement ne se fera pas du jour au lendemain.

Pour commencer, les lacunes en matière de connaissances et la disponibilité limitée des FMPS de classe 4 peuvent constituer des obstacles à l'adoption de cette technologie. Les électriciens, les ingénieurs, les architectes et les autres décideurs devront apprendre les meilleures façons de déployer, d'utiliser et d'entretenir l'alimentation de classe 4, ce qui prendra du temps. Dans le même temps, les fabricants et les concepteurs d'équipements s'efforceront de mettre au point les composants nécessaires à la construction de circuits à haute tension et à la gestion des défaillances, et de trouver des moyens de les fabriquer de manière fiable et à grande échelle. En outre, la réticence éventuelle à travailler avec de tels circuits à haute tension pourrait avoir un impact sur l'adoption jusqu'à ce que les électriciens et les constructeurs soient convaincus de l'efficacité du FMPS en matière de réduction des dommages.

De même, l'alimentation de classe 4 pourrait ne pas être une option pour la modernisation de l'alimentation de classe 2 ou de l'alimentation traditionnelle en courant alternatif, en raison des modifications importantes de l'infrastructure qui seraient nécessaires pour prendre en charge les conceptions de FMPS. Il est peu probable que les opérateurs de réseaux et les propriétaires de bâtiments entreprennent ce type de rénovation intensive et les dépenses asso-

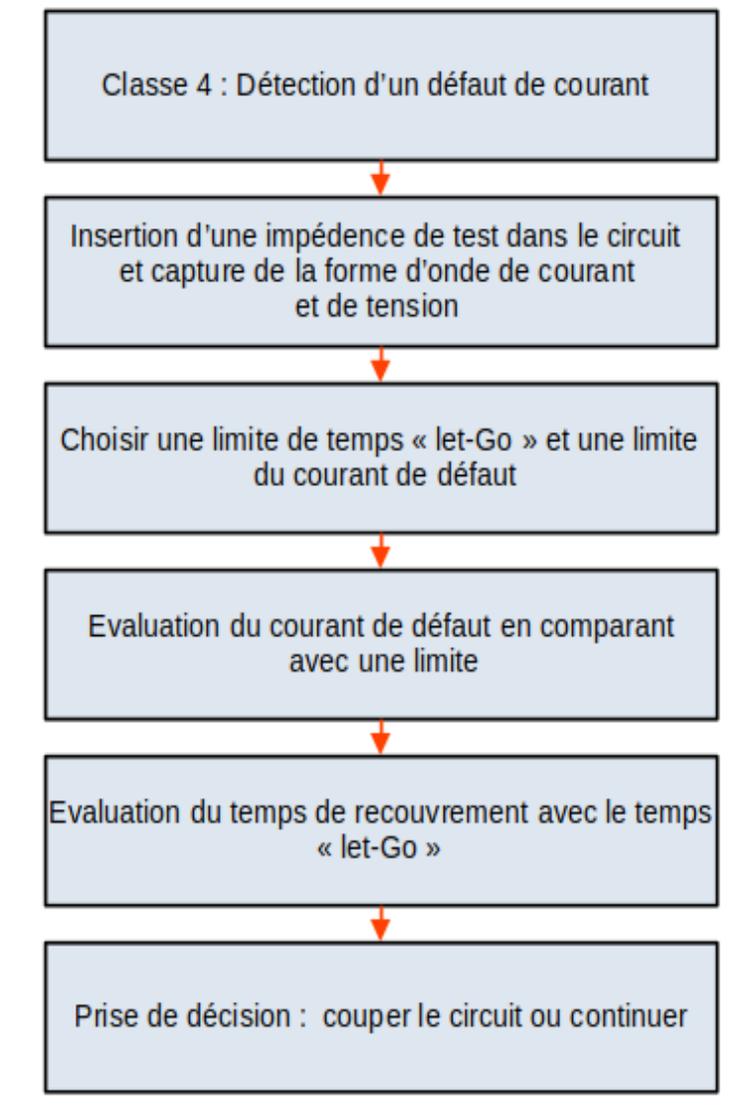


FIGURE 2.15 – Recommandations de l’UL 1400-1 pour l’évaluation du courant de défaut [55]

ciées, à moins que les avantages pour leur cas d’utilisation ou leur application ne l’emportent sur le coût. Au lieu de cela, les circuits de classe 4 et leurs avantages apparaîtront plus souvent dans les déploiements de communications à venir et dans les nouvelles architectures à budget élevé (comme les stades, les aéroports, les installations de transport public et les centres de données).

#### 2.4.4 Exemple de système de classe 4

Bien que la première version de la norme concernant les systèmes de puissance de classe 4 vienne d’être ajoutée dans la NEC, une entreprise américaine au nom de Voltserver [56] met au point des produits de distribution d’électricité innovants fondés sur une technologie brevetée. La technologie « Digital Electricity » est une distribution d’électricité en format

numérique. La technologie combine l'énergie et les données en paquets d'énergie et transfère des centaines de paquets chaque seconde d'un émetteur à un récepteur comme illustré dans la figure 2.16. L'émetteur vérifie le transfert de chaque paquet. S'il y a un mauvais câblage, un court-circuit ou si une personne touche les lignes de transmission, l'émetteur reconnaît la situation en 3 millisecondes et n'envoiera plus de paquets d'énergie. Le résultat est une transmission électrique sans contact à des niveaux de puissances allant jusqu'à 1000 W et une capacité inhérente à contrôler numériquement de nombreux dispositifs électroniques connectés au système de distribution. Ce type de distribution est véhiculé par des câbles en cuivre multi-paires. La section de ces câbles dépend de la distance et de la puissance exigée par la charge.

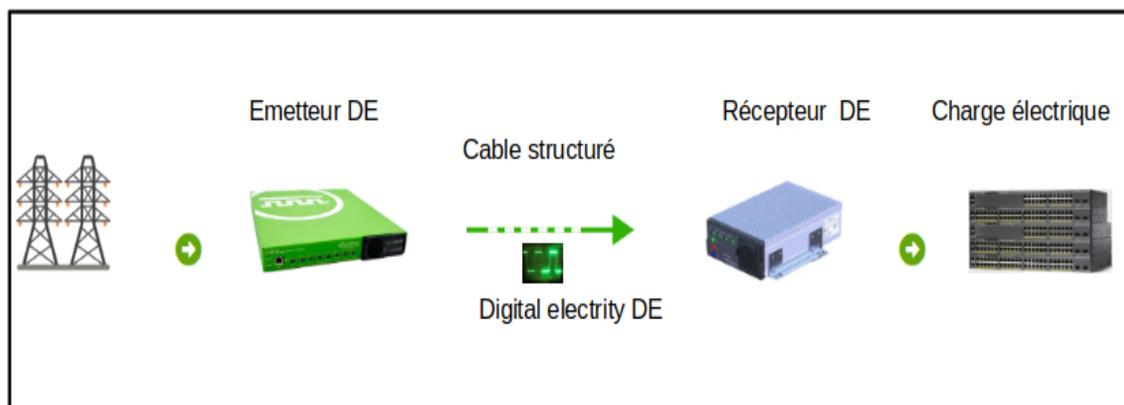


FIGURE 2.16 – Système de distribution de puissance Voltserver [56]

## 2.5 Une nouvelle architecture décentralisée 380 VDC et PoE/PoDL

### 2.5.1 Présentation

Notre architecture matérielle présentée dans la figure 2.17 est basée sur une approche décentralisée, le contrôle-commande est assuré par chaque nœud intelligent du réseau, afin de répartir les calculs sur tous les nœuds du réseau et de rendre notre réseau extensible sans limite sur le nombre de branches et de nœuds. D'après l'état de l'art, nous avons choisi le bus 380 VDC avec une structure radiale peu coûteuse. Sa fiabilité est assurée par les nœuds intelligents qui protègent le bus 380 VDC et assurent sa stabilité par les différentes mesures et contrôles temps réel effectués par chaque Smart Node (SN). Nous adoptons une procédure de détection de défauts basée sur la communication et l'échange des différents états de chaque nœud pour pouvoir localiser les anomalies et les éliminer.

Cette architecture nous fournit un contrôle total de chaque équipement sur le réseau avec les éléments suivants :

- Intégration de batterie de stockage.

- Interface avec l'EV pour participer à l'équilibre de réseau et à l'optimisation énergétique.
- Interface avec le bus AC et la possibilité de fonctionner en mode connecté ou non connecté à la grille de distribution.
- Intégration de panneaux photovoltaïques.
- Pilotage de toutes les charges sur les Switchs PoE (LED, stores, capteurs, CVC, caméra de surveillance...).
- Communication avec un serveur Building Management System (BMS) pour le pilotage/supervision du réseau interne.

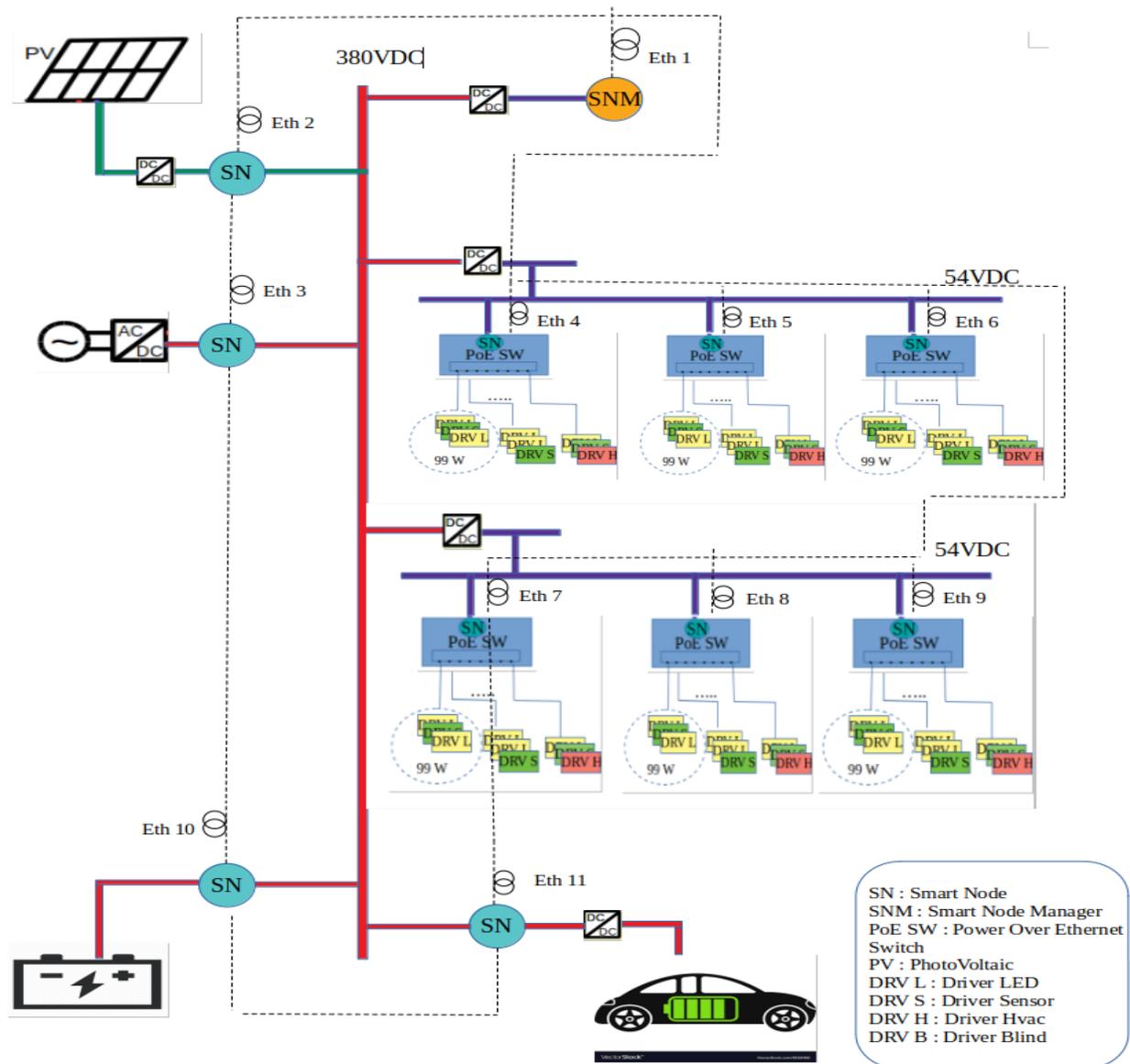


FIGURE 2.17 – Une nouvelle architecture décentralisée 380 VDC et PoE

### 2.5.2 Le système PoE pour les charges à faible puissance

Nous avons commencé une première implémentation de l'architecture sur un bâtiment (N8B [57]) de 20000 m<sup>2</sup> composé de Smart Switchs PoE comprenant 56 ports capables de fournir 5,6 kW, les switchs PoE alimentent les terminaux que sont des drivers de 4 types :

- Driver LED
- Driver Store
- Driver multi-capteurs
- Driver CVC

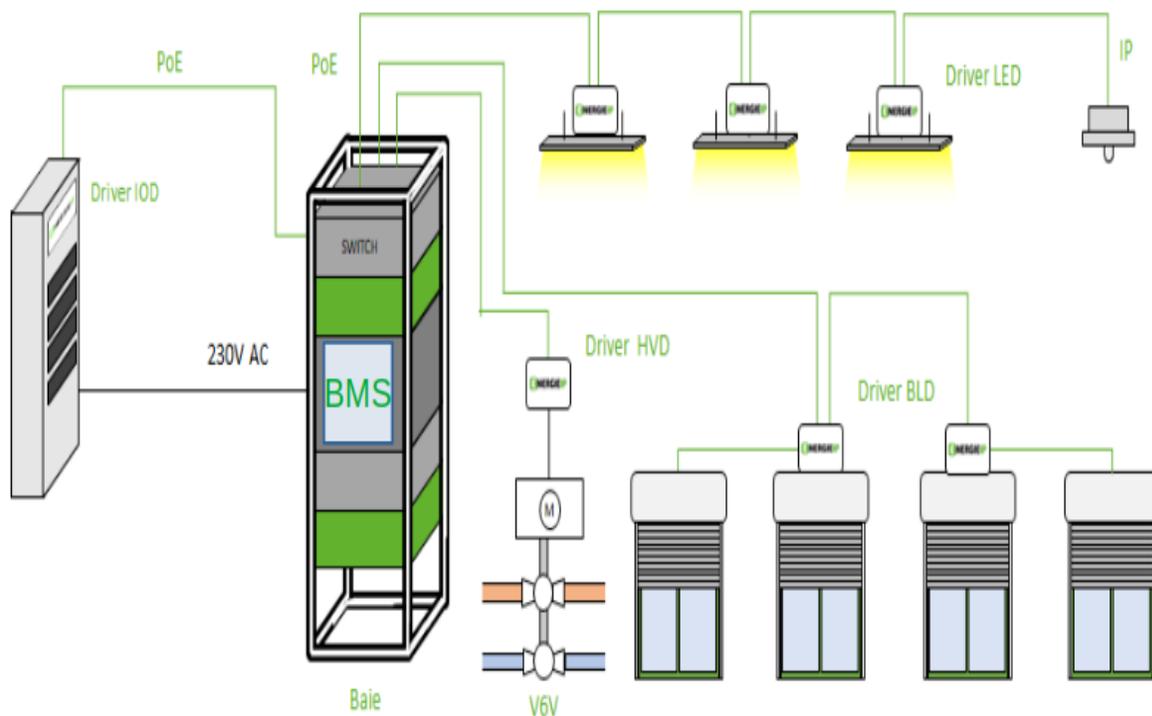


FIGURE 2.18 – Architecture de distribution de l'énergie du bâtiment N8B

La figure 2.18 présente la branche élémentaire de l'architecture globale présentée dans la figure 2.17. Tous les drivers sont pilotables individuellement et communiquent leur utilisation d'énergie en temps réel ainsi que leurs consommations de puissance maximale au Switch. Ce dernier à son tour communique ces informations ainsi que le bilan énergétique global de ses charges au serveur BMS qui représente le centre de contrôle/supervision dans une architecture centralisée et seulement de supervision dans une architecture décentralisée. Le Switch a également une intelligence locale, il est capable ainsi de gérer toutes les charges selon des algorithmes prédéfinis et selon le retour des différentes mesures effectués par les drivers multi-capteurs tels que la température, la luminosité, la présence, l'humidité, le taux de Co2...

### 2.5.3 Le routage d'énergie entre les Smart Nodes et les drivers

La gestion de PSEs dans les Smart Nodes nous permettait d'avoir la consommation de chaque port et par conséquent la consommation globale de tous les drivers alimentés par le Smart Node comme démontré dans la figure 2.19.

```
swh200@elpswh200:~$ sudo ./pse-diag
[sudo] password for swh200:
2021/02/12 14:45:31 Starting Pse Diag
2021/02/12 14:45:32 PSE1 total power : 339W
2021/02/12 14:45:32 PSE2 total power : 234W
2021/02/12 14:45:32 PSEs total power : 573W
2021/02/12 14:45:32 Daughter board 1 port 1 power : 3W
2021/02/12 14:45:32 Daughter board 1 port 2 power : 3W
2021/02/12 14:45:32 Daughter board 1 port 3 power : 3W
2021/02/12 14:45:32 Daughter board 1 port 4 power : 46W
2021/02/12 14:45:32 Daughter board 1 port 5 power : 3W
2021/02/12 14:45:32 Daughter board 1 port 6 power : 3W
2021/02/12 14:45:32 Daughter board 1 port 7 power : 0W
2021/02/12 14:45:32 Daughter board 1 port 8 power : 1W
2021/02/12 14:45:32 Daughter board 2 port 1 power : 3W
2021/02/12 14:45:32 Daughter board 2 port 2 power : 46W
2021/02/12 14:45:32 Daughter board 2 port 3 power : 61W
2021/02/12 14:45:32 Daughter board 2 port 4 power : 3W
2021/02/12 14:45:32 Daughter board 2 port 5 power : 47W
2021/02/12 14:45:32 Daughter board 2 port 6 power : 0W
2021/02/12 14:45:32 Daughter board 2 port 7 power : 3W
2021/02/12 14:45:33 Daughter board 2 port 8 power : 1W
2021/02/12 14:45:33 Daughter board 3 port 1 power : 3W
2021/02/12 14:45:33 Daughter board 3 port 2 power : 3W
2021/02/12 14:45:33 Daughter board 3 port 3 power : 3W
2021/02/12 14:45:33 Daughter board 3 port 4 power : 23W
2021/02/12 14:45:33 Daughter board 3 port 5 power : 0W
2021/02/12 14:45:33 Daughter board 3 port 6 power : 0W
2021/02/12 14:45:33 Daughter board 3 port 7 power : 0W
2021/02/12 14:45:33 Daughter board 3 port 8 power : 0W
2021/02/12 14:45:33 Daughter board 4 port 1 power : 3W
```

FIGURE 2.19 – Données de PSE sur la consommation de chaque Port

En agissant sur les PSE, nous avons la possibilité de configurer la puissance maximale de chaque port, avec cette fonctionnalité émerge l'idée de routage d'énergie par port. Le principe consiste à munir les drivers de ces propriétés :

- Maximum Power.
- Minimum Power.
- Nominal Power.
- Priority.
- Niceness.

Avec le maximum et le minimum, nous fixons les limites de puissance de chaque driver, avec la puissance minimale, le driver sera capable d'accomplir les fonctions minimales cruciales de communication.

La puissance nominale garantit une activité normale du driver en assurant toutes ses fonctions. Priority PR et Niceness NI sont deux caractéristiques utilisées par l'ordonnanceur du processus dans Linux. L'ordonnanceur est le cœur du multitâche dans Linux, utilisant un algorithme de planification basé sur les priorités pour choisir entre les processus en cours d'exécution dans le système. Il classe les processus en fonction de leur mérite et de leurs besoins en temps CPU. Les processus ayant des priorités plus élevées seront exécutés avant ceux ayant des priorités inférieures, tandis que les processus ayant la même priorité sont

programmés successivement, à plusieurs reprises. Dans le système Linux, il existe un total de 140 priorités réparties en deux catégories distinctes. La première est une valeur de gentillesse (niceness) qui va de -20 (priorité la plus élevée) à 19 (priorité la plus basse), avec 0 comme valeur par défaut. L'autre est la priorité pour les processus temps réel, qui va de 1 à 99, tandis que la plage de 100 à 139 est réservée à l'espace utilisateur [58].

Du point de vue de l'accès à des ressources limitées, le problème de l'énergie dans les bâtiments ou dans tout système d'alimentation avec des ressources limitées est similaire au problème des programmes multi-tâches et de l'accès au processeur dans le système Linux [59].

Les Smart Nodes dans notre architecture jouent le rôle de l'ordonnanceur dans la gestion de l'énergie du système.

## 2.5.4 Résultats et interprétations

### Implémentation réelle des bâtiments N8A et N8B

Dans une première implémentation et en coopération avec la société Energie IP dans le cadre du projet « N8B Évidence [57] », nous avons installé 72 Smart Nodes et plus de 6000 drivers ont été déployés. Les Switchs PoE ont été placés dans le bâtiment d'une manière à respecter la distance maximale autorisée par la norme 802.3bt qui autorise des longueurs de câbles inférieurs à 100 m. La figure 2.20 montre une vue réelle d'un seul étage du bâtiment à partir du logiciel de supervision du serveur BMS, elle montre ainsi comment les drivers et les Smart Nodes ont été placés dans cet étage. Après le déploiement, et après avoir fait le bilan énergétique du système, nous avons remarqué que la perte en lignes sur les câbles RJ45 sont significatives pour les drivers placés à une distance de plus de 30 m du switch PoE. Nous avons fait d'autres tests intensifs avec un câble de 100 m qui relie un driver LED. Les résultats ont montré une perte de 20 % pour 90 W de puissance transmise. Ces résultats révèlent que l'utilisation des Switchs PoE à plusieurs ports (56 dans notre cas) n'est énergétiquement pas efficace d'où le passage à l'utilisation de plus petits Switchs PoE avec 16 ports et un placement proche de drivers qui ne dépasse pas 30 m. Une vue d'ensemble du déploiement dans le bâtiment N8B est représentée dans la figure 2.21.

La consommation à vide (aucune charge connectée) est aussi considérée comme une perte. Étant donné que tous les équipements d'une solution d'alimentation électrique basée sur le PoE sont connectés par IP, les drivers et les Switchs sont toujours actifs sur le réseau, la consommation d'énergie de ce mode de fonctionnement est calculée dans le tableau 2.6 sur la base du bâtiment N8B (20 000 m<sup>2</sup>). Les pertes à vide pourraient être réduites en utilisant d'autres protocoles de communication non basés sur le TCP, ce qui nécessite une communication active en permanence. D'autres améliorations pourraient également être obtenues en utilisant certaines fonctions avancées des CPU de drivers avec le mode veille. Comme le montre le tableau suivant, les pertes totales de fonctionnement à vide sont de 10700 W pour 20000 m<sup>2</sup>, ce qui représente 0,53 W/m<sup>2</sup>.

### Performances PoE vs PoDL

La structure physique de la technologie PoDL est comme évoqué précédemment basée sur un PSE et un PD pour la négociation de la classe de puissance ainsi que pour la protection et les fonctionnalités assurées par la norme IEEE 802.3bu. La non-disponibilité de PSE et

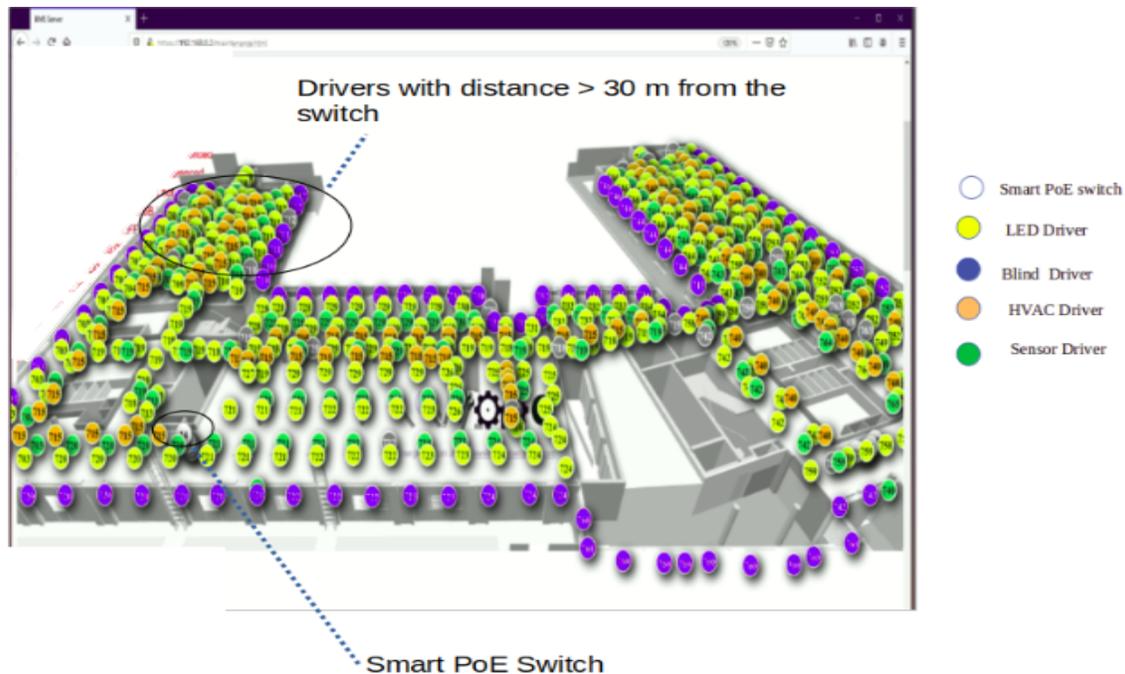


FIGURE 2.20 – Répartition des drivers et des Switchs PoE dans un étage du bâtiment N8B

TABLEAU 2.6 – Consommation en mode inactif de divers équipements présents au sein du bâtiment N8B

Equipement	Nombre	Consommation unitaire (W)	Consommation totale (W)	Total (W)
driver Led	2900	1.3	3770	-
driver Blind	1100	1.2	1320	-
driver Multi-sensors	1300	0.6	780	-
driver CVC	800	2.1	1680	-
switch PoE	72	40	2880	-
switch Cisco	18	15	270	-
				10700

PD sur le marché de l'électronique nous a poussé à concevoir des blocs de protections et de couplage pour pouvoir utiliser la communication assurée par le SPE entre les switches et les drivers afin de faire la classification de puissance. Pour la protection, nous avons utilisé un bloc électronique à base de circuit intégré TPS26631 pour assurer la protection contre les décharges, les surtensions, le courant d'appel et la surchauffe. Nous avons établi les pertes des systèmes PoE et SPE/PoDL par rapport à un système AC. L'efficacité globale du système de distribution électrique PoE et SPE/PoDL est proche de 86%, en tenant compte des pertes des convertisseurs DC/DC et des pertes en lignes. D'autre part, l'efficacité globale d'un système de distribution électrique AC est de 79%. Dans nos expériences, les convertisseurs AC/DC et DC/AC ont des valeurs d'efficacité moyennes de 90%, un câble Cat5e a été utilisé pour le

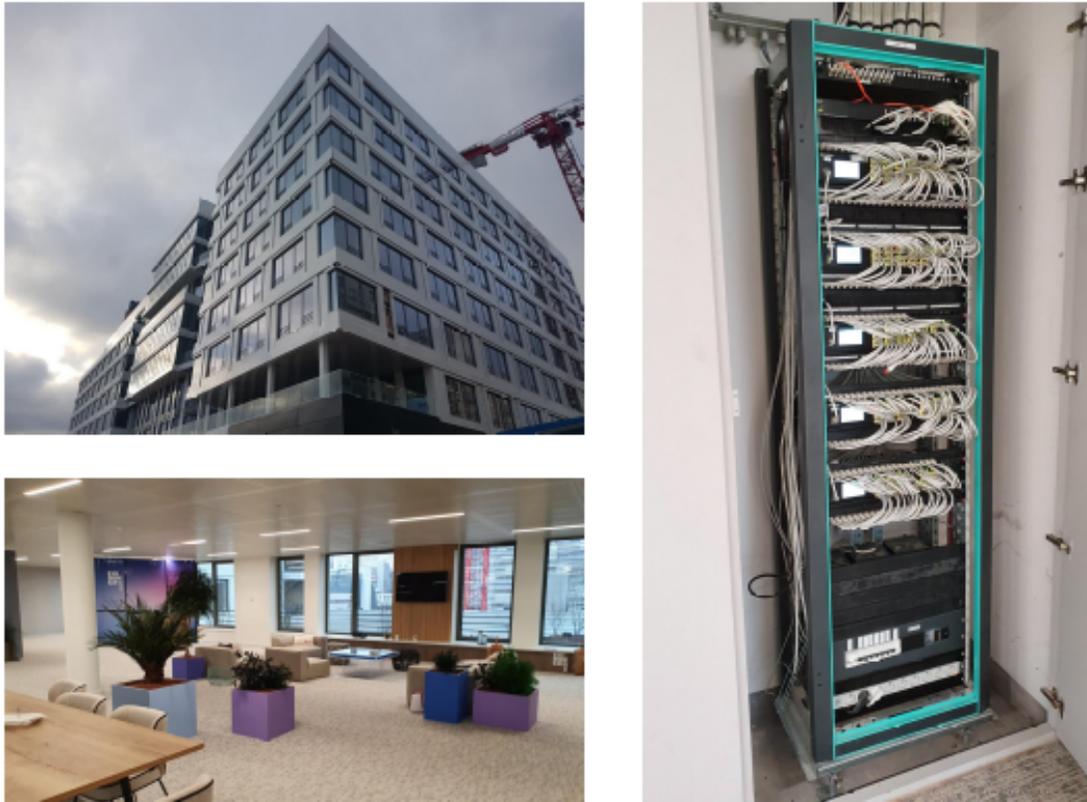


FIGURE 2.21 – Vue globale du bâtiment N8B

système de distribution électrique PoE. Pour la mesure de l'efficacité du système SPE/PoDL, nous avons utilisé des câbles de 18 AWG (American Wire Gauge). La norme 802.3cg avec le protocole 10base-T1L a été utilisée pour la communication SPE. Les données issues des expérimentations relatives au rendement et à l'efficacité énergétique de chaque système sont visualisées dans la figure 2.22.

Comme évoqué dans l'état de l'art, le but principal d'utiliser la technologie PoDL dans notre système est la réutilisation des câbles électriques déjà installés dans les bâtiments en rénovation. Nous avons ainsi effectué des tests sur le protocole 10base-T1L afin d'évaluer la qualité de la communication en fonction des longueurs de câbles utilisées et de couplage de puissance. Pour cela, nous avons mis en place une communication (Peer-To-Peer) entre un switch SPE (10Base-T1L) et un driver avec une charge résistive comme illustré dans la figure 2.23. Nous avons pu mesurer les pertes des paquets Ethernet dans les configurations suivantes :

- Utilisation d'un câble de 1 m sans et avec couplage de puissance.
- Utilisation d'un câble de 30 m sans et avec couplage de puissance.

Les résultats sont représentés dans la figure 2.24. Comme on peut voir sur la figure 2.24, le couplage PoDL et la longueur du câble (de 1 à 30 m) ont peu d'effet sur la perte de paquets vu le faible impact sur les propriétés RL pour la couche physique de la norme 10base-T1L. Par rapport à la PoE, qui présente presque 0 % de perte de paquets avec une gigue maximale de 0,9 ms, le résultat pour le SPE (10base-T1L) semble un peu décevant, avec une perte de paquets proche de 80 % et une gigue pouvant atteindre 6 ms pour un débit de 10Mbits/s.

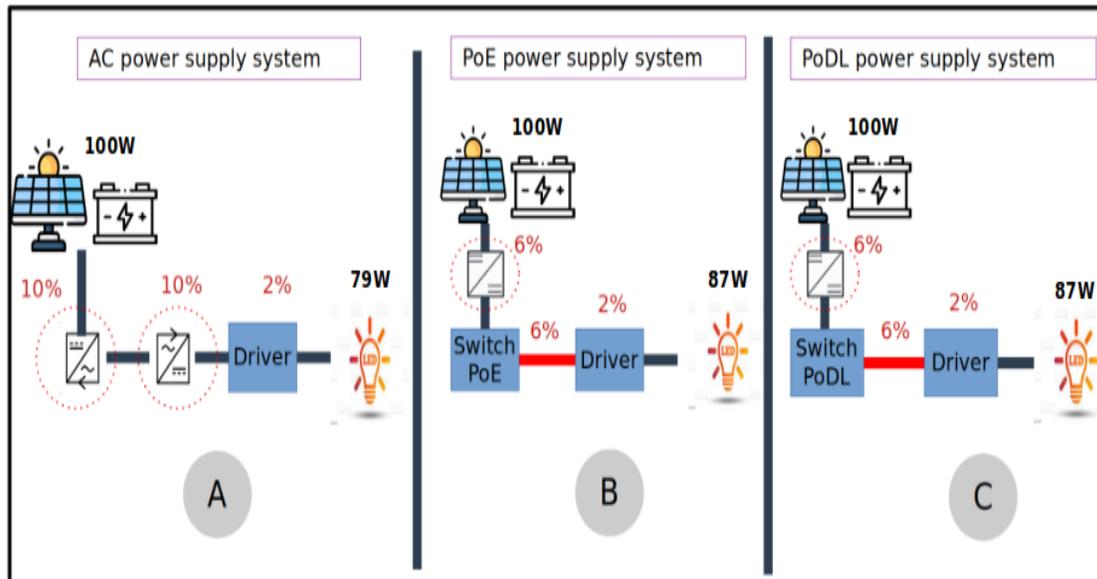


FIGURE 2.22 – Pertes énergétiques AC vs PoE vs PoDL

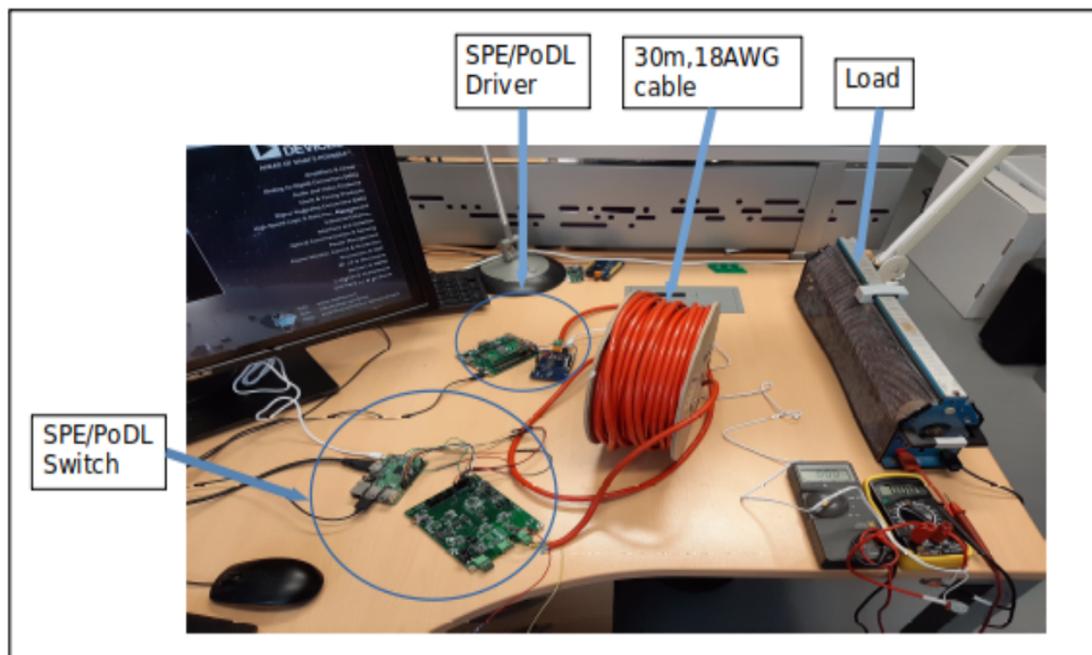


FIGURE 2.23 – Test de couplage SPE/PoDL

Cependant, dans ces expériences, nous avons volontairement utilisé des câbles qui sont habituellement utilisés pour la distribution de l'électricité dans les bâtiments. Ces câbles ne sont pas blindés et les connecteurs utilisés ne sont pas conformes aux recommandations de la norme IEEE 802.3cg, ce qui entraîne des pertes d'insertion et des pertes de retour considérables. Ainsi, obtenir une communication stable, surtout avec un taux de transmission

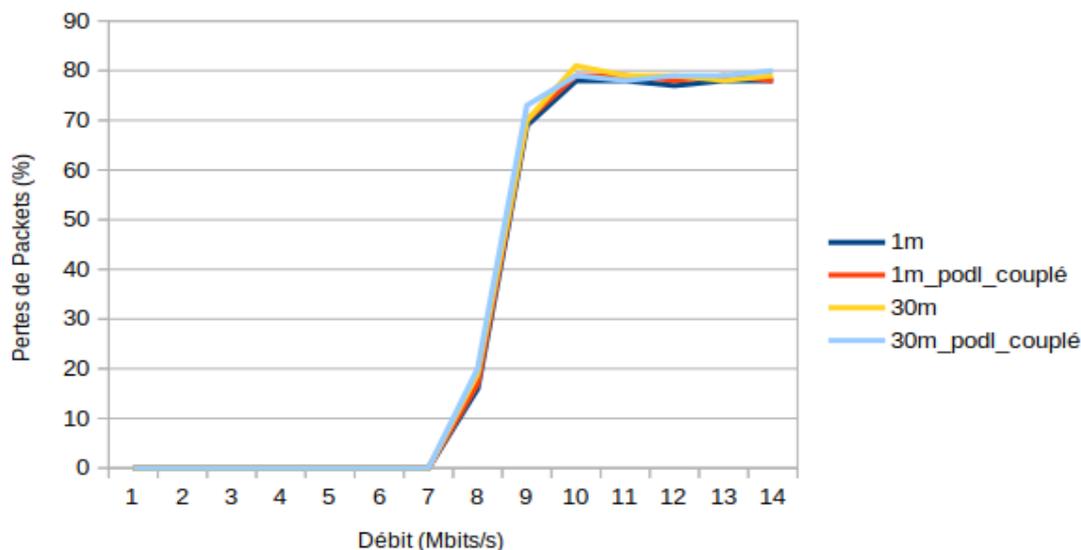


FIGURE 2.24 – Pertes de paquets en fonction des longueurs des câbles et du couplage PoDL

supérieur à 7 Mbits/s est un résultat très encourageant, et le 10base-T1L semble être un protocole très fiable. L'idée de réutiliser l'infrastructure de distribution de courant alternatif AC (câbles installés) dans la distribution d'électricité DC avec PoDL et SPE est techniquement réalisable avec la norme IEEE 802.3cg et le protocole 10base-T1L. Les expériences réalisées sont faites avec une communication PTP, donc il n'y a plus de facteurs réseau (comme la restriction de la bande passante ou la congestion) qui peuvent causer une perte de paquets. Un taux de transmission de 7 à 8 Mbits/s est très suffisant pour le processus de contrôle/commande des terminaux (drivers LED, drivers stores, etc.).

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la distribution électrique en courant continu ainsi que les technologies PoE et PoDL qui offrent des avantages significatifs pour la gestion de l'alimentation électrique dans les bâtiments. La distribution électrique en DC en utilisant les technologies PoE et PoDL ouvre de nouvelles opportunités pour améliorer l'efficacité énergétique et l'empreinte carbone, simplifier l'installation et la gestion des équipements électriques dans les bâtiments, et favoriser le développement de solutions intelligentes pour une meilleure gestion des ressources énergétiques. Malgré les preuves démontrées par la communauté scientifique dans plusieurs études, le déploiement du courant continu dans les bâtiments reste très limité à l'échelle mondiale. Cette réticence est principalement due au manque de normes, en particulier les normes de sécurité.

Toutefois, l'évolution vers un déploiement plus répandu du courant continu dans les bâtiments semble prometteuse avec l'introduction du standard UL-1400 pour les systèmes de classe 4 en décembre 2022. Ce standard propose des normes de sécurité pour la protection des biens et des personnes. En conséquence, nous sommes d'avis que le courant continu va gagner en popularité dans le secteur du bâtiment dans un futur très proche. Au cours de notre

étude sur la distribution de l'électricité à basse tension, nous avons pu mettre en évidence une nouvelle approche de routage d'énergie qui s'apparente à un ordonnanceur de système Linux. Cette approche novatrice est rendue possible grâce à la flexibilité des technologies PoE et PoDL. Cependant, malgré les nombreux avantages de la technologie PoE, elle atteint ses limites en termes de puissance injectée et d'efficacité en raison des contraintes imposées par les standards de câbles RJ45.

C'est pour cette raison que nous concentrons actuellement nos efforts sur la technologie PoDL, qui se montre très prometteuse si nous parvenons à mettre en place des normes plus flexibles permettant une injection de puissance plus élevée. En explorant cette voie, nous espérons repousser les limites actuelles et ouvrir de nouvelles perspectives pour l'alimentation électrique des dispositifs.

Nous avons ainsi constaté les avantages de la flexibilité apportée par la communication via les technologies PoE et PoDL dans la gestion de l'énergie. C'est pourquoi nous avons proposé un système de contrôle global basé sur la communication et la collaboration entre les différents équipements (producteurs et consommateurs) du réseau DC. Bien que les méthodes de contrôle classiques (comme le PID - Proportional-Integral-Derivative utilisé dans le droop-control - et le MPC - Model Predictive Control) soient plus simples à mettre en œuvre, elles se révèlent efficaces uniquement pour les systèmes simples et bien modélisés. En revanche, les méthodes basées sur la communication sont préférées pour les systèmes distribués et complexes, où la collaboration entre les composants est essentielle pour obtenir de meilleures performances globales. Ainsi, dans le chapitre suivant, nous examinerons l'architecture et le protocole de communication choisis pour répondre aux contraintes spécifiques de notre application.

# Chapitre 3

## Communication

### Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>49</b>
<b>3.2</b>	<b>Communications micro-réseau - protocoles et normes</b>	<b>49</b>
3.2.1	Communication SNL-Drivers	50
3.2.2	Le protocole MQTT	52
3.2.3	Communication entre Smart Nodes (SNs)	55
3.2.4	Courant Porteur en Ligne (CPL)	56
3.2.5	PowerLink	66
3.2.6	Le protocole Data Distribution Service (DDS)	72
<b>3.3</b>	<b>Modélisation d'un micro-réseau DC basé sur une architecture de communication DDS</b>	<b>81</b>
3.3.1	Modèle de communication entre les Smart Nodes (SNs)	81
3.3.2	Tests et résultats	81
3.3.3	Discussion	85
<b>3.4</b>	<b>Conclusion</b>	<b>89</b>

---

## 3.1 Introduction

Les protocoles de communication jouent un rôle essentiel en permettant des interactions efficaces au sein des bâtiments et des micro-réseaux. Ces protocoles établissent les bases pour un échange de données fluide, un contrôle et une coordination entre les différents dispositifs, systèmes et composants qui constituent l'infrastructure moderne de ces environnements. En facilitant une communication fiable et le partage d'informations, ces protocoles améliorent la gestion, l'optimisation énergétique et les performances globales des bâtiments et des micro-réseaux.

Dans le contexte des bâtiments, les protocoles de communication servent de colonne vertébrale pour l'écosystème diversifié de systèmes interconnectés, notamment le CVC, l'éclairage, la sécurité et la surveillance de l'occupation. Ils permettent une surveillance en temps réel, un contrôle et une analyse des données, permettant aux gestionnaires et aux opérateurs de bâtiments de prendre des décisions éclairées pour améliorer le confort des occupants, réduire la consommation d'énergie et garantir la sécurité.

Le 21 juillet dernier, le ministère français de la Transition écologique a émis un décret baptisé « Building Automation & Control Systems (BACS) », en corrélation avec la Directive européenne relative à la performance énergétique des bâtiments (DPEB) de 2018. Ce décret impose que d'ici le 1er janvier 2025, tous les édifices à usage tertiaire, qu'ils soient neufs ou déjà existants et dotés de systèmes de chauffage ou de climatisation excédant 290 kW de puissance, doivent mettre en place des systèmes d'automatisation et de gestion du bâtiment (BACS).

Les bâtiments tertiaires nouvellement construits doivent respecter cette obligation si leur permis de construire est délivré à partir du 21 juillet 2021. Le décret requiert également l'intégration de dispositifs d'autorégulation de la température intérieure par pièce ou zone de chauffage dans les nouvelles constructions. En ce qui concerne les bâtiments déjà existants, l'installation de systèmes de régulation automatique de la chaleur pourrait être exigée à partir du 21 juillet 2021, lorsqu'un remplacement ou une installation de générateurs de chaleur est prévu. Dans ce contexte, l'indispensabilité d'un système de télémessure et d'automatisation reposant sur des protocoles est devenue évidente. En effet, pour la gestion des équipements, pour garantir la réactivité des équipements face aux problèmes électriques et pour assurer la stabilisation décentralisée de l'architecture DC décrite dans le chapitre précédent, le choix du protocole de communication revêt une importance cruciale. C'est ce que nous examinerons en détail dans ce chapitre.

## 3.2 Communications micro-réseau - protocoles et normes

Les progrès récents de l'Internet des objets (IoT) et des infrastructures de télécommunication ont considérablement augmenté la fiabilité et l'efficacité des protocoles de communication dans tous les environnements et particulièrement dans l'environnement des micro-réseaux. Aujourd'hui, les équipements d'un micro-réseau échangent non seulement des informations entre eux beaucoup plus rapidement, mais aussi contrôlent, surveillent et diagnostiquent les pannes de manière plus fiable. Malgré les avantages de ces nouvelles technologies, celles-ci sont conçues pour répondre à des besoins spécifiques.

Le choix du protocole dépend principalement de l'application elle-même et des contraintes

du système. Pour un système de gestion des bâtiments, les principaux critères requis sont classés comme suit :

- **Fiabilité** : La fiabilité représente la probabilité qu'un objet remplisse sa fonction sur un intervalle de temps donné (Wang et al [60]). La fiabilité est généralement mesurée à l'aide d'un taux de défaillance. Pour les applications de haute criticité, un taux de défaillance limite est prédéfini [61, 62].
- **Réactivité** : Ce critère dépend principalement du temps de cycle ou du temps de communication point à point [63, 64].
- **Temps réel** : Le délai maximal de transmission de messages doit être borné et maîtrisé pour garantir la résilience du système.
- **Déterminisme** : Le comportement de la communication suit des règles prédéfinies et le système suit toujours le même comportement et la même machine d'état. En effet, le déterminisme est une caractéristique d'un système qui garantit des performances prévisibles et reproductibles autant en conditions normales qu'en conditions de défaillances (Jakovljevic et al. [65]). Le déterminisme d'une communication peut être défini par une latence maximale bornée et connue.
- **Évolutivité** : L'évolutivité d'un protocole de communication fait référence à sa capacité à s'adapter et à prendre en charge de manière efficace une augmentation du nombre de participants, de la charge de travail ou des exigences de performance, tout en maintenant une expérience utilisateur satisfaisante. L'évolutivité est une considération importante lors de la conception de protocoles de communication, car elle permet de garantir que le système est capable de fonctionner de manière fiable et performante à mesure qu'il se développe.
- **Sécurité** : La sécurité d'un protocole de communication est essentielle pour garantir la confidentialité, l'intégrité et la disponibilité des données échangées entre les participants. Un protocole sécurisé doit protéger les informations sensibles contre les attaques malveillantes, assurer l'authenticité des entités communicantes et prévenir les altérations ou les interceptions non autorisées.
- **Coût** : Le coût d'un protocole de communication peut varier en fonction de plusieurs facteurs tel que le développement initial, le coût du matériel, la mise en œuvre et le déploiement, les coûts opérationnels, la maintenance et les mises à jour, etc.

Pour l'application proposée dans ce travail, on distingue deux niveaux de communication différents comme illustré dans la figure 3.1, une communication entre chaque Smart Node type Load (SNL) et ses drivers et une autre communication entre les noeuds intelligents SNs.

### 3.2.1 Communication SNL-Drivers

Au premier niveau, nous considérons la communication entre les drivers et les SNL. Les réseaux locaux (LAN) formés entre chaque SNL et leurs drivers sont des réseaux filaires puisque nous utilisons le PoE et le PoDL pour alimenter les drivers.

A ce niveau les SNL communiquent avec les drivers pour pouvoir les contrôler et afin de remonter les informations de capteurs, de consommation . . .

Les drivers sont sur des niveaux de tensions  $< 60$  V ce qui signifie que les normes PoE 802.3bt et PoDL 802.3bu assurent bien la sécurité des personnes et des équipements électriques conformément à la norme NF C 15-100. Le choix de protocole de communication se base

donc principalement sur le coût et la sécurité de données, tout en respectant la sécurité des personnes.

Les protocoles de messagerie les plus étudiés et émergents dans les systèmes IoT sont :

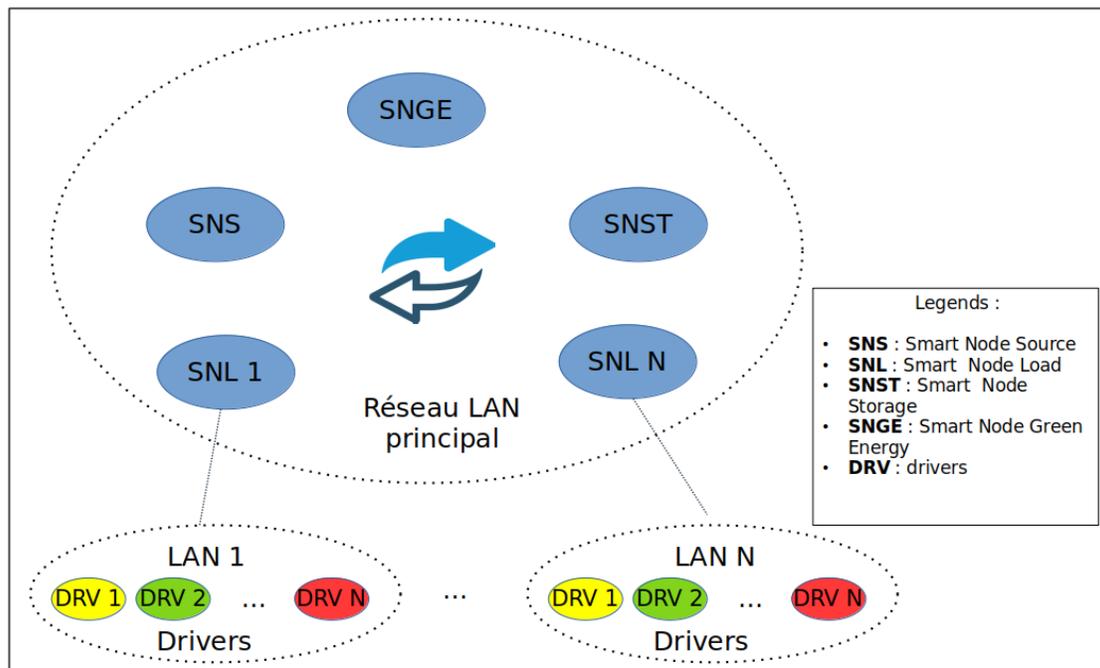


FIGURE 3.1 – Architecture de communication

- MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)
- CoAP (Constrained Application Protocol)
- AMQP (Advanced Message Queuing Protocol)
- HTTP (Hypertext Transfer Protocol)
- DPWS (Device Profile for Web Service).

De nombreuses études comparatives des protocoles IoT ont été réalisées, notamment [66, 67, 68], et de nombreux critères ont été utilisés pour analyser les performances de chaque protocole, tels que la norme, l'architecture, la taille des en-têtes, la qualité de service (QoS), le protocole de transport, la sécurité, etc. Ces protocoles d'application sont différents et chacun a ses avantages et ses inconvénients, une comparaison de quelques protocoles de communication selon les critères évoqués précédemment est illustrée dans le tableau 3.1.

La fiabilité, la sécurité et l'évolutivité sont les critères les plus cruciaux pour notre système ; ainsi pour des raisons industrielles et économiques, le coût de matériel est très important vu le grand nombre de points à contrôler dans un bâtiment (points lumineux, stores, multi-capteurs, CVC, etc.). En tenant compte de ces critères de choix et des études de comparaison entre les différents protocoles utilisés dans ce type d'application, nous avons décidé d'utiliser le protocole MQTT pour la communication entre les drivers et les SNL, ce que nous justifions dans la partie suivante.

TABLEAU 3.1 – Comparaison entre différents protocoles IoT

Protocole/Critère	Fiabilité	Déterminisme	Réactivité	Évolutivité	Sécurité	Coût
MQTT	+++	+	+	+++	+++	+++
CoAP	++	+	+	++	++	+++
FTTP	+++	+	+	+++	+++	++
AMQP	++	+	+	++	+++	++
DPWS	++	+	+	++	+++	++

### 3.2.2 Le protocole MQTT

#### Présentation

MQTT est un protocole de transfert de données de machine à machine (M2M), Il est considéré comme l'un des principaux protocoles de messagerie de l'Internet des objets (IoT). En effet, même s'il existe diverses technologies et protocoles pour l'IoT, MQTT s'est imposé grâce à ses avantages :

- **la fiabilité** : MQTT est basé sur TCP/IP comme protocole de transport, ce qui le rend plus fiable que tous les protocoles d'application basés sur UDP. De plus, il utilise 3 niveaux de qualité de service (QoS) qui renforcent la fiabilité de la communication.
- **la sécurité** : MQTT utilise TLS pour crypter les messages et peut authentifier les clients en utilisant des protocoles d'authentification avancés tels que OAuth.
- **l'évolutivité** : MQTT peut évoluer pour connecter des millions d'appareils IoT.
- **la légèreté** : Les clients MQTT sont très légers et nécessitent des ressources minimales, ce protocole peut donc être utilisé sur des microcontrôleurs aux ressources limitées. Les en-têtes de message MQTT sont également petits ce qui permet d'optimiser la bande passante du réseau.

MQTT a également quelques inconvénients qui sont principalement :

- **le fonctionnement sur TCP** : le fonctionnement sur TCP a l'avantage de la fiabilité citée précédemment mais il a aussi un inconvénient pour les appareils fonctionnant sur batterie car TCP nécessite plus d'échanges pour établir une communication et plus encore en cas d'utilisation de TLS pour la sécurité. La solution est de garder la session ouverte, ce qui est également un énorme problème pour les applications fonctionnant sur batterie en termes de consommation d'énergie. Dans notre cas, cela ne pose pas de problème étant donné que tous nos appareils fonctionnent avec le PoE.
- **la communication centralisée** : cela peut être un point d'échec (Single Point Of Failure). Un problème au niveau du broker peut également affecter l'ensemble du système.

### Les délais dans MQTT

De nombreuses études ont analysé les performances de MQTT. Dans notre travail, nous ne considérons que le délai d'une transmission de bout en bout (du producteur au consommateur), ce qui est crucial dans le cas de l'architecture proposée et dans notre vision du système de routage énergétique. Ce système de routage repose principalement sur la réactivité et la fiabilité du réseau.

Shinho Lee et al. [69] ont étudié le délai de bout en bout dans un réseau MQTT sans fil et filaire, sa dépendance du niveau de QoS et sa corrélation avec la perte de paquets. Le niveau de QoS choisi dépend des besoins de l'application ainsi que du degré de fiabilité souhaité. En ce qui concerne le fonctionnement de la QoS pour MQTT, voici comment cela se déroule.

- QoS 0 : Livraison la plus simple et la plus rapide, mais les messages peuvent être perdus.
- QoS 1 : Garantit la livraison des messages, mais des messages en double peuvent se produire.
- QoS 2 : Garantit une livraison exactement une fois, mais implique plus de surcharge et peut être plus lent.

Dans l'étude de Deepsubhra Guha Roy et al. [70] sur l'estimation du délai de bout en bout et de la perte de paquets, les auteurs ont utilisé la pile logicielle eclipse-paho pour mettre en œuvre le MQTT-SN. Ces études ont démontré la corrélation entre le délai de bout en bout et les pertes de paquets et d'après les résultats présentés, nous pouvons voir que le délai dans le cas de QoS2 est très élevé, plus de 100 ms pour un message de 1000 octets [69] et même plus de 300 ms dans l'étude de [70]. Ces études sont réalisées avec le protocole MQTT non sécurisé (sans la couche TLS). Dans notre étude, nous allons expliquer notre méthode pour évaluer le délai de bout en bout dans le cas d'un MQTT non sécurisé et dans le cas d'un MQTT sécurisé. Nous avons commencé notre expérimentation en évaluant un seul nœud sur le réseau, afin de mesurer le délai de bout en bout. Ce nœud publie et souscrit sur le même sujet, il envoie un premier message et parce qu'il a souscrit à ce sujet le broker le renverra, une fois reçu le nœud recommencera la même procédure pour 100 fois. Nous démarrons une horloge avant d'envoyer le premier message et nous obtenons le temps total des 100 transmissions à la fin de la procédure, puis nous calculons le délai moyen de bout en bout en divisant le résultat par 100.

La figure 3.2 présente les résultats pour MQTT sécurisé et MQTT non sécurisé dans le contexte de la configuration QoS0, tandis que la figure 3.3 expose les résultats pour la configuration QoS1. Que ce soit dans le cas de QoS0 ou dans le cas de QoS1, nous pouvons voir l'influence du protocole TLS et le délai qui est minimal dans le cas de messages avec un nombre minimal d'octets mais qui augmente avec le nombre d'octets transmis, ce qui peut être expliqué par l'équation qui décrit le délai d'un paquet le long de sa route de la source à la destination :

$$\text{Delay} = D_{\text{processing}} + D_{\text{queuing}} + D_{\text{transmission}} + D_{\text{propagation}}$$

Le protocole TLS affecte principalement le délai de traitement ( $D_{\text{processing}}$ ) avec les temps de cryptage et de décryptage. Nous pouvons également voir l'impact du niveau de QoS sur le délai de bout en bout en comparant les figures 3.2 et 3.3. Les travaux de recherche de [67], [68] et [69] ont expliqué cet impact par la corrélation entre le délai et les pertes de paquets mais ils n'ont pas traité l'effet du nombre de nœuds sur le réseau qui affecte principalement

le délai de mise en file d'attente et les caractéristiques techniques du broker (processeur, fréquence...). P. Ferrari et al. [70] ont étudié le délai de bout en bout avec une expérience indépendante du matériel et avec différents brokers MQTT, l'étude a également montré l'impact du Round-Trip Delay (RTD) sur le délai de bout en bout. Le RTD est négligé dans notre étude puisque nous travaillons dans le cas d'un réseau local. Nous avons effectué nos tests sur un réseau réel avec les équipements présentés dans le tableau 3.2.

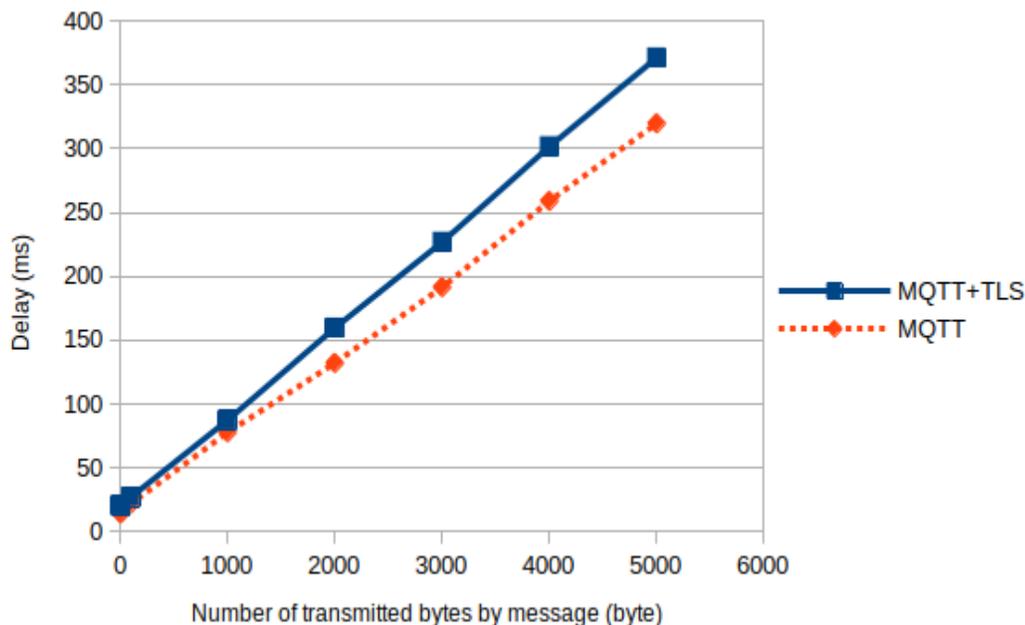


FIGURE 3.2 – Délai de communication MQTT et MQTT sécurisé pour QoS 0

TABLEAU 3.2 – Equipements utilisés pour les tests MQTT.

	SNL	Drivers	Serveur BMS
Processeur	BCM2837B0 Cortex-A53	Cortex-M4	BCM2837B0 Cortex-A53
Fréquence	1.2 GHz	64 MHz	1.2 GHz
RAM	1 Go	256 KB	8 Go
ROM	16 Go	1 MB	32 Go

Le réseau est composé de 74 drivers en tant que clients MQTT et d'un broker, les résultats présentés dans la figure 3.4 montrent la différence de délai entre un réseau avec un seul client et un réseau avec 74 clients. Ces résultats peuvent également être affectés par l'activité des autres nœuds du réseau, dans cette expérimentation, tous les autres nœuds ont été configurés avec un rapport d'état de 1 seconde, ce qui signifie que chaque dispositif doit envoyer ses données au moins une fois par seconde.

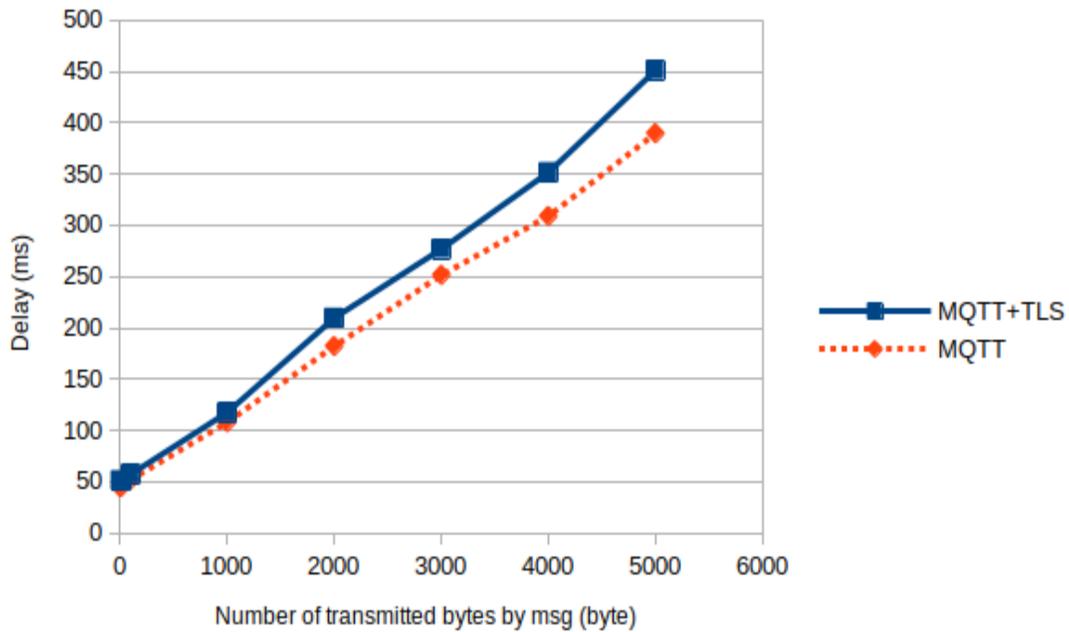


FIGURE 3.3 – Délai de communication MQTT et MQTT sécurisé pour QoS 1

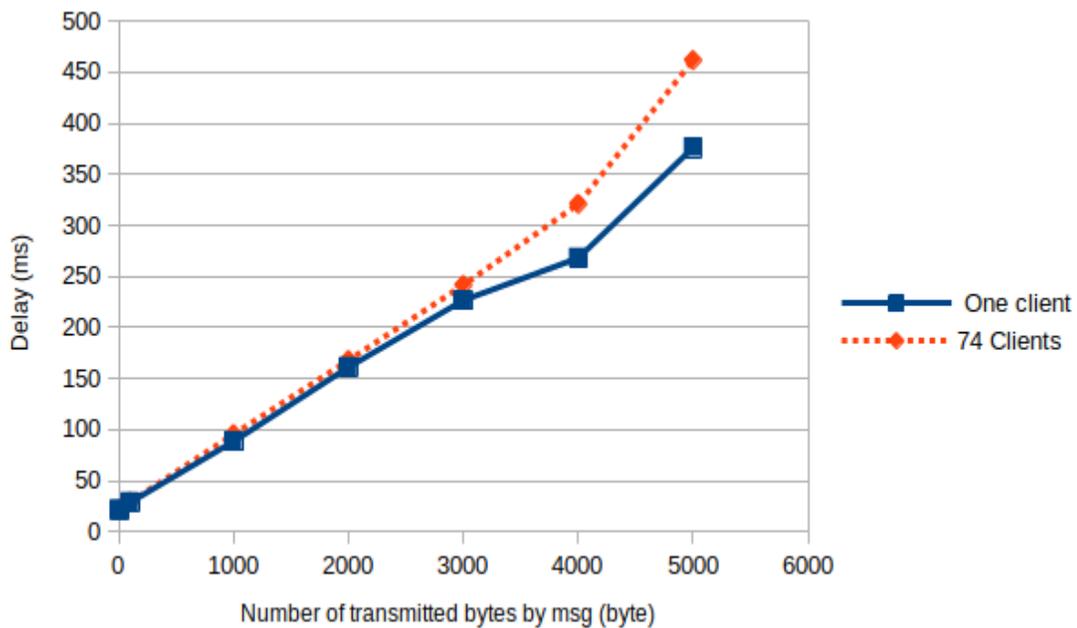


FIGURE 3.4 – Délai de communication MQTT avec 74 clients

### 3.2.3 Communication entre Smart Nodes (SNs)

Afin de contrôler le micro-réseau de distribution de l'électricité dans le bâtiment et assurer la stabilité du bus 380 VDC en équilibrant la production et la consommation d'électricité,

ainsi que pour faire remonter les informations de consommation, les dispositifs de contrôle sur le bus 380 VDC ont besoin d'intégrer des technologies de communication.

La criticité de la sécurité et la stabilité du bus 380 VDC exigent un protocole de communication réactif avec un temps de cycle ou un temps de communication point à point inférieur à 20 ms pour garantir la sécurité des personnes en cas de défaut électrique. Ainsi, notre application exige un déterminisme absolu afin de garantir la résilience du système avec l'équilibrage entre les producteurs et les consommateurs sur le bus DC et afin d'isoler les équipements défaillants en cas d'incident.

Nous avons ainsi tenté d'évaluer les protocoles de communication qui se sont avérés adéquats pour cette application, en commençant par le Courant Porteur en Ligne (CPL) qui présente des avantages écologiques et économiques intéressants.

### 3.2.4 Courant Porteur en Ligne (CPL)

#### Préambule

Le principe de la technologie CPL consiste à faire transiter un signal électrique informatif sur une ligne électrique de puissance. Cette technologie peut être utilisée de deux façons. La première est d'utiliser un réseau électrique déjà présent afin de faire transiter des communications, comme des données multimédia. La deuxième est d'utiliser le réseau de puissance d'un système pour y faire passer une information de commande électrique. La communication par courants porteurs en ligne (ou CPL) permet donc de construire un réseau informatique sur le réseau électrique d'une habitation ou d'un bureau, voire d'un quartier. Depuis 1950, des courants à basse et moyenne tension sont couramment utilisés pour porter des informations. En 2012 un protocole CPL de communication simple et ouvert, dit « G3- PLC » (ou « G3-Power Line Communication »), a été spécialement développé pour le fonctionnement des micro-réseaux électriques. Il constitue un pas de plus vers les réseaux électriques intelligents, et l'Internet de l'énergie. Il permet un meilleur contrôle et monitoring du réseau de distribution électrique, et une gestion énergétique fine, pour cette raison on a choisi de commencer l'état de l'art sur la communication entre SN par l'étude de ce protocole qui est le plus récent dans ce domaine de la communication par les courants porteurs. La documentation concernant l'utilisation de la technologie CPL avec le courant continu est assez restreinte. Cependant, il existe quelques publications, telles que celle de Jousse et al. [71], qui ont avancé un modèle de communication entre les batteries au sein d'un micro-réseau DC de petite taille. Cette technologie présente l'avantage, comme la technologie PoDL, de permettre l'exploitation des installations électriques déjà existantes et donc elle permet un gain d'énergie grise et un gain économique considérable pour les bâtiments en rénovation.

#### Fonctionnement

Le principe du CPL consiste à superposer au courant électrique alternatif/continu un signal à plus haute fréquence et de faible énergie (figure 3.5 et 3.6). Ce deuxième signal se propage sur l'installation électrique et peut être reçu et décodé à distance. Ainsi le signal CPL est reçu par tout récepteur CPL de même catégorie se trouvant sur le même réseau électrique.

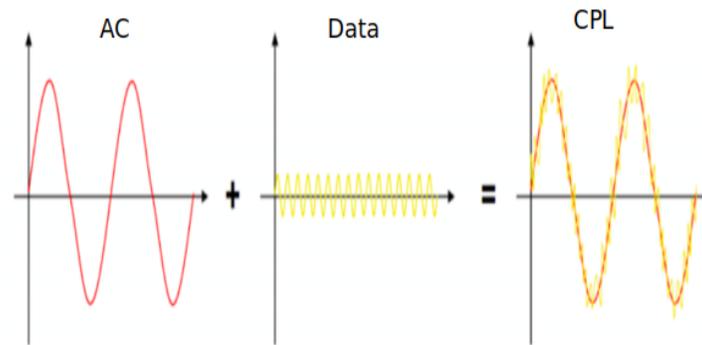


FIGURE 3.5 – CPL porté par un réseau AC

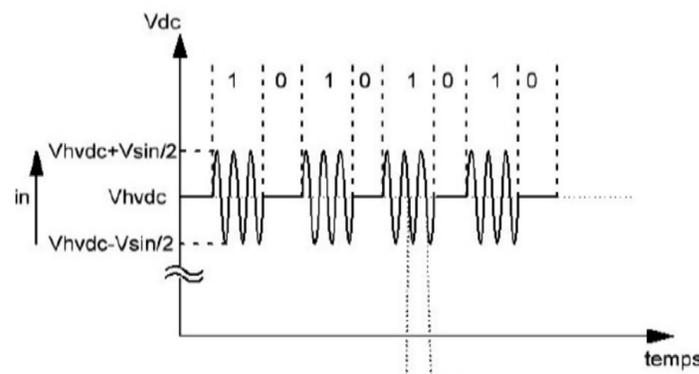


FIGURE 3.6 – CPL porté par un réseau DC [72]

### Le standard CPL

Homeplug Av : Actuellement, le principal standard CPL utilisé pour des applications multimédia est le standard Home-plug Av qui atteint un débit théorique de 200 Mbit/s sur la bande [1,8 30] MHz. Les principales caractéristiques du standard Homeplug Av sont présentées dans le tableau 3.3.

#### Autres standards :

Parallèlement au standard Homeplug-Av, d'autres organisations ont développé leurs propres standards ou normes comme l'Universal Powerline Association (UPA) et le High Definition Power Line Communication (HD-PLC). Les caractéristiques principales de ces standards CPL sont présentées dans le tableau 3.4.

TABLEAU 3.3 – Caractéristiques du standard Homeplug Av.

Bande passante	[1.8; 28] MHz
Fréquence d'échantillonnage	75 MHz
Nombre de sous-porteuses totales	1536
Nombre de sous-porteuses utiles	917
Constellation	BPSK, QPSK, 8-QAM, 16-QAM, 64-QAM, 256 QAM, 1024-QAM
Technique de transmission	OFDM
Taille de FFT	3072
Temps symbole OFDM sans préfixe cyclique	40,96 $\mu$ s
Durée du préfixe cyclique	5.56 $\mu$ s ; 7.56 $\mu$ s ; 40.96 $\mu$ s
Débit maximum	200 Mbit/s
Technique d'accès au canal	CSMA/CA TDMA

TABLEAU 3.4 – Standards HD-PLC et UPA

Paramètres	HD-PLC	UPA
Modulation	wavelet OFDM	window OFDM
Codage canal	RS-CC	RS+4D-TCM
Système d'accès au canal	TDMA-CSMA/CA	ADTDM
Taille de FFT 3072 NC	512	NC
Nombre total de porteuses	NC	1536
Fréquence d'échantillonnage	62,5 MHz	NC
Bande de fréquence	[4; 28] MHz	[0; 30] MHz
Débit brut	190 Mbit/s	200 Mbit/s
Nombre maximal de nœud	64	64

### G3-Power Line Communication (G3-PLC)

La technologie G3-PLC est basée sur la technique de multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM), qui offre la vitesse, la robustesse et la portée nécessaires pour les réseaux à courants porteurs à grande échelle. G3-PLC utilise des techniques de communication large bande avancées pour atteindre un débit de 300 Kbits/s.

#### A. Couche physique

G3-PLC est basé sur la technologie OFDM qui utilise des techniques avancées de codage de canaux. Cette combinaison favorise une communication très robuste sur le canal de courants porteurs. La figure 3.7 présente le schéma fonctionnel d'un système OFDM.

La largeur de la bande (CENELEC/FCC/..) est divisée en plusieurs sous-canaux, qui peuvent être vus comme autant de porteuses modulées PSK indépendantes avec différentes fréquences de porteuses (orthogonales) sans interférences. Les codages convolutifs et Reed-Solomon fournissent des bits de redondance permettant au récepteur de récupérer les bits perdus en raison du bruit de fond et des bruits impulsionnels. Le signal OFDM est généré par l'exécution d'une IFFT sur les points de signaux à valeur complexe produits par modulation

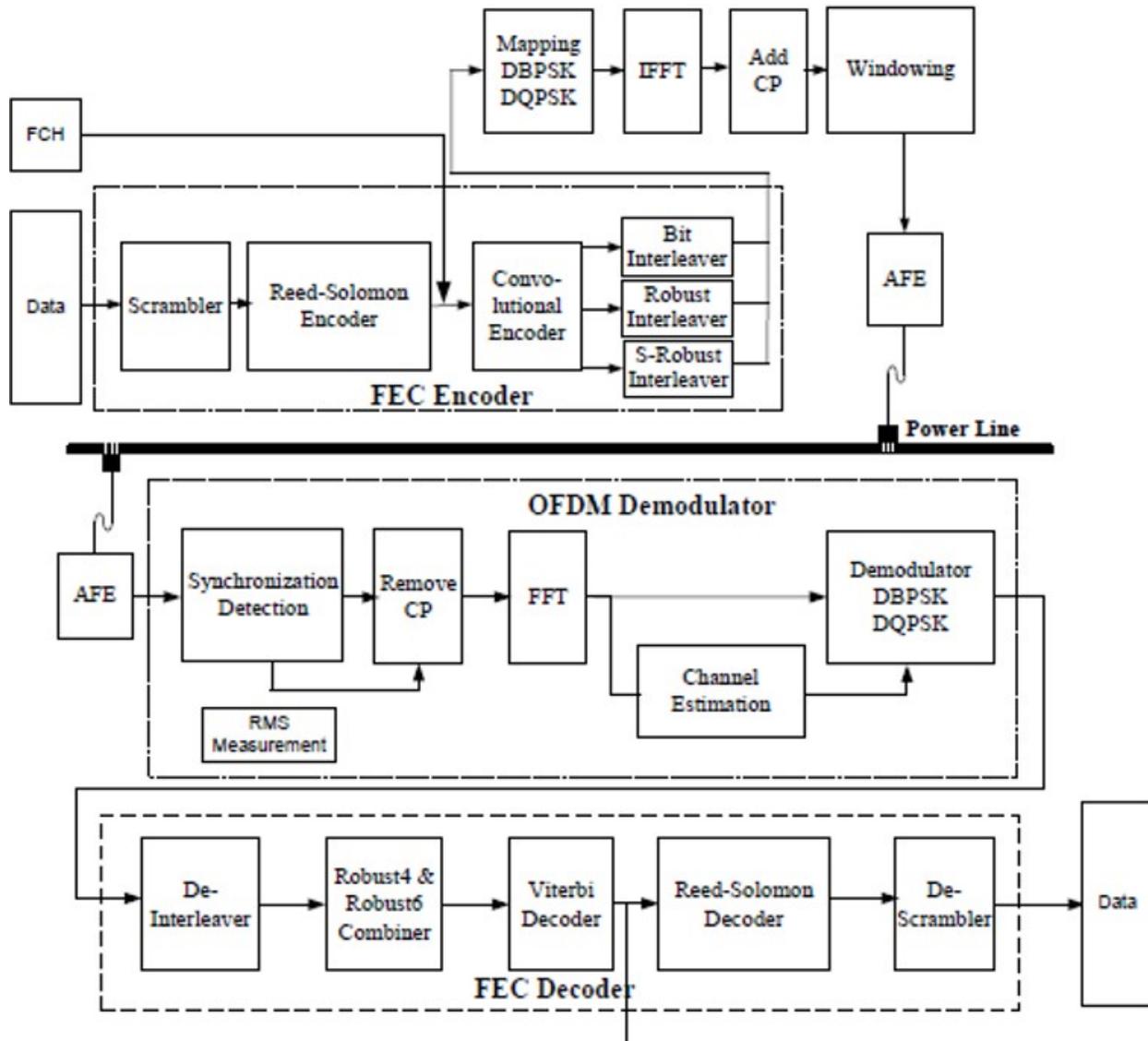


FIGURE 3.7 – Schéma fonctionnel d'un transmetteur-récepteur OFDM [72]

de phase codée en différentielle qui sont alloués à des sous-porteuses individuelles.

### B. Caractéristiques :

- Cette technologie doit être conforme aux réglementations d'organismes du monde entier comme CENELEC, ARIB et FCC (de 10 kHz à 490 kHz). Les modulations utilisées sont 8PSK, QPSK, BPSK ou Robuste.
- Le support d'IPv6, qui autorise la création de systèmes de gestion d'énergie électrique fondés sur Internet.
- Un protocole CSMA/CA de la couche MAC amélioré, une requête automatique de répétition (ARQ) et un routage de réseau maillé (MRP) pour supporter tous les ser-

vices courants pour diverses topologies de réseau.

- Un coprocesseur d'authentification avec un chiffrement AES-128 pour augmenter la sécurité des données est proposé.
- Un Tone mapping (choix des sous-canaux) adaptatif est disponible pour optimiser l'utilisation de la bande passante.
- Deux niveaux de correction anticipée d'erreur permettent une communication fiable sur les canaux en environnement sévère.
- La bande de fréquence s'étale de 10 à 487.5 kHz (tableau 3.5).

TABLEAU 3.5 – Bande de fréquences et Modulations [72]

Bande de fréquence	Type Robuste Débit (bps)	Type BPSK Débit (bps)	Type QPSK Débit (bps)	Type 8PSK Débit (bps)	Type Max 8PSK Débit (bps)
CENELEC A (36 kHz au 91 kHz)	4.500	14.640	29.285	43.928	46.044
FCC (150 kHz au 487.5 kHz)	21.000	62.287	124.575	186.863	234.321
FCC (10 kHz au 487.5 kHz)	38.000	75.152	150.304	225.457	298.224

### C. Structure des trames

La couche physique reconnaît deux types de trames (différence au niveau du FCH selon le mode robuste ou non). Chaque trame débute par un préambule qui est utilisé à titre de synchronisation, ce préambule se compose de huit symboles de synchronisation suivis d'un symbole et demi sans préfixe cyclique entre des symboles adjacents (Figure 3.8). Le préambule est suivi par 13 symboles de données alloués au FCH (Frame Control Header). Le FCH détient les informations de contrôle importantes requises pour démoduler la trame de données.

La durée théorique d'une trame PHY est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$T_{\text{Frame}} = ((N_s + N_{\text{FCH}}) + (N_{\text{CP}} + (N - N_o)) + (N_{\text{pre}})) / F_s \quad (3.1)$$

$N_s$  est le nombre de symboles pour la donnée (c'est un paramètre qui varie entre 12 et 256), les autres paramètres sont définis dans le tableau 3.6.

TABLEAU 3.6 – Paramètres de l'équation de la durée

Nombre de points FFT	$N=256$
Nombre d'échantillons en chevauchement	$N_o=8$
Nombre d'échantillons de préfixe cyclique	$N_{CP}=30$
Nombre de symboles FCH	$N_{FCH}=13$
Fréquence d'échantillonnage	$F_s=0.4\text{MHz}$
Nombre de symboles en préambule	$N_{pre}=9.5$

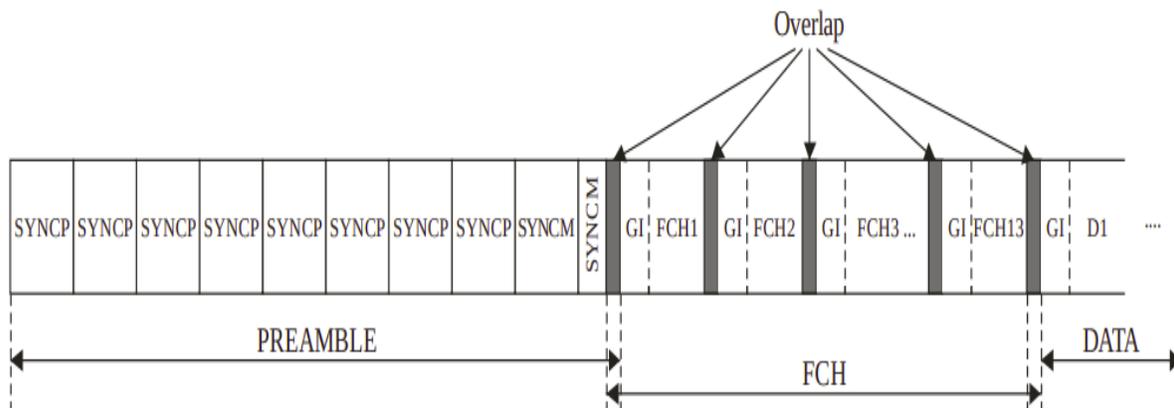


FIGURE 3.8 – Trame Physique G3-PLC [72]

#### D. Le protocole G3-PLC

Comme illustré par la figure 3.9, le protocole G3-PLC intègre la nouvelle génération d'IP (IPV6), qui ouvre largement la gamme des applications et services potentiels. Pour permettre une bonne interopérabilité entre IPV6 et MAC, une sous-couche d'adaptation prise dans le monde Internet et appelée 6LoWPAN est mise en place. La couche Application comprend deux grandes classes, applications basées sur les protocoles Device Language Message Specification (DLMS) / Companion Specification for Energy Metering (COSEM) et applications assurant la gestion de réseau.

#### Test du protocole G3-PLC

Pour évaluer les performances de la pile logicielle G3-PLC, nous avons employé deux cartes d'évaluation ATSAM4CP fournies par Atmel. Cette plateforme complète a été utilisée pour concevoir un système de communication via le CPL, le scénario de communication est présenté dans la figure 3.10.

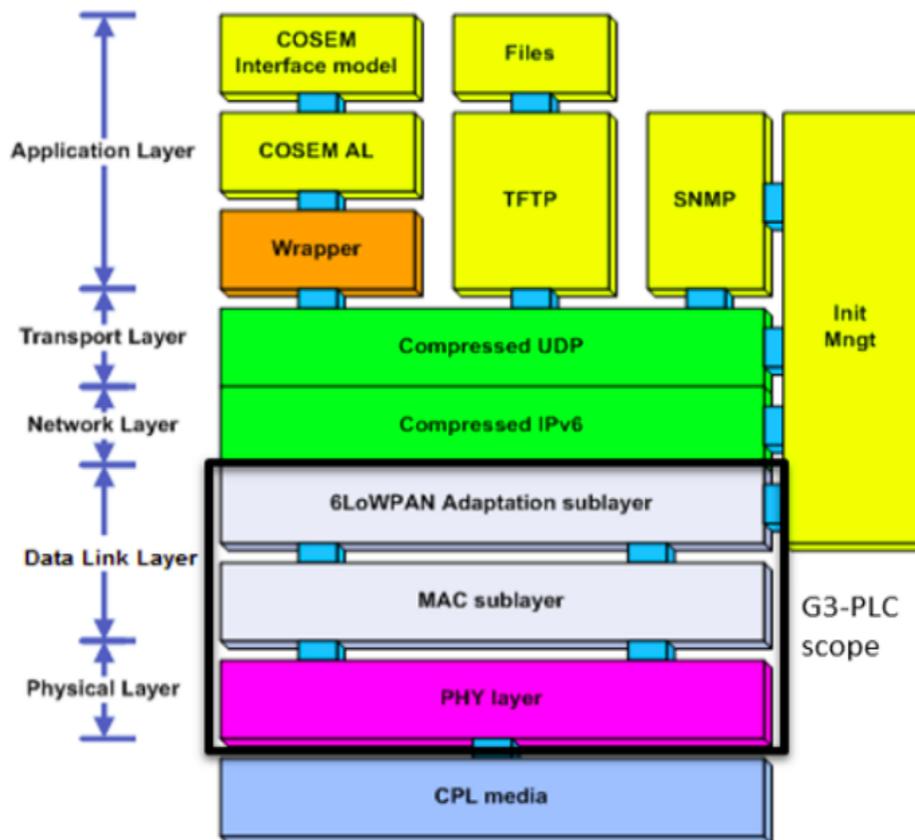


FIGURE 3.9 – Modèle OSI du protocole G3-PLC [72]

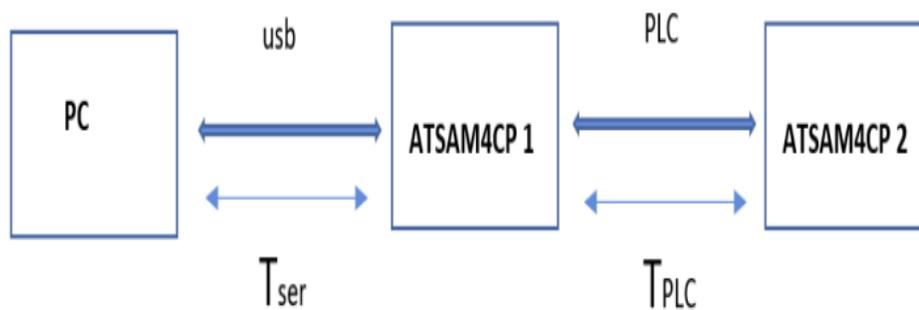


FIGURE 3.10 – Scénario de test G3-PLC

Le but est de calculer le délai d'un échange de messages de bout-en-bout entre les deux nœuds ATSAM4CP.

—  $T_{ser}$  : c'est le temps de transmission d'une trame  $F$  du PC de test au nœud 1

- $T_{plc}$  : c'est le temps de transmission entre le nœud 1 et le nœud 2 (A calculer).
- $T_{total}$  : c'est le temps nécessaire pour que la trame F sorte du PC, passe par les nœud 1 et nœud 2 et revienne vers le PC de test.

$$[T_{plc} = (T_{tot} - 2 * T_{ser})/2] \quad (3.2)$$

Cette approche n'est pas fiable à cause du temps de latence de la transmission série entre le PC et la carte ATSAM, donc nous avons rapidement changé la stratégie de calcul de temps en intégrant des minuteurs directement sur les nœuds de réseaux qui fonctionnent en interruption de haute priorité afin de calculer le temps exact de la communication.

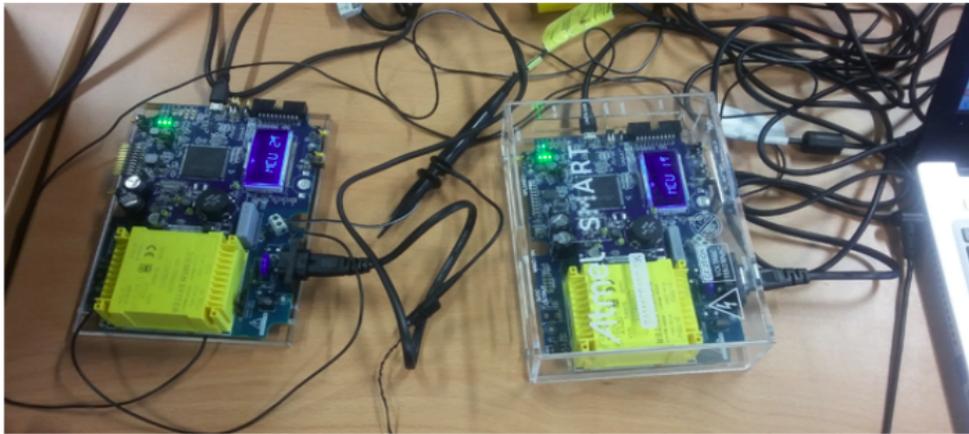


FIGURE 3.11 – Communication CPL avec les cartes ATSAM4CP

### Stabilité du temps de transmission

Afin de pouvoir analyser la stabilité de la communication avec le kit matériel fourni par Atmel et la pile logicielle G3-PLC, nous avons effectué plusieurs tests de transfert de 100 trames de même longueur. Le résultat est que le temps de transmission est quasiment stable avec une gigue variant dans l'intervalle compris entre 0 et 2  $\mu$ s.

### Evolution du délai de transmission en fonction de la taille de données

Nous avons effectué plusieurs tests afin de déterminer les délais de transmissions en fonction du mode de transmission utilisé (BPSK, QPSK et Robuste), les résultats sont présentés dans les figures 3.12, 3.13 et 3.14.

La technologie CPL, en exploitant les lignes électriques existantes pour les communications, permet de réaliser des économies significatives en termes d'infrastructure et de frais de maintenance. Elle évite ainsi la nécessité de créer de nouvelles infrastructures de communication, contournant les obstacles tels que les bâtiments, les collines et les sous-sols qui peuvent entraver les communications sans fil. Malgré ces avantages, contrairement au CPL sur le courant alternatif AC, la technologie CPL sur le courant continu présente encore des

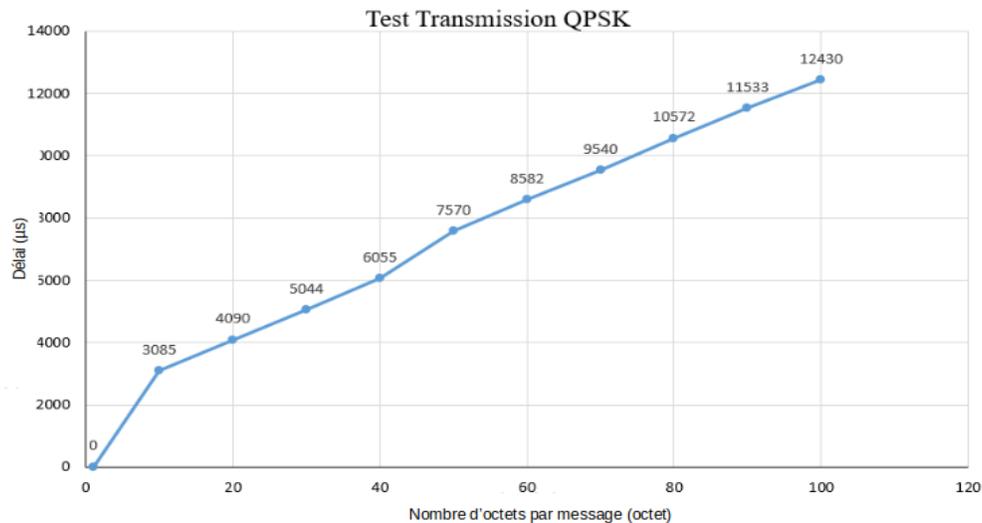


FIGURE 3.12 – Durée de transmission en mode QPSK

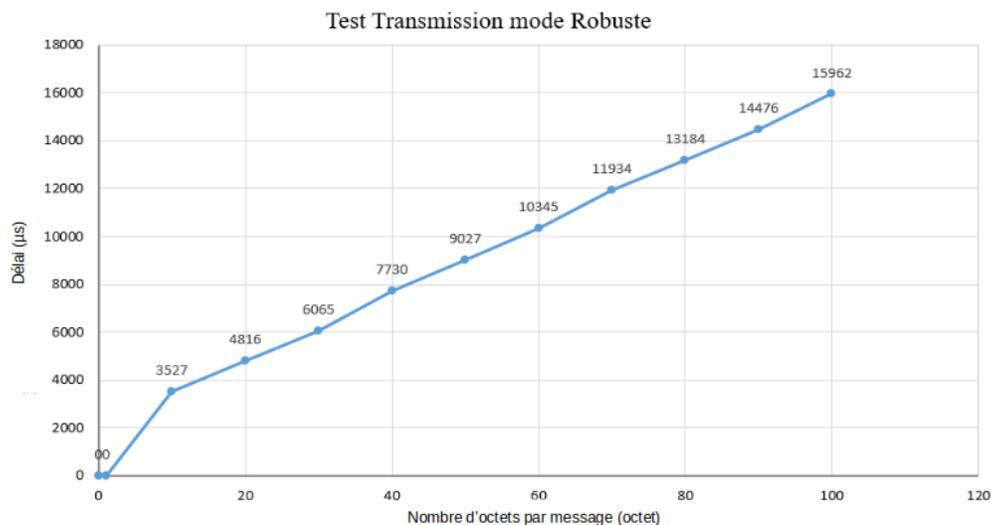


FIGURE 3.13 – Durée de transmission en mode Robuste

limitations pour les applications critiques, telles que celle que nous examinons. En effet, comme le démontrent les résultats des délais de communication en mode robuste (le plus fiable) [73], le délai minimum d'échange de 100 octets entre deux nœuds s'élève à 15,9 ms, ce qui ne répond pas aux exigences de notre application.

Afin de trouver un protocole de communication compatible avec les exigences de temps de communication pour notre application, et afin d'assurer la fiabilité et la stabilité de notre micro réseau DC, nous avons essayé de voir les protocoles temps réel "Real Time Ethernet (RTE)" qui ont fait leur preuve dans le secteur industriel.

Les protocoles RTE les plus utilisés sont :

- PowerLink
- PROFINET

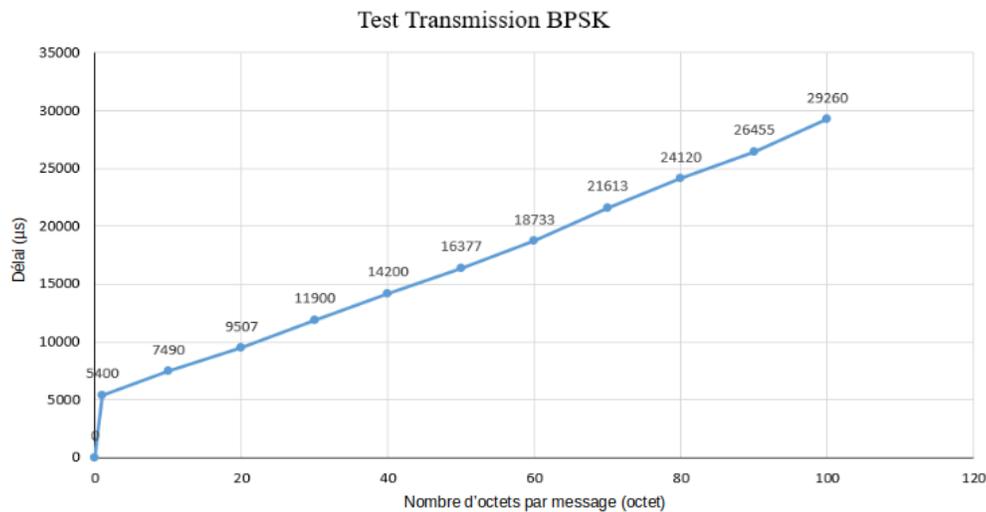


FIGURE 3.14 – Durée de transmission en mode BPSK

- EtherCat
- EtherNet/IP
- SECROS-III

Une classification de ces protocoles RTE à base de temps de réponse est faite dans [74] :

- Classe 1 : pour le contrôle humain avec un temps de réponse d'environ 100 ms. Ce temps est typique pour les interventions humaines dans l'observation des processus. Cette classe est garantie par les canaux classiques TCP/IP.
- Classe 2 : pour le contrôle des processus avec un temps de réponse inférieur à 10 ms. Cette contrainte est imposée par la plupart des outils de contrôle, comme les PLC, PC-based control. Pour atteindre ce comportement temporel, des mesures spéciales doivent être prises au niveau des équipements : l'utilisation d'équipements spéciaux, performants, paraît indispensable afin de simplifier la pile protocolaire et traiter les protocoles TCP/IP dans la phase temps réel pour garantir le temps de réponse nécessaire.
- Classe 3 : pour "motion de control" avec un temps de réponse inférieur à 1 ms, cette classe ne sera plus atteignable avec l'Ethernet classique (100 MB/s) que si le protocole d'accès au medium et la structure de matériels sont modifiés.  
Les protocoles de classe 1 ne sont pas adéquats pour notre application vu le temps de réponse, les protocoles de classe 3 sont les meilleurs en termes de réactivité et de temps de cycle, mais la plupart de protocoles de cette classe nécessitent un matériel spécial comme Ethercat ASIC ou TSN ASIC et ne sont pas compatible avec le matériel de l'Ethernet standard.

Plusieurs études comparatives entre les protocoles de communication ont été réalisées. Le tableau 3.7 présente les protocoles les plus couramment cités dans les travaux de recherche.

Le protocole Powerlink se présente comme l'un des meilleurs candidats pour notre ap-

TABLEAU 3.7 – Comparaison entre des protocoles de communication synthétisée à partir de [75, 76, 77, 78, 79, 80, 81]

Protocole	Modbus-TCP	Ethernet Power-link	Ethercat	Profinet	EtherNet/IP	SERCOS III	TSN	DDS
Délai minimal d'une communication [ms]	< 15	< 0.1	< 0.15	< 0.1	< 0.2	< 0.04	< 0.002	< 0.2
Déterminisme	Non	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Oui
Évolutivité : Max. nr. de dispositifs	Pas de limite	240	180	60	90	9	15	Pas de limite
Auto configuration	Non	Oui	Oui	NON	Non	Oui	Oui	Oui
Matériel spécial	Non	Oui (Option)	Oui	Oui (TTE-thernet switches)	OUI (EEE 1588 switches)	Oui (Option)	Oui	Non

plication. Dans la section suivante, nous examinerons en détail le fonctionnement et les performances de ce protocole.

### 3.2.5 PowerLink

PowerLink est un protocole de communication temps réel déterministe et conforme à la norme IEEE802.3. Il est régi par Ethernet PowerLink Standardization Group (EPSG). L'architecture du protocole PowerLink selon le modèle OSI est décrit dans la figure 3.15. Le modèle OSI de Powerlink est un cadre de réseau qui se compose de sept couches, chacune remplissant une fonction spécifique pour permettre la communication dans les systèmes basés sur Powerlink. Ces couches sont les suivantes :

- Couche Physique : Cette couche traite de la connexion physique et de la transmission des données sur le support de communication, souvent à l'aide de câbles Ethernet. Elle définit les aspects électriques, mécaniques et fonctionnels du support physique.
- Couche Liaison de Données : Responsable de l'encadrement et de la vérification des erreurs des paquets de données. Elle garantit une communication fiable point à point entre les appareils et gère l'adressage, la synchronisation et le contrôle de flux.
- Couche Réseau : Gère l'acheminement et le transfert des paquets de données entre différents appareils du réseau. Elle gère l'adressage logique, l'acheminement des paquets et le contrôle de congestion.

- Couche Transport : Assure la communication de bout en bout en établissant, maintenant et terminant les connexions entre les applications. Elle gère également la segmentation des données, le réassemblage et la détection d'erreurs.
- Couche Session : Établit, maintient et termine les sessions de communication entre les applications. Elle gère la synchronisation, les points de contrôle et la récupération.
- Couche Présentation : Responsable de la traduction des données, du chiffrement et de la compression, en veillant à ce que les données soient présentées dans un format compréhensible par la couche d'application.
- Couche Application : La couche la plus élevée où les applications utilisateur et les services réseau interagissent directement avec le réseau. Elle offre une plateforme pour les applications afin d'échanger des données sur le réseau Powerlink.

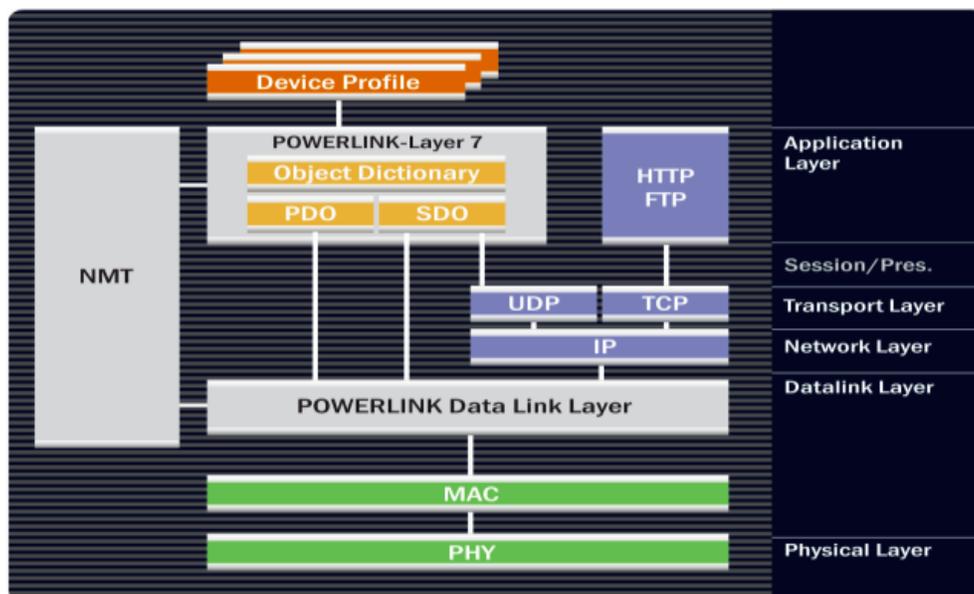


FIGURE 3.15 – Modèle OSI PowerLink[28]

Le problème majeur des protocoles Ethernet TCP/IP est le non déterminisme causé par l'utilisation de mécanisme CSMA/CD. Pour une transmission déterministe de données, la norme POWERLINK [82] améliore la couche liaison de données avec des mécanismes de scrutation et de découpage temporel pour permettre une transmission déterministe de données. PowerLink est totalement open source donc ne nécessite pas de matériel spécifique pour l'implémentation. Les composants d'Ethernet standard sont suffisants pour avoir un protocole de communication déterministe et temps réel sans aucun investissement matériel ou logiciel.

## Mécanismes

Le protocole PowerLink améliore la couche liaison de données de l'Ethernet standard qui utilise le mécanisme CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection) avec les mécanismes TDMA (Time Division Multiple Access) qui donnent à chaque nœud esclave (Controlled Node) l'accès exclusif au réseau pour une durée bien déterminée. Ainsi PowerLink définit un maître MN (Manager Node) qui est en charge de modérer l'accès au réseau afin d'éviter tout type de collision pour permettre une transmission de données déterministe.

## Cycle de base

PowerLink fonctionne d'une manière cyclique pour assurer la communication entre les différents nœuds du réseau. Il existe trois phases principales dans un cycle PowerLink qui sont : la phase Idle, la phase Isochrone et la phase Asynchrone (figure 3.16).

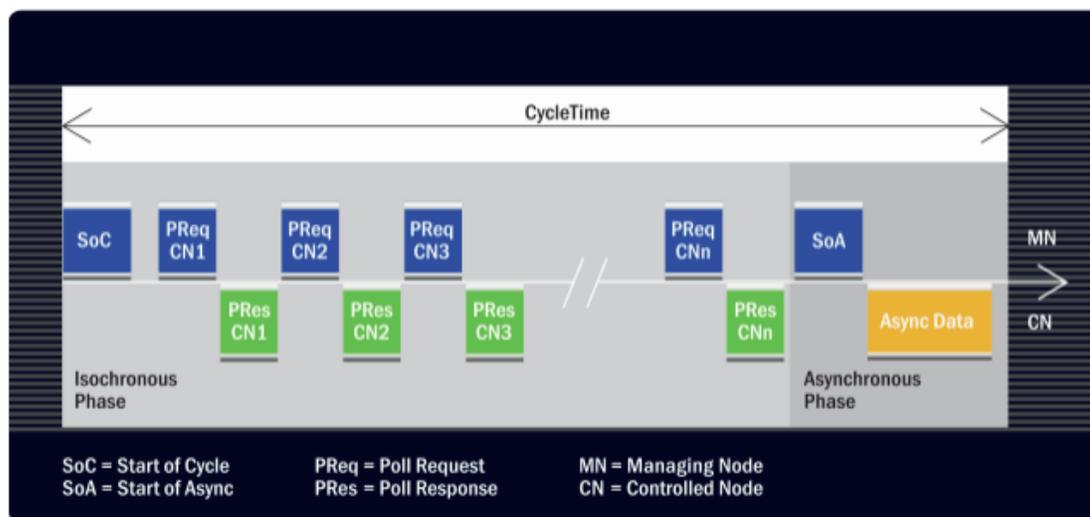


FIGURE 3.16 – Cycle PowerLink [82]

### Phase Isochrone

Cette phase est dédiée pour le transfert de données critiques. L'annonce du début de cette phase se fait par un message « Start of Cycle » (SoC) envoyé en broadcast depuis le MN vers tous les CNs du réseau. Selon le mécanisme de Polling, le MN envoie un message « Poll Request » (PReq) en Unicast à chaque CN du réseau à part celui auquel ce dernier doit répondre, dans un délai bien déterminé, par un message « Poll Response » (PRes) en broadcast. L'accès au réseau est exclusif pour chaque nœud émetteur pour éviter les collisions. La fin de cette phase est annoncée par un message PRes envoyé par le MN en broadcast vers tous les nœuds CNs. Outre le transfert de données isochrones au cours de chaque cycle de base, certains nœuds sont aussi capables de partager des tranches de données à transférer pour une meilleure utilisation de la bande passante. Pour cette raison, la phase isochrone peut distinguer entre les fenêtres de transferts dédiées aux nœuds particuliers, qui doivent envoyer leurs données à chaque cycle de base. Par conséquent, les données moins

importantes peuvent être transférées dans des cycles plus longs que le cycle de base.

### **Phase Asynchrone**

Pendant cette phase il y a un échange de données non critiques, cette phase est généralement dédiée à la configuration et au paramétrage du réseau. Le début de cette phase est annoncé par un message « Start of Asynchronous » (SoA) envoyé en broadcast dans le réseau. Pendant cette phase n'importe quel nœud peut envoyer un message « Asynchronous Send » (ASnd) contenant des informations non critiques généralement liées à la configuration du réseau ou bien la collecte d'informations sur les nœuds.

### **Phase Idle**

C'est une phase de repos qui sépare deux cycles consécutifs et pendant laquelle il n'y a pas d'échange de données.

## **Couche application PowerLink**

PowerLink hérite de la couche applicative du bus de terrain CANopen qui se base sur le mécanisme de dictionnaire d'objets pour assurer l'échange de données entre les différents nœuds du réseau. Le dictionnaire d'objets est une liste structurée d'objets qui forme la principale interface entre la demande du nœud et le réseau, et permet au dispositif d'exposer les données, les paramètres et les services à d'autres participants du réseau. Les objets dans le dictionnaire d'objets peuvent être accessibles via le service SDO (Service Data Objects) ou le PDO (Process Data Object). Un objet définit une interface entre l'application, l'interface réseau et d'autres participants au réseau. Les objets peuvent être subdivisés en sous-objets.

### **SDO**

La communication SDO est basée sur un principe client / serveur : un client SDO établit une connexion à un serveur SDO et émet une commande spécifique (lecture ou écriture de / vers un objet). Cette connexion est unicast et permet d'accéder à tous les objets d'un nœud distant.

### **PDO**

Dans une configuration de réseau, des données spécifiques doivent être fréquemment transmises dans certains cas, par exemple les données réelles d'un capteur. Ces données sont d'une part disponible sans la surcharge d'un autre protocole (demande/réponse), et d'autre part intéressante pour plusieurs participants du réseau conséquent. La communication PDO suit le principe éditeur/abonné : le nœud de transmission crée un (Transmit Process Data Object (TPDO)) qui contient toutes les valeurs réelles d'un ensemble d'objets et publie fréquemment au réseau. Du côté de la réception, chaque nœud intéressé par une ou plusieurs des valeurs peut souscrire à cette TPDO, donc la configuration comme un PDO de réception (Receive Process Data Object (RPDO)). Le processus d'assemblage des TPDO et RPDO est appelé PDO Mapping.

Dans PowerLink, la communication PDO a lieu dans la phase isochrone et utilise les cadres "PollRequest (de PReq)" et "PollResponse (PRES)" pour le transport de la charge utile PDO.

### **Trame PowerLink**

Chaque paquet de PowerLink se compose d'un en-tête et des données réelles de l'utilisateur.

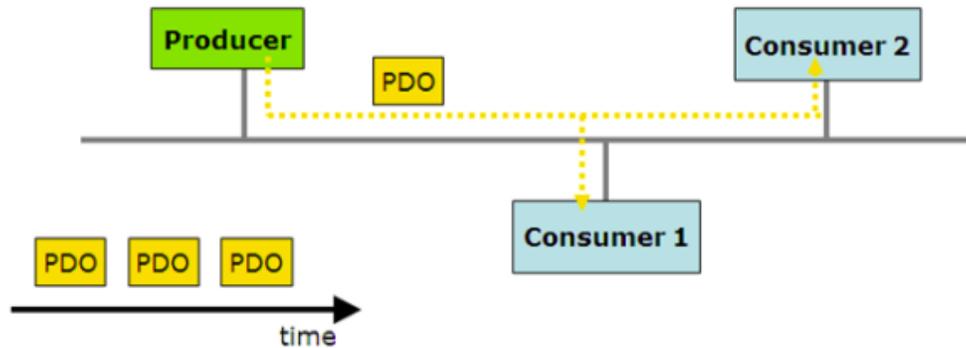


FIGURE 3.17 – Communication par PDO [82]

Ce paquet fait partie d'une trame Ethernet normale dont la taille doit être comprise entre 64 octets et 1500 octets. La figure 3.18 représente les champs de Trame Power Link.

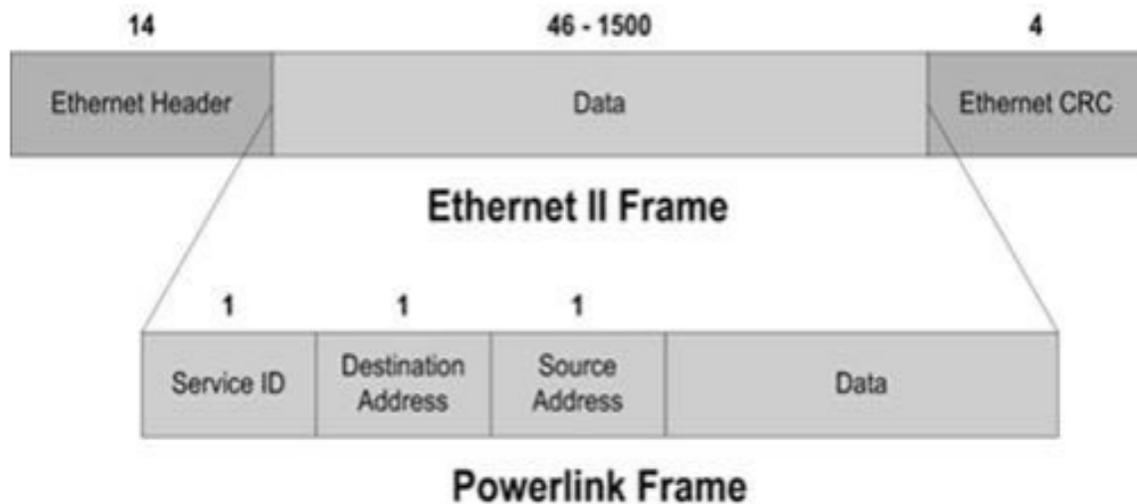


FIGURE 3.18 – Trame PowerLink [82]

L'en-tête PowerLink lui-même est composé de :

- 1 bit : réservé
- 7 bits : type de message
- 8 bit : numéro de nœud de destination
- 8 bits : numéro de nœud source

### Temps de cycle

Le calcul de temps de cycle minimum ( $T_{c_{min}}$ ) pour un réseau PowerLink qui comporte un maître et un seul esclave est calculé en suivant les spécifications données par le standard

[82] comme suit :

$$[T_{C_{\min}} = T_{SoC} + T_{IFG} + T_{Preq} + T_{IFG} + T_{Pres} + T_{IFG} + T_{SoA} + T_{IFG} + T_{Asnd}] \quad (3.3)$$

Avec IFG (Inter Frame Gap) égale à 960 s et avec un débit configuré de 100Mbits/s, nous obtenons un Temps de cycle minimum de 277  $\mu$ s [83].

Pour obtenir une mesure concrète du délai minimal d'une communication de bout en bout entre un maître et un esclave PowerLink, nous avons expérimenté avec deux dispositifs distincts pour l'esclave (figure 3.19) : une carte d'évaluation STM3210c basée sur le microcontrôleur STM32F103, ainsi qu'une carte Raspberry Pi 2.

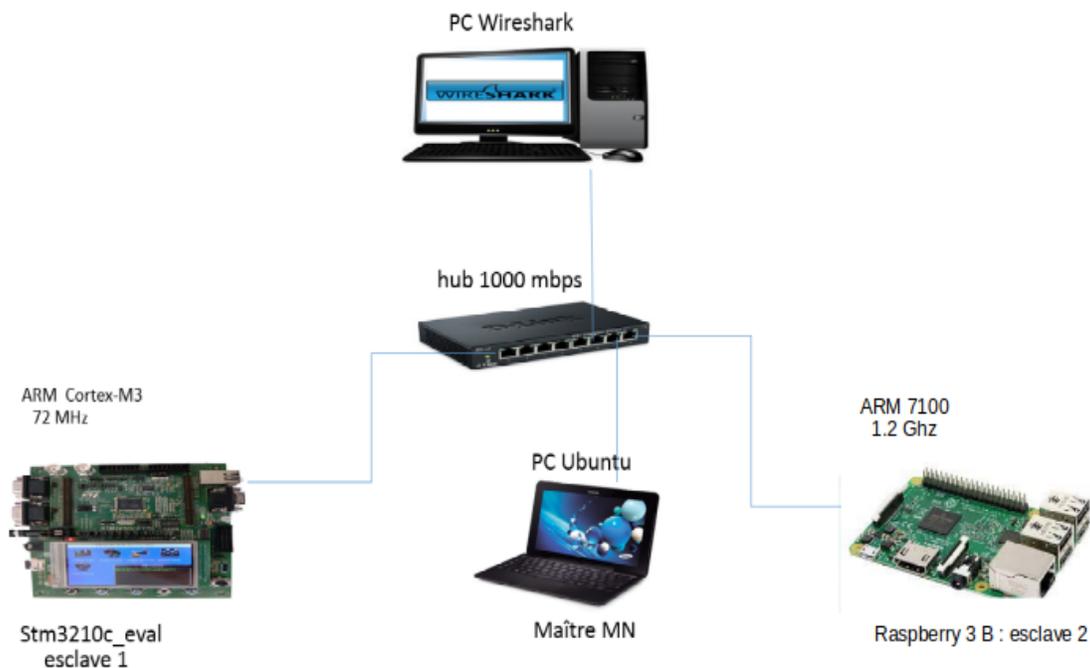


FIGURE 3.19 – Banc de test pour une communication PowerLink

Les délais observés pour les deux esclaves (figure 3.20) lors d'une communication de bout en bout avec le maître PowerLink diffèrent considérablement des valeurs théoriques calculées dans la section précédente (51 et 200 ms par rapport aux 277  $\mu$ s théoriques). En réalité, le délai de communication de bout en bout selon les spécifications PowerLink inclut un autre facteur de latence, à savoir la gigue de démarrage, qui varie entre 0 et 50 ms. Cette variation pourrait expliquer les valeurs obtenues pour l'esclave 2 (carte Raspberry Pi), mais ne semble pas être la cause des résultats obtenus pour l'esclave 1 (STM3210c). Il est possible qu'une mauvaise configuration de la pile logicielle PowerLink ou des problèmes liés à l'horloge puissent affecter les performances de l'esclave 1.

Dans les deux situations, ces délais ne respectent pas les contraintes de temps imposées par notre application.



implémentations DDS que sont OpenSplice et RTI, les auteurs ont adopté une approche pratique et considèrent plusieurs mesures de performance différentes utiles pour évaluer les deux implémentations, d'abord appliquées à un environnement de laboratoire plus limité, puis à un environnement de production à grande échelle. Dans les deux cas on peut bien voir que pour des messages de 4096 octets, la moyenne de délai de communication ne dépasse pas 1 ms. Une autre étude a été portée par Stefan P et al.[85] présente aussi une évaluation de performances de quelques protocoles de l'industrie 4.0 comme DDS, MQTT, OPC UA... L'étude confirme bien la réactivité de DDS malgré l'Overhead de ses messages qui dépassent 8000 octets.

T. A. Youssef et al. [86] ont effectué une simulation avec DDS pour un système de gestion d'énergie pour micro réseau. La simulation sur Matlab a montré des latences de communication très faible ( $< 400$  us) pour des échanges Unicast et Multicast.

On peut citer d'autres avantages de DDS en plus de ses performances en termes de délai de communication et de latence :

- L'indépendance de l'emplacement des interlocuteurs grâce au protocole de publication/souscription anonyme.
- L'absence de gestion d'adresse IP grâce au mécanisme de découverte.
- L'évolutivité des communications grâce à la grande quantité des domaines, sujets, producteurs et consommateurs possibles.
- La portabilité et l'interopérabilité grâce à une interface et un protocole de communication.
- La standardisation le rendant compatible avec l'Ethernet standard 802.3.

## Fonctionnement

DDS définit les spécifications pour une interface de programmation (API) qui se divise en deux couches soit la couche de publication/souscription basée sur les données (DCPS) et une autre couche de reconstruction locale des données appelé (DLRL). Le modèle OSI pour DDS est présenté dans la figure 3.21 :

La couche DCPS définit la méthode de communication qui est basée sur le paradigme de messagerie de publication-souscription (Figure 3.22) et gère le système de QoS. DCPS définit aussi les différentes entités qui doivent être utilisées afin d'effectuer une communication.

## Entités DDS

Afin d'avoir une communication avec DDS, plusieurs entités doivent être créées dans la couche DCPS.

Tel que mentionné précédemment, la couche DCPS définit plusieurs entités afin d'établir les communications définies dans la norme. Chacune des différentes entités ont leurs propres utilités et certaines sont obligatoires, d'autres ne le sont pas. Les principales entités sont les suivantes : participants au domaine, publieurs (publishers), abonnés (subscribers), rédacteurs de données (data-writer), lecteurs de données (data-reader) et les sujets (topic). Une description de ces entités et de leurs interactions est effectuée dans cette section.

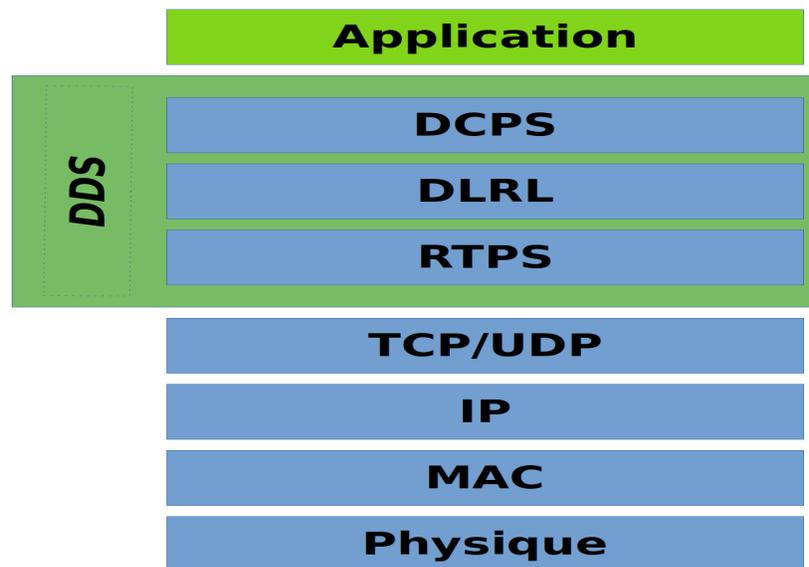


FIGURE 3.21 – Modèle OSI de protocole DDS

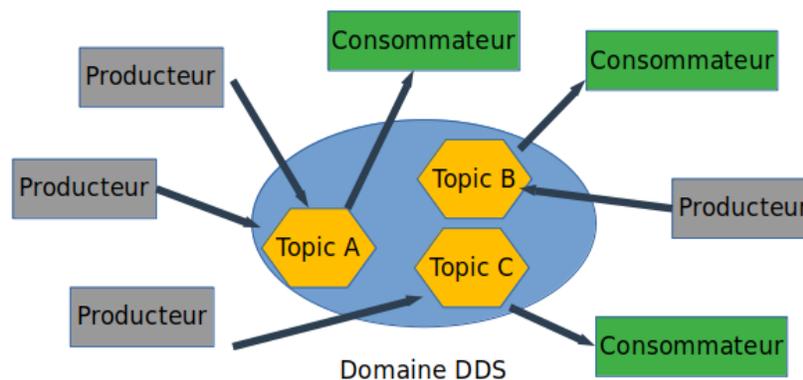


FIGURE 3.22 – La structure producteur/consommateur dans DDS

**Domaine** : Un domaine représente un réseau logique de communication où seuls les membres appartenant à ce domaine peuvent interagir entre eux. Il s'agit ainsi d'une approche visant à sécuriser les données en limitant leur accessibilité aux seuls participants autorisés.

### Producteur (Publisher)

Cette entité, mise en place par un membre du domaine, offre la possibilité de créer un ou plusieurs rédacteurs de données. Certaines caractéristiques de qualité de service (QoS) du publieur (publisher) seront alors assignées aux rédacteurs (Data-writers), facilitant ainsi la gestion simultanée des QoS de plusieurs rédacteurs (Figure 3.23).

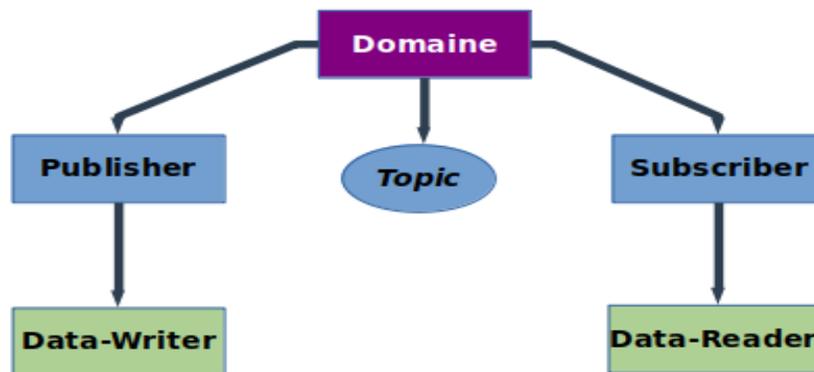


FIGURE 3.23 – Entités DDS

### Consommateur (Subscriber)

Cette entité, qui est créée par un participant au domaine, permet de créer un ou plusieurs lecteurs de données. Certaines QoS du consommateur seront attribuées aux lecteurs (Data-Readers) ce qui permet de contrôler les QoS de plusieurs lecteurs en même temps (Figure 3.23).

### Lecteur (Data-Reader)

Cette entité, instaurée par un membre du domaine, autorise la création d'un ou plusieurs utilisateurs de données. Certaines caractéristiques de qualité de service (QoS) de l'abonné seront associées à ces utilisateurs, facilitant ainsi la gestion simultanée des QoS de plusieurs d'entre eux.

### Sujet (Topic)

Le sujet a une importance cruciale, car il détermine la possibilité de communication entre les rédacteurs et les lecteurs, constituant ainsi un deuxième filtre après le domaine. En effet, seuls les rédacteurs et les lecteurs qui ont été associés au même sujet peuvent interagir entre eux. De plus, lors de sa création, un sujet doit être attribué à un type de données spécifique. Ce type de données définit le format des informations à être transmises via le canal de communication DDS. Il peut s'agir d'un type de données simple, tel qu'un "int", ou bien d'une structure ou d'une union composée de plusieurs types de données simples.

## Configuration DDS

Les mécanismes de Qualité de Service (QoS) sont essentiels pour garantir des performances de haute qualité aux applications en fonction de leur niveau de criticité. Les performances influencées par les QoS sont variées, englobant des aspects tels que la latence maximale, la bande passante, et la gigue, entre autres.

Chaque instance des différentes entités possède son propre ensemble de politiques QoS, qui peuvent être configurées soit lors de leur création, soit en cours d'exécution. Ces diverses politiques de QoS servent également à vérifier la compatibilité des entités entre elles en comparant leurs configurations QoS. En effet, la communication entre un rédacteur et un lecteur

ne peut s'effectuer que si leurs politiques QoS sont compatibles, ce qui peut contribuer à détecter des erreurs de configuration lors de la phase de développement du code.

Nous allons détailler ensuite quelques paramètres de configuration.

### **Délai de publication/réception**

La contrainte de délai de publication/réception (Deadline) est une QoS pertinente, car elle permet de définir un intervalle de temps maximal souhaité pour la publication par un rédacteur ou la réception par un lecteur. Par exemple, un lecteur peut se voir attribuer un délai de réception de 1 ms. Dans ce cas, l'infrastructure DDS doit avertir l'application si plus de 1 ms s'écoule entre la réception de deux données par ce lecteur. De manière similaire, un délai de publication peut être défini pour un rédacteur, afin que l'application soit alertée en cas de non-transmission d'une nouvelle donnée dans le délai spécifié. Il est important de noter que DDS ne peut garantir le respect absolu de ces délais de publication/réception, car cela dépend en fin de compte de la logique de l'application, mais il peut informer l'application en cas de non-respect de ces intervalles.

### **Budget de latence**

La politique de budget de latence (Latency Budget) permet de spécifier la latence maximale souhaitée entre l'émission et la réception d'un échantillon. En cas de non-respect de cette latence, le lecteur reçoit une notification.

### **Durabilité**

La politique de durabilité (Durability) définit la période de validité des échantillons et leur persistance après leur utilisation. Cette politique peut avoir trois valeurs :

- Volatile (volatile) : La valeur volatile permet seulement d'envoyer les échantillons aux abonnés qui existent déjà lors de l'envoi.
- Transitoire (transient) : La valeur transitoire permet de garder plus longtemps les échantillons envoyés pour potentiellement les renvoyer aux nouveaux abonnés qui sont créés après l'envoi original.
- Persistante (persistent). La valeur persistante permet d'enregistrer les échantillons dans un endroit mémoire de façon permanente.

### **Historique**

La politique d'historique (History) est utilisée pour configurer un service qui détermine combien d'échantillons les lecteurs et les rédacteurs conservent en mémoire avant de les remplacer par de nouveaux échantillons. Les options comprennent la conservation de tous les échantillons, la conservation d'un nombre spécifié d'échantillons, ou la conservation uniquement du dernier échantillon.

### **Vivacité**

La politique de vivacité (Liveliness) permet de paramétrer le mécanisme utilisé pour déterminer la présence ou l'absence d'une entité dans le système. Il est également possible de définir la période à partir de laquelle une entité est considérée comme inactive. Cette politique revêt une importance particulière dans le domaine de l'aviation, où il est crucial de savoir quand un interlocuteur n'est plus actif dans le système afin de prendre les mesures nécessaires.

### **Fiabilité**

Cette politique de fiabilité (Reliability) permet de définir le niveau de confiance souhaité pour une communication. Les deux options possibles sont fiable (reliable) et meilleur effort (Best effort). Une communication avec une fiabilité meilleur effort autorise la perte d'échantillons et ne nécessite pas de renvoi des échantillons perdus. En revanche, une communication avec une fiabilité "fiable" contraint le publieur à renvoyer les échantillons qui n'ont pas été reçus par les lecteurs. Cette politique revêt de l'intérêt, car elle permet au DDS d'utiliser des protocoles de transport qui ne disposent pas de mécanismes de fiabilité, tels que UDP/IP, afin de forcer le renvoi des échantillons non reçus.

### **Priorité de transport**

La politique de priorité de transport (Transport Priority) permet d'attribuer des niveaux de priorité distincts aux divers rédacteurs. Cette politique se révèle pertinente compte tenu des différents degrés de criticité des applications qui peuvent parfois partager le même bus de données. En utilisant cette politique, il est possible d'accorder une priorité plus élevée aux applications critiques par rapport aux applications non critiques, évitant ainsi que ces dernières n'accaparent une part disproportionnée de la bande passante du canal de communication.

### **Limite de ressources**

La politique de limite de ressources (Resource Limits) permet de fixer la quantité maximale de mémoire qui peut être attribuée aux différentes entités. Ainsi, il devient possible de superviser la quantité maximale de mémoire allouée pour le fonctionnement de DDS.

### **RTPS assure la liaison avec le protocole de transport**

Le protocole Real-Time Publish Subscribe (RTPS) trouve ses origines dans le domaine de l'automatisation industrielle et a été officiellement adopté par l'IEC en tant que composante de la suite Ethernet industriel en temps réel IEC-PAS-62030. Il s'agit d'une technologie éprouvée sur le terrain qui est actuellement déployée à l'échelle mondiale dans des milliers de dispositifs industriels.

RTPS a été spécifiquement élaboré pour répondre aux besoins uniques des systèmes de distribution de données. En tant que l'un des domaines d'application ciblés par DDS, la communauté de l'automatisation industrielle a formulé des exigences pour un protocole publieur-souscripteur (publisher-subscriber) standard qui correspond étroitement à celles de

DDS. Par conséquent, une étroite synergie existe entre DDS et le protocole RTPS, à la fois en ce qui concerne l'architecture comportementale sous-jacente et les fonctionnalités de RTPS.

Le protocole RTPS est conçu pour fonctionner sur des réseaux multicasts et sur des réseaux sans connexion à meilleur effort, tels que UDP/IP. Les principales caractéristiques du protocole RTPS incluent :

- Des propriétés de performance et de qualité de service pour permettre une communication publieur-souscripteur à meilleur effort et fiable pour les applications temps réel sur des réseaux IP standard.
- Une tolérance aux pannes pour permettre la création de réseaux sans points uniques de défaillance.
- Une extensibilité pour permettre au protocole d'être étendu et amélioré avec de nouveaux services sans rompre la compatibilité descendante et l'interopérabilité.
- Une connexion plug-and-play pour que de nouvelles applications et services soient automatiquement découvertes et que les applications puissent rejoindre et quitter le réseau à tout moment sans nécessiter de reconfiguration.
- Une configurabilité pour permettre de faire un équilibre entre les exigences de fiabilité et de temps pour chaque livraison de données.
- Une modularité pour permettre aux dispositifs simples d'implémenter un sous-ensemble du protocole et de toujours participer au réseau.
- Une scalabilité pour permettre aux systèmes de potentiellement évoluer jusqu'à de très grands réseaux.
- Une sécurité de type pour empêcher les erreurs de programmation de compromettre le fonctionnement des nœuds distants.

Les caractéristiques ci-dessus font de RTPS un excellent choix pour un protocole filaire DDS. Étant donné ses racines publieur-souscripteur, Le protocole RTPS n'est pas utilisable par lui-même et doit reposer sur un protocole de transport tel que le UDP ou TCP. De ce fait, les performances de DDS sont fortement dépendantes du protocole de transport sur lequel repose le RTPS-DDS. L'utilisation de ce protocole standardisé dans l'implémentation d'un intergiciel DDS n'est pas obligatoire, mais vu les avantages de différents mécanismes que ce protocole offre tel que le process de découverte et pour augmenter ainsi l'interopérabilité de l'intergiciel avec les autres implémentations, l'intégration de ce protocole est désormais recommandée.

### Processus de découverte

Le protocole RTPS-DDS établit un mécanisme de découverte qui permet aux différentes entités DDS de s'interconnecter de manière automatique et anonyme, sans nécessiter de connaissances préalables sur la configuration réseau ou les adresses IP.

Cette fonctionnalité présente l'avantage de simplifier la gestion des communications entre les différents nœuds, car l'ajout de nouveaux nœuds à un système existant ne requiert pas une connaissance approfondie des autres nœuds.

La norme RTPS-DDS définit deux protocoles de découverte : le protocole de découverte des participants (Participant Discovery Protocol (PDP)) et le protocole de découverte des points d'arrivée (Endpoint Discovery Protocol (EDP)). Le processus de découverte se déroule en deux étapes : d'abord, la découverte des participants grâce au PDP, puis la découverte des lecteurs/écrivains via l'EDP. Les détails de ce processus de découverte sont exposés en

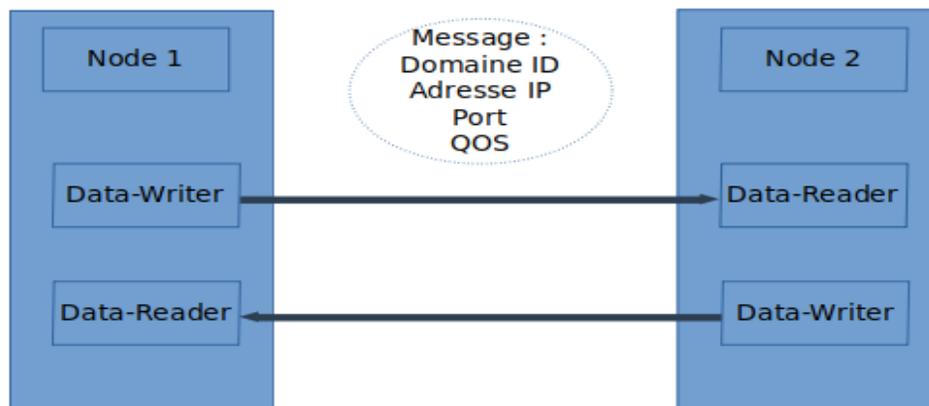


FIGURE 3.24 – Echange de données via RTPS

profondeur dans les sections suivantes.

### Protocole de découverte des participants (PDP)

Le PDP est utilisé pour que deux participants sur le réseau se découvrent et échangent leurs informations. La figure 3.24 illustre le fonctionnement du processus de découverte des participants ainsi que le contenu des messages échangés. Cette figure présente des entités DDS prédéfinies (un lecteur et un rédacteur) qui sont créées pour débiter un échange de données entre les deux participants. Ces entités communiquent sur des ports prédéfinis dans la norme RTPS-DDS, donc ne nécessitent aucune information supplémentaire pour pouvoir communiquer ensemble. La figure 3.24 présente également les données qui sont échangées entre les deux participants soit l'adresse IP, le numéro de port, les politiques de QoS et l'identificateur globalement unique (Global Unique Identifier (GUID)) des participants concernés. De ce fait, les participants ont ensuite toutes les informations nécessaires afin de pouvoir se connecter ensemble.

Ces données sont régulièrement diffusées sur le réseau afin d'indiquer la présence du participant aux nouveaux participants potentiels et de vérifier la disponibilité des participants actuels. La fréquence d'envoi de ces informations est régie par la Qualité de Service (QoS) de vivacité du participant, ce qui détermine la quantité de bande passante utilisée pour les métadonnées. Par conséquent, il est nécessaire de trouver un équilibre entre la rapidité de détection de la terminaison (qu'elle soit normale ou anormale) d'un participant et la quantité de bande passante consacrée aux données de vivacité (métadonnées).

### Protocole de découverte des points d'arrivée (EDP)

Lorsqu'un lecteur ou un rédacteur est créé, l'EDP est activé pour permettre aux participants d'échanger de nouvelles informations concernant les différents lecteurs et rédacteurs qu'ils contiennent.

Les communications nécessaires pour effectuer le processus de découverte des lecteurs/écrivains sont effectuées en utilisant des entités DDS prédéfinies conformément à la norme

RTPS-DDS. Cela permet à un participant d'établir des liaisons entre ses lecteurs et rédacteurs et ceux des autres participants. Cette connexion entre un lecteur et un rédacteur est établie uniquement s'ils partagent le même sujet et possèdent des politiques de QoS compatibles. La figure 3.25 illustre le fonctionnement du processus de découverte des lecteurs et rédacteurs. Cette figure met en évidence que les messages nécessaires pour établir la connexion entre les lecteurs et les rédacteurs contiennent à la fois les politiques de qualité de service (QoS) et les identifiants globalement uniques (GUID) des différents lecteurs et rédacteurs appartenant aux participants concernés.

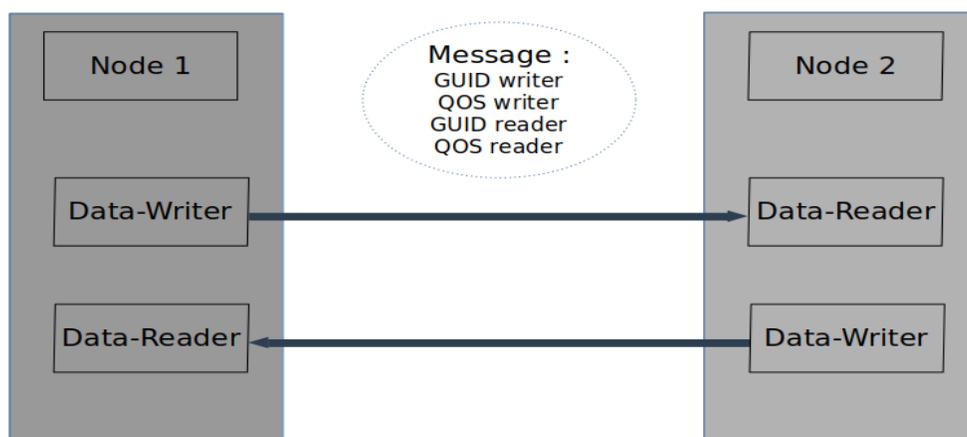


FIGURE 3.25 – Fonctionnement du processus de Découverte des entités par EDP

### La couche RTPS

Pour résumer, bien que la couche RTPS ne soit pas obligatoire dans les spécifications DDS, la couche RTPS est cruciale en assurant les fonctionnalités suivantes :

- RTPS assure la liaison avec le protocole de transport
- RTPS définit un processus de découverte qui permet aux différentes entités DDS de se connecter les unes aux autres automatiquement et de façon anonyme.
- RTPS assure le temps réel de DDS.
- RTPS gère aussi les messages de Vivacité (Heartbeat).

La spécification RTPS divise le protocole de découverte en deux protocoles indépendants et gère leurs fonctionnements :

- 1. Participant Discovery Protocol (PDP).
- 2. Endpoint Discovery Protocol (EDP).

## 3.3 Modélisation d'un micro-réseau DC basé sur une architecture de communication DDS

### 3.3.1 Modèle de communication entre les Smart Nodes (SNs)

Afin de modéliser le micro-réseau DC avec une architecture de communication basée sur DDS, nous avons suivi les étapes suivantes :

- Définir les composants du micro-réseau DC : nous avons identifié les nœuds du micro-réseau DC : chaque composant du micro-réseau DC peut être considéré comme un nœud dans le système distribué. Nous avons ainsi utilisé chaque SN comme participant sur le réseau DDS. Notre système DC est ainsi composé de 4 types de nœuds :
  - SNL : Smart Node type Load
  - SNGE : Smart Node type Green Energy
  - SNST : Smart Node type Storage
  - SNS : Smart Node type Source
- Mettre en place une infrastructure DDS : nous avons configuré une infrastructure DDS pour permettre la communication entre les différents nœuds du micro-réseau DC. Cela implique la mise en place de brokers DDS pour faciliter l'échange de données, la définition des types de données échangées et la configuration des canaux de communication entre les nœuds.
- Modéliser les échanges de données : nous avons déterminé quelles informations doivent être échangées entre les nœuds du micro-réseau DC. Cela comporte des données sur la source d'énergie principale (capacité de convertisseur AC/DC et prix de l'électricité), la demande d'énergie (consommation de chaque SNL), l'état des batteries, la production d'énergie verte (production instantanée et prévisions). Nous avons ainsi défini les messages DDS correspondants pour chaque type de données.
- Implémenter la communication DDS : nous avons utilisé la bibliothèque OpenDDS avec ses outils DDS pour implémenter la communication DDS dans notre modélisation. Nous avons ainsi configuré les nœuds pour qu'ils puissent publier et souscrire aux messages DDS, en utilisant les canaux de communication appropriés (data-writers et data-readers).

Le modèle d'échange est présenté dans la figure 3.26.

### 3.3.2 Tests et résultats

Les tests de performances du protocole DDS permettent de mesurer et d'analyser des métriques clés et cruciales pour notre application telles que la latence, le délai maximum pour une communication point à point ou pour diffuser un message pour tous les nœuds sur le réseau. Ces tests fournissent des informations précieuses sur les capacités du protocole DDS dans un environnement réel, en tenant compte de la taille du réseau, du volume de données échangées et de la charge de travail. La latence ou le délai est généralement définie comme le laps de temps nécessaire à un message pour parcourir un système donné. Dans un réseau utilisant des paquets pour la communication, la latence est généralement mesurée selon deux méthodes principales : la latence unidirectionnelle, qui mesure le temps entre l'envoi d'un paquet par la source et sa réception par la destination, et le temps de retard

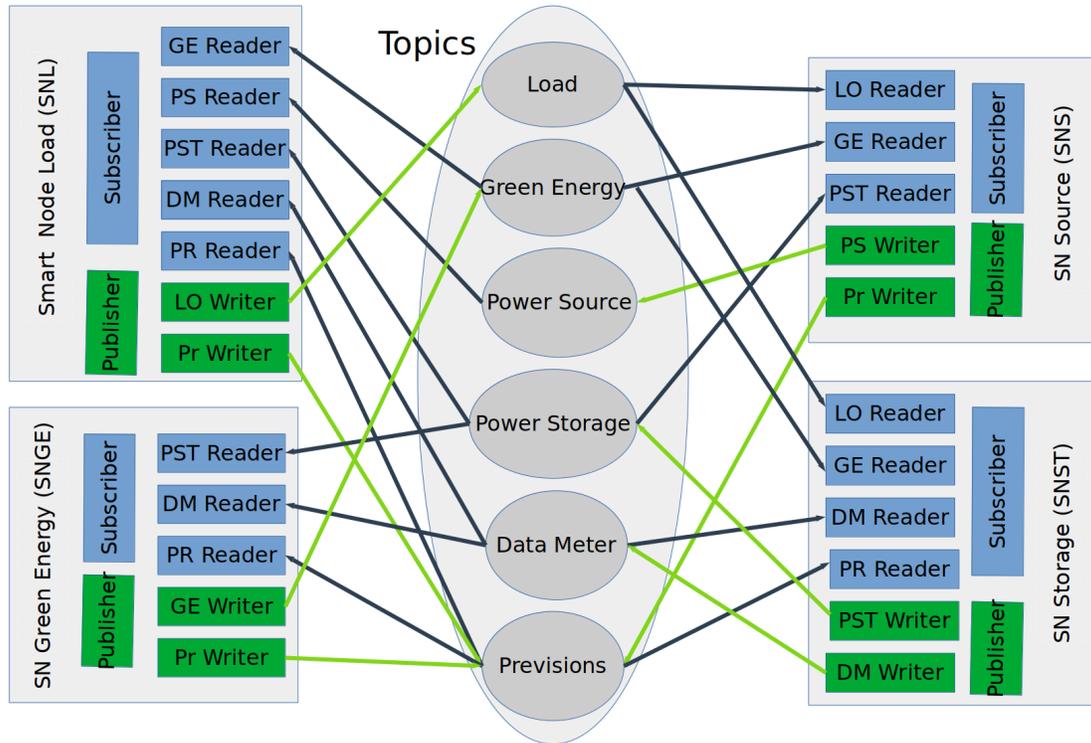


FIGURE 3.26 – Modélisation de la communication entre les SN

aller-retour, qui englobe le temps entre la transmission par la source et la réception par la destination, puis le trajet de retour. Cette dernière approche est plus répandue en raison de sa capacité à être évaluée depuis un seul point de vue.

Dans le contexte d'un échange de communication DDS, la latence peut être définie comme le temps cumulé mis par un éditeur pour sérialiser et transmettre un message de données, et par un abonné correspondant pour le recevoir et le désérialiser. En appliquant le même principe de trajet aller-retour précédemment évoqué, la latence de trajet aller-retour est caractérisée par la période nécessaire à un message pour voyager d'un éditeur à un abonné, puis revenir de l'abonné au même éditeur. Par exemple, en considérant le schéma de la figure 3.27, le temps de trajet aller-retour serait représenté par  $T2-T1$ , ce qui conduit à une latence de  $(T2-T1)/2$ . Nous avons ainsi implémenté le protocole DDS sur les équipements conçus

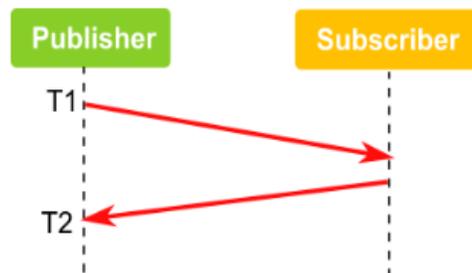


FIGURE 3.27 – Calcul de latence

dans le laboratoire qui joueront les rôles de SNs (Figure 3.28). Le tableau 3.8 présente les caractéristiques techniques de chaque SN.

	SNL	SNS	SNGE	SNST
Processeur	BCM2837B0 Cortex-A53	Intel Core i7-8850H	BCM2837B0 Cortex-A53	BCM2837B0 Cortex-A53
Frequency	1.2 GHz	2.6 GHz	1.2 GHz	1.2 GHz
RAM	1 Go	32 Go	8 Go	8 Go
ROM	16 Go	500 Go	32 Go	32 Go
Ethernet Phy	LAN9512- JZX	Intel i219LM Gigabit Ethernet Controller	LAN9512- JZX	LAN9512- JZX

TABLEAU 3.8 – Caractéristiques des noeuds SN

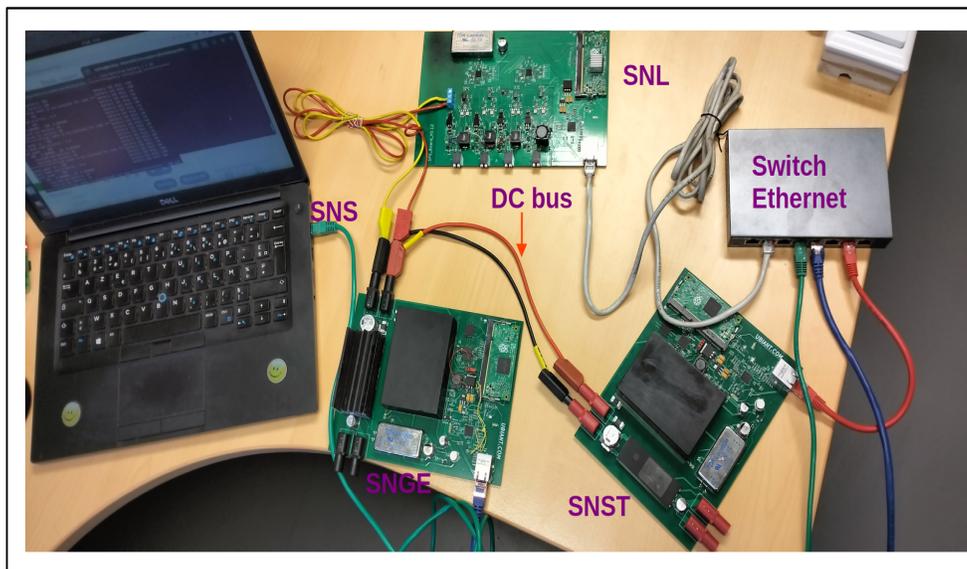


FIGURE 3.28 – Test du protocole DDS avec les noeuds SN

Nos résultats démontrent l'efficacité et les performances optimales de l'implémentation du protocole DDS sur les équipements développés dans notre laboratoire, confirmant ainsi sa capacité à assurer une communication fiable et en temps réel entre les différents SN du réseau. Les résultats des expérimentations effectuées sont présentés dans le tableau 3.9 .

Les courbes d'évolution de la latence maximale et du délai moyen pour une communication DDS utilisant TCP comme couche de transport entre deux nœuds en fonction du nombre d'octets par message sont présentées dans la figure 3.29.

Nous avons ainsi effectué les mêmes tests dans le cas de la diffusion des messages pour 4 nœuds (4 SN). Les résultats sont présentés dans la figure 3.30.

Nombre d'octets par message	Nombre de répétitions	Multicast/Unicast	Latence maximale	Délai moyen
10	100	Unicast	1100	205
100	100	Unicast	1120	212
1000	100	Unicast	1200	214
2000	100	Unicast	2210	408
3000	100	Unicast	3100	566
4000	100	Unicast	5300	686

TABLEAU 3.9 – Résultats de test pour une communication DDS unicast avec une couche de transport TCP

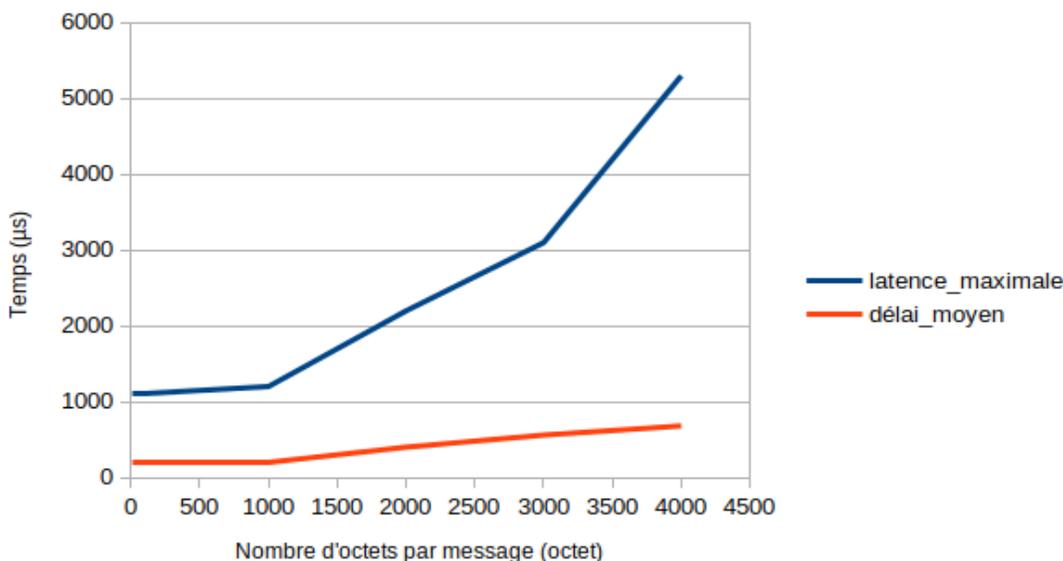


FIGURE 3.29 – Évolution de la latence maximale et du délai moyen pour une communication DDS utilisant TCP

Comme discuté auparavant, DDS peut utiliser d'autres couches de transport comme UDP et RTPS\_UDP pour une communication multicast. Nous avons donc effectué les mêmes tests avec ces couches de transport afin d'évaluer toujours les deux paramètres qui nous intéressent : la latence maximale et le délai de diffusion d'un message aux participants sur le réseau. Les résultats sont présentés dans les figures 3.31, 3.32 et 3.33.

Dans le but d'évaluer la capacité d'adaptation de notre système et de comprendre comment le nombre de nœuds affecte la latence et les performances de la communication, nous avons réalisé des expériences en utilisant 10 nœuds DDS à l'aide de cartes Raspberry Pi 3 modèle B (figure 3.34). Les résultats des essais menés pour les trois modes de communication (TCP, UDP et RTPS Multicast) sont illustrés dans les figures 3.35, 3.36 et 3.37.

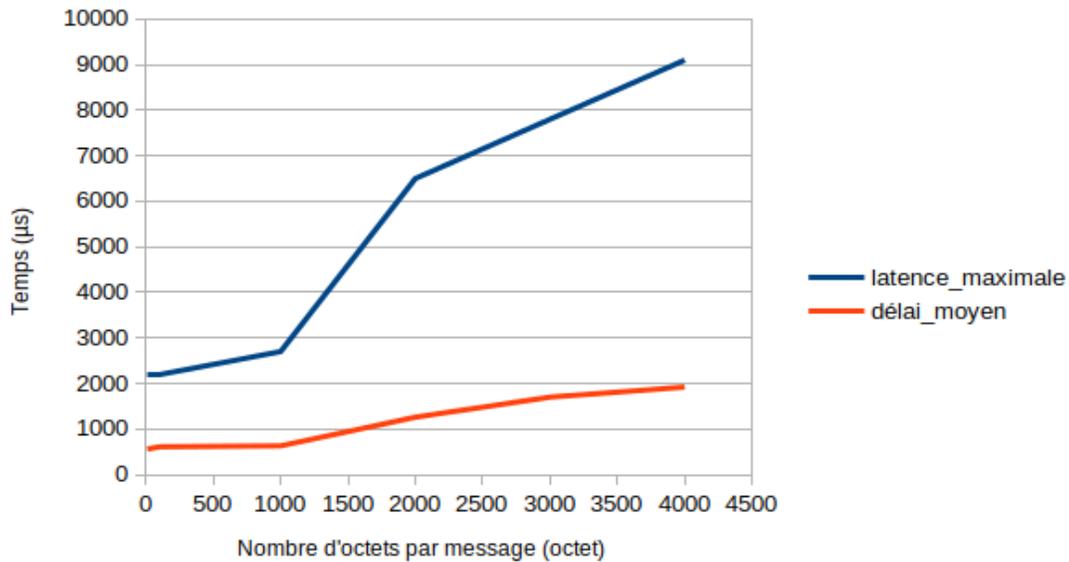


FIGURE 3.30 – Évolution de la latence maximale et du délai moyen pour une communication DDS utilisant TCP avec 4 SN

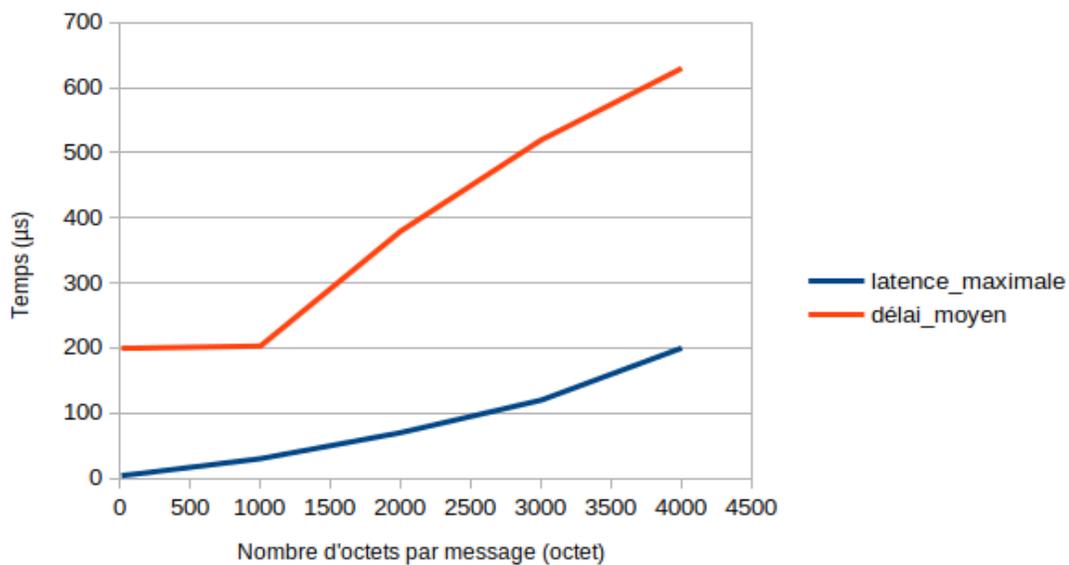


FIGURE 3.31 – Évolution de la latence maximale et du délai moyen pour une communication DDS utilisant UDP avec 2 SN

### 3.3.3 Discussion

Les résultats issus des évaluations de performance du protocole DDS fournissent une perspective approfondie de sa capacité à répondre aux exigences spécifiques de notre application. Ces résultats s'avèrent également précieux pour l'ajustement optimal des configurations et paramètres du protocole DDS. Une observation importante est que le protocole de trans-

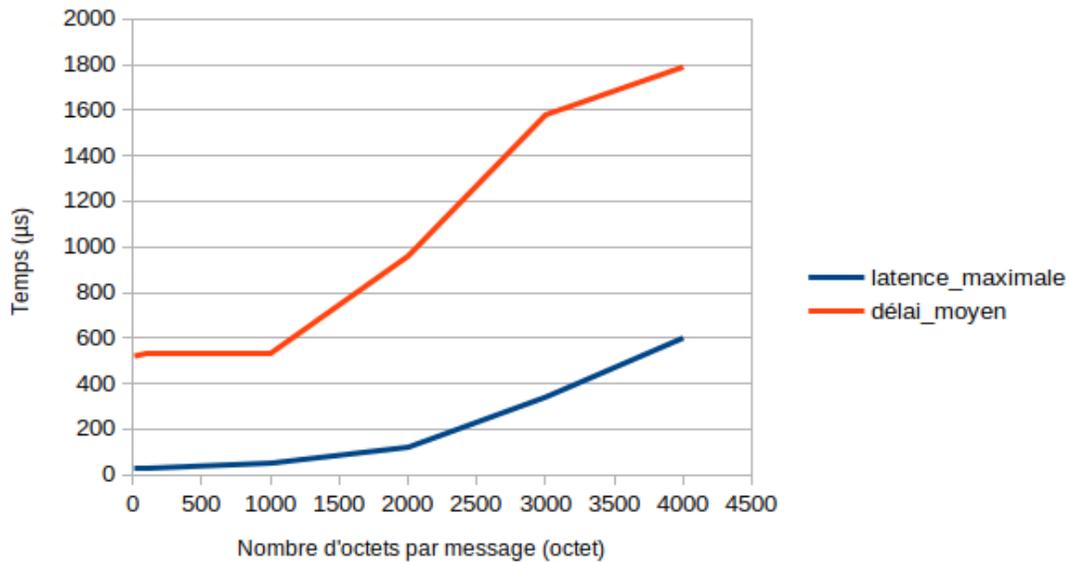


FIGURE 3.32 – Évolution de la latence maximale et du délai moyen pour une communication DDS utilisant UDP avec 4 SN

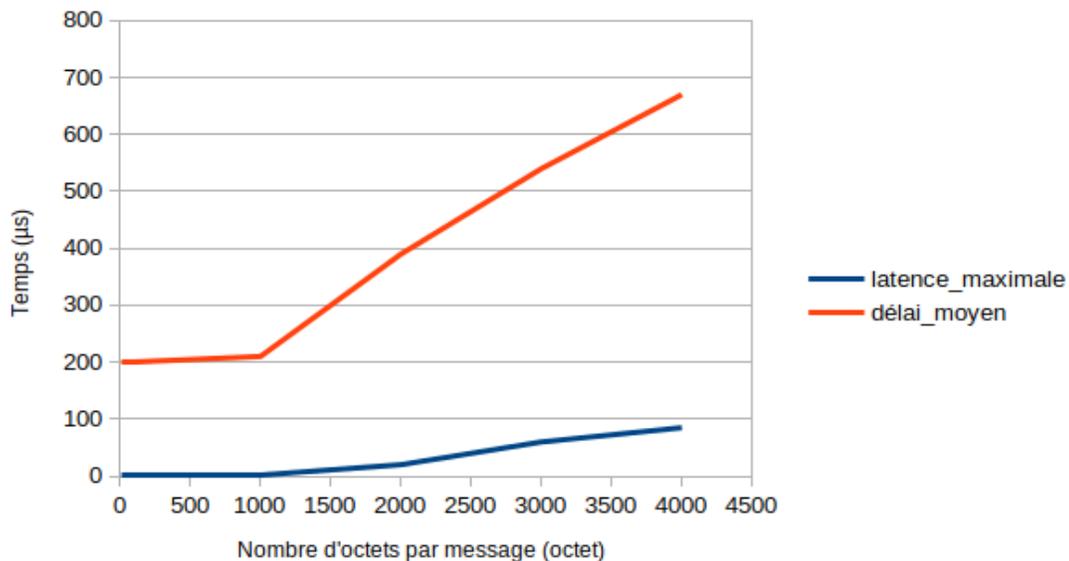


FIGURE 3.33 – Évolution de la latence maximale et du délai moyen pour une communication DDS multicast avec RTPS-UDP

mission TCP se caractérise par des latences et des délais de transmission plus élevés en comparaison avec UDP et RTPS. Dans le cas d'un message de 2000 octets diffusé à travers 10 nœuds sur le réseau, la latence maximale peut atteindre 8000  $\mu\text{s}$ , et le délai de diffusion du message à l'ensemble des 10 participants peut atteindre 4000  $\mu\text{s}$ . En comparaison, les transmissions effectuées via la couche UDP démontrent des performances légèrement supé-

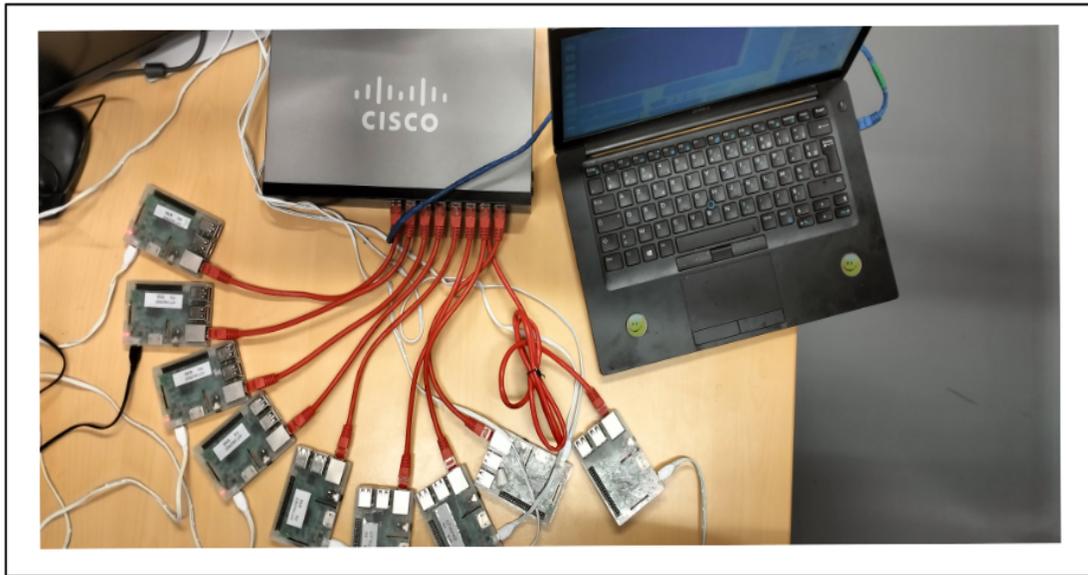


FIGURE 3.34 – Test avec 10 nœuds DDS

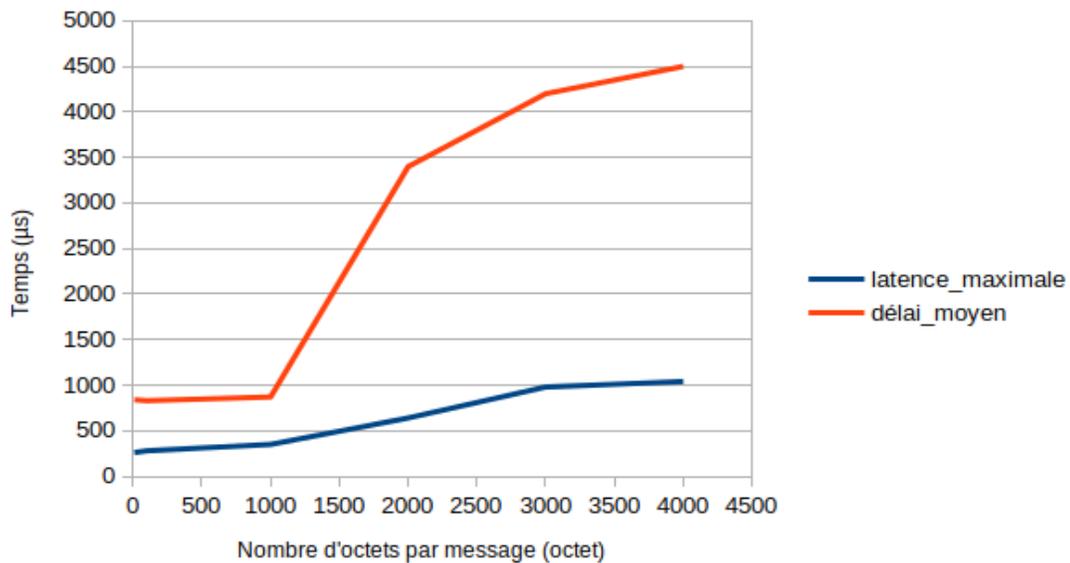


FIGURE 3.35 – Évolution de la latence maximale et du délai moyen pour une communication DDS utilisant UDP avec 10 SN

rieures en termes de latence et de délai moyen de transmission. Dans le même scénario, la latence maximale est de 3000  $\mu\text{s}$ , tandis que le délai moyen de transmission s'établit à 530  $\mu\text{s}$ . En comparant ces résultats avec les expérimentations impliquant 2 nœuds et 4 nœuds sur le réseau, on peut clairement observer une tendance où non seulement le délai moyen de diffusion des messages augmente en fonction du nombre de nœuds sur le réseau, mais également la latence maximale. Cette constatation soulève une préoccupation significative,

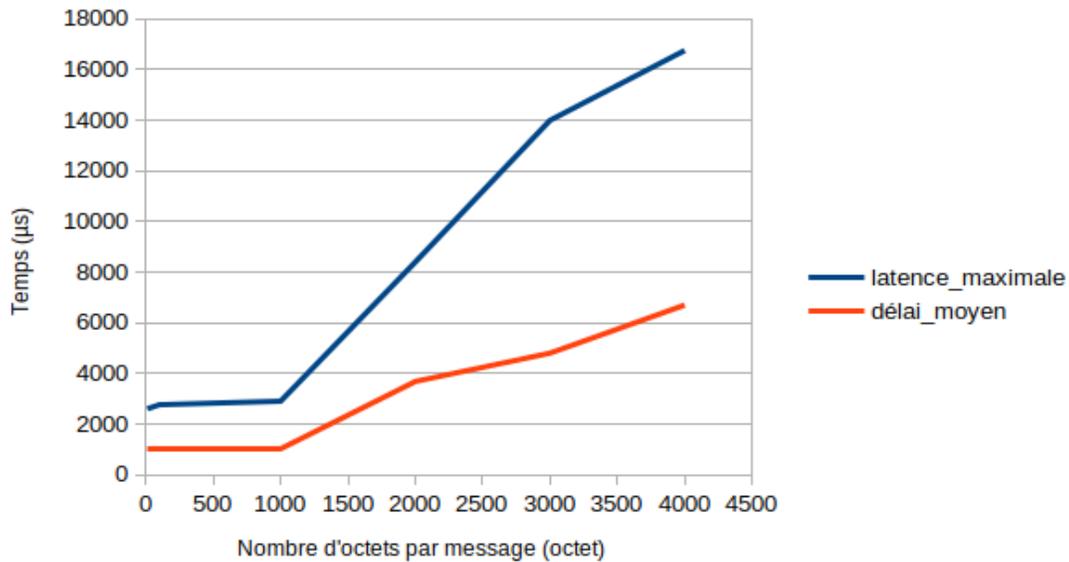


FIGURE 3.36 – Évolution de la latence maximale et du délai moyen pour une communication DDS utilisant TCP avec 10 SN

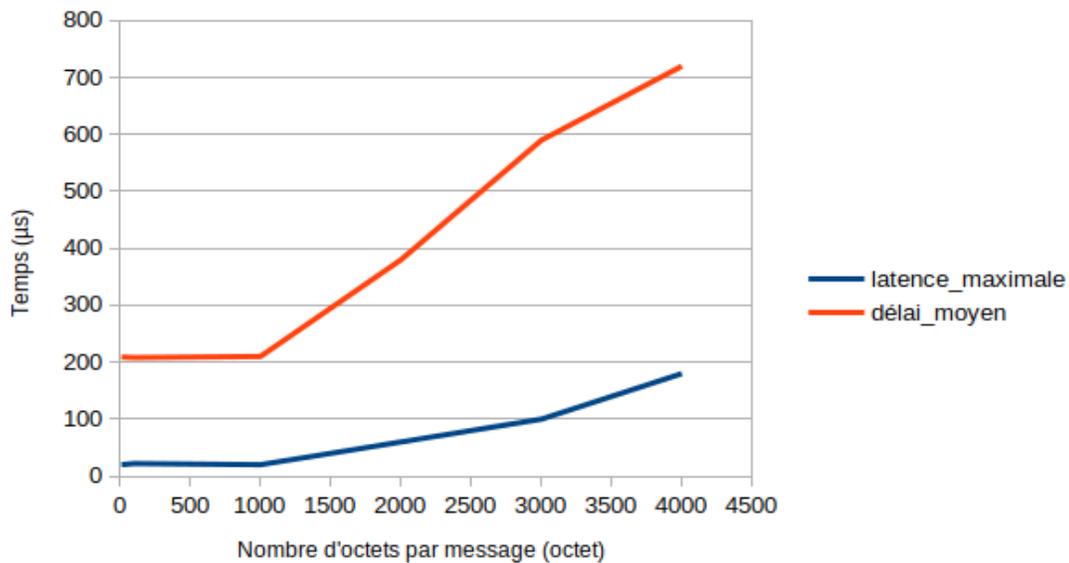


FIGURE 3.37 – Évolution de la latence maximale et du délai moyen pour une communication DDS utilisant RTPS-UDP Multicast avec 10 SN

surtout en envisageant un réseau plus vaste avec un nombre considérable de nœuds. La solution RTPS-UDP proposée par DDS pour la transmission en mode multicast se distingue par ses performances nettement supérieures en termes de latence et de délai moyen de transmission. Du fait de la nature multicast de la diffusion des messages, ces paramètres ne sont pas influencés par le nombre de nœuds présents sur le réseau. En effet, grâce à l'approche multi-

cast, la charge totale du réseau est minimisée car les données ne sont transmises qu'une seule fois, indépendamment du nombre de destinataires. Cette réduction des flux de données et du traitement du côté de l'émetteur contribue à maintenir une latence maximale réduite. Ce mode de communication a démontré des performances extrêmement satisfaisantes au cours de nos expérimentations, avec des délais moyens de transmission qui restent en dessous de 400  $\mu$ s et des latences qui ne dépassent pas les 100  $\mu$ s toujours pour 2000 octets par message, ce qui répond pleinement aux exigences de notre application.

## 3.4 Conclusion

Nous avons étudié dans les sections précédentes quelques protocoles de communication. La criticité de notre application réside principalement au niveau de la communication entre les différents SN qui ont le rôle de stabiliser le bus DC et donc le micro-réseau. Les contraintes de sécurité des biens et des personnes évoquées dans la partie électrique avec les contraintes économiques et industrielles exigent un protocole de communication réactif avec un temps de latence borné. Nous avons vu que le protocole DDS présente des performances temps réel remarquables avec une latence bornée et maîtrisée. Grâce à son architecture distribuée et ses fonctionnalités avancées de gestion de données, le DDS est capable de fournir des communications temps réel fiables et prédictibles dans des environnements exigeants.

La conception orientée données du protocole DDS permet une diffusion efficace de l'information entre les différents nœuds du réseau, assurant ainsi une communication synchronisée et cohérente. Cette approche permet également de garantir une latence bornée, ce qui signifie que les délais de transmission des messages sont prévisibles et limités, ce qui est crucial pour notre application. La mise en place de DDS, malgré ses nombreux avantages, peut s'avérer complexe, surtout lorsqu'elle est déployée sur des cibles embarquées. De plus, le manque de support technique de la pile logicielle OpenDDS peut rendre la configuration et l'installation du système plus laborieuses et moins ergonomiques.

Cette partie de notre étude a été particulièrement chronophage, en raison des défis évoqués ci-dessus. Néanmoins, en surmontant ces obstacles, nous avons pu bénéficier des performances et des fonctionnalités avancées offertes par DDS pour répondre aux exigences de communication temps réel de notre application.

# Chapitre 4

## Optimisation et contrôle à l'aide d'un SMA

### Sommaire

---

<b>4.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>91</b>
<b>4.2</b>	<b>Système Multi-Agent (SMA)</b>	<b>91</b>
4.2.1	Définition d'un agent	91
4.2.2	Définition d'un Système Multi-Agent (SMA)	92
4.2.3	Le système multi-agent centralisé	93
4.2.4	Le système multi-agent distribué	93
4.2.5	Le système multi-agent décentralisé	94
4.2.6	L'utilisation des systèmes multi-agents	94
4.2.7	Interactions entre agents	95
4.2.8	Exemple de plateforme pour les systèmes multi-agents : Volttron	97
4.2.9	Concept d'intelligence dans les systèmes multi-agents	99
4.2.10	Le comportement des systèmes multi-agents	101
4.2.11	La modélisation des systèmes multi-agents	101
<b>4.3</b>	<b>Algorithmes d'optimisation</b>	<b>102</b>
4.3.1	Coopération avec la Société Ubiant	103
4.3.2	Algorithme de contrôle niveau 1	105
4.3.3	Algorithme de contrôle niveau 2	108
4.3.4	Simulation micro-réseau	109
4.3.5	Discussion	109
<b>4.4</b>	<b>Système multi-agent temps réel</b>	<b>110</b>
4.4.1	Modélisation des agents pour le contrôle/commande du micro-réseau	112
4.4.2	Coordination entre les agents	113
4.4.3	Optimisation en utilisant le graphe hamiltonien	117
<b>4.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>123</b>

---

## 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons aborder principalement deux aspects : l'un concernant les systèmes multi-agents et l'autre portant sur les algorithmes visant à optimiser l'efficacité énergétique des bâtiments. Nous allons examiner en détail le concept des systèmes multi-agents, leur application en tant que méthode de gestion des micro-réseaux électriques, les différentes formes d'interaction possibles au sein de ces systèmes multi-agents, ainsi que leur utilisation en temps réel. Nous allons également illustrer un cas concret en présentant la plateforme Volttron, qui a été spécialement conçue comme un environnement de développement dédié aux systèmes multi-agents destinés à la gestion de l'énergie dans les bâtiments. De plus, nous discuterons d'une approche visant à améliorer la réactivité des agents en optimisant leurs délais de coordination, afin de favoriser une réponse rapide des agents pour stabiliser le micro-réseau DC. En ce qui concerne l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments, nous allons explorer les algorithmes et les approches qui sont largement adoptés dans ce domaine. Ensuite, nous approfondirons l'examen de deux algorithmes spécifiques que nous avons développés pour résoudre les défis d'optimisation. Nous verrons par la suite comment ces deux algorithmes s'intègrent dans l'ensemble de l'architecture de gestion énergétique que nous proposons, en tenant compte de notre collaboration avec la société Ubiant.

## 4.2 Système Multi-Agent (SMA)

### 4.2.1 Définition d'un agent

Un agent est considéré comme un dispositif, situé dans un environnement, ayant la capacité d'effectuer des actions, de manière autonome afin d'atteindre ses objectifs. Un agent est capable de comprendre sa situation et de s'adapter à des environnements changeants grâce à l'auto-configuration. Un agent peut également avoir des croyances et des désirs comme évoqué dans [87], les désirs, dans ce contexte, font référence aux buts, aux préférences ou aux objectifs que vise à atteindre un agent.. Voici quelques caractéristiques importantes qui permettent d'atteindre les objectifs de conception d'un agent intelligent et qui distinguent un agent de contrôleurs modestes [88], [89], [90], [91].

- Autonomie : la capacité d'un agent à effectuer ses tâches de manière indépendante dans le réseau sans interférence extérieure de la part d'autres agents ou d'humains. Ces attributs permettent de protéger les états intérieurs d'un agent contre les influences extérieures et d'isoler l'agent contre l'instabilité provoquée par des perturbations extérieures.
- Capacité d'inférence : capacité d'un agent à opérer dans des stipulations d'objectifs intellectuels, c'est-à-dire à déduire des observations en simplifiant l'information. Cela peut se faire en manipulant le contenu approprié des informations existantes.
- Réactivité : l'aptitude d'un agent à observer pleinement l'état actuel d'un environnement et à y répondre dans un temps éventuellement minimal pour apporter des changements à l'environnement. Cette capacité revêt une grande importance dans les applications en temps réel du système.
- Pro-activité : un agent doit montrer une réponse positive offerte par des conditions immédiates sans référence à un comportement général. Cela permet à l'agent d'améliorer ses actions vers ses objectifs définis au lieu d'être réactif à une variation spécifique de

l'environnement.

- Comportement social : même si les agents doivent avoir la capacité de prendre des décisions de manière indépendante, il est très important, pour atteindre un objectif spécifique, que l'agent ait la capacité d'interagir/communiquer avec des sources externes qui peuvent être d'autres agents, des humains ou des unités de contrôle dans l'environnement. Cela permet à l'agent de coopérer, de négocier ou d'entrer en concurrence avec d'autres agents.

### 4.2.2 Définition d'un Système Multi-Agent (SMA)

Le système multi-agent est un modèle informatique composé d'entités autonomes (agents) interagissant les uns avec les autres pour atteindre des objectifs communs ou individuels. Le concept de SMA est né dans les années 1980, et depuis lors, il a connu une croissance exponentielle, devenant une discipline de recherche à part entière. Les premières recherches sur les SMA ont commencé avec les travaux de John Holland sur les systèmes adaptatifs complexes [92, 93]. Holland a développé une approche basée sur l'évolution des populations pour résoudre des problèmes complexes et a appliqué cette méthode à la modélisation de phénomènes tels que la formation de nuages et la circulation atmosphérique. Les SMA ont également trouvé de nombreuses applications en biologie, notamment en écologie, en éthologie et en biologie des populations. Les SMA ont été utilisés pour modéliser des interactions entre des organismes vivants, tels que des prédateurs et des proies, des pollinisateurs et des plantes, ou des colonies de fourmis.

En écologie, les SMA ont été utilisés pour modéliser la dynamique des populations et les interactions entre différentes espèces dans des écosystèmes complexes. Par exemple, les chercheurs ont utilisé des SMA pour étudier la propagation de maladies dans les populations animales [94] et pour modéliser les impacts du changement climatique sur les écosystèmes [95].

En éthologie, les SMA ont été utilisés pour simuler le comportement des animaux en réponse à des stimuli environnementaux et sociaux. Les SMA ont également été utilisés pour étudier les comportements de groupe chez les animaux, tels que la formation de bancs de poissons ou la coordination des mouvements chez les oiseaux migrateurs [96].

En biologie des populations, les SMA ont été utilisés pour modéliser la compétition entre les espèces pour les ressources, la dispersion des semences, la migration des animaux, et la propagation des maladies dans les populations. Les SMA ont également été utilisés pour simuler les interactions entre les prédateurs et les proies et pour étudier les impacts des changements environnementaux sur les populations. Le concept abstrait des systèmes multi-agent (SMA) a une grande variété d'applications et de définitions. Comme définit dans [97], "les systèmes multi-agent sont des systèmes qui comprennent de multiples entités autonomes avec des informations ou des intérêts divergents, ou les deux". Étant traditionnellement des entités logicielles ou matérielles, les SMA peuvent être programmés pour se comporter et interagir avec les autres de toutes les manières possibles et imaginables. Les agents reçoivent des données de leur environnement, appelées perceptions, prennent des décisions à partir des percepts actuels et éventuellement passés, et effectuent des actions par l'intermédiaire des actionneurs dont ils peuvent être équipés (figure 4.1). L'environnement d'un agent est constitué des entités et ressources externes avec lesquelles le SMA peut interagir.

Il existe plusieurs approches pour concevoir des systèmes multi-agent (SMA) en fonction

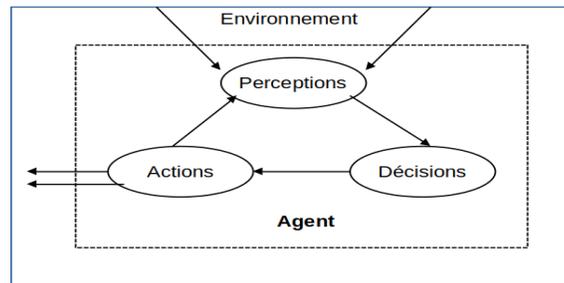


FIGURE 4.1 – Fonctionnement d'un agent dans son environnement

de la manière dont les agents interagissent entre eux et prennent des décisions. Ainsi on distingue 3 approches, le SMA centralisé, le SMA distribué et le SMA décentralisé.

### 4.2.3 Le système multi-agent centralisé

L'approche centralisée des systèmes multi-agent (SMA) est une méthode de conception de SMA dans laquelle un agent centralisé est responsable de la coordination et de la prise de décisions pour l'ensemble du système. Dans cette approche, l'agent centralisé est souvent considéré comme le "chef" du système, qui reçoit des informations des différents agents et prend des décisions en conséquence. Les autres agents sont souvent considérés comme des "exécutants" qui suivent les ordres de l'agent centralisé. Cette approche peut être utile dans des situations où les objectifs du système sont clairs et bien définis, et où les agents individuels n'ont pas besoin de prendre des décisions complexes ou autonomes. Cependant, elle peut être moins efficace dans des situations où les objectifs sont complexes et mal définis, ou lorsque les agents doivent prendre des décisions autonomes en fonction de leur environnement.

En général, l'approche centralisée peut être considérée comme plus simple à concevoir et à implémenter que l'approche décentralisée ou distribuée des SMA, mais elle peut également être moins flexible et moins adaptée aux environnements dynamiques et incertains.

### 4.2.4 Le système multi-agent distribué

Un système multi-agent distribué est un système composé de plusieurs agents autonomes qui interagissent entre eux pour atteindre un objectif commun. Chaque agent a la capacité de prendre des décisions et d'agir de manière autonome en fonction de son environnement et de ses objectifs. Les agents peuvent communiquer entre eux pour échanger des informations et coordonner leurs actions sur l'environnement. La distribution dans un SMA signifie que les agents sont situés sur différents équipements et sont connectés par un réseau de données. Cela permet une plus grande flexibilité et une meilleure résilience en cas de défaillance d'un agent ou d'un équipement [98]. Les SMA sont utilisés dans de nombreux domaines, tels que l'automatisation industrielle, la robotique, la finance, la logistique, les jeux vidéo, la simulation, etc. Ils sont particulièrement utiles pour résoudre des problèmes complexes nécessitant une coordination entre plusieurs entités autonomes.

### 4.2.5 Le système multi-agent décentralisé

Un système multi-agent décentralisé est un système composé de plusieurs agents autonomes qui agissent de manière coordonnée sans avoir besoin d'une autorité centrale. Les agents communiquent entre eux et prennent des décisions de manière indépendante, en fonction de l'information locale qu'ils ont [98]. Contrairement à un système centralisé, où toutes les décisions sont prises par une entité centrale, un système multi-agent décentralisé peut être plus flexible et plus résilient. Les agents peuvent s'adapter aux changements de l'environnement et réagir rapidement aux événements imprévus. De plus, la décentralisation peut aider à éviter les points de défaillance uniques et les problèmes de scalabilité qui peuvent survenir dans un système centralisé.

Les SMA décentralisés sont souvent utilisés dans des applications telles que les réseaux de capteurs, la coordination de flottes de véhicules autonomes, la gestion de l'énergie, la gestion des ressources naturelles, la finance décentralisée et les systèmes de vote électronique.

### 4.2.6 L'utilisation des systèmes multi-agents

Le SMA a été considéré comme un système intelligent efficace pour le fonctionnement optimal du système, y compris le contrôle, la supervision, la gestion et la protection au niveau des micro-réseaux, et présente de nombreux avantages par rapport aux approches traditionnelles [99]. Les avantages significatifs de la technique SMA sont les suivants :

1) Contrôle et supervision : Les agents ont généralement beaucoup de compétences pour rendre le système plus intelligent que d'autres matériels/logiciels traditionnels. En cas de défaillance d'une unité de contrôle au sein d'un système, les agents du voisinage ont une capacité suffisante pour compléter les tâches et suivre leurs objectifs. Au sein d'un système, les agents du voisinage ont la capacité de remédier à la défaillance dans un minimum de temps afin de rendre le système fiable.

2) Réduction des complications liées aux données : en adoptant l'approche SMA, chaque agent prend la responsabilité localement dans l'environnement et donc les agents traitent les données localement. Par conséquent, les manipulations de données au sein du système sont réduites, ce qui permet de minimiser les coûts du système et les charges de communication. De même, un tel schéma de supervision est également très facile à maintenir en évaluant moins de procédures de communication traditionnellement acceptable dans les réseaux de distribution.

3) Indépendance du système : Les tâches à accomplir dépendent des objectifs de l'agent local qui doit opérer dans l'organisation du micro-réseau de manière autonome/indépendante et qui pourrait être suffisamment efficace et compétent pour fournir des renseignements suffisants à l'organisation du micro-réseau.

4) Actions de l'agent fondées sur les connaissances : les agents ont la capacité d'exécuter des tâches de manière autonome et d'absorber des connaissances à partir de leurs comportements et activités antérieurs afin de prendre des décisions fondées sur ces connaissances de manière plus efficace pour fournir de meilleures performances.

5) Nature bien ajustable : Les systèmes multi-agents permettent aux fabricants/manipulateurs des composants des ressources énergétiques distribuées et aux consommateurs, en intégrant un programme dans le contrôleur de l'agent, de rendre leurs unités/équipements suffisamment intelligents pour atteindre les objectifs souhaités. Compte tenu des caractéristiques et des avantages susmentionnés de l'approche multi-agents, on peut se rendre compte

que l'emploi d'agents dans un système de gestion de l'énergie peut être une solution efficace. En tenant compte des caractéristiques et avantages mentionnés de l'approche multi-agents, on peut se rendre compte que l'emploi d'agents dans une organisation, en particulier au niveau distribué, est très bénéfique par rapport à d'autres pratiques de supervision traditionnelles. Ainsi, en employant l'approche multi-agents au niveau du micro-réseau, les avantages sous forme de fiabilité du système, de constance et d'efficacité de la gestion de l'information et de la gestion des ressources se multiplieront.

### 4.2.7 Interactions entre agents

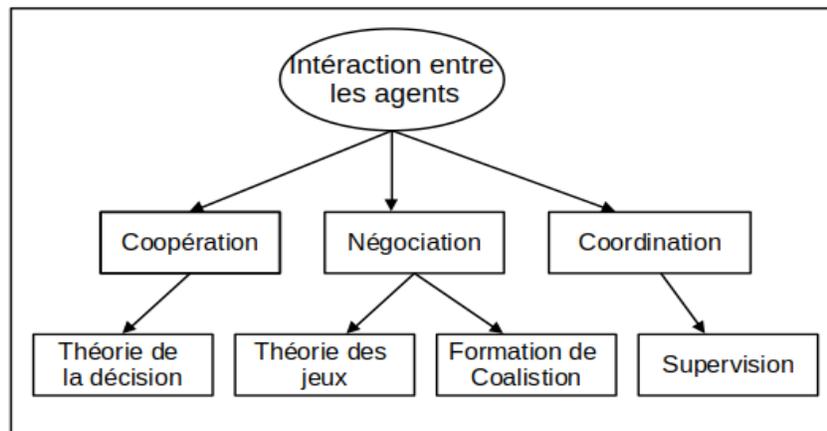


FIGURE 4.2 – Exemples de types d'interactions entre les agents dans un SMA

Les actes de communication entre agents peuvent avoir différents objectifs ou modèles d'interactions (figure 4.2), comme la coordination, la coopération ou la négociation [100][101]. Dans les modèles multi-agents, la coordination est essentielle pour permettre aux agents de travailler efficacement ensemble, mais elle peut également poser des défis en matière d'ordonnancement et d'allocation de tâches, qui ont souvent plusieurs solutions possibles, chacune ayant des conséquences différentes sur les résultats des simulations. Pour résoudre ces problèmes, les modèles multi-agent peuvent utiliser des algorithmes qui prennent en compte les préférences et les contraintes des agents, ainsi que les objectifs globaux du système. Cependant, il est important de trouver un équilibre entre la coordination et d'autres objectifs pour obtenir des résultats optimaux. Les algorithmes d'ordonnancement et d'allocation de tâches doivent donc être conçus de manière à tenir compte de ces différents facteurs. En somme, la coordination est un aspect crucial des modèles multi-agent, mais elle ne doit pas être considérée comme un objectif en soi, mais plutôt comme un moyen d'atteindre des objectifs plus larges. La théorie de la décision est similaire à la théorie des jeux car elle vise à maximiser un critère appelé utilité, et suppose que les agents font des choix rationnels en choisissant l'alternative la plus utile. Cependant, la théorie des jeux prend également en compte les choix futurs des agents, créant ainsi des situations d'équilibre dans lesquelles aucun agent n'a intérêt à s'écarter. Les modèles de la théorie des jeux peuvent être mis en œuvre en tours, où les agents prennent des décisions successives qui modifient la décision des agents suivants. Les coalitions sont une autre approche pour modéliser les

interactions entre agents, où un groupe d'agents confronté à une demande cherche à parvenir à un consensus satisfaisant pour toutes les parties. Pour y parvenir, des compromis individuels sont nécessaires. Les mécanismes d'alliance peuvent être introduits lorsque plusieurs agents sont impliqués pour arriver à un consensus plus rapidement. La définition d'un protocole de communication approprié est alors cruciale pour que les agents puissent échanger leurs choix actuels et les modifier jusqu'à ce qu'un consensus soit atteint. Les systèmes avec supervision centrale ou distribuée sont également une catégorie générale de schémas d'interaction. Cela peut inclure des mécanismes de vote ou d'enchères, où un contrôle central existe, ou un agent chargé de résoudre les conflits. Un schéma d'interaction couramment utilisé est Contract-Net, qui résout le problème de l'allocation des tâches en permettant aux gestionnaires de proposer des tâches aux contractants, qui peuvent répondre avec une offre ou non. Contract-Net a été adopté par la fondation pour les agents physiques intelligents, qui propose des normes pour l'organisation et les protocoles de communication pour les systèmes multi-agents.

Dans un micro-réseau les principaux problèmes liés à l'incorporation des énergies renouvelables sont la production d'énergie variable et les difficultés liées à l'incertitude du côté de la source, qui doivent fondamentalement être gérées et mesurées. Par conséquent, des agents locaux sont généralement installés dans différentes sous-parties au niveau du micro-réseau pour exécuter leurs tâches localement et communiquer entre eux afin d'améliorer les procédures opérationnelles du système de manière optimale. C'est pourquoi Khan et al [41] ont proposé une approche unique dans laquelle les différents agents se coordonnent entre eux au sein de trois groupes différents afin d'accomplir leurs tâches localement et de fournir des informations aux dispositifs du micro-réseau.

## Des systèmes multi-agents pour la gestion de micro-réseaux

Les SMA ont été largement étudiés dans le domaine de l'informatique. Cependant, ces dernières années, le développement des SMA a attiré l'attention des chercheurs dans le domaine des réseaux électriques pour une application dans le domaine des systèmes énergétiques hybrides et des micro-réseaux pour le contrôle distribué et la gestion de l'énergie [102], [103]. Un système multi-agent pour l'optimisation du système hybride d'énergie renouvelable a été présenté dans [102]. Dans le même temps [103], une solution de gestion distribuée basée sur un SMA a été proposée pour assurer une meilleure fiabilité du système que les systèmes de gestion énergétique centralisés conventionnels. Dans [104], un contrôle coordonné décentralisé hiérarchique basé sur un SMA a été présenté pour résoudre le problème de gestion de l'énergie d'un système de production distribué (DG) en garantissant l'approvisionnement en énergie avec une sécurité élevée. Un SMA et une carte cognitive floue ont été utilisés dans [105] pour un système décentralisé de gestion de l'énergie d'un micro-réseau polygénérationnel autonome. Dans [106], un SMA décentralisé a été utilisé pour l'intégration de la demande, ce qui a permis de réduire le coût de l'énergie, d'améliorer l'efficacité énergétique et d'accroître la sécurité et la qualité de l'approvisionnement. En outre, le SMA a également été utilisé pour la gestion de la puissance réactive dans les réseaux de distribution avec des sources d'énergie renouvelables afin d'améliorer la stabilité dynamique de la tension. [107].

### 4.2.8 Exemple de plateforme pour les systèmes multi-agents : Volttron

Volttron est une plateforme IoT d'exécution et de communication open-source. Bien que cette plateforme ait été utilisée dans un certain nombre de bâtiments et d'applications de gestion énergétique, la plateforme de base est neutre du point de vue des applications. Développée et maintenue par le Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Volttron fait désormais partie de la suite de projets IoT de la Fondation Eclipse. Volttron est essentiellement un petit système d'exploitation construit au-dessus de Linux et de Python. Cette pile logicielle est capable de fonctionner sur de petites plates-formes informatiques en terme de ressources telles que le Raspberry Pi [108]. La figure 4.3 illustre la structure d'ensemble des divers modules au sein de la plateforme de développement Volttron.

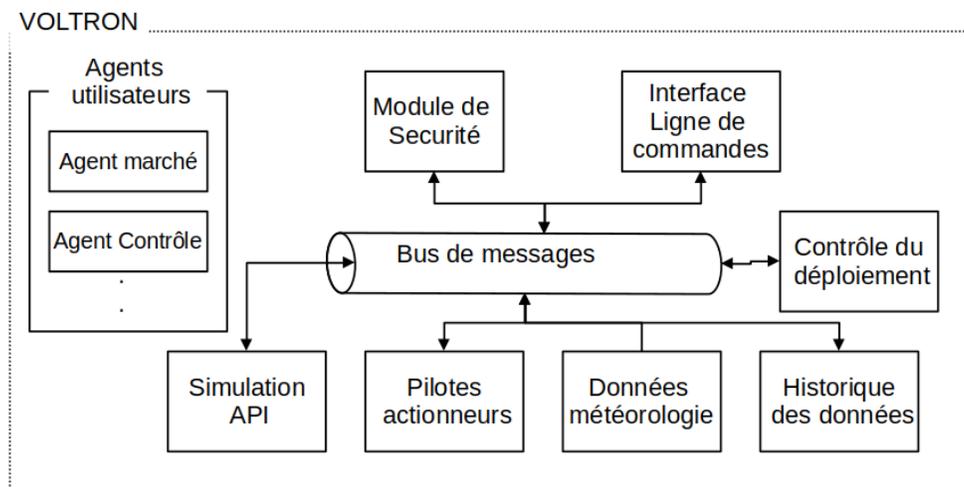


FIGURE 4.3 – Architecture Volttron [109]

#### Volttron sécurité

La plateforme Volttron permet d'établir une communication sécurisée entre les différents agents, elle fournit ainsi un bus de messages central, permettant aux agents (modélisés en tant qu'agents Volttron) d'échanger des informations en publiant et en s'abonnant à des sujets. Volttron utilise le protocole VIP (VOLTTRON Interconnect Protocol) pour accroître la sécurité du bus de messages. L'autorisation VIP protège les abonnés de la plateforme contre la réception de messages provenant d'agents non autorisés. Plus précisément, le propriétaire de la plateforme peut limiter le nombre de personnes autorisées à publier sur un sujet donné. Les abonnés sont ainsi protégés contre la réception de messages provenant d'agents non autorisés. Volttron fournit aussi des outils et des pratiques qui permettent d'intégrer la cybersécurité dans toutes les phases du cycle de développement des logiciels. Alors que le profil de la menace [110] fournit des contrôles contre les attaques, il sert également de point de départ à la collecte d'autres exigences, au lancement de la conception, à la mise en place de procédures de test intégrant la sécurité et aux pratiques de test de la sécurité.

## Volttron services

TABLEAU 4.1 – Services Volttron [111].

Service	Description
Agent actionneur	Contribue à permettre le contrôle d'appareils externes par des V-agents au sein de Volttron. Agit comme un gardien pour les messages qui vont aux pilotes, qui interagissent avec les appareils. L'agent actionneur empêche également plusieurs les agents utilisateurs de contrôler le même appareil en même temps.
Pilotes	Les pilotes communiquent avec les appareils contrôlés par la plateforme. Ils isolent les protocoles spécifiques aux appareils du reste de la plateforme et accèdent au bus de messages pour publier des données sur les appareils et recevoir des commandes.
Historique	Permet de stocker les données des appareils et les résultats de l'analyse des applications dans une base de données (actuellement MongoDB, SQLite et MySQL).
Contrôle de déploiement	Permet d'administrer les nœuds exécutant Volttron sur un ou plusieurs réseaux.
Bus de messages	Fournit un conduit pour les agents utilisateurs et les services afin de publier et de s'abonner aux sujets, en faisant abstraction des détails relatifs aux appareils et aux agents utilisateurs les uns des autres. Au niveau élémentaire, les agents utilisateurs et les services fonctionnent dans la plateforme en produisent et consomment des messages et/ou des événements.
Informations météorologiques	Récupère les données du site météo, les reformate et les publie sur la plateforme, ce qui permet à d'autres agents utilisateurs d'y accéder.

## ZeroMQ

ZeroMQ est une bibliothèque légère et rapide qui permet de faire communiquer des programmes entre eux facilement via des sockets. ZeroMQ possède une portabilité remarquable à la fois en termes de système d'exploitation et de langage, ce qui est prouvé par la multitude de modèles de communication. Il s'agit fondamentalement d'une solution de communication sans courtier. La connexion directe entre les parties du système permet de réduire les coûts de maintenance. L'expéditeur d'un message est responsable de l'acheminement vers la bonne destination et le récepteur d'un message est responsable de la mise en file d'attente, ce qui montre la division de la responsabilité entre l'expéditeur et le destinataire puisqu'il s'agit d'une solution sans courtier [112].

Ce logiciel propose plusieurs types de sockets pour différents usages, basés sur quatre modèles de communication :

- Le modèle requête/réponse, qui utilise un socket REQ connectée à un socket REP pour envoyer une requête et recevoir une réponse. Les sockets DEALER et ROUTER

permettent d'étendre ce modèle à des systèmes plus complexes.

- Le modèle publication/souscription, qui utilise une socket PUB pour émettre des messages typés par sujet, tandis que les sockets SUB s'abonnent à des sujets spécifiques pour recevoir les messages correspondants. Plusieurs sockets SUB peuvent se connecter à un seul socket PUB, et inversement.
- Le modèle pipeline, qui utilise un socket PUSH pour envoyer des données et un socket PULL pour les recevoir. Ces types de sockets permettent de mettre en place facilement un flux de données unidirectionnel, comme la centralisation des logs de différentes applications vers une application unique.
- Le modèle de communication interthread, qui utilise des sockets PAIR pour échanger des données entre deux threads d'un même processus avec une faible consommation de ressources.

## RabbitMQ

RabbitMQ est un middleware de messagerie open-source qui implémente le protocole de messagerie avancée AMQP [113]. Il a été lancé en 2007 en langage de programmation Erlang et basé sur la plateforme Open Telecom Platform. Depuis mai 2013, il est contrôlé par la société Pivotal Software [114]. Le protocole RabbitMQ fournit une solution de messagerie robuste, évolutive et fiable pour les applications distribuées en se reposant sur le concept de file d'attente (queue) pour stocker et livrer les messages entre les applications. Les messages peuvent être publiés dans une file d'attente par un producteur et consommés par un consommateur. Les files d'attente peuvent également être liées à des échanges (exchanges) pour permettre la diffusion des messages à plusieurs files d'attente. Le principe de fonctionnement du protocole RabbitMQ présenté dans la figure 4.4 est comme suit :

- Les producteurs publient des messages dans une file d'attente à l'aide d'une clé de routage (routing key).
- Les échanges (exchanges) reçoivent les messages des producteurs et les acheminent vers les files d'attente appropriées en fonction de leur clé de routage.
- Les consommateurs se connectent aux files d'attente et reçoivent les messages en attente dans la file dans l'ordre dans lequel ils ont été publiés.

Le protocole RabbitMQ offre également des fonctionnalités avancées telles que la gestion des erreurs, la persistance des messages, la gestion des transactions et la gestion de la charge. Ces fonctionnalités permettent de construire des applications robustes et évolutives, capables de traiter des volumes de messages importants [115] [116].

### 4.2.9 Concept d'intelligence dans les systèmes multi-agents

Le concept d'intelligence dans les SMA est lié au comportement de groupes d'agents ou d'entités dans un système, et ils peuvent interagir les uns avec les autres de manière com-

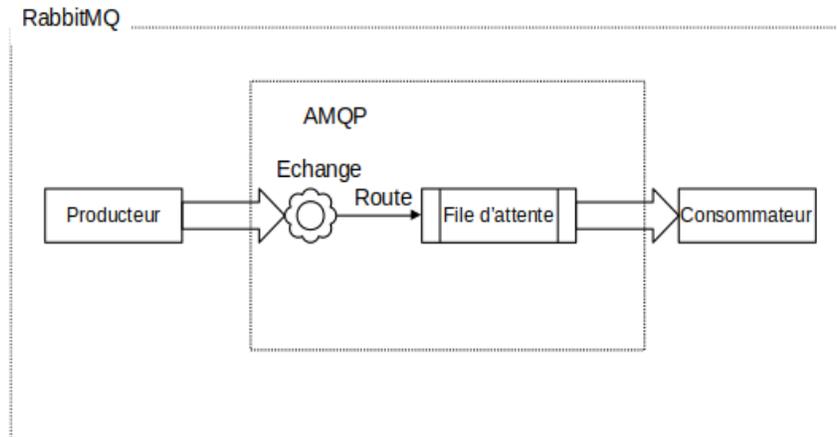


FIGURE 4.4 – Fonctionnement du protocole RabbitMQ

plexe. Il est important de comprendre ces concepts pour concevoir et analyser des systèmes complexes.

L'émergence multi-agent fait référence au phénomène selon lequel des modèles de comportement complexes naissent spontanément des interactions de nombreux agents simples. Ces modèles peuvent inclure des éléments tels que le comportement des oiseaux en vol ou les flux de circulation dans les villes. L'émergence peut résulter d'interactions locales entre des agents qui suivent des règles simples, sans coordination ou contrôle central.

Le consensus, quant à lui, désigne le processus permettant de parvenir à un accord ou à une compréhension commune au sein d'un groupe d'agents. Dans un processus de consensus, les agents échangent des informations et ajustent leurs croyances ou leurs opinions en fonction des informations qu'ils reçoivent. L'objectif est que tous les agents convergent vers un point de vue ou une décision commune.

Bien que l'émergence et le consensus soient liés, ils ne sont pas identiques. L'émergence peut conduire à des modèles de comportement qui ne sont pas nécessairement acceptés par tous les agents. Par exemple, dans une volée d'oiseaux, les oiseaux individuels peuvent ne pas tous être d'accord sur l'endroit où voler, mais ils suivent tout de même le modèle général de la volée. Le consensus, quant à lui, exige que tous les agents soient d'accord sur une décision ou un point de vue particulier.

- Auto-organisation : l'auto-organisation fait référence à la capacité d'un système à s'organiser sans direction ou contrôle externe. Cela peut se produire lorsque des agents suivent des règles simples ou interagissent de manière décentralisée, ce qui conduit à l'émergence de modèles de comportement complexes.
- Adaptation : l'adaptation fait référence à la capacité des agents à modifier leur comportement ou leurs caractéristiques en réponse à des changements dans l'environnement ou à un retour d'information de la part d'autres agents. Cela peut se produire par le biais de processus tels que l'apprentissage, l'évolution ou l'optimisation.
- Coordination : la coordination fait référence à la capacité des agents à travailler ensemble de manière à atteindre un but ou un objectif commun. Cela peut impliquer la

communication, la négociation ou l'utilisation de règles ou de normes communes.

- Coopération et concurrence : la coopération et la concurrence désignent la manière dont les agents interagissent entre eux pour atteindre leurs objectifs. La coopération implique de travailler ensemble pour atteindre un objectif commun, tandis que la concurrence implique que les agents s'affrontent pour obtenir des ressources ou d'autres avantages.

#### 4.2.10 Le comportement des systèmes multi-agents

Un agent est composé d'une ou de plusieurs couches qui déterminent le comportement de ce dernier dans son environnement. Voici les principales couches :

- La couche réactive d'un système multi-agent est responsable de la prise de décisions en temps réel, basée sur les entrées sensorielles et les règles préétablies. Cette couche est souvent utilisée pour des tâches de bas niveau, telles que la navigation ou la manipulation d'objets.
- La couche pro-active est responsable de la planification et de la coordination des actions des agents pour atteindre un objectif commun. Cette couche utilise des techniques telles que la planification et la coordination pour organiser les actions des agents.
- Enfin, la couche cognitive est responsable de la prise de décisions basée sur une compréhension plus profonde de l'environnement et des objectifs. Cette couche utilise des techniques d'apprentissage automatique pour permettre aux agents d'apprendre de leur environnement et d'adapter leur comportement en conséquence.

En combinant ces différentes couches, un système multi-agent peut être capable de réaliser des tâches complexes de manière autonome en utilisant une combinaison de comportements réactifs, pro-actifs et cognitifs.

#### 4.2.11 La modélisation des systèmes multi-agents

Il existe différentes approches pour la modélisation multi-agent, mais en général, elles impliquent la création d'un modèle informatique qui simule les interactions entre les agents et leur environnement. Voici quelques exemples de méthodes de modélisation multi-agent :

- Les modèles basés sur les règles : ces modèles décrivent les interactions entre les agents en utilisant des règles simples. Les règles peuvent être basées sur des heuristiques, des expériences passées ou des modèles mathématiques [117].
- Les modèles basés sur l'apprentissage : ces modèles utilisent des algorithmes d'apprentissage automatique pour apprendre les comportements des agents à partir de données. Les modèles peuvent être supervisés ou non supervisés [118, 119].
- Les modèles basés sur l'optimisation : ces modèles cherchent à optimiser une fonction d'objectif en modifiant les comportements des agents. Les modèles peuvent utiliser des algorithmes d'optimisation classiques ou évolutionnistes [120].

- Les modèles basés sur les réseaux : ces modèles décrivent les interactions entre les agents à l'aide de graphes ou de réseaux. Les modèles peuvent utiliser des algorithmes de la théorie des graphes ou de réseau pour étudier les propriétés du réseau [121].

### 4.3 Algorithmes d'optimisation

Afin de réduire la consommation énergétique des bâtiments, plusieurs travaux de recherche ont proposé divers systèmes de gestion de l'énergie pour les bâtiments avec sources d'énergies renouvelables. Les principaux objectifs de ces systèmes sont de réduire la consommation d'énergie en période de pointe et de réduire le coût de l'électricité pour l'utilisateur. Il existe plusieurs algorithmes qui peuvent être utilisés pour l'optimisation énergétique à l'intérieur des bâtiments. Voici quelques-uns des plus courants :

- La commande prédictive par modèle (MPC) : il s'agit d'un algorithme de contrôle qui utilise un modèle mathématique de la consommation d'énergie du bâtiment pour prédire la consommation d'énergie future et ajuster les actions de contrôle en conséquence [23, 24, 25, 26].
- Optimisation par essaims de particules (PSO) : il s'agit d'un algorithme d'optimisation basé sur la population qui peut être utilisé pour optimiser la consommation d'énergie dans les bâtiments en trouvant les points de consigne optimaux pour les systèmes CVC et les autres systèmes du bâtiment. Dans l'étude de R. Lavanya et al [31], Le modèle PSO-OMRC proposé est évalué avec la mise en œuvre d'un modèle d'occupant d'image thermique pour améliorer les économies d'énergie, ce qui entraîne une économie d'énergie d'environ 25,2 % tout en maintenant le niveau de confort thermique. Une autre étude menée par S. Mnasri et al [122] démontre également que l'efficacité de l'algorithme PSO s'améliore lorsqu'il est utilisé en conjonction avec un système multi-agent pour optimiser le déploiement des capteurs dans un environnement tridimensionnel.
- Algorithmes génétiques (GA) : il s'agit d'un type d'algorithme d'optimisation qui utilise les concepts de l'évolution, tels que la sélection naturelle et la variation génétique, pour trouver des solutions optimales [27, 28, 29, 30].
- Réseaux neuronaux artificiels (ANN) : il s'agit d'un algorithme d'apprentissage automatique qui peut être utilisé pour prévoir la consommation d'énergie dans les bâtiments et identifier les possibilités d'économie d'énergie [29, 123].
- Contrôle par logique floue (FLC) : il s'agit d'un type d'algorithme de contrôle qui utilise la logique floue pour prendre des décisions basées sur l'incertitude et les données imprécises [124, 125].

Ces algorithmes peuvent être appliqués à divers systèmes dans les bâtiments, tels que l'éclairage, le CVC et les systèmes d'énergie renouvelable, afin d'optimiser la consommation d'énergie et de réduire les coûts énergétiques. D'autres types d'algorithmes comme le décalage des charges (load shifting) peuvent être utilisés pour l'optimisation de la consommation d'électricité dans les bâtiments.

Le "load shifting", également connu sous le nom de décalage de charge ou réponse à la demande, est une stratégie utilisée pour gérer la consommation d'électricité dans les bâtiments et d'autres systèmes consommateurs d'énergie. L'objectif principal du "load shifting" est de déplacer la consommation d'électricité des périodes de demande de pointe vers les heures creuses, où les coûts de l'électricité sont généralement plus bas. Cela permet non seulement de réduire les factures d'électricité, mais contribue également à un réseau électrique plus efficace et plus stable. Dans l'étude de G. R. Hemanth et al. [32], les auteurs ont présenté une approche baptisée "Intelligent Universal Load Management System" (IULMS), visant à optimiser la consommation électrique d'un bâtiment résidentiel équipé de divers appareils électriques. L'objectif principal était de minimiser les coûts de consommation d'électricité en tenant compte des contraintes propres à chaque appareil du système. Deux algorithmes d'optimisation, à savoir BGWO (Binary Grey Wolf Optimization) et BPSO (Binary Particle Swarm Optimization), ont été comparés. Les résultats ont montré une réduction des coûts d'électricité de 4,03 % avec BPSO et de 5,19 % avec BGWO.

La recherche sur les économies d'énergie liées au chauffage, à la ventilation et à la climatisation (CVC) a donné des résultats remarquables, mettant en évidence d'importantes opportunités d'économie d'énergie dans divers bâtiments commerciaux. L'étude de A. Khalilnejad et al. [126] a analysé une population complète de plus de 432 bâtiments commerciaux et les a classés en fonction de leur potentiel d'économies. Les résultats ont révélé des économies d'énergie de 2,1 % avec des stratégies simples de réaménagement des horaires de CVC. Les algorithmes présentés par R. Chauhan et al. [33] et appliqués à un micro-réseau en courant continu équipé de panneaux photovoltaïques et de batteries de stockage ont entraîné des économies d'énergie de 31 % ainsi qu'une réduction de 35 % sur la facture d'électricité.

### 4.3.1 Coopération avec la Société Ubiant

L'activité de Ubiant<sup>TM</sup> est centrée sur le développement de solutions technologiques permettant de rendre intelligent les bâtiments, les quartiers, les villes. Ubiant est un éditeur technologique spécialisé dans les « Smart Buildings ». La société a mis au point une technologie facilitant la mise en place et le pilotage de bâtiments connectés et intelligents grâce notamment à une utilisation innovante de l'intelligence artificielle. La plateforme technologique d'Ubiant permet de gérer efficacement de nouveaux services pour les exploitants et les occupants depuis les phases de conception et de chantier jusqu'à l'exploitation des bâtiments. Ubiant édite un BOS (Building Operating System) qui constitue la brique élémentaire d'un smart building. À l'image d'un OS pour un ordinateur, le BOS est une plateforme logicielle qui fait le lien entre, les appareillages, les utilisateurs et les applications (services) du bâtiment.

Le cœur du système d'exploitation de bâtiments (BOS) de la société Ubiant repose sur un système multi-agent breveté nommé Hemis [7, 127, 128]. Ce système se distingue par sa capacité à influencer les paramètres environnementaux à l'intérieur des bâtiments en agissant sur certains actionneurs spécifiques dans une zone, en fonction des objectifs à atteindre. De plus, Hemis intègre des algorithmes d'apprentissage automatique pour analyser l'occupation des bâtiments, les comportements des utilisateurs, ainsi que les caractéristiques des différents actionneurs. Le système multi-agent Hemis facilite ainsi une optimisation énergétique en utilisant des algorithmes de réaménagement des horaires de CVC ou de sélection des actionneurs les moins énergivores. Ainsi, Grâce à son système de jumeau numérique inté-

gré, Hemis offre une solution transparente pour surmonter les problèmes liés au déplacement d'un actionneur spécifique d'une zone à une autre. Jusqu'à présent, le système d'Ubiant a été opérationnel uniquement sur des systèmes électriques classiques en courant alternatif, avec une seule source d'énergie. Pour passer à un système de distribution DC (courant continu) multi-sources avec des capacités de stockage, il est essentiel de mettre en place un système de gestion permettant la coordination et la gestion en temps réel de l'équilibre production-consommation sur le bus DC. C'est dans ce contexte que notre collaboration avec la société Ubiant vise à développer un système multi-agent réactif, garantissant la stabilité du bus DC et la résilience du système électrique à ce niveau.

Le système global de gestion que nous proposons est présenté dans la figure 4.5.

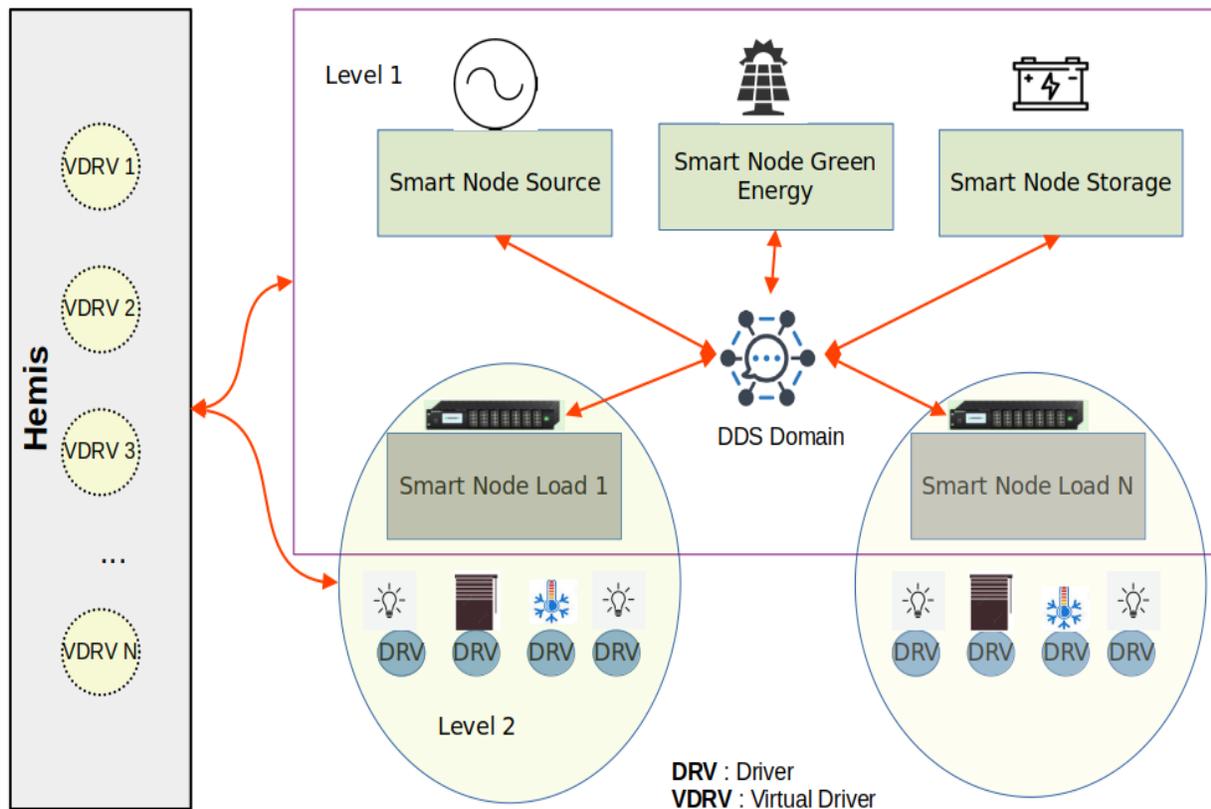


FIGURE 4.5 – Architecture globale de gestion du micro-réseau

Dans la partie communication que nous avons abordée, notre application présente deux niveaux de communication et deux niveaux de contrôle distincts.

Le premier niveau, appelé niveau 1, concerne l'interaction entre les noeuds SN sur le bus DC. À ce niveau, les noeuds communiquent pour déterminer la quantité de puissance à injecter dans le bus et la quantité de puissance à consommer par les demandeurs SNL. Le deuxième niveau, nommé niveau 2, est lié à la distribution d'énergie vers les drivers sur chaque bus 56 VDC.

Le système Hemis joue un rôle important sur les deux niveaux, mais son implication principale se situe au niveau des actionneurs finaux. Il réalise une configuration dynamique des propriétés internes des drivers, telles que la priorité, la puissance maximale et minimale, etc.

De plus, Hemis fournit également les consignes nécessaires pour le contrôle des actionneurs.

### 4.3.2 Algorithme de contrôle niveau 1

Le Niveau 1 consiste en les différents algorithmes de chaque SNL. Nous avons travaillé plus spécifiquement sur un algorithme pour la réduction de la consommation d'électricité issue de la grille en favorisant ainsi l'utilisation de l'énergie issue de ressources renouvelables surtout aux heures de pic de consommation ou lorsque le prix de l'électricité est un peu élevé. Inspiré des travaux de recherche sur les algorithmes de gestion énergétique dans les bâtiments [129, 130], l'algorithme présenté dans la figure 4.6 fonctionne avec l'hypothèse qu'on a un prix d'électricité variable en fonction du temps. Chaque Smart Node de type Load calcule ainsi la quantité d'énergie maximale à consommer selon le prix de l'électricité, l'état de charge des batteries et la disponibilité des sources d'énergie renouvelable (GE). Le but de cet algorithme est que chaque SN de type Load soit capable de calculer un coefficient reflétant l'état général du système et avec lequel chaque SN de type Load calcule ainsi la puissance à consommer à l'instant  $t+1$  avec la formule suivante.

$$[P_{t+1} = C * P_t + P_{\min} * (1 - C)] \quad (4.1)$$

- $C$  : est le coefficient reflétant l'état général du système.
- $P_{\min}$  : est la puissance minimale nécessaire pour le fonctionnement de tous les drivers du SNL.

Afin de mieux comprendre l'algorithme pour les SNL, examinons un exemple de système avec une configuration simple, tel que décrit dans le tableau ci-dessous 4.3.2 :

SNL	Consommation à l'instant $P_{\text{snl}}(t)$	Consommation minimale $P_{\min}$	Coefficient énergétique du système : $C$
SNL1	3000 Wh	2000 Wh	0.6
SNL2	3000 Wh	1500 Wh	0.6
SNL3	3000 Wh	1000 Wh	0.6

Le système est constitué de 3 SNL, où chaque SNL alimente 10 drivers. La consommation minimale de chaque SNL est donc la somme des consommations minimales de chaque driver, ajoutée à la consommation propre de fonctionnement du SNL. Ainsi, en utilisant les consommations instantanées de chaque SNL, nous serons en mesure de calculer la consommation de chaque SNL à l'instant  $t+1$  à l'aide de la suite de fonctions suivante :

$$[U_n = \begin{cases} U_0 = P_{\text{snl}}(t) \\ U_{n+1} = C * U_n + P_{\min} * (1 - C) \end{cases}] \quad (4.2)$$

L'évolution de la consommation de chaque SNL est présenté dans la figure 4.7.

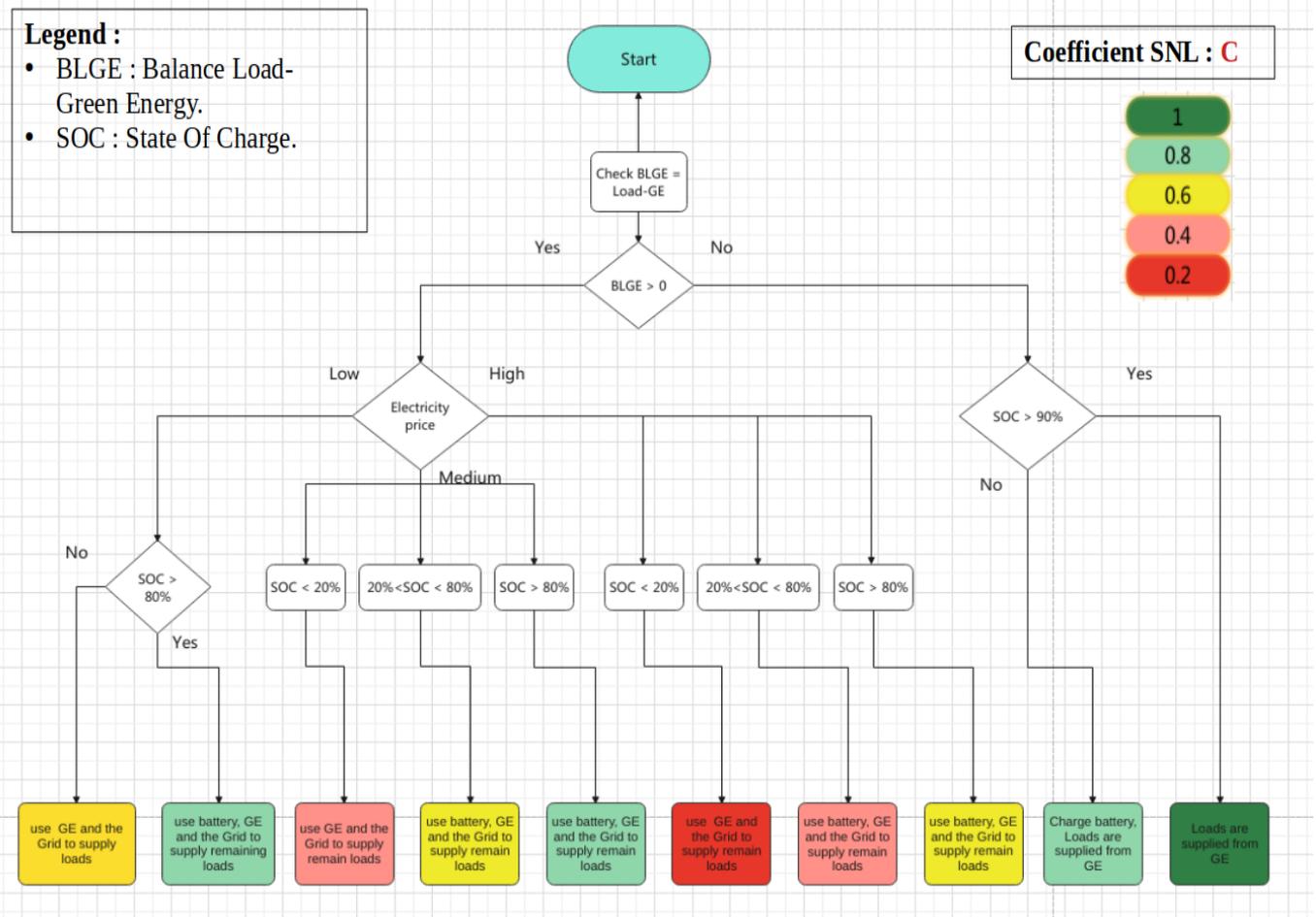


FIGURE 4.6 – Algorithmme SNL

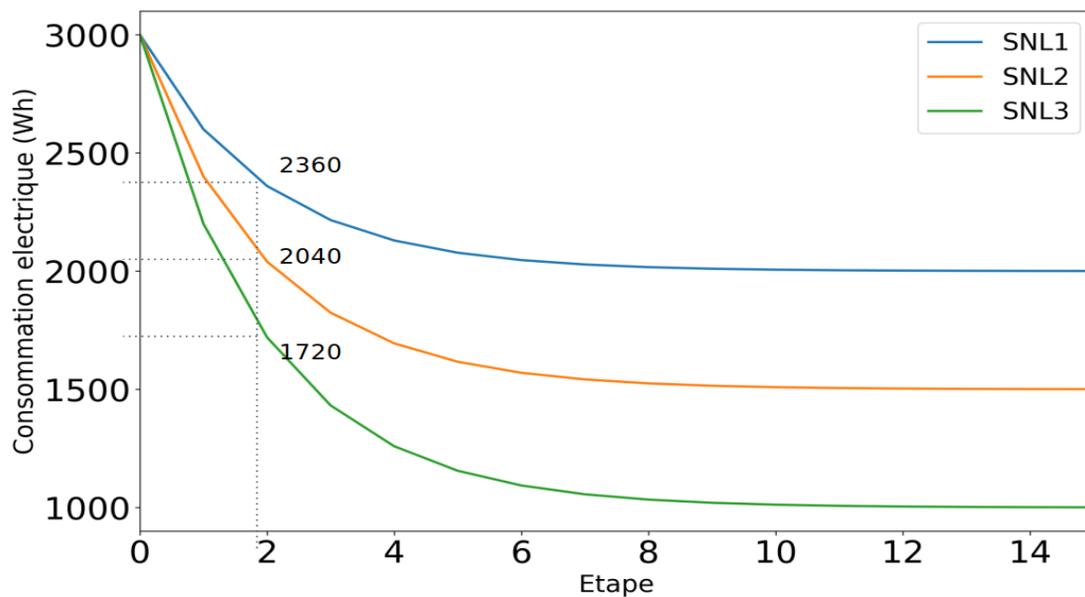


FIGURE 4.7 – Évolution de la consommation électrique des SNL

Nous pouvons observer les trois courbes décroissantes représentant la consommation de chaque SNL. Chaque courbe diminue progressivement jusqu'à atteindre sa consommation minimale respective. Il est intéressant de noter que la réduction de la consommation de chaque SNL est liée à sa consommation minimale. Par exemple, SNL3 a atteint sa consommation minimale après seulement 10 itérations, tandis que SNL2 et SNL3 ont pris plus de temps pour atteindre leurs valeurs minimales respectives.

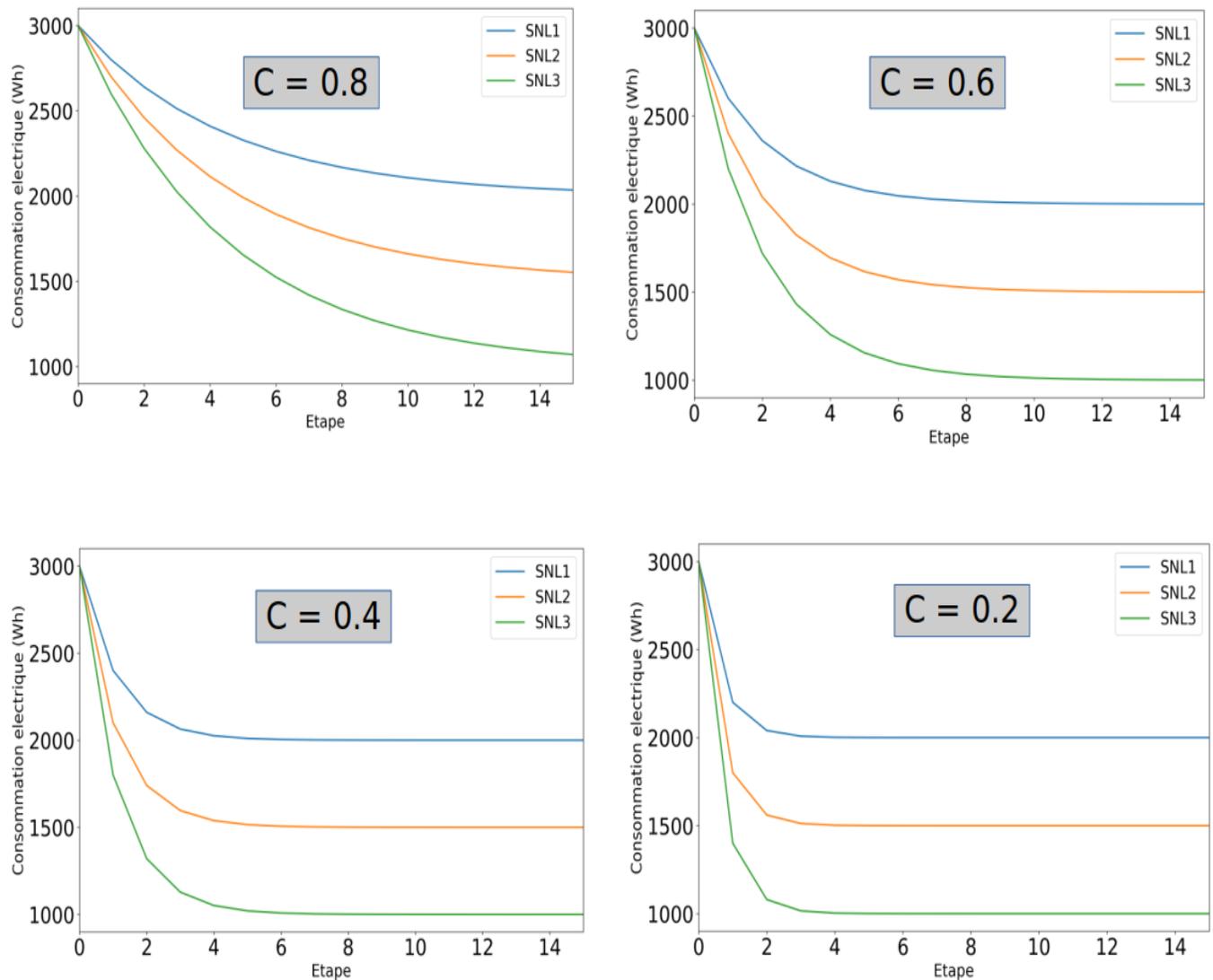


FIGURE 4.8 – L'effet de C sur l'évolution de la consommation de chaque SNL.

Les courbes présentées dans la figure 4.8 illustrent l'effet de la valeur du coefficient du système C sur la dynamique de diminution de la consommation des SNL. En les observant, il est évident que plus le coefficient du système est faible, plus la diminution de la consommation des SNLs est marquée et rapide. Cette observation suggère que chaque SNL participe activement à l'optimisation de l'énergie d'une part, et contribue également à la stabilité globale du système d'autre part.

### 4.3.3 Algorithme de contrôle niveau 2

Dans le chapitre 2, nous avons abordé la partie du routage d'énergie entre les Smart Nodes (SNL) et les drivers, qui constitue notre proposition pour la gestion des communications et la gestion des PSE en utilisant les technologies PoE et PoDL. Cette approche permet de router la puissance vers les drivers en fonction de leurs priorités et de leur "niceness", en s'inspirant du fonctionnement d'un ordonnanceur de noyau Linux.

Dans la section précédente, nous avons également discuté de l'implication des SNL dans la limitation de la consommation électrique lorsque le coefficient énergétique du système est inférieur à 1. Cette réduction est réalisable en diminuant la consommation des drivers, et chaque SNL intègre un algorithme de niveau 1, tel que présenté dans la figure 4.9.

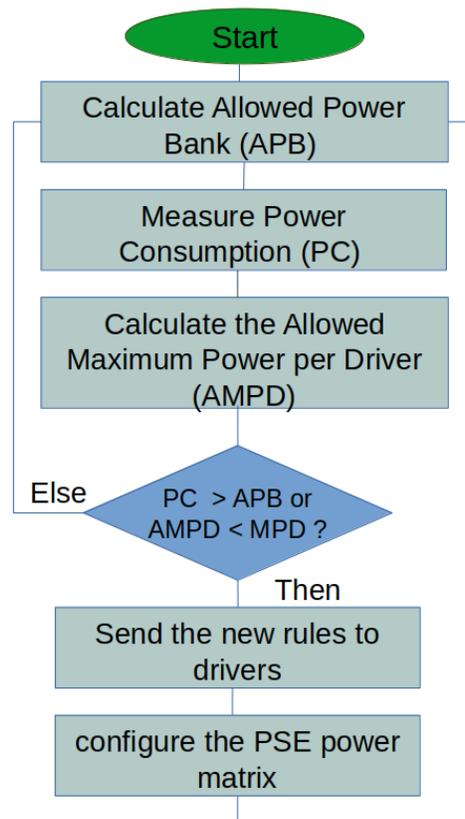


FIGURE 4.9 – Routage de puissance basée sur la puissance permis et la priorité de chaque driver.

D'après l'équation 4.1, à chaque itération, chaque SNL effectue deux calculs importants. Premièrement, il calcule la quantité d'énergie qui peut être consommée (APB). En parallèle, le SNL mesure en temps réel la consommation de tous ses drivers (PC). Ensuite, le SNL détermine la puissance maximale à consommer pour chaque driver (AMPD).

Dans le cas où le SNL consomme globalement plus d'énergie qu'il ne devrait, ou si un driver dépasse sa puissance maximale autorisée, le SNL prend des mesures correctives. Il envoie les niveaux de puissances maximales à ne pas dépasser pour les drivers concernés, et configure la matrice de puissance des PSE en conséquence. Ainsi, tout driver qui ne respecte pas les nouvelles règles sera automatiquement déconnecté du système d'alimentation pour

préserver l'équilibre énergétique.

#### 4.3.4 Simulation micro-réseau

Pour valider les deux algorithmes de niveau 1 et 2 avant leur intégration dans le système réel, nous avons réalisé des simulations pour étudier le comportement des SNL en fonction de l'état global du micro-réseau. Ces simulations prennent en compte divers paramètres tels que l'état de charge de la batterie (SOC), la production photovoltaïque, le prix de l'électricité et la consommation demandée.

Différents scénarios ont été mis en place en utilisant des entrées statiques provenant de fichiers de configurations. Pour faciliter l'interprétation des résultats obtenus par l'algorithme (courbe de consommation réelle), nous avons agi sur un ou deux paramètres à chaque étape. Parmi les scénarios simulés, nous avons constaté, par exemple, qu'entre les étapes 6 et 15, une baisse de la production photovoltaïque (en raison d'une couverture nuageuse ou autre) combinée à une baisse de l'état de charge de la batterie a entraîné une réduction de près de 8 % de la consommation côté SNL. Dans un autre scénario, illustrant l'effet de l'augmentation du prix de l'électricité sur le comportement des SNL (étapes 47 à 53), nous avons observé une diminution de la consommation d'environ 17 % par le SNL.

Les résultats de ces simulations sont présentés ensemble dans la figure 4.10 pour une meilleure visualisation et compréhension des résultats obtenus.

#### 4.3.5 Discussion

Dans cette section, nous avons abordé notre partenariat avec la société Ubiant et leur solution novatrice, Hemis, qui repose sur un système multi-agent fonctionnant avec des jumeaux numériques. Nous avons ainsi proposé une solution complète composée de deux algorithmes. Le premier vise à optimiser l'énergie en gérant la participation des charges SNL, tandis que le second s'occupe de la distribution de l'énergie aux charges en fonction de leurs priorités. L'algorithme de niveau 1 repose sur le concept du coefficient énergétique, lequel prend en compte la production locale, le prix de l'énergie, l'état de la batterie, ainsi que la consommation instantanée. Cela permet aux SNL de contribuer à la réduction de leur consommation et, par conséquent, à l'équilibrage du système. D'autre part, le système Hemis a la capacité d'influencer directement les charges finales (drivers) en ajustant de manière dynamique leurs niveaux de consommation minimale, maximale, et leurs priorités.

Le système Hemis offre la possibilité d'agir directement sur les charges finales (drivers). Il peut dynamiquement configurer leurs niveaux de consommation minimale, maximale et leurs priorités en tenant compte des besoins du réseau, des algorithmes d'apprentissage, du confort des occupants, etc. Cette flexibilité permet une distribution efficace de l'énergie aux charges les plus prioritaires, notamment lors de périodes où la tension de consommation sur le bus DC est élevée, lorsque le prix de l'énergie est élevé, ou lorsque la production locale d'énergie verte est insuffisante.

En résumé, grâce à la combinaison de notre solution d'optimisation énergétique basée sur les algorithmes de niveau 1 et 2, ainsi qu'à la souplesse du système Hemis pour agir sur les charges finales, nous avons pu apporter une réponse complète et efficace aux défis liés à l'équilibrage et l'optimisation de l'énergie dans un micro-réseau DC.

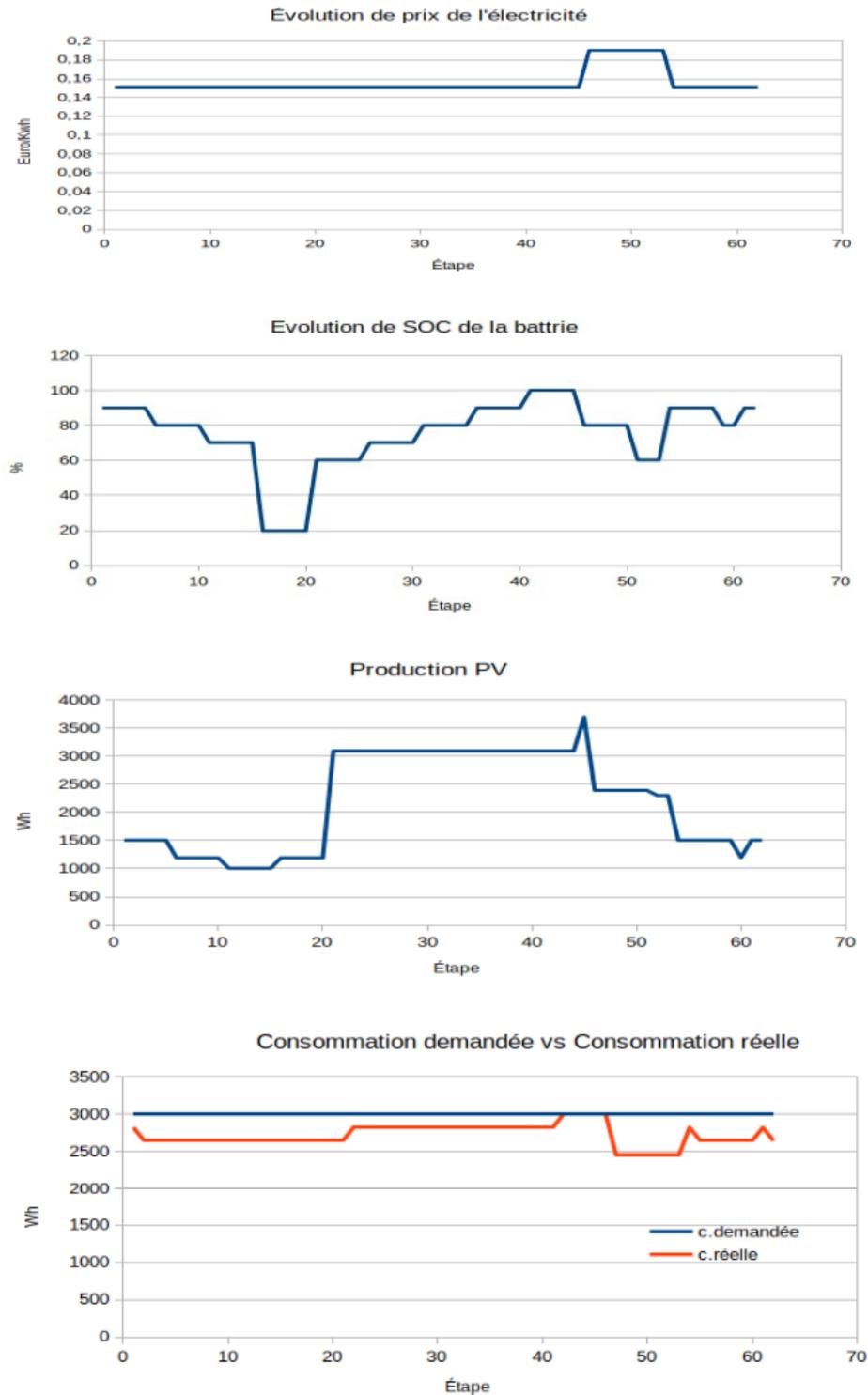


FIGURE 4.10 – Simulation algorithme SNL

#### 4.4 Système multi-agent temps réel

Cet article [131] présente la conception et la mise en œuvre d'un système multi-agent pour le contrôle d'un micro-réseau IDAPS (Intelligent Distributed Autonomous Power System).

Le système comprend un agent de contrôle, un agent DER (Distributed Energy Resource), un agent utilisateur et un agent de base de données. Les agents échangent leurs messages via un protocole TCP/IP. L'étude de cas montre que le système peut déconnecter et stabiliser le micro-réseau en cas de défaut dans un temps inférieur à 8 ms. La communication décrite suite à une détection de défaut se compose d'un échange unique. Il démontre ainsi que le système multi-agent peut être une alternative logicielle aux systèmes traditionnels de protection matérielle pour l'isolation d'un micro-réseau en cas de détection de défauts.

A.Q.Santos et al [132] ont proposé un système multi-agent hiérarchique centralisé visant à améliorer les algorithmes traditionnels de réponse aux urgences, notamment les schémas de délestage de charge, en exploitant l'infrastructure future du réseau électrique intelligent. Le système multi-agent vise à minimiser la déconnexion de charge en un court laps de temps, réduisant ainsi les perturbations de la fréquence du système. La méthodologie proposée a été validée à l'aide d'une simulation matérielle en temps réel d'un système électrique complet. Un score métrique de délestage de charge a été utilisé pour comparer la méthodologie proposée à deux autres philosophies de délestage de charge. Les résultats indiquent que l'utilisation d'une infrastructure de communication avancée, de la surveillance et de capacités de traitement intégrées peut améliorer considérablement la stabilité et réduire les déconnexions de charge inutiles du système.

Dans le domaine des études sur les systèmes multi-agents en temps réel, la plupart des travaux de recherche se concentrent sur le problème du consensus et examinent les approches employées pour parvenir à un consensus aussi rapidement que possible. Les travaux de J. Zhao et al. [133] par exemple examinent le consensus moyen parmi des agents hétérogènes en explorant divers aspects, notamment les protocoles de consensus en temps continu et en temps discret, le consensus avec délai temporel et le consensus dans une topologie de réseau dynamique. L'étude utilise la théorie des graphes pour modéliser le système et réalise des simulations et des analyses pour valider l'efficacité et la précision de ces protocoles de consensus, en particulier lorsqu'il s'agit de traiter les retards temporels.

On trouve aussi d'autres travaux de recherche sur l'influence de latence sur le consensus pour un système multi-agent, Ma et al. [134] par exemple se penchent sur le calcul précis de la marge de consensus de retard (DCM : Delay Consensus Margin) pour les systèmes multi-agents d'ordre deux dans un contexte de rétroaction proportionnelle-dérivée (PD) distribuée sur des graphes non orientés. D'autres articles de la littérature abordent encore la question de la latence dans le processus de consensus pour les systèmes multi-agents [135], [136], [137], [138], [139]. Dans les systèmes multi-agents qui exploitent la coordination comme méthode entre les agents pour atteindre leurs objectifs, la question de la latence, qu'elle soit présente au sein des agents eux-mêmes ou dans les communications entre eux, peut poser des défis. En effet, la coordination implique la répartition des tâches, des rôles et des responsabilités, ainsi que leur gestion globale. Pour les applications critiques nécessitant des systèmes en temps réel, il est essentiel de tenir compte du problème de délai ou de latence. Liu et al. [140] dans cet article ont posé ce problème et ont proposé une solution en utilisant une stratégie de contrôle prédictif d'ordre élevé dans le cadre d'un réseau de communication liant des agents non linéaires. Une autre méthode, toujours basée sur une stratégie de contrôle prédictif pour la coordination des agents, a été utilisée dans les travaux de recherche de Zhang et al. [141] pour compenser l'imprévisibilité de la latence des agents. L'article [142] présente un système multi-agent avec coordination visant à favoriser l'autoguérison des réseaux électriques intelligents. Ce système comprend un agent central chargé de prédire les pannes à l'aide de la

méthode de la série de Taylor à plusieurs étapes, tandis que les autres agents partagent des données et assurent la protection du réseau électrique. Toutefois, l'article ne précise pas la nature des échanges entre l'agent central et les autres agents, ni l'impact de ces échanges sur la stabilité du réseau.

Il existe peu de recherches sur la coordination des agents dans les applications critiques qui exigent un comportement en temps réel de la part des agents dans leur fonctionnement. Comme nous l'avons constaté, la majorité des travaux se concentrent davantage sur la coopération des agents et les méthodes de consensus. Dans cette étude, nous avons tenté de répondre au problème de la latence et des délais dans les systèmes multi-agents lorsqu'il s'agit de coordonner les agents pour garantir la stabilité des micro-réseaux et du bus DC. À la différence des approches couramment utilisées dans certaines recherches, qui se reposent souvent sur des stratégies de contrôle prédictif pour atténuer les problèmes de latence dans le fonctionnement et les interactions des agents, notre approche consiste à acquérir une compréhension approfondie et une modélisation précise de ces latences dans notre application. Par la suite, nous proposons une méthode d'optimisation fondée sur la théorie des graphes. En réalité, bien que les stratégies de contrôle prédictif puissent être une solution pour compenser les problèmes de latence et de délai dans un système multi-agent, garantissant ainsi la stabilité du bus DC et établissant un équilibre entre la production et la consommation d'électricité dans notre application, cette approche présente certaines limitations. L'une de ces limitations est qu'elle impose un type spécifique de contrôle, alors que d'autres méthodes telles que la logique floue, le contrôle par des algorithmes d'apprentissage, et les systèmes multi-agents basés sur des règles, comme ceux que nous avons présentés précédemment, offrent de nombreux avantages. Un autre inconvénient est que la stratégie de contrôle prédictif ne permet pas de réagir en cas d'incidents de sécurité impliquant des biens ou des personnes.

C'est pourquoi, dans cette étude, nous avons choisi de proposer une alternative à la stratégie de contrôle prédictif pour toutes les applications nécessitant une approche de contrôle/commande différente, notamment pour celles présentant des contraintes temps réel importantes.

#### 4.4.1 Modélisation des agents pour le contrôle/commande du micro-réseau

Comme évoqué précédemment lors de la description de la conception, notre système repose principalement sur quatre types de nœuds intelligents, appelés SN. La modélisation des agents suit une approche similaire, où l'on distingue principalement cinq types d'agents comme on peut le voir dans la figure 4.11 :

- Load agents : ce sont les agents chargés de la gestion et du contrôle des charges électriques.
- Power Source Agent : c'est l'agent responsable à la gestion de source d'électricité liée à la grille principale.
- Power Storage Agent : c'est l'agent en charge de la gestion de la source d'électricité connectée au réseau principal.
- Green Energie Agents : ce sont les agents responsables de la gestion de toute source d'énergie renouvelable ou de production locale.

- Politiques and configurations agent : c'est l'agent qui fait l'interface entre nos agents de bas niveau et le système Hemis mentionné précédemment.

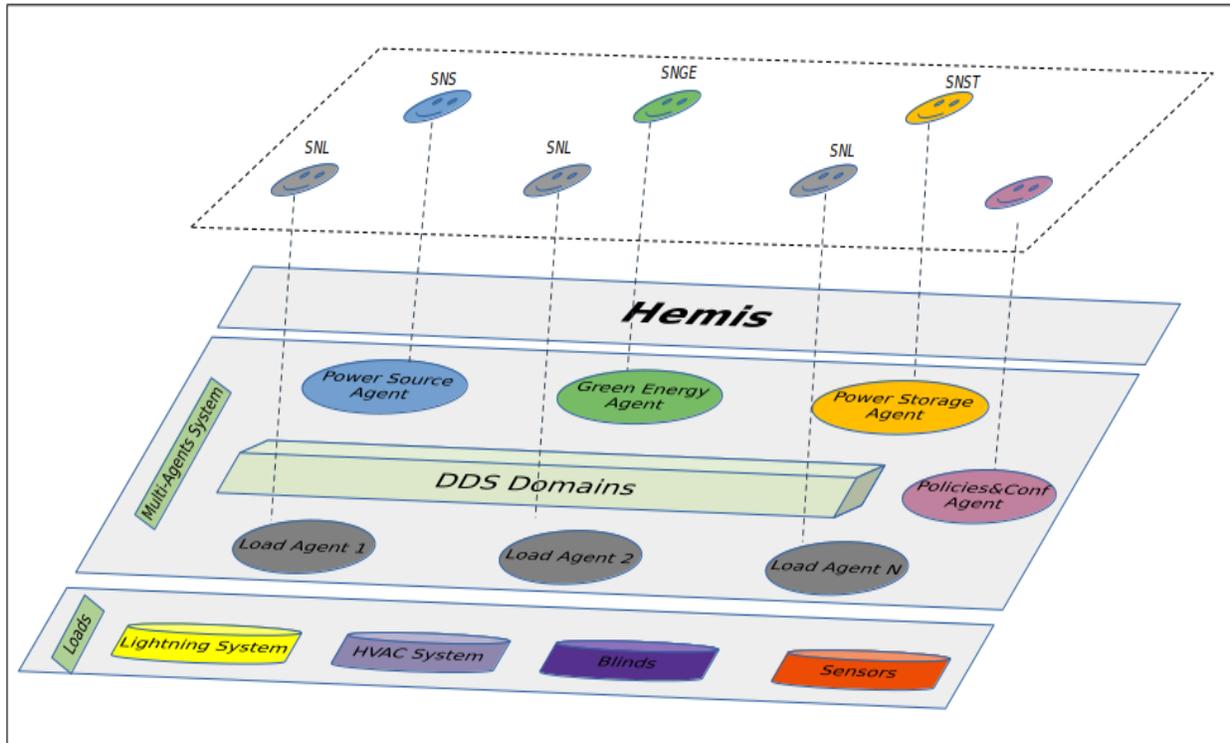


FIGURE 4.11 – Modélisation des agents pour le contrôle/commande du micro-réseau

Nous pouvons également classifier ces agents en trois groupes en fonction de leurs objectifs et de leurs fonctionnalités :

- Groupe 1 : ce groupe est responsable de la production et de l'injection d'électricité dans le micro-réseau, en favorisant l'injection de l'énergie produite localement. Il comprend l'agent source de puissance et l'agent d'énergie verte.
- Groupe 2 : il englobe les agents qui gèrent directement les charges électriques. L'objectif de ces agents est de contribuer à la stabilisation du bus DC en contrôlant plus efficacement la consommation d'énergie en fonction des conditions du système, telles que le prix de l'électricité, la disponibilité de l'énergie verte, l'état de la batterie, les charges connectées, etc.
- Groupe 3 : ce groupe d'agents est chargé de la gestion des sources de stockage d'électricité, telles que les batteries, les super-condensateurs, etc. Ces agents partagent les mêmes objectifs communs que les autres groupes tout en cherchant à préserver la durée de vie des batteries connectées en tant qu'objectif propre.

#### 4.4.2 Coordination entre les agents

Pour mettre en place efficacement le modèle de coordination entre les agents, il est essentiel de répertorier les diverses interactions entre les agents ainsi que les ressources partagées

et les ressources dont chaque agent a besoin pour collaborer avec les autres agents en vue d'atteindre l'objectif commun, tout en poursuivant ses propres objectifs.

L'agent SNS communique deux informations essentielles aux autres agents. Tout d'abord, il transmet sa capacité à fournir de l'énergie (capacity), généralement mesurée en kilowatt-heures (KWh). Cette capacité indique la quantité d'énergie que la source principale peut potentiellement injecter dans le système, laquelle dépend généralement de la capacité du convertisseur AC/DC installé dans le nœud SNS. De plus, l'agent SNS partage également le prix de l'électricité (Energy Price : EP), ce qui permet aux autres agents de prendre en compte le coût de cette énergie dans leurs décisions.

L'agent SNS et l'agent SNST, chargé de la gestion des sources de stockage, en particulier des batteries, travaillent en étroite collaboration pour stabiliser la tension du bus DC dans une plage spécifiquement définie. Leur coopération est axée sur le maintien de l'équilibre entre la demande et l'offre d'électricité, et ils agissent de manière coordonnée, jouant ainsi le rôle d'une régulation droop-control.

En plus de sa communication de capacité et de prix, l'agent SNS a besoin d'autres données cruciales pour prendre des décisions éclairées. Il collecte des informations telles que la consommation de chaque SNL, qui représente la demande d'électricité spécifique à chaque point du micro-réseau. Il tient également compte de l'état de charge des batteries, leur capacité actuelle et l'énergie injectée par l'agent des énergies renouvelables, qui peut varier en fonction des conditions météorologiques et de la disponibilité des sources renouvelables. Toutes ces interactions entre l'agent SNS et les autres agents sont schématisées dans le diagramme de séquence, tel que détaillé dans la figure 4.12. Ce diagramme permet de visualiser de manière claire les échanges de messages sortants, représentés par des communications asynchrones dans le diagramme, ainsi que les messages entrants, essentiels pour la prise de décisions de l'agent SNS, qui sont présentés sous forme de communications synchrones dans le diagramme.

L'agent SNS joue un rôle central dans la coordination et la distribution de l'énergie électrique au sein du micro-réseau. Sa communication d'informations cruciales et sa collaboration avec d'autres agents, en particulier l'agent SNST, sont essentielles pour la stabilité du micro-réseau.

L'agent SNST, en tant que responsable de la gestion des batteries, a pour mission principale de garantir la durée de vie optimale des batteries connectées au système. Pour accomplir cette tâche, il collabore étroitement avec l'agent SNS, qui représente la source d'énergie de la grille principale, et ensemble, ils régulent le bus DC. Voici comment cela fonctionne en détail :

- Communication de l'état de la batterie : L'agent SNST surveille en permanence l'état de charge (SOC) et la santé des batteries. Il communique ces informations aux autres agents, notamment l'agent SNS. Cela permet à l'ensemble du système de rester informé de la capacité actuelle des batteries et de leur disponibilité pour fournir de l'énergie.
- Optimisation de la charge et de la décharge : L'objectif principal de l'agent SNST est de préserver la durée de vie des batteries. Pour ce faire, il doit décider quand les batteries doivent être chargées, déchargées ou mises en veille. Ces décisions dépendent de plusieurs facteurs, notamment :
  - La consommation totale d'électricité dans le système, qui est obtenue en agrégeant les demandes de chaque SNL (Source de Niveau Local).

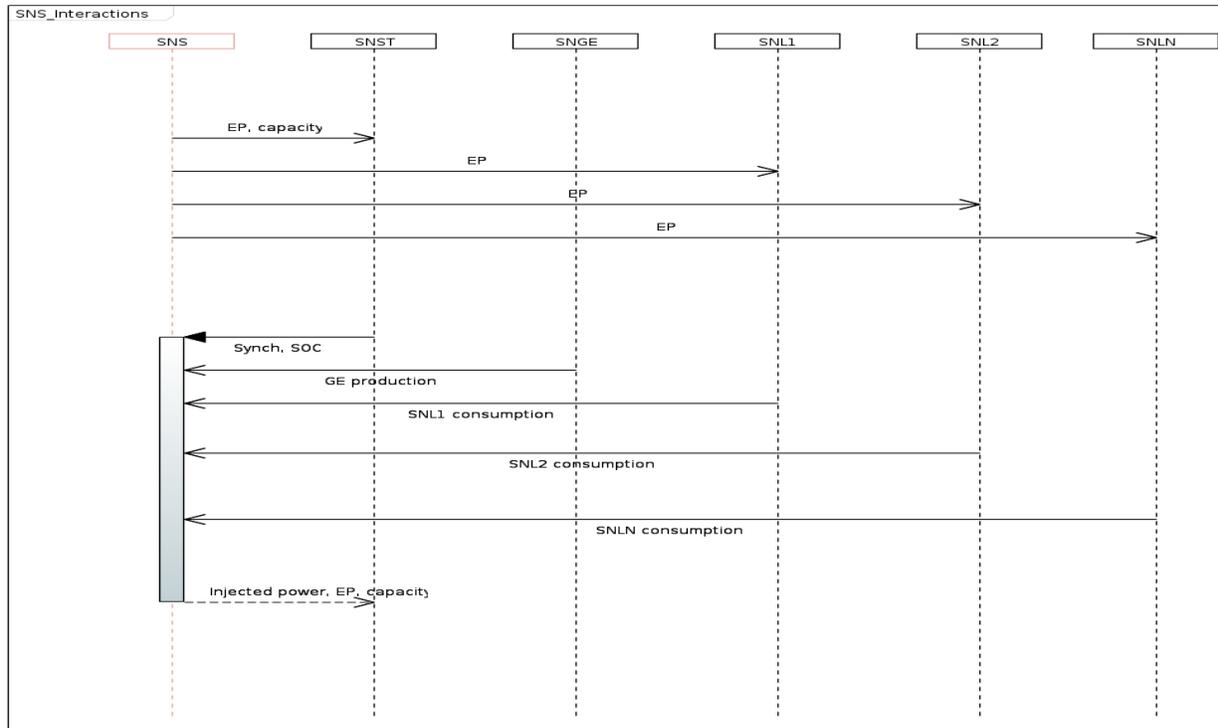


FIGURE 4.12 – Diagramme de séquence pour l'agent SNS

- La quantité d'énergie verte produite localement, provenant par exemple de sources d'énergie renouvelable comme des panneaux solaires ou des éoliennes.
- Le prix de l'électricité sur le marché, car il peut être plus rentable d'utiliser l'énergie stockée lorsque les prix sont élevés.
- Cycle de charge et de décharge : En utilisant ces informations, l'agent SNST décide à quel moment activer les batteries pour les cycles de charge ou de décharge. Il veille à ce que les batteries ne soient pas surchargées ou déchargées excessivement, ce qui pourrait réduire leur durée de vie. Il optimise également leur utilisation en fonction des coûts et de la disponibilité des sources d'énergie verte.

L'agent SNST joue un rôle crucial dans la stabilisation du bus DC et dans la gestion des batteries en prenant des décisions stratégiques pour maximiser leur durée de vie tout en répondant aux besoins en énergie du système. Cette coordination étroite avec l'agent SNS et les autres agents garantit une utilisation efficace et durable des ressources énergétiques dans le micro-réseau. Toutes les interactions de l'agent SNST et les autres agents sont schématisées dans le diagramme de séquence présenté dans la figure 4.13.

L'agent SNGE a pour mission principale de superviser et de gérer l'ensemble des sources de production d'énergie locale présentes dans le micro-réseau. Cela inclut des équipements tels que les panneaux photovoltaïques et les éoliennes. Son objectif est d'assurer que ces sources produisent de l'électricité de manière efficace et en harmonie avec les besoins du micro-réseau. L'agent SNGE communique régulièrement aux autres agents la quantité d'électricité produite par ces sources locales (GE production). Cela permet aux autres agents, en particulier à l'agent SNS et à l'agent SNST, de prendre en compte cette production dans

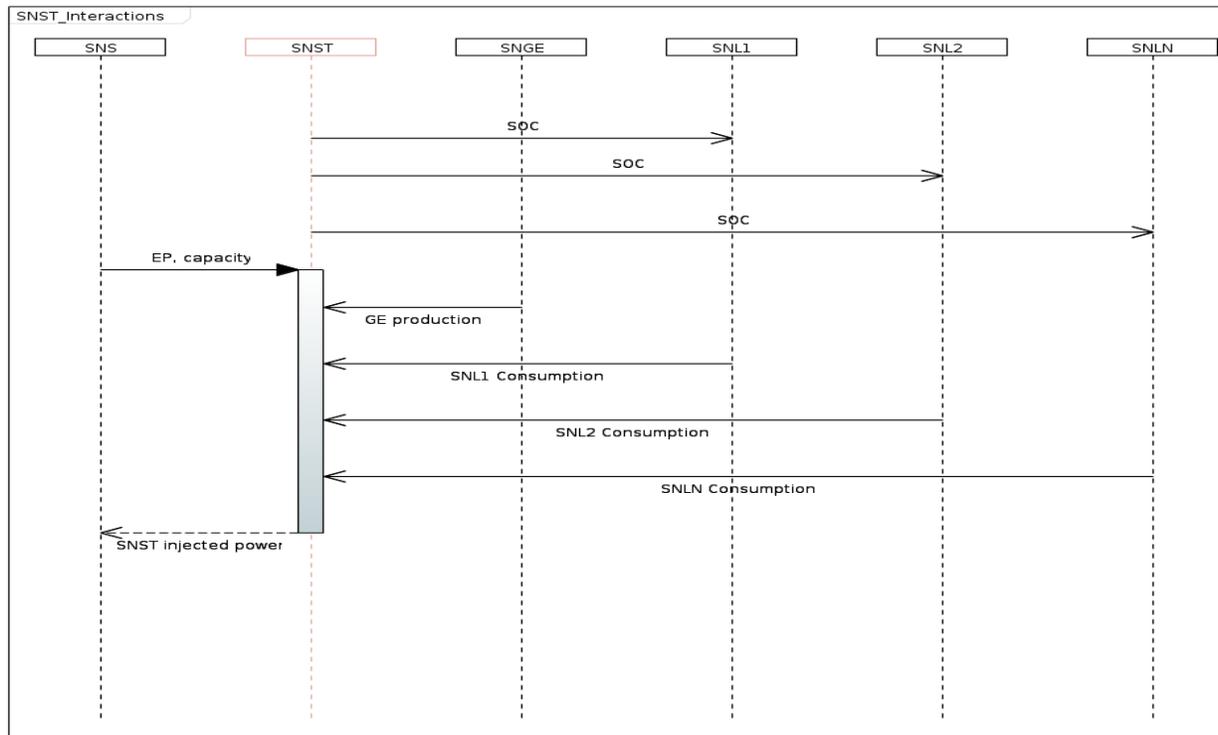


FIGURE 4.13 – Diagramme de séquence pour l'agent SNST

leurs décisions de gestion globale de l'énergie. Pour ajuster la production locale en fonction de la demande, l'agent SNGE reçoit des informations sur la consommation de chaque SNL (Source de Niveau Local) du micro-réseau. Cette consommation spécifique à chaque point d'utilisation est essentielle pour calculer la consommation totale du micro-réseau à un moment donné. L'agent SNGE joue un rôle crucial dans l'optimisation de la production d'énergie locale. En utilisant les données sur la consommation actuelle des SNL, il peut éviter la surproduction d'électricité. Une surproduction inutile pourrait entraîner des perturbations dans le bus DC du micro-réseau, ce que l'agent SNGE cherche à prévenir.

Bien que son rôle soit plus simplifié que celui des agents SNS et SNST, l'agent SNGE reste en coordination avec les autres agents pour assurer une gestion globale cohérente de l'énergie. En particulier, il ajuste sa production en fonction des informations fournies par l'agent SNS sur la disponibilité de l'électricité de la grille principale et en fonction des besoins signalés par les SNL. Toutes les interactions de l'agent SNGE avec les autres agents sont schématisées dans le diagramme de séquence présenté dans la figure 4.14. L'une des contributions essentielles de cette recherche réside dans l'implication des charges électriques dans la régulation du micro-réseau. Les SNL sont les entités responsables de la gestion de ces charges électriques, et elles jouent un rôle actif dans la régulation du bus DC, contribuant ainsi à l'optimisation de l'efficacité énergétique en utilisant les algorithmes discutés dans la section "Algorithmes d'optimisation".

Les agents SNL communiquent régulièrement leurs niveaux de consommation instantanée aux autres agents, ce qui permet une gestion dynamique de la demande d'électricité. Ils reçoivent également des informations cruciales pour leur fonctionnement, telles que l'état de

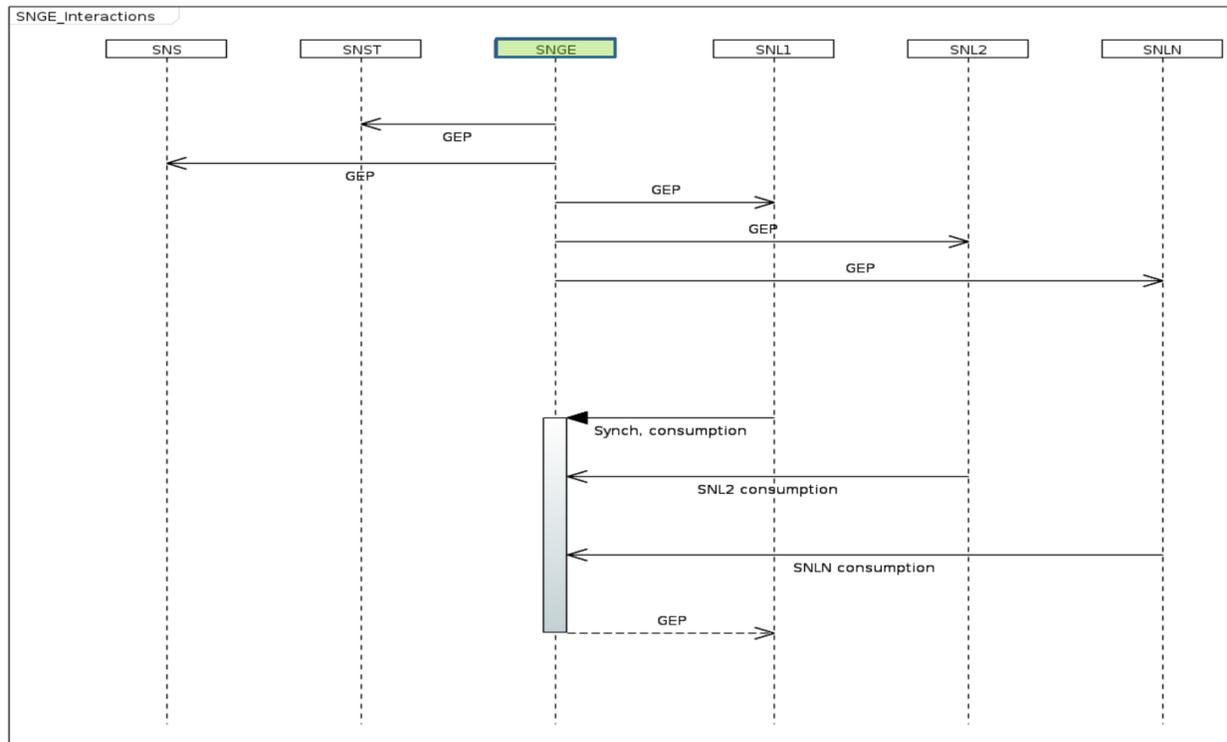


FIGURE 4.14 – Diagramme de séquence pour l'agent SNGE

charge des batteries (SOC), la production locale d'énergie et le prix de l'électricité. Cette communication bidirectionnelle permet aux SNL de s'ajuster en temps réel en fonction de la disponibilité d'énergie, des tarifs et de l'état du système, contribuant ainsi de manière significative à la régulation globale et à l'efficacité énergétique du micro-réseau. Toutes les interactions des agents SNL's avec les autres agents sont schématisées dans le diagramme de séquence présenté dans la figure 4.15.

### 4.4.3 Optimisation en utilisant le graphe hamiltonien

#### Définitions

En théorie des graphes, on définit généralement un graphe à l'aide d'un couple noté  $G = (S, A)$  tel que

- $S$  est un ensemble fini de sommets.
- $A$  est un ensemble de couples de sommets  $(s_i, s_j) \in S$

Un graphe peut être orienté ou non, dans un graphe orienté, les couples  $(s_i, s_j) \in A$  sont orientés, c'est à dire que  $(s_i, s_j)$  est un couple ordonné, où  $s_i$  est le sommet initial, et  $s_j$  le sommet terminal.

Un couple  $(s_i, s_j)$  est appelé un arc, et est représenté graphiquement par  $s_i \rightarrow s_j$ .

#### Terminologie

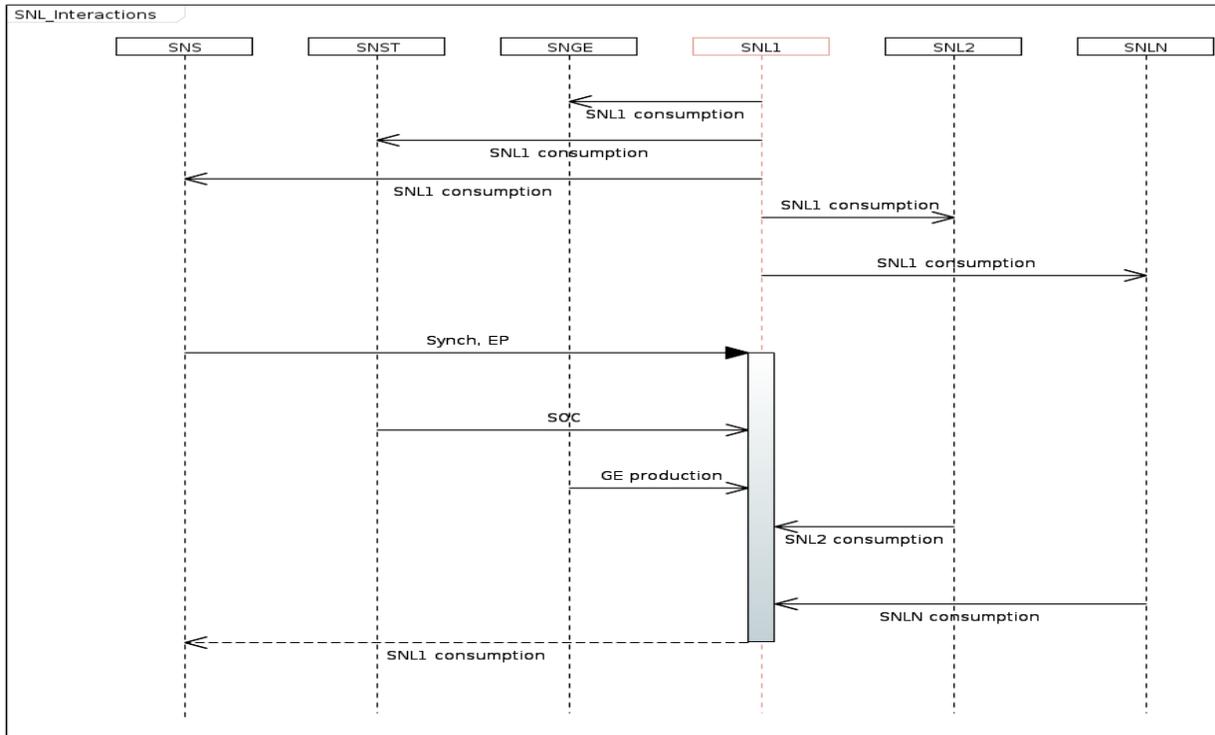


FIGURE 4.15 – Diagramme de séquence pour l'agent SNL

- L'ordre d'un graphe est le nombre de ses sommets.
- Un graphe non orienté est considéré comme simple s'il ne contient ni boucles ni plus d'une arête reliant deux sommets. En revanche, s'il ne respecte pas ces conditions, il est désigné comme un multi-graphe.
- Dans le cas d'un multi-graphe,  $A$  n'est plus un ensemble mais un multi-ensemble d'arêtes.
- Un graphe orienté est un  $p$ -graphe s'il comporte au plus  $p$  arcs entre deux sommets. Le plus souvent, on étudiera des 1-graphes.
- Un graphe partiel d'un graphe orienté ou non est le graphe obtenu en supprimant certains arcs ou arêtes.
- Un sous-graphe d'un graphe orienté ou non est le graphe obtenu en supprimant certains sommets et tous les arcs ou arêtes incidents aux sommets supprimés.
- Un graphe orienté est dit élémentaire s'il ne contient pas de boucle.
- Un graphe orienté est dit complet s'il comporte un arc  $(s_i, s_j)$  et un arc  $(s_j, s_i)$  pour tout couple de sommets différents  $s_i, s_j \in S$ .
- un graphe non-orienté est dit complet s'il comporte une arête  $(s_i, s_j)$  pour toute paire de sommets différents  $s_i, s_j \in S$ .

Dans un graphe non orienté simple avec  $n$  sommets, une chaîne hamiltonienne est une séquence élémentaire de nœuds qui la relie, où chaque nœud est visité une seule fois et la longueur de la chaîne est  $n - 1$ . De manière équivalente, une chaîne hamiltonienne parcourt chaque nœud du graphe exactement une fois. En revanche, un cycle hamiltonien est une séquence élémentaire de nœuds formant un cycle dans le graphe, où chaque nœud est visité

une seule fois, et la longueur du cycle est  $n$ . Un graphe qui contient soit un cycle hamiltonien, soit une chaîne hamiltonienne est appelé un graphe hamiltonien [143]. Par exemple, le graphe dans la figure 4.16 possède un cycle hamiltonien ( $\langle a, e, b, d, c, a \rangle$ ).

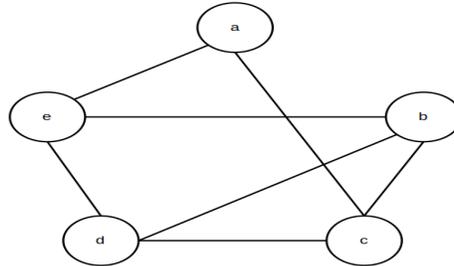


FIGURE 4.16 – Exemple d'un cycle hamiltonien

Cependant, dans le graphe 4.17, il n'existe pas de cycle hamiltonien, mais il contient une chaîne hamiltonienne ( $\langle a, b, e, d, c \rangle$ ). Il n'existe pas de condition à la fois nécessaire et

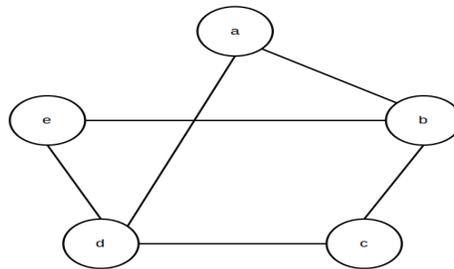


FIGURE 4.17 – Exemple d'une chaîne hamiltonienne.

suffisante pour déterminer l'existence de cycles (chaînes, circuits ou chemins) hamiltoniens dans tous les graphes. Cependant, il est possible de fournir des conditions suffisantes, notamment en se basant sur les degrés des nœuds d'un graphe simple. Dans un graphe complet de  $n$  sommets (où chaque sommet est connecté à tous les autres), il existe généralement plusieurs cycles hamiltoniens possibles.

Le nombre de cycles hamiltoniens dans un graphe complet de  $n$  sommets peut être calculé en utilisant la formule suivante :

$$C_n = \frac{(n-1)!}{2} \quad (4.3)$$

Où  $C_n$  représente le nombre de cycles hamiltoniens dans le graphe complet de  $n$  sommets. Cette formule tient compte du fait que le nombre de cycles hamiltoniens est généralement plus petit que le nombre de permutations possibles des  $n$  sommets.

## Méthodologie

Pour bien représenter les délais de communication et de traitement des agents, nous avons développé un modèle simplifié d'interaction entre cinq agents : un agent SNS, un agent SNST, un agent SNGE, ainsi que deux agents SNL.

Dans ce système, les délais résultent de deux sources principales : les délais internes propres à chaque agent et les délais de communication entre les agents. Les délais internes des agents peuvent découler de divers facteurs, tels que les tâches exécutées par l'agent, les performances du matériel de support de l'agent, les processus de mesure, et ainsi de suite.

Première étape : Cette étape consiste à évaluer les performances des agents dans leur environnement d'application et à mesurer les délais de chaque interaction entre deux agents.

Deuxième étape : Dans cette phase, nous créons un graphe simple, complet et non orienté en utilisant les délais ( $L_{ij}$ ) liés à chaque paire d'agents ( $i, j$ ) comme données d'entrée. Un exemple de tel graphe est présenté dans la figure 4.18.

Troisième étape : En utilisant le graphe des latences que nous avons élaboré, nous serons en mesure de découvrir tous les cycles hamiltoniens possibles pour l'agent en question (dans notre exemple de 5 agents, 12 cycles possibles pour chaque agent). Cette procédure nous permettra ensuite de calculer le cycle hamiltonien qui affiche la latence minimale. Par conséquent, nous serons en mesure de déterminer le trajet le plus efficace pour que cet agent puisse recevoir toutes les informations essentielles requises pour accomplir ses fonctions.

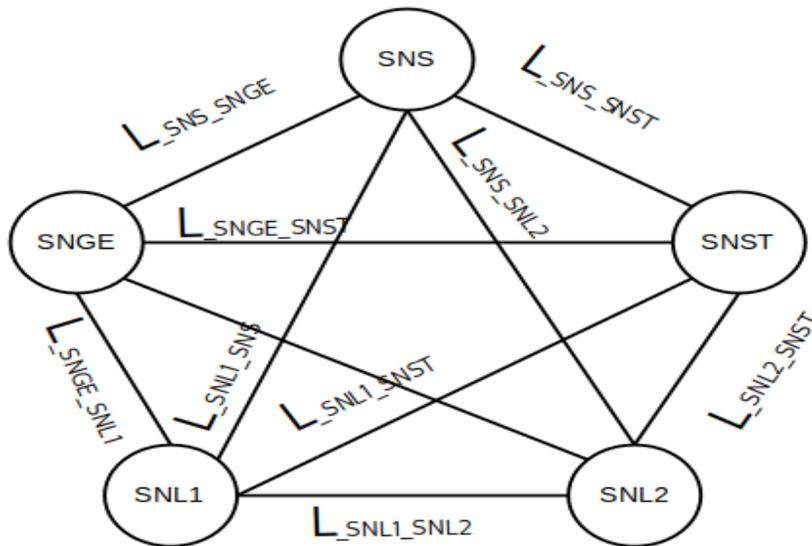


FIGURE 4.18 – Modélisation des délais d'interactions entre les agents

TABLEAU 4.2 – Latence entre chaque paire d'agents ( $\mu\text{s}$ )

Agent	SNS	SNST	SNGE	SNL1	SNL2
SNS	-	310	304	320	312
SNST	310	-	290	315	393
SNGE	304	290	-	310	301
SNL1	320	315	310	-	330
SNL2	312	393	301	330	-

Pour explorer l'ensemble des cycles hamiltoniens pour chaque agent, et en l'absence d'une approche mathématique directe, nous avons employé un algorithme spécifique (présenté dans

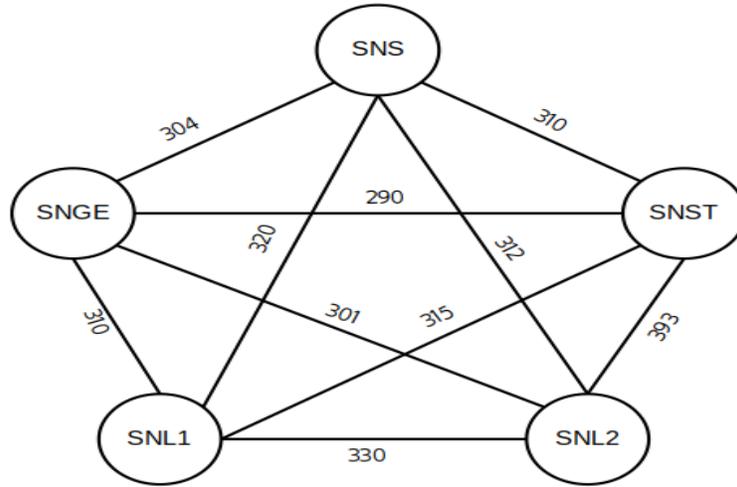


FIGURE 4.19 – Graphe des latences pour les agents SNS, SNST, SNGE, SNL1 et SNL2

l'annexe) sur un ensemble de matrices  $A_{sns}$ ,  $A_{snst}$ ,  $A_{sngc}$ ,  $A_{snl1}$ ,  $A_{snl2}$ . Chaque matrice est élaborée en utilisant les vecteurs des arêtes hamiltoniennes, où l'agent en question occupe la position initiale dans la matrice.

Ensuite, nous avons appliqué une méthode connue sous le nom de "retour en arrière" (Backtracking) sur les matrices obtenues ci-dessous. Cette méthode est expliquée dans l'article référencé [144].

$$A_{sns} = \begin{bmatrix} 0 & 310 & 304 & 320 & 312 \\ 310 & 0 & 290 & 315 & 393 \\ 304 & 290 & 0 & 310 & 301 \\ 320 & 315 & 310 & 0 & 330 \\ 312 & 393 & 301 & 330 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{snst} = \begin{bmatrix} 0 & 310 & 290 & 315 & 393 \\ 310 & 0 & 304 & 320 & 312 \\ 290 & 304 & 0 & 310 & 301 \\ 315 & 320 & 310 & 0 & 330 \\ 393 & 312 & 301 & 330 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{sngc} = \begin{bmatrix} 0 & 304 & 290 & 310 & 301 \\ 304 & 0 & 310 & 320 & 312 \\ 290 & 310 & 0 & 315 & 393 \\ 310 & 320 & 315 & 0 & 330 \\ 301 & 312 & 393 & 330 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{snl1} = \begin{bmatrix} 0 & 320 & 315 & 310 & 330 \\ 320 & 0 & 310 & 304 & 312 \\ 315 & 310 & 0 & 290 & 393 \\ 310 & 304 & 290 & 0 & 301 \\ 330 & 312 & 393 & 301 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{sn12} = \begin{bmatrix} 0 & 312 & 393 & 301 & 330 \\ 312 & 0 & 310 & 304 & 320 \\ 393 & 310 & 0 & 290 & 315 \\ 301 & 304 & 290 & 0 & 310 \\ 330 & 320 & 315 & 310 & 0 \end{bmatrix}$$

Après la détermination de tous les cycles hamiltonien  $\{C_j, j \in [1..N], N = 12\}$  pour chaque agent  $A_i$ , le calcul du cycle minimum et du cycle maximum est simple, les résultats pour les cinq agents sont illustrés dans le tableau 4.3. La figure 4.20 illustre un exemple de cycle minimal pour l'agent SNS. Ce cycle, étant donné que le graphe est complet dans cet exemple, est également le cycle minimal pour les autres agents. En mettant en œuvre cette méthode, chaque agent peut réduire le temps nécessaire pour accomplir sa tâche de près de 7%. Dans cet exemple, les agents sont tous déployés sur des cartes Raspberry Pi 3 et des Raspberry Pi industriels CM3, ce qui signifie qu'il n'y a pas de grande différence en termes de latences internes entre les agents. Cependant, dans le cas où les agents sont déployés sur des matériels cibles nettement différents, les gains en termes de réduction des délais peuvent être encore plus importants.

TABLEAU 4.3 – Synthèse des traits distinctifs des cycles de divers agents.

Agent	SNS	SNST	SNGE	SNL1	SNL2
Nombre de cycles	12	12	12	12	12
Cycle maximal ( $\mu s$ )	1647	1647	1647	1647	1647
Cycle minimal ( $\mu s$ )	1538	1538	1538	1538	1538

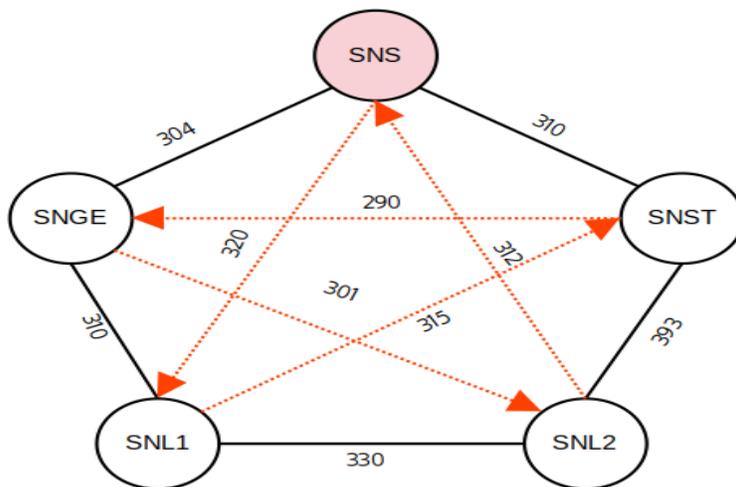


FIGURE 4.20 – Cycle minimal pour l'Agent SNS

Cette approche peut non seulement contribuer à réduire les délais des agents dans l'accomplissement de leurs tâches, mais elle peut également être appliquée à l'optimisation de toute tâche nécessitant la coordination entre un groupe d'agents.

## 4.5 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons exposé notre réponse aux défis associés à l'optimisation de l'énergie. Nous avons passé en revue les diverses approches et algorithmes fréquemment mentionnés dans la littérature pour l'optimisation énergétique des bâtiments. De plus, nous avons présenté notre propre approche, qui repose sur deux algorithmes. Ces algorithmes tiennent compte d'une multitude de paramètres, tels que le coût de l'électricité, l'état des batteries de stockage, la production d'énergie verte, et d'autres encore. De surcroît, nous avons détaillé notre algorithme de routage de l'énergie vers les charges, qui s'inspire des principes de priorité et de gentillesse, en s'appuyant sur le fonctionnement des ordonnanceurs de processus du noyau Linux.

Pour évaluer l'efficacité des deux algorithmes de niveau 1 et 2, nous avons réalisé des simulations visant à étudier la réaction des SNL (Sous-Nœuds Locaux) en fonction de l'état global du micro-réseau. Les résultats de ces simulations ont démontré des économies d'énergie notables, allant de 8% à 17% dans certaines conditions, grâce à l'application des algorithmes que nous avons conçus.

Dans la seconde partie, nous avons exposé notre collaboration avec la société Ubiant, ainsi que le modèle de contrôle de bus DC basé sur un système multi-agent. Avant d'en arriver là, nous avons examiné diverses approches de contrôle de bus DC, ainsi que différents modèles d'interactions entre les agents, tant dans les systèmes multi-agents en général que dans les systèmes appliqués à la régulation de micro-réseaux électriques.

En raison de l'exigence de temps réel dans notre application, nous avons été contraints de mieux appréhender et de détailler le problème d'interaction entre les agents au sein d'un modèle basé sur la coopération, qui est le modèle le plus couramment utilisé dans la littérature, en conjonction avec des modèles de contrôle/commande prédictifs.

Dans ce travail, nous avons cherché à présenter une approche différente pour la régulation des micro-réseaux électriques, à savoir le modèle de coordination. Nous avons ainsi proposé une méthodologie visant à modéliser de manière approfondie les interactions et les délais d'action des agents, ainsi qu'une approche d'optimisation des latences entre les agents en utilisant la technique de l'optimisation hamiltonienne.

# Chapitre 5

## Conclusion et perspectives

### Sommaire

---

5.1	Conclusion générale . . . . .	125
5.2	Perspectives . . . . .	126

---

## 5.1 Conclusion générale

Ce travail de recherche a été mené dans le but de résoudre les défis spécifiques liés à la stabilité et à l'optimisation des réseaux de distribution en courant continu. Son objectif principal était de développer une architecture de distribution électrique en courant continu, des stratégies de contrôle et des algorithmes d'optimisation avancés afin d'assurer un fonctionnement fiable et efficace du système, tout en maximisant l'utilisation des sources d'énergie renouvelable et en minimisant les pertes d'énergie.

Cette thèse a généré deux contributions significatives. En premier lieu, il a introduit les technologies de communication et de distribution électrique, notamment le PoE et le PoDL, dans le contexte des bâtiments. Deuxièmement, il a élaboré une approche globale qui combine à la fois la stabilité du bus DC et l'optimisation énergétique dans le système de distribution.

Nous avons conçu une architecture électrique DC qui intègre ces deux technologies, le PoE et le PoDL, puis nous avons mené une évaluation approfondie de l'utilisation de PoE dans les bâtiments N8A et N8B. Cette évaluation a porté principalement sur les avantages et les inconvénients, en mettant particulièrement l'accent sur les pertes en ligne et les pertes à vide.

De plus, une architecture de communication complète a été proposée et mise en œuvre après avoir évalué les performances de divers protocoles de communication, notamment MQTT, Powerlink, G3-PLC, DDS, et autres. L'aspect critique de notre application réside principalement dans la réactivité des nœuds intelligents (Smart Nodes ou SN) qui jouent un rôle essentiel dans la stabilisation du bus DC et, par extension, du micro-réseau. Les contraintes de sécurité des personnes et des biens, ainsi que les impératifs économiques et industriels, requièrent un protocole de communication réactif avec un temps de latence strictement défini. C'est pourquoi nous avons opté pour le protocole DDS, qui se distingue par d'excellentes performances en temps réel, offrant une latence limitée et maîtrisée. De plus, il s'agit d'un protocole ouvert. Grâce à son architecture distribuée et à ses fonctionnalités avancées de gestion des données, le DDS est en mesure de garantir des communications temps réel fiables et prévisibles, même dans des environnements exigeants. Cette capacité permet de réduire les délais liés à la communication, améliorant ainsi la réactivité des agents opérant dans les Smart Nodes. L'approche développée repose sur un système de communication très réactif entre les différents acteurs du bus DC, garantissant ainsi la stabilité du système et la sécurité des biens et des personnes. De plus, l'utilisation d'un système multi-agent d'une façon coordonnée permet de prendre des décisions adaptées aux contextes, optimisant ainsi l'efficacité du réseau de distribution DC tout en maintenant un fonctionnement stable et une utilisation efficace de l'énergie.

En ce qui concerne l'optimisation de l'efficacité énergétique des bâtiments, nous avons étudié en détail les algorithmes et les approches couramment utilisés dans ce domaine. Par la suite, nous avons effectué une analyse approfondie de deux algorithmes spécifiques que nous avons élaborés pour relever les défis liés à l'optimisation énergétique. Il est important de noter que les deux algorithmes que nous avons développés sont complémentaires et offrent une alternative aux algorithmes d'optimisation classiques qui se basent généralement sur le délistage des charges. De plus, les deux algorithmes que nous avons conçus sont des algorithmes de bas niveau, spécialement conçus pour être étroitement liés au matériel. Ils sont ainsi en mesure d'interagir et de fonctionner en synergie avec n'importe quel algorithme de haut niveau doté de fonctionnalités et de services étendus, tels que le système Hemis de la

société Ubian.

Le choix d'un système multi-agent pour le contrôle-commande a été privilégié par la société Ubian dans le but d'assurer une interopérabilité et une cohérence avec leur système Hemis. Ce choix, bien que complexe, présente de nombreux avantages tels que la flexibilité et la facilité de mise à l'échelle par rapport aux systèmes de contrôle-commande traditionnels tels que le matériel en boucle fermée (hardware-in-the-loop) et le modèle de commande prédictif (MPC). Les systèmes multi-agents sont plus adaptables en termes d'ajout et de suppression de sources de production ou de charges.

Le système multi-agent que nous avons développé repose sur une approche de coordination entre les producteurs et les consommateurs d'électricité au sein du micro-réseau. Cette approche requiert une modélisation fine des interactions entre les agents. Dans ce contexte, nous avons proposé une méthode pour modéliser et optimiser les délais d'action des agents, en utilisant une technique bien connue en théorie des graphes appelée "optimisation hamiltonienne". Cette méthode est particulièrement adaptée aux applications en temps réel qui nécessitent des délais d'action limités et bien maîtrisés.

En résumé, l'approche globale de ce travail, combinant la stabilité du bus DC, l'optimisation énergétique et les technologies de communication, garantit un fonctionnement stable du réseau et une utilisation efficace de l'énergie. Le système de communication très réactif permet de détecter rapidement les perturbations sur le bus DC et de prendre les mesures nécessaires en conséquence.

## 5.2 Perspectives

Dans ce projet, nous avons abordé le rôle de la technologie PoDL en tant que solution de distribution électrique ayant un impact significatif sur l'énergie grise dans les bâtiments. Jusqu'à présent, notre travail s'est limité à l'utilisation du protocole SPE 10base-T1L, qui est un protocole point à point. Dans le cadre de nos perspectives futures, nous envisageons d'explorer la norme 10-base-T1S qui offre une topologie point à multiples points (multi-drop). Cette topologie permet de réaliser des économies d'énergie grise en connectant jusqu'à 8 nœuds sur le même câble. Cependant, un défi majeur réside dans l'absence de norme PoDL pour cette topologie en raison des difficultés liées à la détection, à la négociation des puissances et aux aspects de protection pour plusieurs nœuds sur la même paire de fils.

Plusieurs pistes d'exploration peuvent être envisagées, notamment l'utilisation d'un protocole de communication de la couche IP pour la négociation de puissance, en remplacement d'une négociation au niveau de la couche physique. En ce qui concerne la sécurité des biens et des personnes, il convient de mentionner qu'en décembre 2022, la norme UL 1400-1 a été publiée. Il s'agit de la première norme qui s'applique aux systèmes de puissance de classe 4, et elle spécifie toutes les recommandations nécessaires pour la conception d'un système de classe 4, sans limitation de puissance, avec des niveaux de tension pouvant atteindre 450 V en courant continu. Cette norme vise à garantir la protection des biens et des personnes contre tous les incidents électriques. Nous envisageons donc d'intégrer les spécifications matérielles et logicielles dans nos cartes SN afin de répondre aux exigences de cette norme. La partie du contrôle-commande basée sur le système multi-agent pourrait également bénéficier d'améliorations. En effet, les systèmes multi-agents destinés aux applications temps réel sont encore peu explorés dans la littérature. La majorité des travaux, comme mentionné précédemment, se concentrent sur la coopération et les problèmes de consensus dans un contexte

---

de contraintes temporelles. Nous avons tenté d'apporter une contribution en matière de coordination entre les agents en proposant une méthode de modélisation et d'optimisation des actions des agents. Cependant, cette piste de recherche pourrait être renforcée en explorant d'autres méthodes mathématiques ou d'autres algorithmes d'optimisation. Un autre axe de recherche essentiel concerne l'amélioration de la plateforme open source pour les systèmes multi-agents Volttron, qui offre de nombreux avantages en termes de services pour le développement de systèmes de gestion énergétique basés sur des approches multi-agents. Des propositions d'amélioration peuvent être formulées en ce qui concerne les approches d'organisation entre les agents ainsi que la latence globale des opérations des agents.

# Bibliographie

- [1] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. World energy outlook 2022. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>. Accessed on January 20, 2023.
- [2] Cerema. Consommation d'énergie dans les bâtiments – chiffres clés 2018. <https://reseaux-chaleur.cerema.fr/espace-documentaire/consommation-denergie-dans-les-batiments-chiffres-cles-2018>. Accessed on January 5, 2023.
- [3] De multiples leviers pour réduire les émissions carbon d'un bâtiment en construction ou en rénovation. [https://resources.taloen.fr/resources/documents/4224\\_190604\\_FichID\\_Les\\_materiaux\\_biosources\\_et\\_le\\_reemploi.pdf](https://resources.taloen.fr/resources/documents/4224_190604_FichID_Les_materiaux_biosources_et_le_reemploi.pdf). Accessed on Mar 24, 2021.
- [4] Abhilash Kantamneni, Laura E. Brown, Gordon Parker, and Wayne W. Weaver. Survey of multi-agent systems for microgrid control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 45 :192–203, 2015.
- [5] Muhammad Waseem Khan and Jie Wang. The research on multi-agent system for microgrid control and optimization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80 :1399–1411, 2017.
- [6] Yu Wang, Tung-Lam Nguyen, Yan Xu, Quoc-Tuan Tran, and Raphael Caire. Peer-to-peer control for networked microgrids : Multi-layer and multi-agent architecture design. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(6) :4688–4699, 2020.
- [7] Mansour Saber, Wiest Nicolas, Lefevre Olivier, and Mazac Sebastien. Hemis : Hybrid multi-agent architecture for energy management and home automation. In *2012 IEEE Sixth International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems*, pages 229–230, 2012.
- [8] Max Roser Hannah Ritchie. Emissions by sector. <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>. Accessed on Feb 20, 2022.
- [9] Iea. Data overview. <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLDfuel>. Accessed on Feb 20, 2022.
- [10] NATIONS UNIES 2015. Accord de paris. [https://unfccc.int/sites/default/files/french\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/french_paris_agreement.pdf). Accessed on January 6, 2023.

- [11] La consommation d'électricité en chiffres. <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/l-electricite-au-quotidien/la-consommation-d-electricite-en-chiffres>. Accessed on Mar 20, 2022.
- [12] Cheng KW Eric, KAS Mallikarjuna Rao, Sunita Nadampalli, VT Somasekhar, K Rajambal, P Sanjeevikumar, G Balaji, Manjunatha YR, MY Sanavullah, TS Sivakumar, et al. Overview of the dc power conversion and distribution. *Asian Power Electronics*, 2(2) :75–82, 2008.
- [13] Yen Kheng Tan, Truc Phuong Huynh, and Zizhen Wang. Smart personal sensor network control for energy saving in dc grid powered led lighting system. *IEEE Transactions on smart grid*, 4(2) :669–676, 2012.
- [14] Hiroya Yajima, Tadatoshi Babasaki, Kenichi Usui, Yasuyuki Ooi, and Keiichi Hirose. Energy-saving and efficient use of renewable energy by introducing an 380 vdc power-supply system in data centers. In *2015 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, pages 1–4. IEEE, 2015.
- [15] Guy AlLee and William Tschudi. Edison redux : 380 vdc brings reliability and efficiency to sustainable data centers. *IEEE Power and Energy Magazine*, 10(6) :50–59, 2012.
- [16] Yoshiteru Yoshida, Toshihiro Hayashi, Hirotaka Kusabe, Toshiyuki Kyunai, Kenichi Usui, Hiroya Yajima, Keiichi Hirose, Tadahito Aoki, and Dan Stanzone. Energy-saving effects by using 380vdc power supply system interconnected with a solar power generation system in texas. In *2017 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, pages 189–195. IEEE, 2017.
- [17] Rajeev Kumar Chauhan, Bharat Singh Rajpurohit, Robert E Hebner, Sri Niwas Singh, and Francisco M Gonzalez-Longatt. Voltage standardization of dc distribution system for residential buildings. *CEM Publications*, 2014.
- [18] Estefanía Planas, Jon Andreu, José Ignacio Gárate, Iñigo Martínez de Alegría, and Edorta Ibarra. Ac and dc technology in microgrids : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43 :726–749, 2015.
- [19] Michael Starke, Leon M. Tolbert, and Burak Ozpineci. Ac vs. dc distribution : A loss comparison. In *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, pages 1–7, 2008.
- [20] Ander Goikoetxea, José María Canales, Roberto Sanchez, and Pablo Zumeta. Dc versus ac in residential buildings : Efficiency comparison. In *Eurocon 2013*, pages 1–5, 2013.
- [21] Huey Pang, Edward Lo, and Bryan Pong. Dc electrical distribution systems in buildings. In *2006 2nd International Conference on Power Electronics Systems and Applications*, pages 115–119, 2006.
- [22] U. Boeke and M. Wendt. Dc power grids for buildings. In *2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, pages 210–214, 2015.

- [23] Yigao Du, Jing Wu, Shaoyuan Li, Chengnian Long, and Ioannis Ch. Paschalidis. Distributed mpc for coordinated energy efficiency utilization in microgrid systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(2) :1781–1790, 2019.
- [24] Xiaowen Xing, Lili Xie, and Hongmin Meng. Cooperative energy management optimization based on distributed mpc in grid-connected microgrids community. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 107 :186–199, 2019.
- [25] Yigao Du, Jing Wu, Shaoyuan Li, Chengnian Long, and Simona Onori. Coordinated energy dispatch of autonomous microgrids with distributed mpc optimization. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(9) :5289–5298, 2019.
- [26] Salem Batiyah, Roshan Sharma, Sherif Abdelwahed, and Nasibeh Zohrabi. An mpc-based power management of standalone dc microgrid with energy storage. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 120 :105949, 2020.
- [27] Ali Izadi, Masoomeh Shahafve, and Pouria Ahmadi. Neural network genetic algorithm optimization of a transient hybrid renewable energy system with solar/wind and hydrogen storage system for zero energy buildings at various climate conditions. *Energy Conversion and Management*, 260 :115593, 2022.
- [28] Inês Costa-Carrapiço, Rokia Raslan, and Javier Neila González. A systematic review of genetic algorithm-based multi-objective optimisation for building retrofitting strategies towards energy efficiency. *Energy and Buildings*, 210 :109690, 2020.
- [29] Marjan Ilbeigi, Mohammad Ghomeishi, and Ali Dehghanbanadaki. Prediction and optimization of energy consumption in an office building using artificial neural network and a genetic algorithm. *Sustainable Cities and Society*, 61 :102325, 2020.
- [30] D. D’Agostino, F. Minelli, and F. Minichiello. New genetic algorithm-based workflow for multi-objective optimization of net zero energy buildings integrating robustness assessment. *Energy and Buildings*, 284 :112841, 2023.
- [31] R. Lavanya, C. Murukesh, and N.R. Shanker. Microclimatic hvac system for nano painted rooms using pso based occupancy regression controller. *Energy*, 278 :127828, 2023.
- [32] GR Hemanth, S Charles Raja, J Jeslin Drusila Nesamalar, and J Senthil Kumar. Cost effective energy consumption in a residential building by implementing demand side management in the presence of different classes of power loads. *Advances in Building Energy Research*, 16(2) :145–170, 2022.
- [33] Rajeev Kumar Chauhan and Kalpana Chauhan. Building automation system for grid-connected home to optimize energy consumption and electricity bill. *Journal of Building Engineering*, 21 :409–420, 2019.
- [34] Microchip Technology Inc Eli Ohana, Shahar Feldman. Next-generation poe : Ieee® 802.3bt white paper. [https://www.microsemi.com/document-portal/doc\\_view/136209-next-generation-poe-ieee-802-3bt-white-paper](https://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/136209-next-generation-poe-ieee-802-3bt-white-paper). Accessed on January 2, 2022.

- [35] Felipe Jerez. Inductors for modern power over signal applications in automotive. In *2019 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ)*, pages 103–106, 2019.
- [36] Felix Schwarze, Florian Protze, Martin Kreißig, and Frank Ellinger. Design and latency analyses of an enhanced mixed-signal coupling network with adaptive noise cancellation for power over data lines. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(3) :2514–2528, 2021.
- [37] Neven Pischl. Practical considerations for implementing podl-coupling circuits. Broadcom Corporation, January 9, 2015.
- [38] GITESH BHAGWAT. Podl power coupling network performance. Analog Device, January 20, 2023.
- [39] E Barklund, Nagaraju Pogaku, Milan Prodanovic, C Hernandez-Aramburo, and Tim C Green. Energy management in autonomous microgrid using stability-constrained droop control of inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23(5) :2346–2352, 2008.
- [40] A Gkountaras, S Dieckerhoff, and T Sezi. Performance analysis of hybrid microgrids applying soc-adaptive droop control. In *2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications*, pages 1–10. IEEE, 2014.
- [41] Tomislav Dragicevic, Juan C Vasquez, Josep M Guerrero, and Davor Skrlec. Advanced lvdc electrical power architectures and microgrids : A step toward a new generation of power distribution networks. *IEEE Electrification Magazine*, 2(1) :54–65, 2014.
- [42] Vahidreza Nasirian, Seyedali Moayedi, Ali Davoudi, and Frank L Lewis. Distributed cooperative control of dc microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(4) :2288–2303, 2014.
- [43] ETSI. Etsi en 300 132-3-1. <http://www.etsi.org/>. Accessed on Jul 20, 2023.
- [44] EMerge Alliance. Standards. <https://www.emergealliance.org/standards/our-standards/>. Accessed on Jun 5, 2023.
- [45] Ahmed T Elsayed, Ahmed A Mohamed, and Osama A Mohammed. Dc microgrids and distribution systems : An overview. *Electric power systems research*, 119 :407–417, 2015.
- [46] Venkata Anand Prabhala, Bhanu Prashant Baddipadiga, Poria Fajri, and Mehdi Ferdowsi. An overview of direct current distribution system architectures & benefits. *Energies*, 11(9) :2463, 2018.
- [47] Toshimitsu Tanaka, Keiichi Hirose, Didier Marquet, BJ Sonnenberg, and Marek Szpek. Analysis of wiring design for 380-vdc power distribution system at telecommunication sites. In *Intelec 2012*, pages 1–5, 2012.
- [48] Tilo Pueschel. Dc-powered office buildings and data centres : The first 380 vdc micro grid in a commercial building in germany. In *2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia)*, pages 190–195, 2018.

- [49] R. Weiss, L. Ott, and U. Boeke. Energy efficient low-voltage dc-grids for commercial buildings. In *2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, pages 154–158, 2015.
- [50] Junpei Inamori, Hidekazu Hoshi, Toshimitsu Tanaka, Tadatoshi Babasaki, and Keiichi Hirose. 380-vdc power distribution system for 4-mw-scale cloud facility. In *2014 IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, pages 1–8, 2014.
- [51] Arthur Santos, Gerald Duggan, Stephen Frank, Daniel Gerber, and Daniel Zimmerle. Endpoint use efficiency comparison for ac and dc power distribution in commercial buildings. *Energies*, 14 :5863, 09 2021.
- [52] Vagelis Vossos, karl johnson, Margarita Kloss, Mukesh Khattar, Daniel Gerber, and Richard Brown. Review of dc power distribution in buildings : A technology and market assessment, 05 2017.
- [53] Marc Petit, Seddik Bacha, Xavier Guillaud, Hervé Morel, Dominique Planson, and Bertrand Raison. Les réseaux hvdc multi-terminaux : des défis multiples en génie électrique. In *Symposium de Génie Electrique (SGE'14)*, 2014.
- [54] Zhicheng Wang, Kansheng Yu, Guoqiang Xie, and Jin Zou. The rated voltage determination of dc building power supply system considering human beings safety. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, 108 :052094, 01 2018.
- [55] UL LLC. Outline of investigation for fault-managed power systems – part 1 : Safety requirements. In *Issue Number : 1*. UL LLC, December 19, 2022.
- [56] Voltserver website. <https://voltserver.com/>. Accessed : 2022-09-10.
- [57] Overview n8b building. <https://www.bouygues-batiment-ile-de-france.com/references/zac-des-docks-lot-n8b-evidence>. Accessed on September 20, 2023.
- [58] K. Wang. *Process Management in Unix/Linux*, pages 101–140. 08 2018.
- [59] Karem Hafsi, Denis Genon-Catalot, Jean-Marc Thiriet, and Olivier Lefevre. Dc building management system with iee 802.3bt standard. In *2021 IEEE 22nd International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR)*, pages 1–8, 2021.
- [60] Kang Wang, Shaoping Wang, and Jian Shi. Integrated reliability theory and evaluation methodology of afdx. In *IEEE 10th International Conference on Industrial Informatics*, pages 657–662. IEEE, 2012.
- [61] Nur Arzilawati Md Yunus, Mohamed Othman, Zurina Mohd Hanapi, and Kweh Yeah Lun. Reliability review of interconnection networks. *IETE Technical Review*, 33(6) :596–606, 2016.
- [62] Bardia Safaei, Amir Mahdi Hosseini Monazzah, Milad Barzegar Bafroei, and Alireza Ejlali. Reliability side-effects in internet of things application layer protocols. In *2017 2nd International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS)*, pages 207–212, 2017.

- [63] Santosh Kalwar. Introduction to reactive protocol. *IEEE Potentials*, 29(2) :34–35, 2010.
- [64] Daxesh N. Patel, Sejal B. Patel, Hemangi R. Kothadiya, Pinakin D. Jethwa, and Rutvij H. Jhaveri. A survey of reactive routing protocols in manet. In *International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES2014)*, pages 1–6, 2014.
- [65] Mirko Jakovljevic. Synchronous/asynchronous ethernet networking for mixed criticality systems. In *2009 IEEE/AIAA 28th Digital Avionics Systems Conference*, pages 1–E. IEEE, 2009.
- [66] Sakina Elhadi, Abdelaziz Marzak, Nawal Sael, and Soukaina Merzouk. Comparative study of iot protocols. *Smart Application and Data Analysis for Smart Cities (SADASC'18)*, 2018.
- [67] Nitin Naik. Choice of effective messaging protocols for iot systems : Mqtt, coap, amqp and http. In *2017 IEEE international systems engineering symposium (ISSE)*, pages 1–7. IEEE, 2017.
- [68] Dinesh Thangavel, Xiaoping Ma, Alvin Valera, Hwee-Xian Tan, and Colin Keng-Yan Tan. Performance evaluation of mqtt and coap via a common middleware. In *2014 IEEE ninth international conference on intelligent sensors, sensor networks and information processing (ISSNIP)*, pages 1–6. IEEE, 2014.
- [69] Shinho Lee, Hyeonwoo Kim, Dong-kweon Hong, and Hongtaek Ju. Correlation analysis of mqtt loss and delay according to qos level. In *The International Conference on Information Networking 2013 (ICOIN)*, pages 714–717. IEEE, 2013.
- [70] Deepsubhra Guha Roy, Bipasha Mahato, Debashis De, and Rajkumar Buyya. Application-aware end-to-end delay and message loss estimation in internet of things (iot)—mqtt-sn protocols. *Future Generation Computer Systems*, 89 :300–316, 2018.
- [71] Jérémie Jousse, Nicolas Ginot, Christophe Batard, and Elisabeth Lemaire. Power line communication management of battery energy storage in a small-scale autonomous photovoltaic system. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(5) :2129–2137, 2017.
- [72] g3-plc specifications cenelec arrib fcc\_2017. [https://g3-plc.com/wpfd\\_file/g3-plc\\_alliance\\_-\\_g3-plc\\_specifications\\_-\\_cenelec\\_-\\_arrib\\_-\\_fcc\\_-\\_revision\\_\\_march-2017\\_\\_clean-1/](https://g3-plc.com/wpfd_file/g3-plc_alliance_-_g3-plc_specifications_-_cenelec_-_arrib_-_fcc_-_revision__march-2017__clean-1/). Accessed on Mars 4, 2022.
- [73] Karem Hafsi, Denis Genon-Catalot, Thanh-kha Tran, Hamed Yahoui, and Stephane Renouard. News challenges and protocols for dc bus for smart buildings. In *2018 International Conference on Smart Communications in Network Technologies (SaCoNeT), IEEE, Oct 2018, El Oued, Algeria*.
- [74] Ayoub Soury, Melek Charfi, Denis Genon-Catalot, and Jean-Marc Thiriet. Performance analysis of ethernet powerlink protocol : Application to a new lift system generation. In *2015 IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, pages 1–6. IEEE, 2015.

- [75] Jérémy Robert, Jean-Philippe Georges, Éric Rondeau, and Thierry Divoux. Minimum cycle time analysis of ethernet-based real-time protocols. *International Journal of Computers, Communications and Control*, 7(4) :743–757, 2012.
- [76] Xuepei Wu and Lihua Xie. Performance evaluation of industrial ethernet protocols for networked control application. *Control Engineering Practice*, 84 :208–217, 2019.
- [77] Seifeddine Nsaibi, Ludwig Leurs, and Hans D Schotten. Formal and simulation-based timing analysis of industrial-ethernet sercos iii over tsn. In *2017 IEEE/ACM 21st International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT)*, pages 1–8. IEEE, 2017.
- [78] Guilherme Serpa Sestito, Afonso Celso Turcato, André Luis Dias, Paolo Ferrari, and Maíra Martins da Silva. Evaluating real-time ethernet performance indicators for sercos iii networks. In *2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, pages 1191–1197. IEEE, 2021.
- [79] Data distribution service for real-time systems specification, Jun 2007.
- [80] Paolo Bellavista, Antonio Corradi, Luca Foschini, and Alessandro Pernaflini. Data distribution service (dds) : A performance comparison of opensplice and rti implementations. In *2013 IEEE symposium on computers and communications (ISCC)*, pages 000377–000383. IEEE, 2013.
- [81] Tarek A. Youssef, Mohamad El Hariri, Ahmed T. Elsayed, and Osama A. Mohammed. A dds-based energy management framework for small microgrid operation and control. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(3) :958–968, 2018.
- [82] Ethernet powerlink - epsg : Ethernet powerlink. <https://www.ethernet-powerlink.org/>. Accessed on Mar 20, 2021.
- [83] Ayoub Soury, Karem Hafsi, Denis Genon-Catalot, and Jean-Marc Thiriet. Safety for real-time ethernet in iec 61508 and iec 61784.
- [84] Jinsong Yang, Kristian Sandström, Thomas Nolte, and Moris Behnam. Data distribution service for industrial automation. In *Proceedings of 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2012)*, pages 1–8. IEEE, 2012.
- [85] Stefan Profanter, Ayhun Tekat, Kirill Dorofeev, Markus Rickert, and Alois Knoll. Opc ua versus ros, dds, and mqtt : performance evaluation of industry 4.0 protocols. In *2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, pages 955–962. IEEE, 2019.
- [86] Tarek A Youssef, Mohamad El Hariri, Ahmed T Elsayed, and Osama A Mohammed. A dds-based energy management framework for small microgrid operation and control. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(3) :958–968, 2017.
- [87] Qingquan Sun. A multi-agent based intelligent sensor and actuator network design for smart house and home automation. *Journal of Sensor and Actuator Network*. vol. 2, no. 3, pp. 557-588, 2013., 01 2013.

- [88] Rafael C. Cardoso and Angelo Ferrando. A review of agent-based programming for multi-agent systems. *Computers*, 10(2), 2021.
- [89] P. G. Balaji and D. Srinivasan. *An Introduction to Multi-Agent Systems*, pages 1–27. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [90] Wiebe van der Hoek and Michael Wooldridge. Chapter 24 multi-agent systems. In Frank van Harmelen, Vladimir Lifschitz, and Bruce Porter, editors, *Handbook of Knowledge Representation*, volume 3 of *Foundations of Artificial Intelligence*, pages 887–928. Elsevier, 2008.
- [91] Stephen D. J. McArthur, Euan M. Davidson, Victoria M. Catterson, Aris L. Dimeas, Nikos D. Hatziargyriou, Ferdinanda Ponci, and Toshihisa Funabashi. Multi-agent systems for power engineering applications—part ii : Technologies, standards, and tools for building multi-agent systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(4) :1753–1759, 2007.
- [92] John H. Holland and John H. Miller. Artificial adaptive agents in economic theory. *The American Economic Review*, 81(2) :365–370, 1991.
- [93] John H. Holland. Complex adaptive systems. *Daedalus*, 121(1) :17–30, 1992.
- [94] Elise Dion, Louis VanSchalkwyk, and Eric F. Lambin. The landscape epidemiology of foot-and-mouth disease in south africa : A spatially explicit multi-agent simulation. *Ecological Modelling*, 222(13) :2059–2072, 2011.
- [95] F Bousquet and C Le Page. Multi-agent simulations and ecosystem management : a review. *Ecological Modelling*, 176(3) :313–332, 2004.
- [96] Emanuela Merelli, Giuliano Armano, Nicola Cannata, Flavio Corradini, Mark d’Inverno, Andreas Doms, Phillip Lord, Andrew Martin, Luciano Milanese, Steffen Möller, et al. Agents in bioinformatics, computational and systems biology. *Briefings in bioinformatics*, 8(1) :45–59, 2007.
- [97] Yoav Shoham and Kevin Leyton-Brown. *Multiagent systems : Algorithmic, game-theoretic, and logical foundations*. Cambridge University Press, 2008.
- [98] Yue Wang, Eloy Garcia, David Casbeer, and Fumin Zhang. Cooperative control of multi-agent systems : Theory and applications. 2017.
- [99] Ali Dorri, Salil S. Kanhere, and Raja Jurdak. Multi-agent systems : A survey. *IEEE Access*, 6 :28573–28593, 2018.
- [100] Kwang-Kyo Oh, Myoung-Chul Park, and Hyo-Sung Ahn. A survey of multi-agent formation control. *Automatica*, 53 :424–440, 2015.
- [101] BRYAN HORLING and VICTOR LESSER. A survey of multi-agent organizational paradigms. *The Knowledge Engineering Review*, 19(4) :281–316, 2004.
- [102] Zeng Jun, Liu Junfeng, Wu Jie, and H.W. Ngan. A multi-agent solution to energy management in hybrid renewable energy generation system. *Renewable Energy*, 36(5) :1352–1363, 2011.

- [103] Jeremy Lagorse, Damien Paire, and Abdellatif Miraoui. A multi-agent system for energy management of distributed power sources. *Renewable Energy*, 35(1) :174–182, 2010.
- [104] Chun xia Dou, Wei qian Wang, Da-Wei Hao, and Xin bin Li. Mas-based solution to energy management strategy of distributed generation system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 69 :354–366, 2015.
- [105] Christos-Spyridon Karavas, George Kyriakarakos, Konstantinos G. Arvanitis, and George Papadakis. A multi-agent decentralized energy management system based on distributed intelligence for the design and control of autonomous polygeneration microgrids. *Energy Conversion and Management*, 103 :166–179, 2015.
- [106] Susanna Mocci, Nicola Natale, Fabrizio Pilo, and Simona Ruggeri. Demand side integration in lv smart grids with multi-agent control system. *Electric Power Systems Research*, 125 :23–33, 2015.
- [107] M.S. Rahman, M.A. Mahmud, H.R. Pota, and M.J. Hossain. Distributed multi-agent scheme for reactive power management with renewable energy. *Energy Conversion and Management*, 88 :573–581, 2014.
- [108] Jereme Haack, Bora Akyol, Nathan Tenney, Brandon Carpenter, Richard Pratt, and Thomas Carroll. Volttron™ : An agent platform for integrating electric vehicles and smart grid. In *2013 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, pages 81–86. IEEE, 2013.
- [109] Pacific Northwest National Laboratory (PNNL). The volttron™ platform—a secure capability for coordination and control. [https://volttron.org/sites/default/files/publications/VOLTTRON\\_Brochure\\_V11\\_WEB.pdf](https://volttron.org/sites/default/files/publications/VOLTTRON_Brochure_V11_WEB.pdf). Accessed on Mars 6, 2023.
- [110] Patrick O’Connell Chance Younkin. Secure software central. *U.S. Department of Energy under Contract DE-AC05-76RL01830*, May 2019.
- [111] Craig H Allwardt Chandrika Sivaramakrishnan Jereme N Haack Shwetha Niddodi, Benjamin LaRoque. Message bus usage recommendations. [https://volttron.org/sites/default/files/publications/MessageBus-Usage\\_Recommentations%20%28002%29.pdf](https://volttron.org/sites/default/files/publications/MessageBus-Usage_Recommentations%20%28002%29.pdf). Accessed on Mars 2, 2023.
- [112] Suman Patro, Manish Potey, and Amit Golhani. Comparative study of middleware solutions for control and monitoring systems. In *2017 Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, pages 1–10. IEEE, 2017.
- [113] Joel L Fernandes, Ivo C Lopes, Joel JPC Rodrigues, and Sana Ullah. Performance evaluation of restful web services and amqp protocol. In *2013 Fifth international conference on ubiquitous and future networks (ICUFN)*, pages 810–815. IEEE, 2013.
- [114] Ran Li, Jiaqi Yin, and Huibiao Zhu. Modeling and analysis of rabbitmq using upaal. In *2020 IEEE 19th International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (TrustCom)*, pages 79–86, 2020.

- [115] Xian Jun Hong, Hyun Sik Yang, and Young Han Kim. Performance analysis of restful api and rabbitmq for microservice web application. In *2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, pages 257–259, 2018.
- [116] Suman Patro, Manish Potey, and Amit Golhani. Comparative study of middleware solutions for control and monitoring systems. In *2017 Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, pages 1–10, 2017.
- [117] My El Hassan Charaf, Mohammed Benattou, and Salma Azzouzi. A rule-based multi-agent system for testing distributed applications. In *2012 International Conference on Multimedia Computing and Systems*, pages 967–972, 2012.
- [118] Mohammad Jafari, Hao Xu, and Luis Rodolfo Garcia Carrillo. A biologically-inspired reinforcement learning based intelligent distributed flocking control for multi-agent systems in presence of uncertain system and dynamic environment. *IFAC Journal of Systems and Control*, 13 :100096, 2020.
- [119] Siddhartha Deb Roy, Sanjoy Debbarma, and Josep M. Guerrero. Machine learning based multi-agent system for detecting and neutralizing unseen cyber-attacks in ac and hvdc systems. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 12(1) :182–193, 2022.
- [120] Kaixuan Li, Qingshan Liu, and Zhigang Zeng. Distributed optimisation based on multi-agent system for resource allocation with communication time-delay. *IET Control Theory & Applications*, 14(4) :549–557, 2020.
- [121] Amirreza Rahmani, Meng Ji, Mehran Mesbahi, and Magnus Egerstedt. Controllability of multi-agent systems from a graph-theoretic perspective. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 48(1) :162–186, 2009.
- [122] Sami Mnasri, Nejah Nasri, Adrien van den Bossche, and Thierry Val. A new multi-agent particle swarm algorithm based on birds accents for the 3d indoor deployment problem. *ISA Transactions*, 91 :262–280, 2019.
- [123] K. Muralitharan, R. Sakthivel, and R. Vishnuvarthan. Neural network based optimization approach for energy demand prediction in smart grid. *Neurocomputing*, 273 :199–208, 2018.
- [124] Stefano Leonori, Enrico De Santis, Antonello Rizzi, and F.M. Frattale Mascioli. Optimization of a microgrid energy management system based on a fuzzy logic controller. In *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pages 6615–6620, 2016.
- [125] Mauricio Rodriguez, Diego Arcos-Aviles, and Wilmar Martinez. Fuzzy logic-based energy management for isolated microgrid using meta-heuristic optimization algorithms. *Applied Energy*, 335 :120771, 2023.
- [126] Arash Khalilnejad, Roger H. French, and Alexis R. Abramson. Data-driven evaluation of hvac operation and savings in commercial buildings. *Applied Energy*, 278 :115505, 2020.

- [127] Victor Lequay, Mathieu Lefort, Saber Mansour, and Salima Hassas. Ajustement diffus et adaptatif de la consommation électrique résidentielle par un système multi-agent auto-adaptatif. *Revue des Sciences et Technologies de l'Information-Série RIA : Revue d'Intelligence Artificielle*, 31(4/2017) :427–447, 2017.
- [128] Victor Lequay, Mathieu Lefort, Saber Mansour, and Salima Hassas. Flexible load shedding using gossip communication in a multi-agents system. In *2016 IEEE 10th International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO)*, pages 31–39, 2016.
- [129] A. Rifat Boynuegri, Bunyamin Yagcitekin, Mustafa Baysal, Arif Karakas, and Mehmet Uzunoglu. Energy management algorithm for smart home with renewable energy sources. In *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, pages 1753–1758, 2013.
- [130] Zaheeruddin and Munish Manas. Renewable energy management through microgrid central controller design : An approach to integrate solar, wind and biomass with battery. *Energy Reports*, 1 :156–163, 2015.
- [131] M. Pipattanasomporn, H. Feroze, and S. Rahman. Multi-agent systems in a distributed smart grid : Design and implementation. In *2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, pages 1–8, 2009.
- [132] Athila Quaresma Santos, Renato Machado Monaro, Denis Vinicius Coury, and Mario Oleskovicz. A new real-time multi-agent system for under frequency load shedding in a smart grid context. *Electric Power Systems Research*, 174 :105851, 2019.
- [133] Jichao Zhao, Fengzhi Dai, and Yunzhong Song. Analysis of the consensus protocol of heterogeneous agents with time-delays. In *2021 Proceedings of International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB)*, volume 26, pages 592–595, 2021.
- [134] Dan Ma, Jie Chen, and Tianyou Chai. Exact computation of maximal allowable delay for general second-order multi-agents consensus. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 32(18) :9681–9695, 2022.
- [135] Janghoon Yang. Deep learning-based consensus control of a multi-agents system with unknown time-varying delay. *Electronics*, 11(8) :1176, 2022.
- [136] Jin Zhang, Jing Shi, Lei Ding, and Chen Peng. Constructive conditions for consensus of multi-agents under fast switching networks : A time-delay approach. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 33(1) :659–679, 2023.
- [137] Yurong Liu, Daniel WC Ho, and Zidong Wang. A new framework for consensus for discrete-time directed networks of multi-agents with distributed delays. *International Journal of Control*, 85(11) :1755–1765, 2012.
- [138] Peng Lin and Yingmin Jia. Average consensus in networks of multi-agents with both switching topology and coupling time-delay. *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 387(1) :303–313, 2008.

- 
- [139] Alexandre Seuret, Dimos V Dimarogonas, and Karl H Johansson. Consensus of double integrator multi-agents under communication delay. *IFAC Proceedings Volumes*, 42(14) :376–381, 2009.
- [140] Guo-Ping Liu. Coordination of networked nonlinear multi-agents using a high-order fully actuated predictive control strategy. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 9(4) :615–623, 2022.
- [141] Tian-Yong Zhang, Bo You, and Guo-Ping Liu. Motion coordination for a class of multi-agents via networked predictive control. *Journal of Systems Science and Complexity*, 33 :622–639, 2020.
- [142] Shiwei Xia, Xiao Luo, and Ka Wing Chan. A framework for self-healing smart grid with incorporation of multi-agents. *Energy procedia*, 61 :2123–2126, 2014.
- [143] Christine Solnon. Théorie des graphes et optimisation dans les graphes. <https://perso.liris.cnrs.fr/christine.solnon/polyGraphes.pdf>. Accessed on Juin 20, 2023.
- [144] Print all hamiltonian cycles in an undirected graph. <https://www.geeksforgeeks.org/print-all-hamiltonian-cycles-in-an-undirected-graph/>. Accessed on Juin 29, 2023.

# Acronymes

**6LoWPAN** IPv6 Low power Wireless Personal Area Networks.

**8PSK** 8 phase-shift keying.

**ADTDM** Least Common Multiple.

**AES** Advanced Encryption Standard.

**AIE** Agence Internationale de l'Energie.

**AMQP** Advanced Message Queuing Protocol.

**API** Application Programming Interface.

**ARIB** Association of Radio Industries and Businesses.

**ARQ** Automatic Repeat reQuest.

**AWG** American Wire Gauge.

**BACS** Building Automation & Control Systems.

**BMS** Building Management System.

**BPSK** Binary phase-shift keying.

**CAN** Controller Area Network.

**CMC** Common Mode Chokes.

**CO<sub>2</sub>** Carbon dioxide.

**CoAP** CConstrained Application Protocol.

**COSEM** Companion Specification for Energy Metering.

**CPL** Courants Porteurs en Ligne.

**CSMA/CA** Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance.

**CVC** Chauffage, Ventilation, Climatisation.

**DC** Direct Current.

**DCPS** Data-Centric Publish-Subscribe.

**DDR** Dispositif Différentiel à Courant résiduel.

**DDS** Data Distribution Service.

**DG** Distributed Generation.

**DLMS** Device Language Message Specification.

**DLRL** Data Local Reconstruction Layer.  
**DPEB** Directive européenne relative à la Performance Énergétique des Bâtiments.  
**DPWS** (Device Profile for Web Service.  
**EDP** Endpoint Discovery Protocol.  
**EM** Électro Magnétique.  
**FCC** Federal Communications Commission.  
**FCH** Frame Control Header.  
**FMPS** Fault Managed Power Systems.  
**FTTP** Hypertext Transfer Protocol.  
**G3-PLC** G3-Power Line Communication.  
**GUID** Global Unique IDentifier.  
**HD-PLC** High Definition Power Line Communication.  
**IFFT** Inverse Fast Fourier Transform.  
**IoT** Internet of Things.  
**IP** Internet Protocol.  
**IPV6** Internet Protocol version 6.  
**LAN** Local Area Network.  
**LED** Light Emitting Diode.  
**LIN** Local Interconnect Network.  
**LLDP** Link Layer Discovery Protocol.  
**M2M** Machine-to-Machine.  
**MAC** Medium access control.  
**MN** Manager Nod.  
**MPC** Model Predictive Control.  
**MQTT** Message Queuing Telemetry Transport.  
**MRP** Media Redundancy Protocol.  
**NEC** National Electrical Code.  
**OFDM** Orthogonal Frequency-Division Multiplexing.  
**OSI** Open Systems Interconnection.  
**PD** Powered Device.  
**PDO** Process Data Object.  
**PDP** Participant Discovery Protocol.  
**PHY** Couche Physique selon le modèle OSI.

**PoDL** Power over Data Line.  
**PoE** Power over Ethernet.  
**PSE** Power Source Equipement.  
**PV** Photovoltaïque.

**QAM** quadrature amplitude modulation.  
**QoS** Quality of Service.  
**QPSK** Quadrature phase-shift keying.

**RPDO** Receive Process Data Object.  
**RS-CC** Reed-Solomon and Convolutional Code.  
**RTD** Round-Trip Delay.  
**RTE** Real Time Ethernet.

**SCCP** Serial Communications Classification Protocol.  
**SDO** Service Data Objects.  
**SMA** Système Multi-Agent.  
**SNGE** Smart Node type Green Energy.  
**SNL** Smart Node type Load.  
**SNS** Smart Node type Source.  
**SNST** Smart Node type Storage.  
**SPE** Single Pair Ethernet.  
**SRF** Self Resonant Frequency.

**TCP** Transmission Control Protocol.  
**TDMA** Time Division Multiple Access.  
**TIA** Telecommunications Industry Association.  
**TLS** Transport Layer Security.  
**TPDO** Transmit Process Data Object.

**UPA** Universal Powerline Association.

**VDC** Volt direct Current.  
**VIP** VOLTTRON Interconnect Protocol.

# Annexe A

## Back-tracking algorithm

```
# Function to check if a vertex v
# can be added at index pos in
# the Hamiltonian Cycle
def isSafe(v, graph, path, pos):

    # If the vertex is adjacent to
    # the vertex of the previously
    # added vertex
    if graph[path[pos - 1]][v] == 0:
        return False

    # If the vertex has already
    # been included in the path
    for i in range(pos):
        if path[i] == v:
            return False

    # Both the above conditions are
    # not true, return true
    return True

# To check if there exists
# at least 1 hamiltonian cycle
hasCycle = False

# Function to find all possible
# hamiltonian cycles
def hamCycle(graph):
    global hasCycle

    # Initially value of boolean
    # flag is false
```

```

hasCycle = False

# Store the resultant path
path = []
path.append(0)

# Keeps the track of the
# visited vertices
visited = [False]*(len(graph))

for i in range(len(visited)):
    visited[i] = False

visited[0] = True

# Function call to find all
# hamiltonian cycles

FindHamCycle(graph, 1, path, visited)

if hasCycle:
    # If no Hamiltonian Cycle
    # is possible for the
    # given graph
    print("No Hamiltonian Cycle" + "possible ")
    return

# Recursive function to find all
# hamiltonian cycles
def FindHamCycle(graph, pos, path, visited):

    # If all vertices are included
    # in Hamiltonian Cycle
    xx=0
    if pos == len(graph):

        # If there is an edge
        # from the last vertex to
        # the source vertex
        if graph[path[-1]][path[0]] != 0:

            # Include source vertex
            # into the path and
            # print the path
            path.append(0)
            sum=0

```

---

```

        for i in range(len(path)):
            print(path[i], end = " ")
            sum=sum + graph[path[i-1] ] [path[i] ]

            #print( graph[i] [path[i]])

        #print(len(path))
        print (sum)
        # Remove the source
        # vertex added
        path.pop()

        # Update the hasCycle
        # as true
        hasCycle = True
    return

# Try different vertices
# as the next vertex
for v in range(len(graph)):

    # Check if this vertex can
    # be added to Cycle
    if isSafe(v, graph, path, pos) and not visited[v]:
        path.append(v)
        visited[v] = True

        # Recur to construct
        # rest of the path
        FindHamCycle(graph, pos + 1, path, visited)
        # Remove current vertex
        # from path and process
        # other vertices
        visited[v] = False
        path.pop()

SNS = [ [0,310, 304, 320, 312],
        [310,0, 290, 315, 393],
        [304, 290,0, 310, 301],
        [320, 315, 310,0, 330],
        [312, 393, 301, 330, 0]]

SNST = [ [0,310, 290, 315, 393],
        [310,0, 304, 320, 312],
        [290, 304,0, 310, 301],
        [315, 320, 310,0, 330],

```

```
[393, 312, 301, 330, 0]]

SNGE = [ [0,304, 290, 310, 301],
          [304,0, 310, 320, 312],
          [290, 310,0, 315, 393],
          [310, 320, 315,0, 330],
          [301, 312, 393, 330, 0]]

SNL1 = [ [0,320, 315, 310, 330],
          [320,0, 310, 304, 312],
          [315, 310,0, 290, 393],
          [310, 304, 290,0, 301],
          [330, 312, 393, 301, 0]]

SNL2 = [ [0,312, 393, 301, 330],
          [312,0, 310, 304, 320],
          [393, 310,0, 290, 315],
          [301, 304, 290,0, 310],
          [330, 320, 315, 310, 0]]

hamCycle(SNS)

# This code is contributed by divyesh072019 and modified by Hafsi Karem

\chapter{Back-tracking algorithm}
```