



HAL
open science

Développement d'un nanoréseau à courant continu (DC) pour l'autonomie énergétique des bâtiments

Olivia Graillet Bory Devisme

► **To cite this version:**

Olivia Graillet Bory Devisme. Développement d'un nanoréseau à courant continu (DC) pour l'autonomie énergétique des bâtiments. Energie électrique. Université de la Réunion, 2024. Français. NNT : 2024LARE0017 . tel-04905150

HAL Id: tel-04905150

<https://theses.hal.science/tel-04905150v1>

Submitted on 22 Jan 2025

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.

Développement d'un nano-réseau en courant continu (DC) pour les bâtiments autonomes en énergie

Thèse de doctorat pour obtenir le grade de docteur
de l'Université de La Réunion

École doctorale n° 542, Sciences, Technologies et Santé (EDSTS)

Spécialité de doctorat : Génie électrique et électronique

Unités de recherche : ENERGY-Lab UR4079 et Laboratoire LCIS (Laboratoire de Conception et d'Intégration des Systèmes) UR3747

Entreprise : Intégrale Ingénierie

Thèse présentée et soutenue à Saint-Denis, le 27 août 2024, par

OLIVIA BORY DEVISME

Composition du Jury

Pr. Bertrand Raison	Université de Grenoble Alpes	Président du jury
Pr. Jean-Marc Thiriet	Université de Grenoble Alpes	Rapporteur
Dr. HDR Christophe Batard	Université de Nantes	Rapporteur
Pr. Hélène Frémont	Université de Bordeaux	Examinatrice
Dr. Dhirajsing Rughoo	Université des Mascareignes	Examinateur
Pr. Jean-Pierre Chabriat	Université de La Réunion	Directeur de thèse
Dr. Denis Genon-Catalot	Université de Grenoble Alpes	Encadrant
Dr. Frédéric Aicalapa	Université de La Réunion	Encadrant
Dr. Pierre-Olivier Lucas de Peslouan	Université de La Réunion	Encadrant
M. Laurent Lemaitre	Intégrale Ingénierie	Invité
Dr. Benoit Couraud	Université Côte d'Azur	Invité

Remerciements

A l'issue de ces trois années de thèse, il me tient à cœur d'adresser de nombreux remerciements.

Tout d'abord, je remercie mon équipe d'encadrement, Denis, Laurent, Pierre-Olivier, Frédéric et Jean-Pierre. Merci pour votre confiance et votre soutien, j'ai beaucoup appris auprès de chacun de vous. En particulier, la rigueur scientifique, rester optimiste quelles que soient les difficultés, profiter de cette expérience et toujours croire en son projet pour avancer. Je remercie également l'ensemble du jury d'avoir accepté d'évaluer ces travaux de thèse.

Ce contexte professionnel m'a permis de faire de belles rencontres. Je remercie mes amis du laboratoire ENERGY-Lab, laboratoire LCIS, et de l'entreprise Intégrale Ingénierie : Julie, Tristan, Meziane, Flavien, Lucas, Mathilde, Lilavady, Ludovic, Mihir, Alexis, Clément, Laure, Mathieu, Fabrice, Idriss, Tom. . . la bonne humeur, les rires, les discussions, l'entraide ainsi que tous ces autres bons moments hors du travail resteront gravés !

Ce projet de thèse n'aurait pas pu se réaliser sans l'aide de nombreuses personnes. Ainsi, je remercie la totalité de mes collègues du laboratoire ENERGY-Lab, du laboratoire LCIS et de l'entreprise Intégrale Ingénierie. Cela fut un plaisir d'évoluer à vos côtés, de près ou de loin. En particulier, merci à Kelly, Yann, Benoît, Renaud, Kareem, Carole, Caroline, Christian, Patrick et Xavier pour votre aide précieuse sur les aspects techniques, administratifs ou vos conseils lorsqu'il m'est arrivé de vous solliciter. Travailler sur une installation réelle, en laboratoire et en entreprise a été une vraie chance.

Je remercie également toutes les entreprises, associations et chercheurs que j'ai contactés et qui ont accepté de partager leur expérience dans le domaine des micro-réseaux. Je suis aussi reconnaissante d'avoir eu l'opportunité de présenter à plusieurs reprises mes travaux, en France ou à l'étranger dans des conférences scientifiques ou des séminaires. Rencontrer d'autres chercheurs et assister à des présentations a été très formateur.

Durant la thèse, j'ai pu accéder à des formations de vulgarisation et de gestion de projet, pratiquer l'enseignement et prendre des initiatives. Je remercie donc les universités, les entreprises, les écoles doctorales et toutes les structures qui permettent de financer la recherche et la rendre accessible. Merci à M. Michel BENNE, directeur du laboratoire ENERGY-Lab et M. Laurent LEMAITRE, directeur général d'Intégrale Ingénierie de m'avoir permis de réaliser ces travaux de recherche et d'avoir accepté d'intégrer des activités internes telles que la fresque du climat, des présentations sur la gestion de l'énergie, des visites d'étudiants en entreprise ou encore des interventions dans les écoles avec l'association « Objectif1.5 ». Merci également à la direction du laboratoire LCIS de m'avoir accueillie lors de mes séjours à Valence.

En dehors de mon environnement quotidien, je tiens à remercier les membres de mon comité de suivi de thèse annuel, Benoît, Dominique, Lilia et Olivia. Étant extérieurs au projet, vos avis et remarques ont permis de créer des échanges enrichissants et même aboutir sur une collaboration scientifique. Merci Benoît d'avoir accepté de donner de ton temps pour ce travail qui m'a beaucoup appris.

Au cours de la thèse, les mots réconfortants et le soutien, même à distance donnent du courage, alors merci à ma famille, belle-famille et amis proches d'avoir été là !

Enfin, je remercie mes parents, Josette et Lucien, pour tout leur amour. Au quotidien, vous êtes à plusieurs milliers de kilomètres mais comme a dit Victor Hugo, « vous êtes partout là où je suis ».

Pour terminer, les mots ne sont pas suffisants pour remercier mon mari, Alexandre. Avoir croisé ton chemin et Être aujourd'hui à tes côtés est la plus belle chose qui me soit arrivée dans la vie. D'ailleurs, merci La Vie !

Table des matières

Remerciements	I
Liste des figures	V
Liste des tableaux	IX
Liste des abréviations	X
Introduction générale	XI
1 L'évolution d'un réseau électrique AC vers un réseau hybride AC et DC	1
1.1 Historique : Courant Alternatif (AC) versus Courant Continu (DC)	2
1.1.1 L'origine des réseaux électriques en courant alternatif (AC)	2
1.1.2 L'intégration progressive du Courant Continu (DC) au réseau AC	4
1.1.3 Problématiques liées aux conversions du courant dans les bâtiments	5
1.1.4 Les potentiels et enjeux de la distribution DC dans les bâtiments	7
1.2 Préambule sur les micro et nano-réseaux	11
1.2.1 Définitions des micro et nano-réseaux	11
1.2.2 Topologies AC, hybrides AC/DC et DC	14
1.2.3 Mode d'opération connecté au réseau ou isolé	16
1.2.4 Challenges associés aux micro-réseaux	17
1.3 Etat de l'art des nano-réseaux DC	17
1.3.1 Conception et dimensionnement des nano-réseaux DC	18
1.3.2 Méthodes d'évaluation de l'efficacité énergétique des nano-réseaux	24
1.3.3 Modèles d'Energy Management System (EMS) pour le contrôle des nano-réseaux	27
1.3.4 Référencement de sites expérimentaux de micro et nano-réseaux	31
1.4 Périmètre d'étude de la thèse : Application de la démarche Low-tech	38
1.4.1 Définition des Low-tech	38
1.4.2 Contributions de la thèse	39
2 Evaluation de l'efficacité énergétique d'un banc expérimental de nano-réseau hybride DC-AC isolé "Héliocentris"	42
2.1 Introduction	42
2.2 Présentation du nano-réseau hybride isolé Héliocentris	43
2.2.1 Architecture électrique d'un nano-réseau hybride DC-AC isolé	43
2.2.2 Chaîne de mesures et traitement de données du nano-réseau Héliocentris	45
2.3 Evaluation de l'efficacité énergétique du nano-réseau hybride Héliocentris	48
2.3.1 Instrumentation de la conversion DC-AC	48
2.3.2 Instrumentation de la conversion AC-DC	49

2.3.3	Efficacité énergétique globale du nano-réseau Héliocentris	56
2.3.4	Modélisation du nano-réseau	57
2.4	Optimisation énergétique du nano-réseau hybride isolé "Héliocentris"	59
2.4.1	Remplacement du régulateur MPPT et ajout d'une nouvelle centrale d'acquisition	60
2.4.2	Automatisation du traitement des données et accès à distance	61
2.4.3	Mesures expérimentales de la consommation d'énergie après optimisations	63
2.5	Synthèse	65
3	Développement et implémentation du nano-réseau 48V DC en entreprise	66
3.1	Introduction	66
3.2	Présentation de l'entreprise Intégrale Ingénierie	67
3.2.1	Instrumentation de la consommation d'énergie avant l'installation du nano-réseau LVDC	67
3.2.2	Evaluation des pertes énergétiques liées aux conversions d'énergie	69
3.3	Conception et installation du nano-réseau 48V DC	70
3.3.1	Schéma synoptique et présentation des composants	70
3.3.2	Installation du nano-réseau 48V DC sur site	72
3.3.3	Chaîne de mesures du nano-réseau 48V DC	74
3.4	Evaluation de l'efficacité énergétique du nano-réseau 48V DC	79
3.4.1	Evaluation théorique de l'efficacité énergétique d'un nano-réseau 48V DC	79
3.4.2	Evaluation expérimentale de l'efficacité énergétique d'un nano-réseau 48V DC	84
3.5	Synthèse	88
4	Modélisation d'un Modèle de Gestion de l'Energie (Energy Management System - EMS) pour l'optimisation du stockage thermique	91
4.1	Introduction	91
4.1.1	La consommation d'énergie des systèmes de climatisation à La Réunion	92
4.1.2	Analyse de l'autoproduction PV d'un système de climatisation hybride DC et AC expérimental	93
4.1.3	Etude du potentiel d'autoconsommation photovoltaïque pour la climatisation des locaux d'Intégrale Ingénierie	98
4.2	Modélisation d'un Energy Management System (EMS) dédié à l'optimisation du stockage thermique	100
4.2.1	Définition du problème d'optimisation	100
4.2.2	Modélisation de l'EMS en langage Python basée sur la méthode MILP	103
4.2.3	Résultats des simulations de l'optimisation du stockage thermique	104
4.3	Cas d'application au gîte du Piton des Neiges	106
4.3.1	Présentation du site existant	106
4.3.2	Proposition d'architecture 400V DC avec optimisation du stockage thermique	110
4.4	Synthèse	117
	Conclusion	120
A	Script de collecte et insertion des données entre l'application VRM de Victron et une base de données de type influxDB	VI
B	Script du modèle d'Energy Management System (EMS) dédié à l'optimisation du stockage thermique selon la méthode MILP	VIII

C Paramètres utilisés pour la Simulation Thermique Dynamique (STD) du futur gîte du Piton des Neiges	XIII
Résumé	XIV
Abstract	XV
Bibliographie	XVI

Liste des figures

1.1	Représentation du courant continu et du courant alternatif.	2
1.2	Schéma de fonctionnement du réseau électrique AC issu du site du Syndicat Départemental de l'électricité des Vosges.	4
1.3	Système d'alimentation conventionnel en courant alternatif avec production PV et stockage d'énergie, inspiré des études réalisées au laboratoire Lawrence Berkeley, USA.	6
1.4	Schéma simplifié d'un micro-réseau connecté au réseau électrique.	11
1.5	Schéma d'un micro-réseau constitué de plusieurs nano-réseaux.	12
1.6	Classification des micro-réseaux applicable aux nano-réseaux.	13
1.7	Nano-réseau de topologie AC.	14
1.8	Nano-réseau de topologie DC.	15
1.9	Nano-réseau de topologie hybride AC/DC.	15
1.10	Schéma d'un micro ou nano-réseau AC connecté au réseau.	16
1.11	Schéma d'un micro ou nano-réseau AC isolé.	16
1.12	Challenges associés au développement des micro-réseaux.	17
1.13	Architecture d'un nano-réseau DC avec stockage, en mode connecté au réseau (1.13a) ou iloté (1.13b).	19
1.14	Schéma d'une distribution DC dans un câble.	21
1.15	Paramètres impactant l'efficacité énergétique des nano-réseaux DC.	25
1.16	Schéma de fonctionnement d'un contrôle centralisé dans un micro ou nano-réseau.	28
1.17	Schéma de fonctionnement d'un contrôle décentralisé dans un micro ou nano-réseau.	28
1.18	Localisation du projet smart grid "NICE Grid" à Carros (06), France.	31
1.19	Localisation des nano-réseaux DC déployés par l'entreprise Nanoé dans le nord de Madagascar.	32
1.20	Localisation des micro-réseaux DC de la communauté Living Energy Farm (LEF) aux USA.	33
1.21	Localisation de la maison "DC Nanogrid House" de l'université de Purdue aux USA.	34
1.22	Localisation des micro-réseaux dans les îlets de Roche-Plate (a), Ilet à Bourse (b) et La Nouvelle (c) dans le Cirque de Mafate à La Réunion.	36
1.23	Schéma récapitulatif des principes low-tech inspiré de l'infographie "Low-tech : Assurer durablement l'essentiel pour tous".	39
2.1	Photographie du nano-réseau isolé Héliocentris, laboratoire ENERGY-Lab.	43
2.2	Schéma synoptique du nano-réseau isolé "Héliocentris".	43
2.3	Schéma de câblage du nano-réseau isolé "Héliocentris".	45
2.4	Diagramme de la chaîne de mesures du nano-réseau Héliocentris.	46
2.5	Capture d'écran de l'interface utilisateur du logiciel "Power management" associé au nano-réseau Héliocentris.	47
2.6	Mesures de la puissance (W) délivrée par la centrale PV et consommée par les batteries et l'onduleur.	48

2.7	Schéma du banc de mesures de l'efficacité énergétique des convertisseurs AC vers DC.	50
2.8	Photographie de l'instrumentation en laboratoire du brasseur d'air DC et du panneau de LED. . .	51
2.9	Courbe de rendement du convertisseur AC-DC OT FIT 35/220-240/700 CS L G2 du panneau de leds.	52
2.10	Courbe de rendement du convertisseur AC-DC NI-PS 15 du brasseur d'air DC.	52
2.11	Mesure de la puissance apparente AC et de la puissance DC en amont et en sortie du convertis- seur AC-DC OT FIT 35/220 associé au panneau de leds.	54
2.12	Mesure de la puissance apparente AC et de la puissance DC en amont et en sortie des conver- tisseurs AC-DC NI-PS15 et FP SAW48-24.0-2000 associés au brasseur d'air DC.	54
2.13	Calcul de l'efficacité énergétique globale du nano-réseau Héliocentris pour différents niveaux de puissance et type de charge.	57
2.14	Schéma de modélisation Simulink du nano-réseau Héliocentris.	58
2.15	Photographie du tableau de distribution du nano-réseau Héliocentris après modification du régulateur MPPT et l'intégration d'une nouvelle passerelle communicante.	60
2.16	Nouvelle version de la chaîne de mesures du nano-réseau Héliocentris.	61
2.17	Représentation des mesures effectuées sur la nouvelle version du nano-réseau héliocentris au cours du mois de février 2024.	63
2.18	Mesure expérimentale de l'état de charge et décharge des batteries du nano-réseau Héliocentris (ancienne et nouvelle version) sur 24h.	64
3.1	(a) Localisation d'Intégrale Ingénierie sur La Réunion. (b) Photo du bâtiment "Le Carat". (c) Localisation des locaux d'Intégrale Ingénierie au 3ème étage du bâtiment.	67
3.2	Synoptique du comptage d'énergie des locaux.	68
3.3	Répartition de la consommation énergétique d'Intégrale Ingénierie par catégorie d'équipements en 2022.	69
3.4	(a) Localisation du déploiement du nano-réseau dans l'entreprise. Les deux bureaux individuels sont encadrés en noir sur le plan et situés à 25m du local technique. (b) Photographie d'un des deux bureaux étudiés pour le déploiement.	70
3.5	Schéma synoptique du nano-réseau 48V DC déployé en entreprise.	71
3.6	Schéma de l'architecture du nano-réseau 48V DC	72
3.7	Photographie de la baie informatique regroupant les différents éléments du nano-réseau LVDC. . .	73
3.8	Photographie de la centrale photovoltaïque et de la station météorologique en toiture du bâtiment. .	74
3.9	Schéma de la chaîne de mesures au sein du nano-réseau 48V DC.	74
3.10	Capture d'écran de l'interface influxdb.	76
3.11	Capture d'écran de l'interface utilisateur dans l'application ASTRA - Supervision de la batterie et du confort intérieur.	77
3.12	Capture d'écran de l'interface utilisateur dans l'application ASTRA - Supervision de la produc- tion PV et de la météo extérieure.	77
3.13	Capture d'écran de l'interface utilisateur dans l'application ASTRA - Mesures de température et humidité intérieures et extérieures.	78
3.14	Capture d'écran de l'interface utilisateur dans l'application ASTRA - Mesures de tension et cou- rant de la production PV et de la batterie.	78
3.15	Evolution des chutes de tension théoriques en fonction de la puissance finale en 48V DC pour une distance de 25m et pour les sections de câbles 1.5mm ² et 2.5mm ²	80
3.16	Représentation schématique d'une distribution DC-AC-DC selon les normes actuelles.	81
3.17	Représentation schématique d'une distribution DC selon les normes actuelles.	82

3.18	Superposition de l'efficacité théorique DC-AC-DC vs DC pour une distance de 25m, une tension de 48V DC et des câbles de section 1.5mm ² et 2.5mm ²	83
3.19	Schéma du banc expérimental pour l'évaluation de l'efficacité énergétique du nano-réseau.	84
3.20	Comparaison de l'efficacité énergétique DC-AC-DC vs DC pour un câble de 1.5mm ²	85
3.21	Mesures des chutes de tension pour une distribution 48V DC pour un câble de 1.5mm ² et une distance de 25m.	85
3.22	Comparaison de l'efficacité énergétique DC-AC-DC vs DC pour un câble de 2.5mm ²	87
3.23	Mesures des chutes de tension pour une distribution 48V DC pour un câble de 2.5mm ² et une distance de 25m.	88
4.1	Schéma synoptique de l'installation du système DRV alimenté en courant continu par une centrale PV et connecté au réseau, entreprise MCFOI, La Réunion.	93
4.2	(a) Photographie du système DRV hybride, MCFOI. (b) Photographie de la carte électronique du système DRV, câblée de manière hybride à l'alimentation DC provenant des PV et connecté au réseau EDF.	94
4.3	Instrumentation de la consommation énergétique du système DRV pour la journée du 26 mars 2024 sans la connexion de la centrale PV.	95
4.4	Instrumentation de la consommation énergétique du système DRV pour la journée du 27 mars 2024 avec la connexion de la centrale PV.	96
4.5	Superposition de la modélisation de la production PV et de la consommation d'énergie du système de climatisation DRV d'Intégrale Ingénierie pour la journée du 12 mars 2024.	99
4.6	Fonctionnalités du modèle d'Energy Management System (EMS).	101
4.7	Résultats des simulations de l'optimisation du stockage thermique pour la température intérieure (°C) et puissance de climatisation (kW) pour la journée du 12 mars 2024.	104
4.8	Superposition de la puissance de climatisation optimisée à la modélisation de la production photovoltaïque et les données réelles de climatisation pour la journée du 12 mars 2024.	104
4.9	Localisation du gîte de la caverne Dufour sur l'île de La Réunion.	106
4.10	Photographies du gîte équipé en toiture d'une centrale photovoltaïque (a), du local technique contenant l'onduleur et le chargeur de batteries (b), du parc de batteries (c) et du groupe électrogène (d).	107
4.11	Schéma de l'architecture électrique actuelle du gîte du Piton des Neiges.	108
4.12	Puissance (W) requise par le système de pompe à chaleur du gîte du Piton des Neiges pour le 1er juillet 2023 issue de l'étude de STD.	109
4.13	Schéma représentant l'architecture 400V DC proposée pour l'alimentation du système de pompe à chaleur.	110
4.14	Superposition de la modélisation de la puissance photovoltaïque et de la puissance électrique de la pompe à chaleur obtenue par le calcul de STD.	112
4.15	Résultats de simulations pour l'optimisation du stockage thermique du gîte selon les paramètres du scénario 1.	113
4.16	Résultats de simulations pour l'optimisation du stockage thermique du gîte selon les paramètres du scénario 2.	114
4.17	Résultats de simulations pour l'optimisation du stockage thermique du gîte selon les paramètres du scénario 3.	115
4.18	Schéma représentant l'architecture proposée pour l'association de la distribution 400/48V DC et l'optimisation du stockage thermique.	118

C.1 Détail des paramètres utilisés pour la STD du futur du gîte du Piton des Neiges. XIII

Liste des tableaux

1.1	Les différents domaines de tensions pour le courant alternatif et le courant continu.	3
1.2	Liste non exhaustive des équipements produisant ou consommant du courant continu par catégorie.	5
1.3	Synthèse des études sur les gains d'énergie potentiels et les enjeux liés à la distribution DC.	8
1.4	Atouts et verrous de la distribution DC.	9
1.5	Références des normes électriques actuelles mentionnant la distribution en courant continu.	9
1.6	Comparaison des avantages et inconvénients pour chaque niveau de tension DC dans le secteur résidentiel.	19
1.7	Liste des équipements DC présents sur le marché actuel avec leurs tensions et puissances de fonctionnement associées.	20
1.8	Référencement des études comparatives d'efficacité énergétique de nano-réseaux.	24
1.9	Présentation du micro-réseau expérimental "Nice-Grid".	31
1.10	Présentation des micro-réseaux DC déployés par l'entreprise Nanoé à Madagascar.	32
1.11	Présentation des micro-réseaux DC de la communauté Living Energy Farm (LEF), USA.	33
1.12	Présentation du nano-réseau DC "The DC Nanogrid House", Indiana, USA.	35
1.13	Présentation des micro-réseaux AC localisés dans le Cirque de Mafate à La Réunion.	37
2.1	Références et quantité des éléments du nano-réseau Héliocentris.	44
2.2	Références des modules additionnels du contrôleur Beckhoff BX9000.	46
2.3	Spécifications techniques des équipements terminaux et des convertisseurs AC/DC utilisés pour les expérimentations.	51
2.4	Mesures de la puissance apparente AC (VA) avant convertisseur AC/DC, de la puissance finale DC (W) après convertisseur et calcul du rendement de la conversion AC-DC pour chaque équipement.	53
2.5	Spécifications techniques des éléments du nano-réseau Héliocentris	58
2.6	Références des composants du nano-réseau héliocentris avant et après modifications.	60
3.1	Liste des références des composants utilisés pour le banc de test expérimental.	84
4.1	Paramètres de la modélisation d'une centrale photovoltaïque adaptée à la climatisation des locaux d'Intégrale Ingénierie.	99
4.2	Paramètres utilisés dans le modèle d'optimisation du stockage thermique.	103
4.3	Détail des paramètres des scénarios de simulation pour la gestion de la pompe à chaleur.	111
4.4	Synthèse des résultats de simulation pour la gestion de la pompe à chaleur.	116

Liste des abréviations

DC Direct Current

AC Alternating Current

LVDC Low Voltage Direct Current

HVDC High Voltage Direct Current

BLDC Brushless Direct Current

PV photovoltaïque

EMS Energy Management System

BMS Battery Management System

API Application Programming Interface

IP Internet Protocol

SGBD Système de Gestion de Base de Données

POE Power Over Ethernet

PoDL Power over Digital Line

SPE Single Pair Ethernet

Introduction générale

Le réchauffement climatique anthropique

Au cours des dernières décennies, le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) a identifié que les activités humaines contribuent à l'émission de gaz à effet de serre additionnels, selon leur rapport publié en 2014 [1]. Ces activités sont réparties entre plusieurs secteurs : l'industrie, l'agriculture, les bâtiments et les transports. Cette augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère due à l'activité humaine contribue à un changement climatique anthropique qui s'accélère. Par ailleurs, d'après le rapport "Special Report on Global Warming of 1.5°C" [2], il est déterminant que ce réchauffement climatique soit contenu à 1.5°C, afin de ne pas détériorer davantage les écosystèmes marins et terrestres.

Le secteur du bâtiment et la consommation d'énergie

Concernant le secteur des bâtiments, l'un des principaux gaz à effet de serre émis est le dioxyde de carbone. Tout d'abord, les émissions induites de CO₂ peuvent être amplifiées par la conception des produits utilisés dans le secteur. Les choix de matériaux utilisés ont un impact significatif dans les émissions anthropiques de CO₂ dès l'étape d'extraction des matières premières nécessaires. Leur éventuel transport lié à une importation, leur durée de vie limitée et leur recyclage insuffisant. Cela dit, le choix architectural entre une structure classique ou bioclimatique impactera la phase d'exploitation du bâtiment. En effet, un bâtiment bioclimatique, davantage conçu pour être adapté à son environnement, consommera moins d'énergie pour sa climatisation, son chauffage ou pour son éclairage. De plus, lors de la phase d'exploitation du bâtiment, les émissions de CO₂ induites dépendent à la fois de la source d'énergie primaire utilisée pour la fourniture d'électricité, de la performance énergétique des équipements électriques, de leur régulation énergétique et du comportement des utilisateurs.

Pour réduire la consommation énergétique des bâtiments, le gouvernement français a promulgué le décret tertiaire en juillet 2019 [3]. Ce dernier vise à diminuer la consommation d'énergie des bâtiments tertiaires de manière progressive : de 40% d'ici 2030, de 50% d'ici 2040, puis de 60% d'ici 2050. Pour atteindre ces objectifs, le décret Building Automation and Control System (BACS) [4] a été établi, exigeant que les bâtiments tertiaires dépassant 1000 m² soient dotés de systèmes de mesure et de contrôle énergétique pour surveiller leur consommation électrique. En complément, l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) a mis en place la plateforme OPERAT [5] pour enregistrer en ligne les données des bâtiments concernés.

Le contexte insulaire tropical de l'île de La Réunion

A propos de la gestion de l'énergie, dans le cadre de la Loi de la Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV), un autre objectif du gouvernement est d'atteindre l'autonomie énergétique à l'horizon 2050 pour toutes les Zones Non Interconnectées (ZNI) telle que l'île de La Réunion [6].

La Réunion, située dans le sud-ouest de l'océan Indien, est une région ultrapériphérique européenne et un département français d'outre-mer caractérisé par un contexte insulaire tropical. Son réseau électrique est autonome et n'est pas connecté à d'autres territoires extérieurs. Afin d'assurer la demande en électricité du territoire, qui était de 2850 GWh en 2022 [7], l'île est à présent dépendante d'importations d'énergies renouvelables (pellets de bois canadiens et bio fioul européen). La transition énergétique du mix-électrique vers du 100% renouvelable a été opérée en 2023. D'après les données de l'Observatoire de l'énergie de La Réunion, la part des énergies fossiles importées (encore fossiles en 2022 et renouvelables en 2024) pour la production d'électricité

représentait 62% en 2022 pour 38% d'énergies locales entièrement renouvelables [8]. Pour atteindre l'autonomie énergétique, il est donc essentiel pour un territoire isolé comme La Réunion de maîtriser sa consommation d'énergie tout en développant des sources d'énergies locales et renouvelables. Du fait de sa position géographique, l'île bénéficie d'un climat subtropical au fort potentiel solaire : l'ensoleillement annuel y varie de 1.1 à 2.1 MWh/m²/an. Selon une approche systémique, l'énergie solaire, qui représente actuellement moins de 9% de la production d'énergie électrique (283 GWh) en 2022, pourrait être la première source d'énergie renouvelable de l'île. Son développement constitue ainsi un enjeu majeur de la politique régionale de la transition énergétique pour atteindre l'autonomie énergétique du territoire.

L'essor des micro-réseaux et le retour du courant continu

Afin de faciliter l'insertion des énergies renouvelables, les recherches se concentrent actuellement sur le développement de micro-réseaux. Les micro-réseaux, qui sont des réseaux électriques à échelle réduite, sont généralement déployés pour assurer la distribution électrique de quelques bâtiments, voire un quartier. Ils sont équipés d'une ou plusieurs sources d'énergies (renouvelables ou fossiles), de systèmes de stockage et de systèmes intelligents de gestion de l'énergie. De cette manière, ils peuvent produire de l'électricité localement et passer aisément du mode isolé au mode connecté au réseau électrique [9].

Les micro-réseaux direct current (DC), sont particulièrement étudiés en raison de leur efficacité dans la distribution et la gestion de l'énergie, ainsi que de leur compatibilité avec de nombreuses sources d'énergies primaires renouvelables, telles que l'énergie solaire et l'énergie éolienne. En effet, l'utilisation de micro-réseaux DC permet de réduire les pertes d'énergie associées aux conversions énergétiques entre le courant continu et le courant alternatif. De plus, les micro-réseaux DC apparaissent alors comme une solution technique pour améliorer la fiabilité et la résilience des réseaux électriques, surtout dans des branches du réseau électrique instables ou encore dans des zones éloignées ou isolées. De plus, les micro-réseaux DC offrent une flexibilité accrue dans la gestion de la charge et du stockage d'énergie, ce qui les rend adaptés à une variété d'applications, des installations résidentielles aux sites industriels complexes. En conséquence, leur développement et leur déploiement sont devenus des axes d'avenir de la transition énergétique vers un système décentralisé durable.

Verrous scientifiques et industriels des micro-réseaux DC

Néanmoins, les micro-réseaux DC présentent plusieurs verrous scientifiques, technologiques, normatifs, industriels et humains à lever avant de pouvoir diffuser à large échelle leur intégration dans les bâtiments et les quartiers. Plusieurs défis technologiques sont à relever. Ils concernent notamment leur stabilité, leur gestion, leur contrôle, leur interopérabilité, l'évolution des normes électriques actuelles et enfin la caractérisation de leur coût et de leur efficacité.

Objectifs de recherche

En prenant en compte le contexte énergétique mondial, l'impact du secteur du bâtiment sur la consommation d'énergie, les recherches actuelles sur la distribution DC, les contraintes locales de l'île de La Réunion, son réseau électrique non interconnecté et son objectif d'autonomie énergétique, la question scientifique suivante a été proposée dans le cadre de ces travaux : **Dans quelles conditions la distribution en courant continu est-elle plus efficace que la distribution en courant alternatif pour contribuer à l'autonomie énergétique des bâtiments et notamment en site isolé ?**

Afin de contribuer à cette problématique, l'objectif de la thèse présentée dans ce manuscrit est d'apporter une approche expérimentale de l'évaluation de l'efficacité énergétique d'un nano-réseau DC, de la phase de conception à la phase opérationnelle au cours d'une installation en entreprise.

Ces travaux de thèse s'inscrivent dans le cadre d'une Convention Industrielle de Formation par la Recherche (CIFRE), entre l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT), l'entreprise Intégrale Ingénierie et les laboratoires de recherche universitaires ENERGY-Lab de l'Université de La Réunion et le Laboratoire de Conception et d'Intégration des Systèmes (LCIS) de l'Université de Grenoble Alpes.

Organisation du manuscrit

Afin de répondre à la problématique de recherche énoncée précédemment, ces travaux de thèse ont été décomposés en différentes étapes qui correspondent aux quatre chapitres suivants :

- Dans le **premier chapitre**, un état de l'art des micro-réseaux DC a été réalisé, sur leur conception, leur fonctionnement opérationnel et leur efficacité énergétique. Les problématiques de recherche identifiées et les retours d'expérience de sites expérimentaux ont permis de délimiter le périmètre d'étude de la thèse.
- Dans le **second chapitre**, l'efficacité énergétique d'un nano-réseau hybride (à la fois DC et AC) existant a été étudiée et des actions d'optimisations énergétiques ont été proposées. La méthodologie employée et les résultats de mesures expérimentales avant et après optimisations sont présentés et ont guidé la conception d'un nano-réseau DC.
- Dans le **troisième chapitre** est présenté la conception et le développement d'un nano-réseau DC expérimental dans le cadre d'une installation sur site en secteur tertiaire. Les choix technologiques opérés sont présentés, de la couche matérielle à la couche logicielle. L'efficacité énergétique et les limites de la distribution en 48V DC ont été investigués par une approche théorique et expérimentale.
- Le **quatrième chapitre** propose une stratégie de gestion de l'énergie des nano-réseaux DC en phase opérationnelle. Ainsi, afin d'évaluer l'impact de l'optimisation du stockage thermique sur l'autoconsommation photovoltaïque d'un nano-réseau, un système de gestion de l'énergie ou « Energy Management System » (EMS) a été modélisé et appliqué à la gestion de la demande en climatisation d'un bâtiment.

Enfin, dans une conclusion générale, après une synthèse des travaux réalisés nous présentons des perspectives de futurs développements. Ainsi, nous proposons une étude de cas de l'architecture du nano-réseau DC du gîte du Piton des Neiges à La Réunion, un bâtiment isolé en haute altitude, non connecté au réseau électrique principal et autonome en énergie. Ces travaux de recherche s'inscrivent dans le cadre de développement de nouvelles architectures électriques pour les bâtiments durables afin de relever le défi d'autonomie énergétique de la Stratégie "Futurs Énergétiques 2050".

Valorisation des travaux

Les travaux réalisés ont été valorisés dans les publications et communications suivantes :

- **Revue internationale** : Optimizing Energy Consumption : A Case Study of LVDC Nanogrid Implementation in Tertiary Buildings on La Réunion Island. *Energies* 2024, 17, 1247. <https://doi.org/10.3390/en17051247>.
- **Revue nationale** : Approche pédagogique pour l'étude d'autoconsommation photovoltaïque au niveau Master avec utilisation de l'API de SolarIO en langage Python. *J3eA*, Volume 23, 2024. <https://doi.org/10.1051/j3ea/20240002>
- **Conférences internationales** :
 - Impact of AC vs DC Distribution on System Efficiency in a Nanogrid Office, 2023 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP), Canberra, Australia, 2023, pp. 1-5, doi : 10.1109/TENSYP55890.2023.10223664.
 - Design of a hybrid experimental measurement bench in DC (direct current) for energy self-sufficient isolated sites. Webinaire "Low-Tech Innovation, A French - American discussion, Resilient solutions for climate change", ambassade de France aux USA, avril 2022. <https://www.youtube.com/watch?v=P1CMwChC3vE>
- **Conférences nationales** :
 - Installation d'un nano-réseau CC (Courant Continu) pour l'étude des gains énergétiques dans le secteur tertiaire à La Réunion. CNRIUT 2023 Saint Pierre - La Réunion, IUT de Saint Pierre, Jun 2023, Saint Pierre, La Réunion. hal-04326680
 - Conception d'un banc de mesures expérimental hybride en courant continu pour les sites isolés autonomes en énergie. Journées couplées GDR SEEDS JCGE 2022, Jun 2022, Le Croisic, France. hal-03877551

Chapitre 1. L'évolution d'un réseau électrique AC vers un réseau hybride AC et DC

Avant propos

Dans cette première partie, une étude bibliographique sur les micro et nano-réseaux direct current (DC) est exposée. La synthèse de ces recherches a permis d'identifier de quelle manière ces travaux de thèse pourraient contribuer à la résolution de verrous scientifiques et technologiques actuels, liés à la distribution électrique en courant continu dans un bâtiment, tout en contribuant à la maîtrise de la demande en énergie sur le réseau électrique de l'île de La Réunion.

Le chapitre est organisé en quatre sections.

Dans la **première section**, les notions relatives au courant continu et alternatif sont rappelées ainsi que la chronologie de l'évolution du réseau électrique distribué en courant alternatif vers un réseau hybride, à la fois alternatif et continu. Les avantages estimés et les problématiques associées à cette transition sont mises en évidence.

La **deuxième section** définit les micro et nano-réseaux et précise leur classification (AC ou DC, isolé ou connecté au réseau) ainsi que les challenges associés à leur développement.

Dans la **troisième section**, une attention particulière est portée sur l'analyse des nano-réseaux en courant continu, concernant leur dimensionnement, leur efficacité énergétique et la gestion de l'énergie au travers des Energy Management System (EMS).

Enfin, dans la **dernière section**, il est proposé de cerner le périmètre d'étude de la thèse selon l'approche « Low-Tech » et dans l'objectif de contribuer à apporter une réponse à la problématique de recherche indiquée dans l'introduction générale. A partir des retours d'expériences de sites expérimentaux (quartiers solaires connectés au réseau, villages isolés), des orientations techniques sont proposées pour les développements de ces travaux.

1.1 Historique : Courant Alternatif (AC) versus Courant Continu (DC)

1.1.1 L'origine des réseaux électriques en courant alternatif (AC)

Définition du Courant Continu (DC) et du Courant Alternatif (AC)

L'électricité est une forme d'énergie résultant de l'existence et du mouvement des charges électriques. Elle peut se présenter sous deux formes : en courant continu ou en courant alternatif, comme représenté en Figure 1.1 :

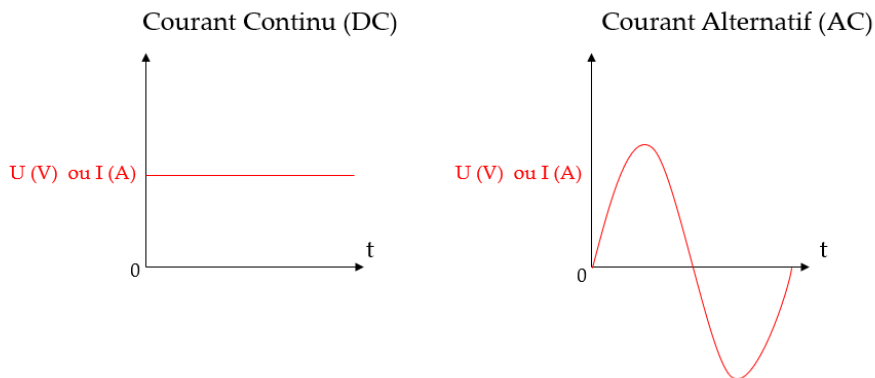


FIGURE 1.1 : Représentation du courant continu et du courant alternatif.

Le courant continu et le courant alternatif se distinguent par la manière dont se déplacent les charges électriques dans un circuit.

Dans un circuit en courant continu, l'électricité circule dans une direction constante. C'est le type de courant produit par les batteries, les cellules solaires, et certains types de générateurs. Il est idéal pour les applications nécessitant une tension stable et invariable, comme l'alimentation de circuits électroniques et le fonctionnement de dispositifs portables.

Le courant alternatif change de direction à intervalles réguliers, oscillant entre positif et négatif. Cette caractéristique lui permet d'être facilement transformé en différentes tensions à l'aide de transformateurs, facilitant ainsi son transport sur de longues distances avec moins de pertes d'énergie. C'est le type de courant produit par tout système rotatif comme des turbines (présentes dans les centrales thermiques) ou des éoliennes.

Les dates clés de l'électricité

Le phénomène physique de l'électricité a été observé dès l'Antiquité, mais sa compréhension scientifique formelle a commencé à se développer au XVII^{ème} siècle. Les dates clés des découvertes importantes menant aux premiers réseaux électriques sont listées ci-dessous. :

- **1600** : Publication de "De Magnete" par William Gilbert, qui y établit une distinction entre les phénomènes magnétiques et électriques, introduisant le terme "électrique".
- **1752** : Benjamin Franklin démontre la nature électrique de la foudre, et introduit le concept de paratonnerre.
- **1800** : Alessandro Volta invente la pile voltaïque, premier dispositif capable de produire un courant électrique continu.

- **1820** : Hans Christian Ørsted découvre que le courant électrique génère un champ magnétique, fondant ainsi l'électromagnétisme.
- **1879** : Thomas Edison met au point l'ampoule électrique incandescente, facilitant l'adoption de l'électricité pour l'éclairage et d'autres applications domestiques.
- **1888** : Nikola Tesla invente le moteur électrique à courant alternatif (AC) et s'associe avec George Westinghouse pour développer le premier réseau de distribution d'électricité en courant alternatif.

La guerre des courants

De nos jours, les réseaux électriques sont distribués majoritairement en courant alternatif. Cette prédominance trouve ses racines dans la rivalité historique à la fin du 19^{ème} siècle, surnommée "La guerre des courants", entre trois figures emblématiques de l'électrification : Nikola Tesla, Georges Westinghouse et Thomas Edison.

Alors que Thomas Edison défendait ardemment le courant continu pour ses installations électriques, Nikola Tesla a démontré les avantages pratiques et économiques du courant alternatif pour la distribution à grande échelle, notamment grâce à son système de transmission polyphasé. D'après T.J. Higgins dans l'*American Journal of Physics* en 1945 [10], un des événements déterminants fut l'exposition universelle de Chicago en 1893, où l'efficacité de la distribution AC a été expérimentée et prouvée pour assurer l'éclairage de l'évènement sur plusieurs kilomètres. La société, Westinghouse Electric Company, qui supportait les travaux Nikola Tesla, a finalement fait évoluer le transport du courant électrique alternatif qui s'est progressivement normalisé mondialement.

A cette époque, les moteurs, les générateurs et les transformateurs en courant alternatif (AC) disposaient de technologies plus développées opérationnelles et économiques que les systèmes électriques en courant continu (DC). L'objectif était de produire de l'électricité dans des centres de production centralisés et de l'acheminer vers les consommateurs à plusieurs centaines de kilomètres. Ainsi les lignes de transmissions à Haute Tension ont été développées pour distribuer l'électricité sur de longues distances. L'élévation des tensions a permis de réduire les pertes énergétiques liées au transport et de réduire le coût des câbles. Plusieurs normes ont été établies pour rendre opérationnel les stratégies de déploiement des réseaux électriques.

Ainsi, par la norme internationale CEI 60038 précise la classification des domaines de tension pour le courant alternatif et le courant continu :

Domaines de tension	Courant Alternatif AC)	Courant Continu DC)
Haute Tension HTB	> 50 000 V	> 75 000 V
Haute Tension HTA	1000 à 50 000 V	1500 à 75 000 V
Basse Tension BT	50 à 1000 V	120 à 1500 V
Très Basse Tension TBT	0 à 50 V	0 à 120 V

TABLE 1.1 : Les différents domaines de tensions pour le courant alternatif et le courant continu.

Le réseau électrique AC en France

A titre d'exemple, dans le réseau électrique français, les lignes haute tension (HTB) ont généralement une tension nominale de 225 kV ou 400 kV, et transportent l'électricité depuis les centrales électriques vers les postes de transformation. Les lignes à haute tension (HTA) ont des tensions de 20 kV à 50 kV et sont utilisées pour distribuer l'électricité à des sous-stations de distribution situées près des zones urbaines et industrielles. Enfin, les lignes basse tension (BT) ont une tension nominale de 230 V ou 400 V et fournissent l'électricité

directement aux consommateurs finaux, tels que les ménages et les petites entreprises.

Le réseau est géré par des entreprises de distribution et de transport d'électricité telles que RTE (Réseau de Transport d'Électricité) pour le transport haute tension et Enedis pour la distribution basse et moyenne tension. Ces entreprises assurent le bon fonctionnement du réseau, y compris la gestion des flux d'électricité, la maintenance des infrastructures et la résolution des pannes.

Un schéma du fonctionnement du réseau électrique français issu du site du Syndicat Départemental de l'électricité des Vosges [11] est représenté en figure 1.2.

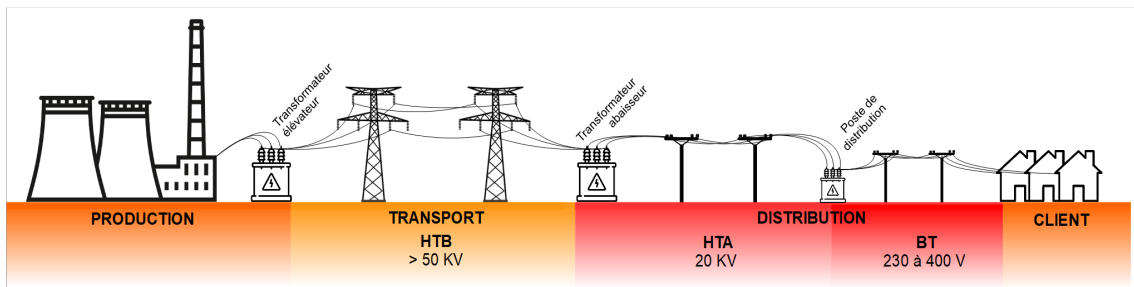


FIGURE 1.2 : Schéma de fonctionnement du réseau électrique AC issu du site du Syndicat Départemental de l'électricité des Vosges.

1.1.2 L'intégration progressive du Courant Continu (DC) au réseau AC

Les transmissions (LVDC) et (HVDC)

Les premières transmissions en courant continu haute tension (HVDC) ont commencé à être sérieusement explorées dans les années 1950, principalement pour connecter des territoires distants via des liaisons sous-marines. Le courant continu pour ces applications a été favorisé pour sa capacité à surmonter les limites imposées par la capacité de charge des lignes en courant alternatif (AC) sur de longues distances, tout en évitant de compromettre la stabilité entre deux réseaux interconnectés.

Ces déploiements ont été possibles grâce aux avancées significatives en électronique de puissance. Les moteurs, générateurs et convertisseurs AC-DC ont considérablement évolué depuis les temps d'Edison et Tesla, gagnant en fiabilité et en efficacité. De nombreuses liaisons HVDC sont actuellement en service en Europe comme les connexions entre la Sardaigne, l'Italie et la Corse ou encore entre l'île de Gotland et la Suède qui fut la première ligne commerciale HVDC au monde (1954). Il existe également des connexions internationales ou à venir telles que le projet "Celtic-Interconnector" reliant la Bretagne à l'Irlande [12].

L'avancée des énergies renouvelables

Depuis le 20ème siècle, les énergies renouvelables (EnR) ont connu un essor significatif en raison des préoccupations croissantes concernant la dépendance aux combustibles fossiles et les émissions de gaz à effet de serre. Des progrès technologiques majeurs dans des domaines tels que l'énergie solaire, éolienne, hydroélectrique et géothermique ont permis une exploitation plus efficace et économique de ces sources d'énergie.

Cependant, la nature intermittente des EnR solaire et éolienne pose un défi majeur pour leur intégration dans les réseaux électriques traditionnels : celles-ci requièrent du stockage et du contrôle pour optimiser leur utilisation. Dans les énergies renouvelables, certains systèmes de production d'électricité peuvent produire du courant alternatif (éoliennes, turbines à vapeur, hydroélectriques ou géothermiques) et du courant continu (générateurs photovoltaïques).

Les nouveaux appareils électriques à courant continu DC dans les bâtiments

Concernant les appareils électriques DC, ceux-ci regroupent majoritairement tous les équipements informatiques et électroniques. Historiquement, les besoins militaires durant la première et seconde Guerre Mondiale pour les transmissions d'informations, le chiffrement de données et la réalisation de calculs complexes ont été des catalyseurs de leur développement. Le courant continu a prédominé dans ces cas applicatifs en raison de son efficacité énergétique et la stabilité des signaux pour l'alimentation des composants électroniques. Par la suite, ces avancées ont eu des applications civiles pour les usages quotidiens.

La table 1.2 récapitule les équipements qui produisent, stockent ou consomment du courant continu dans nos usages actuels :

Production d'électricité	Stockage d'énergie	Appareils électriques	Mobilité électrique
Cellules photovoltaïques	Batteries	Ordinateurs	Voitures électriques
Piles à combustibles	Electrolyseur	Serveurs	Vélos électriques
Générateurs thermoélectriques	Supercondensateurs	Téléphones filaires, Smartphones	Trottinettes électriques
		Bornes WiFi, Modems radio	Scooters électriques
		Eclairage LED	Hoverboard
		Capteurs, objets connectés	Fauteuils roulants électriques
		Commutateurs et routeurs IP	
		Caméras, drones	

TABLE 1.2 : Liste non exhaustive des équipements produisant ou consommant du courant continu par catégorie.

Afin d'être compatibles avec les normes de notre réseau électrique AC actuel, les éléments listés dans la table 1.2 doivent utiliser des convertisseurs (onduleurs ou redresseurs), dont le rôle est de convertir le courant alternatif en courant continu ou continu vers alternatif.

1.1.3 Problématiques liées aux conversions du courant dans les bâtiments

Architecture électrique conventionnelle

Un exemple type d'architecture électrique conventionnelle intégrant de la production d'énergie solaire et des appareils DC et AC est représenté dans la figure 1.3 et inspiré des études réalisées au laboratoire Lawrence Berkeley, USA [13].

Dans le schéma, le bâtiment est équipé d'une centrale photovoltaïque, un système de stockage d'électricité et d'un véhicule électrique en option. L'onduleur est bidirectionnel, ce qui permet de charger la batterie à partir de l'électricité photovoltaïque pendant la journée et à partir du réseau électrique de la ville pendant la nuit. Ce schéma est issu d'une étude réalisée au laboratoire Berkeley, USA [13] sur l'efficacité énergétique des appareils électriques fonctionnant en courant continu.

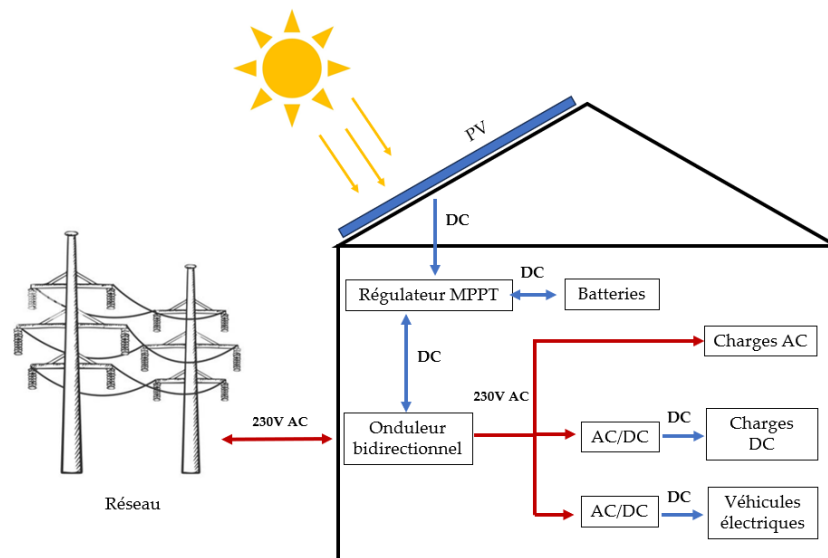


FIGURE 1.3 : Système d'alimentation conventionnel en courant alternatif avec production PV et stockage d'énergie, inspiré des études réalisées au laboratoire Lawrence Berkeley, USA.

Les impacts des convertisseurs dans les architectures électriques

L'ajout de ces multiples étapes de conversion du courant dans les architectures électriques entraîne les conséquences suivantes :

- **Consommation d'énergie additionnelle** : Pour réaliser les différentes conversions du courant, chacun des convertisseurs a une puissance de fonctionnement, qui sera plus ou moins élevée selon son rendement. Individuellement, cette consommation d'énergie est négligeable mais devient conséquente à l'échelle d'une ville, compte tenu de la quantité d'équipements DC aujourd'hui présents dans nos usages.
- **Perturbations du réseau** : Les convertisseurs AC-DC peuvent entraîner la génération d'harmoniques sur le réseau électrique. Celles-ci peuvent notamment détériorer la qualité de l'énergie électrique distribuée et provoquer des surcharges et des échauffements qui impactent la durée de vie de ses équipements.
- **Maintenance et durée de vie des équipements** : Dans les installations photovoltaïques, il est récurrent que les interventions de maintenance concernent majoritairement la réparation ou le remplacement des onduleurs. Ceux-ci ont une durée de vie moyenne qui peut varier de 5 à 15 ans, selon la qualité des composants et de leurs utilisations (impact du choix de dimensionnement ou de la température). Un nombre élevé de convertisseurs va donc augmenter le nombre d'interventions de maintenance sur les installations photovoltaïques, impactant les coûts et les temps de retour sur investissement et d'impact carbone, dû au remplacement des composants.

Note : Ces problématiques ont une importance majeure dans le cas des sites isolés. Dans ces installations spécifiques, il est primordial de réduire les interventions de maintenance en optimisant la durée de vie des équipements. De plus, l'intermittence des énergies renouvelables implique de réduire au minimum la consommation d'énergie globale, pour gagner en autonomie énergétique, en cas d'intempéries impactant la production locale d'énergie.

Pour pallier ces problématiques liées aux conversions d'énergie, le secteur de la recherche étudie le potentiel des bâtiments alimentés partiellement voire totalement en courant continu, afin de réduire les étapes de

conversion du courant. Les avantages et verrous de la distribution en courant continu dans les bâtiments sont détaillés dans la section suivante.

1.1.4 Les potentiels et enjeux de la distribution DC dans les bâtiments

Etudes sur les estimations de gains énergétiques dans les bâtiments DC

Pour quantifier le potentiel de gains d'énergie pour le déploiement d'installations en courant continu, un nombre important de travaux de recherche ont réalisé des comparaisons avec des installations conventionnelles en courant alternatif, pour différents cas d'application [14], [15], [16], [17], [18] et [19].

Les travaux de *H.E. Gelani et al.* [14, 15] ainsi que *B.Glasgo et al.* [17] ont porté sur des simulations d'architecture d'installation photovoltaïque avec stockage associée à une distribution en courant électrique alternatif et ont comparé les résultats avec une distribution en courant continu. H.E. Gelani en particulier propose un modèle multi-paramètres pour les études de comparaison.

La synthèse de ces études est détaillée dans la table 1.3 puis présentée en table 1.4. Les conclusions de ces études énumèrent les enjeux vis-à-vis du déploiement des installations DC.

TABLE 1.3 : Synthèse des études [14, 15, 16, 17, 18, 19] sur les gains d'énergie potentiels et les enjeux liés à la distribution DC.

Références	Périmètre d'étude	Gains d'énergie en DC	Enjeux liés au DC
[14]	Modélisation mathématique d'une distribution AC par rapport à une distribution DC dans le secteur résidentiel avec PV et stockage sur batterie.	2.3% en moyenne sur une journée par rapport à la distribution AC mais avec des variations plus importantes.	L'efficacité en DC varie plus au cours d'une journée par rapport au AC qui reste constante. L'efficacité globale est impactée par l'efficacité des convertisseurs et leur puissance nominale, en fonction des variations de charges au cours d'une journée .
[15]	Remplacement de moteurs à induction ou de résistances électriques par des moteurs ou pompes Brushless Direct Current (BLDC)	Machines à laver : 5 à 15% Climatisation : 30 à 50 % Chauffage : 50%	Les études comparatives de l'efficacité du DC par rapport au AC ont une forte importance pour les déploiements futurs et doivent prendre en compte des analyses multi-paramètres .
[16]	Synthèse d'avis de 17 experts du DC, provenant de l'industrie et du domaine de la recherche. Les experts ont été interrogés sur les avantages et freins à l'adoption du DC et les objectifs de recherche à prioriser.	Les économies d'énergie liées aux conversions du courant est la raison positive majeure de développer le DC.	Les gains d'énergie avérés en DC ne suffisent pas à une adoption généralisée. Il existe des défis non techniques pour la distribution DC comme le manque de formation à l'utilisation de la technologie. Il y a un besoin de projets pilotes et l'axe de recherche prioritaire est l' identification claire de cas applicatifs où le DC est plus avantageux.
[17]	Simulations de Monte-Carlo pour estimer les gains d'énergie en DC, en se basant sur des données réelles de charges mesurées dans des bâtiments du secteur résidentiel.	PV seul : 9 à 20% PV et batteries : 14 à 25 % PV avec seulement la climatisation en DC : 7 à 16%	Compte tenu du coût du marché au moment de l'étude, seules les unités de condensation DC présentent un réel avantage d'économies d'énergie et de coût. Selon les standards américains de l'électricité, au-dessous de 600 VDC les installations DC seraient conformes aux installations AC. Les certifications des équipements et les formations demeurent des freins non techniques.
[18]	Mesures expérimentales de gains d'énergie sur des équipements DC (ventilateurs, réfrigérateur, LED).	Ventilateur de bain 12 VDC : 6% Convertisseurs DC-DC : 2 à 15 % par rapport à des transformateurs AC-DC pour les petits appareils électroniques. Tubes LED 380 VDC : 1 à 5% d'efficacité en plus par rapport à un convertisseur AC-DC intégré	Une attention particulière doit être portée à la tension de distribution et au processus de conversion pour les comparaisons AC vs DC. Les petits appareils électroniques nécessitent des convertisseurs DC-DC dans les architectures DC car la tension de distribution sera plus élevée dans les bâtiments pour s'affranchir des pertes en ligne.
[19]	Etude comparative AC vs DC pour des charges résistives, des moteurs asynchrones, appareils électroniques de faible et haute puissance. Une méthodologie précise est présentée pour prendre en compte plusieurs paramètres impactant l'efficacité.	L'efficacité globale avec PV et batteries est de 3.4% plus élevée en distribution DC par rapport au AC pour un bâtiment isolé.	Le gain en efficacité n'est pas significatif en DC car les convertisseurs AC-DC et DC-AC ont des bons rendements. La pertinence du DC peut être meilleure pour les sites isolés et des analyses coût-bénéfice seraient utiles pour les décideurs.

Potentiel et verrous de la distribution en courant continu (DC)

En accord avec les études mentionnées dans la table 1.3, la table 1.4 ci-dessous présente une synthèse des atouts de la distribution d'énergie électrique DC dans les bâtiments tout en leur associant des verrous scientifiques et industriels actuels.

TABLE 1.4 : Atouts et verrous de la distribution DC.

Atouts	Verrous
Economies d'énergie	Manque de projets pilotes
Réduction du nombre de composants électroniques	Absence de normes
Augmentation de la durée de vie des composants	Coût du marché des équipements et protections
Optimisation du dimensionnement	Disponibilité des équipements DC
Simplification des installations PV	Manque de formations
Economies d'énergie grise	Manque d'études CAPEX et OPEX

Ainsi, bien que la distribution d'énergie électrique DC présente des avantages certains en termes d'économies d'énergie et d'optimisations des architectures électriques, *B.Glasgo et al.* mettent en avant [16] des freins non techniques persistants qui représentent des verrous au déploiement de bâtiments DC.

Les secteurs normatifs, industriels et scientifiques constituent un triptyque dont la synergie devrait permettre de faire évoluer l'adoption du courant continu dans les bâtiments.

Le rôle des normes électriques

En France, le réseau électrique est régulé par des normes et des réglementations définies par des organismes tels que l'Association Française de Normalisation (AFNOR) et l'Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information (ANSSI). Les normes définissent les spécifications techniques des équipements électriques, les paramètres de sécurité, ainsi que les procédures d'exploitation et de maintenance du réseau.

Au sein des bâtiments, les installations électriques à basse tension doivent respecter la norme NF C 15-100. Le courant continu étant utilisé majoritairement pour les installations photovoltaïques, deux guides : UTC 15-712-1 et UTC 15-712-2 sont adossés à la norme NF C 15-100 et précisent les règles de conception et de mise en œuvre concernant la partie électrique des générateurs photovoltaïques. La distribution électrique DC est utilisée en TBT pour les véhicules d'habitation tels que les camping-car, caravanes ou encore certains modèles de bateaux. Les normes existantes mentionnant le courant continu sont référencées dans la table 1.5.

Référence	Intitulé	Date
Norme NF C 15-100	Installations électriques à basse tension	2015
Guide UTC 15-712-1	Installations photovoltaïques sans stockage et raccordées au réseau public	2013
Guide UTC 15-712-2	Installations photovoltaïques autonomes non raccordées au réseau public de distribution avec stockage par batterie	2013
Guide UTE C32-502	Guide pour les câbles utilisés pour les systèmes photovoltaïques	2009
Norme NF EN 1648-1	Véhicules habitables de loisirs - Installations électriques à très basse tension de 12 V en courant continu - Partie 1 : caravanes	2018
Norme NF EN 1648-2	Véhicules habitables de loisirs - Installations électriques à très basse tension de 12 V en courant continu - Partie 2 : autocaravanes	2018

TABLE 1.5 : Références des normes électriques actuelles mentionnant la distribution en courant continu.

Le rôle de l'industrie dans le marché des appareils électriques à courant continu (DC)

Actuellement, l'Emerge Alliance [20] et la communauté IEEE Power and Energy Society [21] travaillent sur l'élaboration de normes pour la distribution en courant continu dans les bâtiments. L'absence de telles normes jusqu'à récemment a entraîné l'utilisation d'une grande variété de niveaux de tension par les appareils électriques DC, conçus selon des spécifications propres à chaque fabricant.

Cette diversité de niveaux de tension rend le déploiement d'installations DC plus complexe, car la simple élimination des convertisseurs AC-DC intégrés aux appareils électriques DC n'est pas suffisante pour transformer une installation AC en DC. En effet, pour convertir intégralement le système de distribution électrique d'un bâtiment en DC, une gamme étendue de bus de distribution et de convertisseurs DC-DC serait nécessaire, pour alimenter les équipements DC qui fonctionnent sur des tensions pouvant aller de 3 à plus de 100V DC.

Le développement des micro-réseaux DC

Le développement des micro-réseaux est un axe de recherche établi durant les dernières décennies pour assurer une transition du réseau électrique AC, vers un réseau électrique hybride, à la fois AC et DC, avec une forte intégration des énergies renouvelables.

En effet, il est estimé que les micro-réseaux, grâce à une production d'énergie décentralisée, peuvent faciliter l'insertion des EnR dans les zones urbaines, tout en apportant des solutions à faible impact carbone pour l'électrification des zones rurales.

Les micro-réseaux DC sont étudiés en particulier par rapport aux micro-réseaux AC pour les sites isolés, où chaque économie d'énergie peut contribuer à l'autonomie énergétique et la résilience aux énergies fossiles du site. De ce fait, ils doivent faire face aux problématiques liées au courant continu, énoncées précédemment, comme la compatibilité des composants pour déployer les installations, la remontée des données à distance ou encore l'optimisation du dimensionnement.

La définition, les différences entre les typologies (AC, DC ou hybride), les modes d'opération et les défis associés au développement des micro-réseaux sont détaillés plus précisément dans la prochaine section.

1.2 Préambule sur les micro et nano-réseaux

1.2.1 Définitions des micro et nano-réseaux

Définition des micro-réseaux

La définition retenue par la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est celle présentée dans l'ouvrage "Microgrid, Modeling, Control, and Applications" R. Kandari et al, 2022 [9], un micro-réseau est défini comme "un groupe de charges interconnectées et de ressources énergétiques distribuées à l'intérieur de limites électriques clairement définies, qui agit comme une seule entité contrôlable par rapport au réseau. Il peut se connecter et se déconnecter du réseau pour lui permettre d'opérer en mode connecté au réseau ou en mode îloté. Il intègre généralement des dispositifs d'énergies renouvelables tels que le solaire-PV, les éoliennes, les micro-turbines et les dispositifs de stockage qui peuvent être exploités soit en mode connecté au réseau, soit en mode autonome." Selon les auteurs, les micro-réseaux ont initialement été développés pour équiper les sites isolés et les zones rurales dépourvus d'accès à un réseau électrique fiable. Avec le temps, l'intérêt pour les micro-réseaux s'est étendu aux zones urbaines, dans le but de faciliter l'intégration et la gestion des énergies renouvelables (EnR) intermittentes. Un schéma simplifié de micro-réseau connecté au réseau électrique en zone urbaine est représenté en figure 1.4.

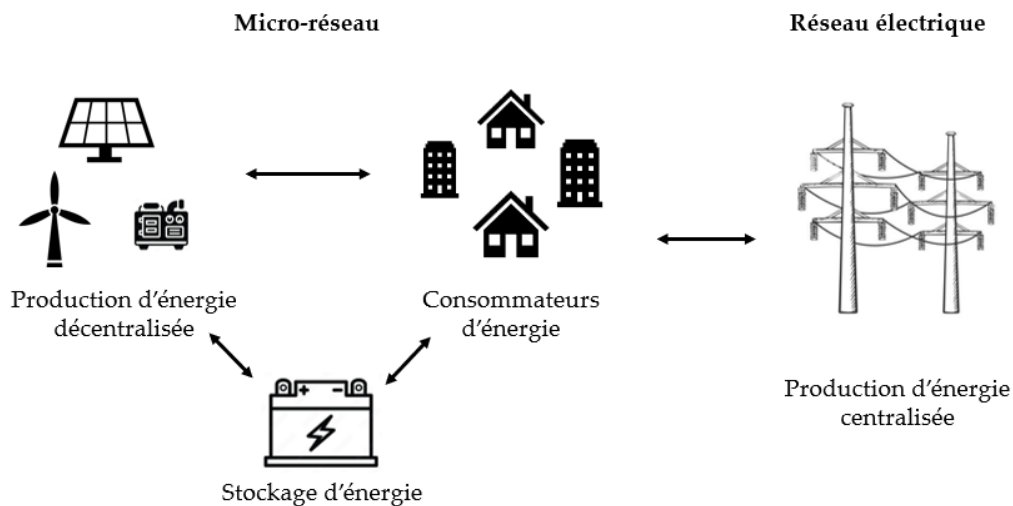


FIGURE 1.4 : Schéma simplifié d'un micro-réseau connecté au réseau électrique.

Définition des nano-réseaux

La distinction entre micro-réseau et nano-réseau a été établie en 2016 par *D. Burmester et al.* [22] : Un nano-réseau, correspond à un réseau électrique réduit à l'échelle d'un bâtiment ou d'une maison. Celui-ci intègre une production locale d'énergie, une gestion intelligente et un stockage de l'énergie. Son fonctionnement est identique à celui d'un micro-réseau, car il peut agir soit en mode connecté au réseau, soit en mode isolé.

Plusieurs nano-réseaux peuvent ainsi former un micro-réseau, comme illustré en figure 1.5.

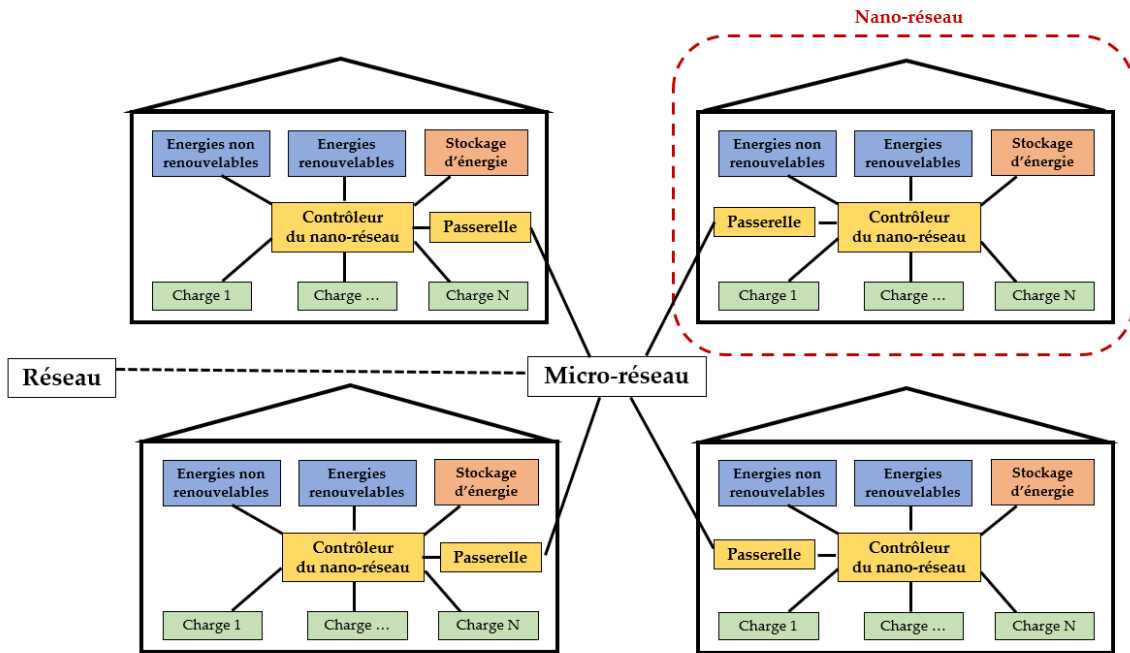


FIGURE 1.5 : Schéma d'un micro-réseau constitué de plusieurs nano-réseaux, inspiré de l'étude de *D. Burmester et al.* [22]

Sur le schéma 1.5, les deux éléments "contrôleur" et "passerelle" sont les composants qui apportent l'intelligence embarquée pour la gestion du nano-réseau :

- **Contrôleur ou Système de Gestion de l'énergie (SGE ou EMS)** : Le rôle du contrôleur est de réaliser une répartition intelligente de l'énergie entre les différents éléments qui le constituent, soit le système de production, le système de stockage, les consommateurs et la communication avec d'autres nano-réseaux, dans le cas d'un raccordement à un micro-réseau. Dans la pratique, les algorithmes de contrôle sont généralement implémentés sur un ou plusieurs micro-contrôleurs, eux-mêmes déployés au sein du micro-réseau. Ces derniers auront chacun des rôles de "maîtres" ou "esclaves". Les différents types de Système de Gestion de l'énergie (SGE ou EMS) sont présentés plus en détail dans la section 1.3.3.
- **Passerelle** : La passerelle entre le nano-réseau et le micro-réseau, ou le réseau électrique, est réalisée par des équipements de commutation et de protection, tels que des disjoncteurs, interrupteurs, relais de protection ou encore commutateurs de transfert communicants.

Classification des micro et nano-réseaux

Les micro-réseaux ont la possibilité de combiner différentes sources d'énergie, différents systèmes de stockage, d'opérer selon différents modes et dans différents cas d'application. La figure 1.6 inspirée des travaux de *M. Uddin et al.* [23] présente leur classification, par mode de contrôle, taille, type de distribution, source d'énergie, secteur, localisation et cas d'applications :

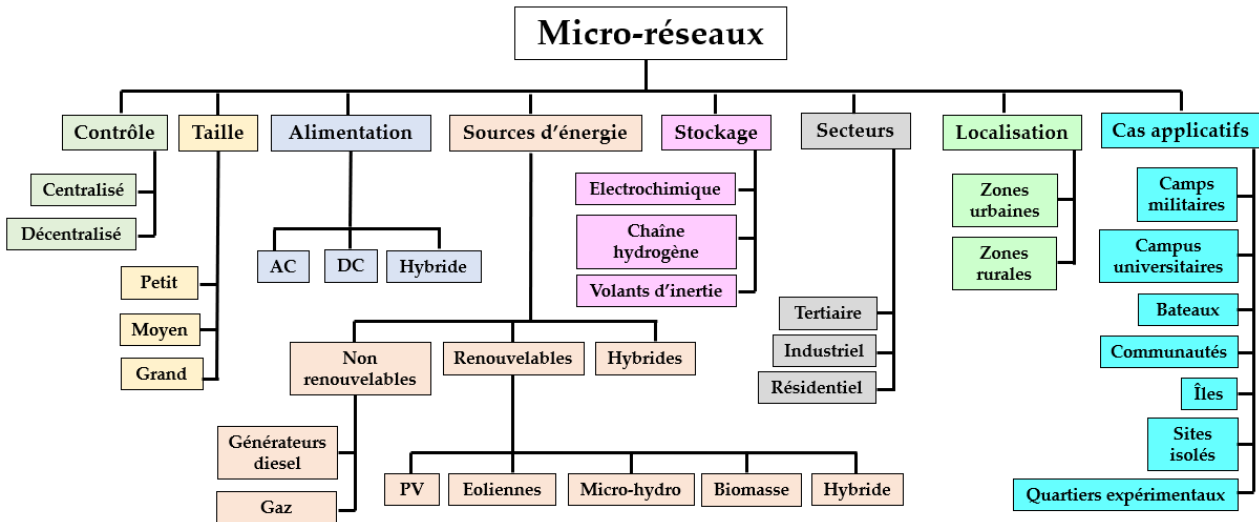


FIGURE 1.6 : Classification des micro-réseaux applicable aux nano-réseaux, inspirée de l'étude de *M. Uddin et al.* [23]

Les choix réalisés pour la conception des micro ou nano-réseaux dépend ainsi des spécificités du site de déploiement et des ressources énergétiques disponibles : par exemple, un micro-réseau isolé aura besoin d'un système de stockage plus important qu'un site en zone urbaine, pour répondre à des problématiques d'autonomie énergétique. De même, un micro-réseau du secteur résidentiel aura besoin d'une hybridation plus importante qu'un micro-réseau du secteur tertiaire, en raison d'une plus forte présence d'appareils électriques AC, pour l'instant indisponibles dans une version DC équivalente (réfrigérateur, climatiseur, etc).

Afin d'introduire le positionnement de ces travaux de recherche sur les nano-réseaux DC, il a été choisi d'exposer préalablement les différences entre une topologie AC, DC ou hybride et le mode d'opération connecté au réseau de distribution électrique (zone urbaine) ou déconnecté (zone rurale ou isolée).

1.2.2 Topologies AC, hybrides AC/DC et DC

L'architecture électrique d'un micro ou nano-réseau peut varier selon différentes topologies :

Topologie AC : L'architecture de distribution en courant alternatif (AC) est basée sur un bus principal sur lesquels sont connectées les charges (figure 1.7). Ces charges terminales sont à la fois de type AC et DC à travers des convertisseurs. Cette topologie correspond aux installations conventionnelles les plus déployées actuellement.

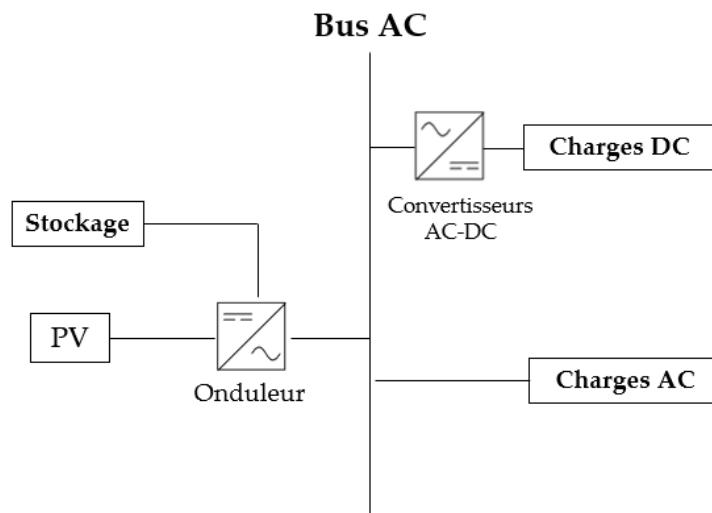


FIGURE 1.7 : Nano-réseau de topologie AC.

Topologie DC : L'architecture de distribution en courant continu repose sur un bus principal DC qui est représentée figure 1.8 . Les charges terminales sont uniquement DC et peut nécessiter des convertisseurs DC-DC afin de pouvoir s'adapter à différents niveaux de tensions. Cette topologie est rarement utilisée, car elle restreint la quantité de charges utilisables, compte tenu des équipements terminaux alimentés en DC disponible actuellement chez les distributeurs du marché du bâtiment. Selon les différentes architectures de micro-réseaux décrites dans la thèse de Mael Riou [24], la typologie DC peut également contenir des charges AC dans la mesure où la majorité des charges du nano-réseau sont DC.

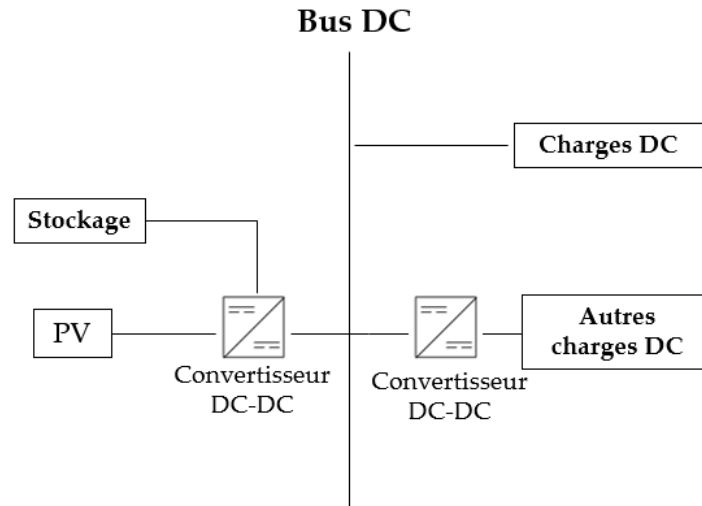


FIGURE 1.8 : Nano-réseau de topologie DC.

Topologie hybride AC/DC : Cette topologie représentée en figure 1.9 propose deux bus principaux de distribution électrique. Les charges terminales sont de type AC et DC. Dans cette configuration, un bus DC est exploité depuis la sortie DC d'un régulateur Maximum Power Point Tracking (MPPT), représenté par un convertisseur DC-DC sur le schéma, ou directement depuis l'onduleur, pour les modèles ayant une sortie DC intégrée.

Note : D'après l'analyse réalisée au cours de ces travaux, cette architecture pourrait être la plus adaptée à l'heure actuelle pour faciliter une insertion progressive du courant continu dans les installations PV. En effet, la majorité des appareils électriques étant standardisés à une tension d'alimentation 230V AC, cette topologie pourrait permettre d'effectuer une transition vers l'insertion de la distribution DC dans les bâtiments, tout en conservant la possibilité d'utiliser les appareils électriques AC.

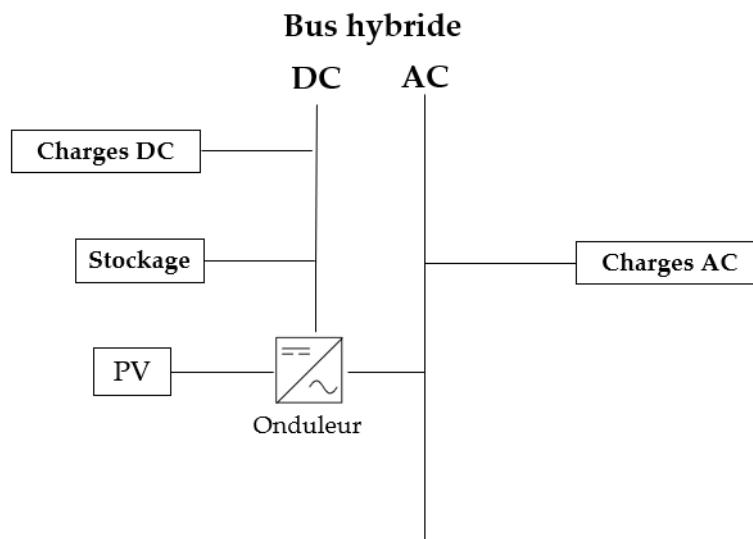


FIGURE 1.9 : Nano-réseau de topologie hybride AC/DC.

1.2.3 Mode d'opération connecté au réseau ou isolé

Les micro et nano-réseaux ont la possibilité d'opérer selon deux modes différents :

- **Mode « connecté au réseau »** : En cas de production d'énergie électrique excédentaire au sein du micro-réseau, ce surplus d'énergie peut être stocké localement, soit redistribué dans le réseau électrique général. En situation de coupure du réseau électrique principal, afin de ne pas réinjecter de l'électricité dans ce réseau alors que des techniciens interviennent, ou dans la situation de surplus de production d'énergie renouvelable susceptible de compromettre la stabilité du réseau auquel il est relié, le micro-réseau a la capacité de s'isoler et d'opérer de manière autonome. Ce fonctionnement est illustré par la figure 1.10, inspirée des travaux de *R. Kandari and J.M. Guerrero* [9].

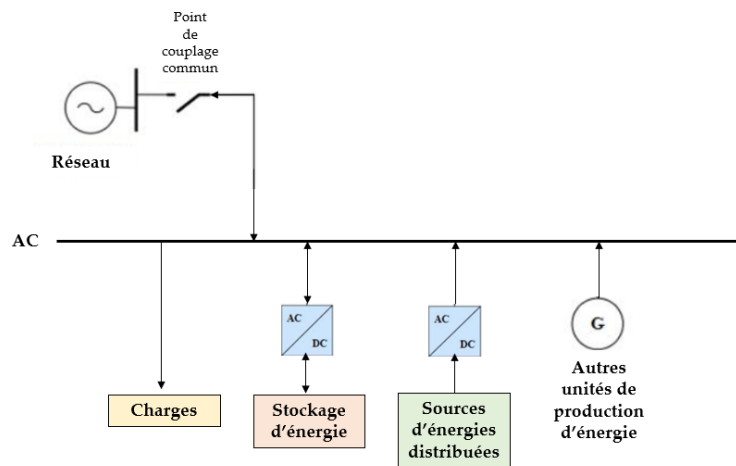


FIGURE 1.10 : Schéma d'un micro ou nano-réseau AC connecté au réseau, inspiré de l'ouvrage de *R. Kandari and J.M. Guerrero* [9]

- **Mode « isolé »** : Le mode isolé ou îloté correspond à la même situation que celle précédente (figure 1.10), mais sans aucune connexion au réseau électrique. Dans cette configuration, l'autonomie énergétique du micro-réseau est assurée par un système redondant (dit système de "secours") correspondant généralement à une génératrice électrique diesel. L'avantage de combiner différentes sources de production d'énergies et différents systèmes de stockage peut ainsi contribuer à augmenter la résilience du nano-réseau ou micro-réseau et diminuer sa dépendance au système de secours.

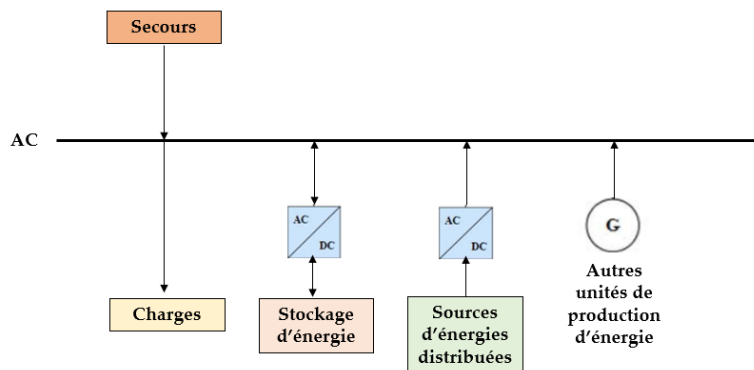


FIGURE 1.11 : Schéma d'un micro ou nano-réseau AC isolé, inspiré de l'ouvrage de *R. Kandari and J.M. Guerrero* [9]

1.2.4 Challenges associés aux micro-réseaux

Défis techniques, industriels et réglementaires liés aux micro-réseaux

Concernant les verrous liés au développement des micro-réseaux, *M. Uddin et al.* [23] ont également identifié les challenges existants, représentés dans la figure 1.12.

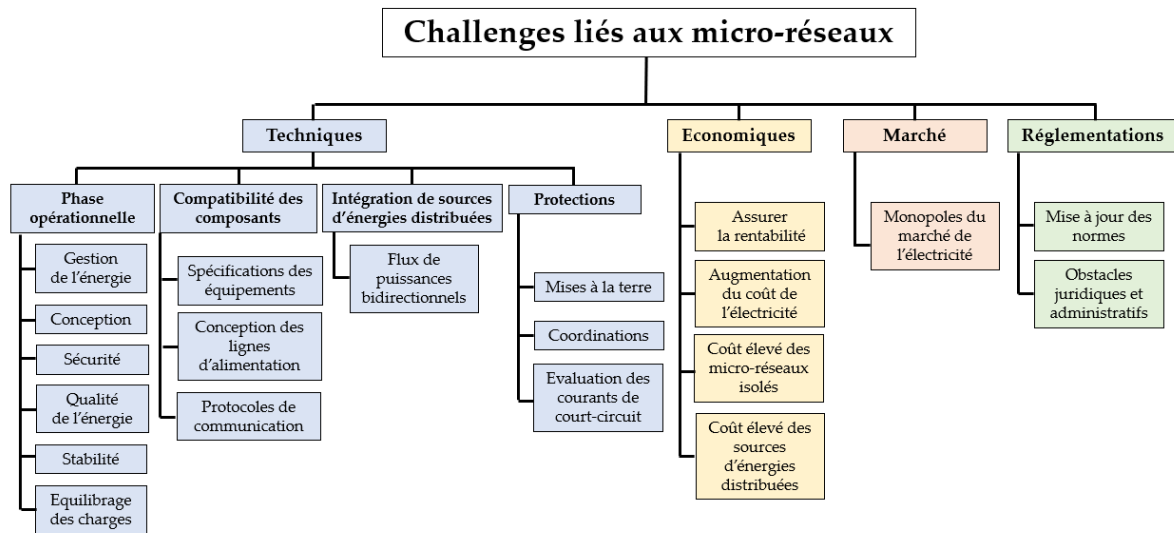


FIGURE 1.12 : Challenges associés au développement des micro-réseaux issu de [23].

Positionnement des travaux

Etant donné l'importance de l'impact carbone du secteur du bâtiment, en particulier compte-tenu de leur consommation d'énergie électrique, ces travaux de recherche auront ainsi pour objectif d'estimer le potentiel et les limites de la distribution de l'énergie électrique en courant continu, identifiés précédemment en table 1.4. Cette démarche devrait contribuer à une réduction de la consommation d'énergie dans les bâtiments.

Ces objectifs de recherche seront notamment centrés sur une phase opérationnelle de développement des **nano-réseaux DC**, de la phase de conception à la phase d'exploitation. Le but étant de contribuer à la résolution des challenges des micros ou nano-réseaux (classés en figure 1.12) tant au niveau de la conception, que de la compatibilité des composants ou de la gestion de l'énergie.

Pour ces raisons, un état de l'art des nano-réseaux DC est présenté dans la section suivante selon 3 axes principaux : leur dimensionnement, l'évaluation de leur efficacité énergétique et les Systèmes de Gestion de l'Energie (SGE).

1.3 Etat de l'art des nano-réseaux DC

Dans cette section, les nano-réseaux DC sont présentés de l'étape de conception à la phase d'exploitation. Une attention particulière est portée à l'évaluation de l'efficacité énergétique des nano-réseaux DC. En effet, la synthèse des études présentées au paragraphe 1.3, démontre que le consensus n'est pas établi quant au choix de la méthodologie à employer pour comparer l'efficacité énergétique relatives aux architectures AC ou DC. *M. Uddin et al.* ont montré que ces études d'efficacité nécessitent de prendre en compte différents paramètres qui sont détaillés dans la figure 1.12.

1.3.1 Conception et dimensionnement des nano-réseaux DC

Le dimensionnement des nano-réseaux DC s'opère en plusieurs étapes, dépendantes du choix des appareils électriques et des distances de transmission. Ces deux facteurs impacteront le dimensionnement des câblages, des protections et des systèmes de production et stockage d'énergie.

Détermination des niveaux de tension d'un nano-réseau

Malgré la disparité des niveaux de tension des équipements DC (voir section 1.1.4), il est possible d'identifier des niveaux de tension les plus couramment utilisés parmi les appareils présents sur le marché.

L'origine de la commercialisation de ces équipements vient du cas applicatif des véhicules de loisirs autonomes comme les camping-cars, ou les installations photovoltaïques de sites isolés, dans lesquels l'électricité est généralement distribuée dans des architectures 12V DC, 24V DC et parfois 48V DC (plus souvent utilisée pour les centres de données).

Par ailleurs, l'essor des véhicules électriques dont la tension de fonctionnement des batteries est fixée à 380V DC, ouvre une nouvelle voie à des réseaux électriques dont une tension de bus serait 380V DC. Ainsi, cette tension est également étudiée pour faire partie des futures normes DC au sein des bâtiments. Un examen approfondi des avantages et inconvénients des différents niveaux de tension pour le déploiement de nano-réseaux DC dans le secteur résidentiel a été réalisé par *S. Moussa et al.* [25].

Dans cet article, les auteurs présentent les éléments à prendre en compte afin d'atteindre un choix de niveau de tension adéquat pour une application donnée. La sécurité des utilisateurs, l'efficacité et les économies de coûts sont également pris en considération dans le choix. Les critères de sélection considérés sont la consommation d'énergie, la zone de déploiement de l'application, la taille des câbles et les pertes de transmission en ligne.

La table 1.6 présente les résultats de l'étude pour les différentes tensions 12, 24, 48 et 380V DC. Concernant le secteur résidentiel, la majorité des études actuelles convergent vers la tension 48V DC comme tension de référence. Celle-ci est favorisée pour l'élaboration des futures normes DC dans les bâtiments.

D'après les avantages et inconvénients listés en table 1.6, utiliser la tension 380V DC dans une architecture de réseau électrique DC permettrait ainsi de faciliter la compatibilité entre les bâtiments DC équipés de centrales photovoltaïques et des véhicules électriques, qui représenteront dans un futur proche des charges électriques importantes, ayant des forts appels de puissance sur le réseau.

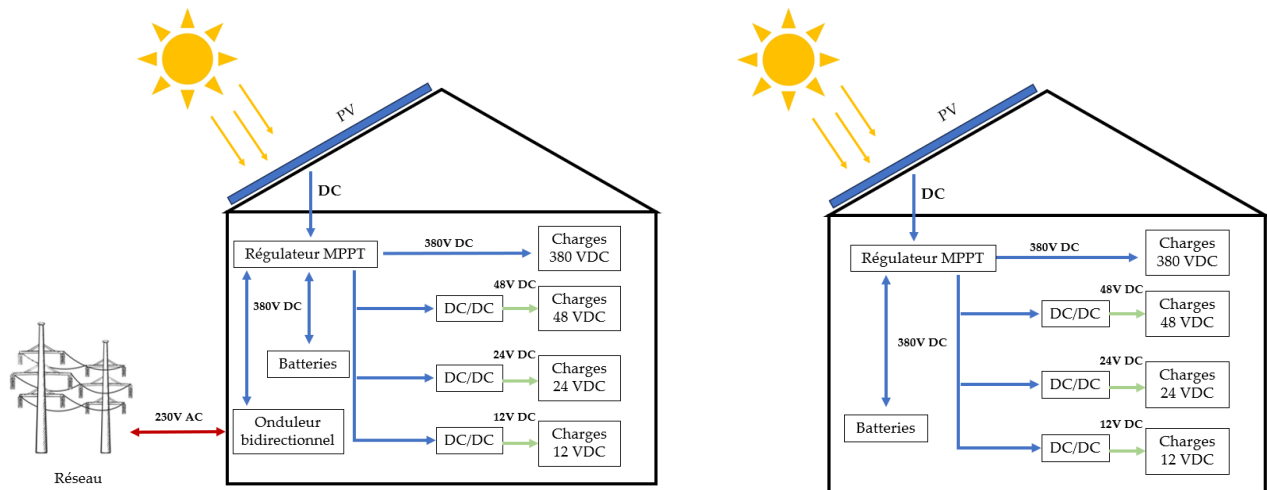
Par ailleurs, afin de pallier à la limitation en puissance des tensions 12, 24 et 48V, associer la tension 380V DC à l'architecture des bâtiments permettrait de limiter les pertes en ligne sur les transmissions de longues distances.

Tension (V)	Cas applicatif	Avantages	Inconvénients
12/24/48 V	Une seule pièce ou une petite maison ou habitat en site isolé.	Disponibilité des appareils commercialisés. Tension sécurisées et requiert des protections basiques. Normes de l'Emerge Alliance pour les espaces occupés (24V) et IEEE pour les micro-réseaux DC (48V)	Destiné à des cas applicatifs de très basse puissance. Pertes importantes pour des puissances élevées.
380 V	Résidence connectée au réseau.	Norme de l'Emerge Alliance pour les bâtiments et centres de données. Tension proche du 230V AC (possibilité d'adapter des charges AC en DC avec des modifications mineures. Adapté à des fortes charges.	Besoin de convertisseurs DC-DC pour s'interfacer avec les appareils DC basse tension existants. Protections obligatoires.

TABLE 1.6 : Comparaison des avantages et inconvénients pour chaque niveau de tension DC dans le secteur résidentiel.[25].

Exemple d'architecture de nano-réseau DC

Un exemple d'architecture de nano-réseau électrique DC incluant les différents niveaux de tension (12, 24, 48, 380 V DC) est représenté dans le schéma en figure 1.13 selon le mode isolé ou connecté au réseau. L'ajout de charges AC dans l'architecture 1.13a et l'ajout d'un onduleur avec charges AC dans l'architecture 1.13b transformerait ces typologies DC en typologies hybrides AC-DC.



(a) Architecture de nano-réseau DC en mode connecté au réseau.

(b) Architecture de nano-réseau DC en mode isolé.

FIGURE 1.13 : Architecture d'un nano-réseau DC avec stockage, en mode connecté au réseau (1.13a) ou îloté (1.13b).

Note : Pour limiter la consommation d'énergie liée aux conversions DC-DC, l'idéal serait d'uniformiser une installation en 48V DC pour les appareils fonctionnant à très basse tension. Cependant, comme listés dans la table 1.7 ci-dessous, les équipements DC présents sur le marché actuel sont majoritairement conçus en 12 ou

24V DC. Ils nécessitent de ce fait l'ajout de convertisseurs DC-DC pour permettre leur intégration dans une architecture 48V DC.

Equipements DC	Plage de puissance (W)	Tension nominale (V)
LED	3-40	12/24/48
Ventilateur	2.7-24	12/24/48
Climatiseur	800	24/48
Congélateur/Réfrigérateur	40-200	12/24/48
Bouilloire	85-350-400	12/24
Micro-onde	660	12
Machine à café	156-170	12/24
Ordinateur	16-27	12/24
Serveur	200-300	12/24/48
Téléviseur	5.5-24	12/24/48
Box wifi	3.1-8.8	12
Radio	10	12
Lave-linge	70-100	12/24
Sèche-linge	40-50	12/24
Fer à repasser	150	12/24
Sèche-cheveux	180-400	12
Bornes de recharges de véhicules électriques	3700 - 22 000	380

TABLE 1.7 : Liste des équipements DC présents sur le marché actuel avec leurs tensions et puissances de fonctionnement associées, issue des études de *K. Garbesi et al.* [13] et *S. Moussa et al.* [25].

Une fois le choix des équipements électriques et la détermination des niveaux de tensions DC réalisés, le dimensionnement des câblages au sein du nano-réseau dépendra des distances de transmission et de la puissance requise par les équipements. Par ailleurs, l'intégration d'un nano-réseau DC dans un réseau électrique existant est un enjeu pour le déploiement rapide de cette technologie. Ainsi, le câblage électrique préexistant en courant alternatif pourrait être aussi conservé pour la distribution en courant continu afin de permettre des économies importantes au niveau de l'énergie grise (rénovation des bâtiments). Dans ce contexte, le choix des tensions fait dans le cadre de ces travaux est limité pour des conditions de sécurité à des tensions inférieures à 60V (NFC 15-100). De ce fait, ces travaux ont été amenés à considérer le dimensionnement des sections de câbles, adaptées aux échanges de puissances à réaliser au sein du nano-réseau à déployer.

Détermination des sections de câbles d'un nano-réseau

Comme il a été précisé dans la table 1.6 concernant les inconvénients des installations en 12, 24 et 48V DC, les pertes en lignes vont être plus importantes que dans une installation conventionnelle en 230V AC. En effet, ces tensions DC étant plus faibles que le 230V AC, le courant sera plus élevé pour une même puissance consommée.

Cette augmentation du courant va nécessiter d'utiliser des sections de câbles plus élevées pour le déploiement de l'installation. En raison de l'effet de Joule, ces deux facteurs impacteront directement les pertes de puissance en ligne dans le câble ainsi que les chutes de tension. Une attention particulière doit être portée aux chutes de tension car comme cela est indiqué dans la norme NFC 15-100, il est nécessaire de respecter une chute de tension relative inférieure à 3% pour de l'éclairage et 5% pour les autres appareils électriques. De ce fait, les études de dimensionnement de nano-réseaux DC doivent prendre en compte ces limites pour effectuer des comparaisons réalistes d'évaluation de l'efficacité énergétique, par rapport à une distribution AC.

La figure 1.14 représente de manière schématique la résistance d'un câble dans une distribution DC et les équations 1.1, 1.2, 1.3 et 1.4 forment en plusieurs étapes le calcul des chutes de tension et l'impact sur la puissance totale consommée.

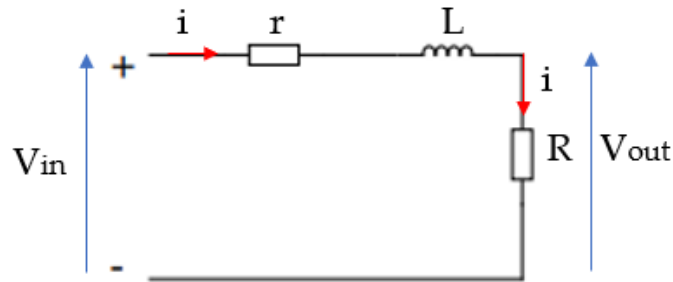


FIGURE 1.14 : Schéma d'une distribution DC dans un câble.[25]

La chute de tension relative est défini par la relation suivante :

$$\Delta v\% = \frac{100 \cdot I \cdot r}{V_{in}} \quad (1.1)$$

avec V_{in} la tension d'alimentation fournie en début de ligne (V) et i l'intensité (A) nécessaire et calculée à partir de la puissance requise par la charge.

$$r = \frac{\rho \cdot 2L}{S} \quad (1.2)$$

avec $\rho = 0.01724$ Ohm.mm²/m la résistivité du cuivre, L la distance (m) de câble multipliée par deux (l'aller retour est pris en compte en DC), et S est la section de câble (mm²). Ensuite, le pourcentage de chute de tension $\Delta v\%$.

Calcul des pertes en ligne :

$$P_{charge} = V_{out} \cdot i \quad (1.3)$$

$$P_{pertes} = i^2 \cdot r \quad (1.4)$$

$$P_{totale} = P_{charge} + P_{pertes} \quad (1.5)$$

avec i l'intensité traversant le câble (A), r la résistance du câble (Ω), V_{in} la tension d'alimentation fournie en début de ligne (V), V_{out} la tension mesurée aux bornes de la charge (V), R la résistance de la charge, P_{pertes} la puissance perdue (W) à travers le câble, P_{charge} la puissance consommée (W) par la charge et P_{totale} la puissance totale requise (W).

Identification des protections

Concernant le choix des protections dans les nano-réseaux, celles-ci doivent être déterminées en fonction des spécifications des appareils électriques terminaux (intensité maximale supportée, plage de tension de fonctionnement).

Par ailleurs, suite au calcul des chutes de tensions effectué, la puissance totale requise par la charge en DC (voir 1.5) indique également l'intensité totale nécessaire (A) comme indiqué en formule 1.6. Le calcul de l'intensité totale permet ainsi de prévoir une marge dans le choix du calibre des protections.

$$I_{totale} = \frac{P_{totale}}{V_{in}} \quad (1.6)$$

La contrainte majeure au choix des protections est le marché actuel des disjoncteurs DC. Le manque de demande a pour conséquence un manque de disponibilité et un coût élevé de ces composants. Cependant, la démarche pour le choix des protections ne diffère pas grandement d'une installation AC car comme précisé dans la table 1.6, les basses tensions requièrent des protections basiques.

Dimensionnement des sources de production et stockage d'énergie

Les nano-réseaux ont la capacité d'intégrer différentes sources d'énergies renouvelables (ou fossiles) pour la production locale d'électricité. Les travaux de thèse de *M. Riou* [24] ont été menés entre le laboratoire ENERGY-Lab, l'entreprise ENTECH et le CEA pour optimiser le dimensionnement des micro-réseaux isolés à forte intégration d'énergies renouvelables.

Dans le cadre de ces travaux de recherche, l'intégration de la ressource solaire photovoltaïque a été étudiée compte tenu de la disponibilité du gisement solaire de La Réunion et du besoin de mobiliser massivement les sources d'énergies renouvelables locales pour la production d'électricité.

Généralement, une étude de dimensionnement photovoltaïque est établie en cinq étapes pour déterminer le nombre de modules photovoltaïque nécessaires :

1. Réalisation d'un inventaire des consommations énergétiques des équipements.
2. Identification de la surface de toiture ou d'emprise au sol disponible.
3. Calcul du nombre de modules photovoltaïques nécessaires.
4. Estimation du pourcentage d'autoconsommation (%).
5. Calcul du temps de retour sur investissement.

Pour estimer le potentiel d'énergie solaire photovoltaïque disponible, différents outils et logiciels tels que pvGis [26] et PVsyst [27] ou encore le cadastre solaire réunionnais développé par Energies-Réunion (<https://www.cadastresolaire-reunion.re>) permettent d'estimer le potentiel de production d'un site.

Notes :

- L'outil pvGis estime par défaut à 14% les pertes d'énergie liées aux étapes de conversion et à l'échauffement des câbles dans toutes les installations PV. Les études et retours d'expériences sur le déploiement de

nouvelles architectures DC pourraient apporter une nouvelle option dans les logiciels de dimensionnement PV, permettant de faire évoluer la valeur des pertes selon l'architecture électrique retenue (convertisseurs AC/DC, DC/DC ou hybride) afin d'optimiser ainsi le nombre de modules photovoltaïques nécessaires.

- Les retours d'expériences montrent aussi que l'éducation des utilisateurs et l'automatisation dans la gestion des équipements permettent d'optimiser l'autoconsommation de l'énergie solaire. Dans le cas d'utilisation de panneaux photovoltaïques pour des habitations mobiles (camping-car, voiliers, etc) les utilisateurs ont appris qu'il est préférable d'utiliser l'énergie électrique disponible pour la recharge des ordinateurs et des téléphones durant la journée alors que la nuit l'usage est réduit à l'éclairage nécessaire. Dans le cas de la mise en place d'un plan de sobriété, la formation des utilisateurs présents dans le réseau sera donc un enjeu important pour la maîtrise des consommations.

Conclusion

D'après l'état de l'art réalisé sur les méthodologies de dimensionnement des nano-réseaux et le marché actuel des appareils DC, deux tensions de distribution sont favorisées pour l'élaboration des futures normes DC au sein des bâtiments : la tension 380V DC et la tension 48V DC. La tension 380V DC est mise en avant pour sa compatibilité avec les batteries et les bornes de recharge de véhicules électriques et son apport en termes de réduction des chutes de tension dans la distribution électrique. La tension 48V DC apporte l'avantage de la sécurité des usagers tout en permettant un gain d'efficacité sur les architectures avec des faibles distances de transmission et des puissances limitées. Des freins persistent concernant le marché actuel des appareils DC disponibles dans ces tensions de fonctionnement, d'où l'importance du développement de standards pour la conception. La prochaine section présente l'étape suivante au dimensionnement des nano-réseaux, qui est leur modélisation, afin d'évaluer leur efficacité énergétique et leur fonctionnement avant installation.

1.3.2 Méthodes d'évaluation de l'efficacité énergétique des nano-réseaux

Une fois le dimensionnement d'un nano-réseau réalisé, différents outils et logiciels de simulation permettent de le modéliser et d'évaluer son efficacité selon différentes architectures (AC, DC ou hybride) et modes d'opération (connecté ou déconnecté du réseau).

Dans cette sous-section, nous présenterons les études ayant réalisé des comparaisons en faisant varier un ou plusieurs de ces paramètres. Les conclusions de ces études permettent de mettre en évidence les points de vigilance à prendre en compte pour l'évaluation de l'efficacité des nano-réseaux qui sont listés dans la sous-section "points de vigilance" 1.3.2.

Outils et logiciels de modélisation des nano-réseaux

Plusieurs études de modélisation et de simulation du comportement de nano-réseaux, ou d'architectures de bâtiments DC (les termes employés peuvent varier selon les années de publications, mais les appellations actuelles convergent vers "nano-réseau DC") sont répertoriés dans la table 1.8.

TABLE 1.8 : Référencement des études comparatives d'efficacité énergétique de nano-réseaux.

Périmètre d'étude	Réf.	Outil de simulation	Validation exp.
Comparaison LVDC Nanogrid vs AC	[28]	HOMER Grid	✗
Nano-réseau DC connecté/iloté	[29]	OPAL-RT	✗
Nano-réseau PV-DC	[30]	Matlab Simulink	✗
Comparaison nano-réseau DC vs AC	[31]	Matlab Simulink	✗
Conversions DC-AC, AC-DC	[19]	Non renseigné	✗
Conversions DC-AC	[32]	Feuille de calcul excel	✗
Nano-réseau DC PV-batteries	[33]	Non renseigné	✓
Transmission 48 vs 380 VDC	[34]	eTap	✓
Architecture bâtiment DC	[35]	LabVIEW	✗
Nano-réseau LVDC	[36]	LTSpice	✗
Distributions AC vs DC	[37]	BEEAM	✗

Parmi les différentes études référencées en table 1.8, les outils de conception et modélisation de nano-réseaux les plus communément utilisés dans la littérature sont les suivants :

- **HOMER Grid** (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) : Logiciel dédié à l'optimisation des micro-réseaux et des systèmes énergétiques hybrides, focalisé sur l'analyse économique et technique pour faciliter la prise de décision.
- **Matlab simulink** : Environnement de simulation multi-domaines qui permet la modélisation, la simulation, et l'analyse de systèmes électriques dynamiques. Il contient des extensions pour le développement de systèmes de contrôle.
- **OPAL-RT** : Solution de simulation en temps réel et de prototypage rapide pour les systèmes électriques. La plateforme permet de tester les performances et la fiabilité des commandes et des systèmes de gestion de l'énergie. OPAL-RT a la possibilité de s'interfacer avec des modules Matlab.

L'atout majeur de ces logiciels réside dans leur capacité à intégrer une vaste gamme de paramètres et un niveau de précision élevé. De plus, l'interface utilisateur et les modules complémentaires bénéficient de mises à jour régulières, améliorant ainsi continuellement leur ergonomie. Toutefois, le coût de ces logiciels et leur

accessibilité limitée, tant dans le milieu académique qu'industriel, posent certaines barrières. Une mobilisation de la communauté scientifique pour développer des logiciels en libre accès (open source) pour l'étude des micro et nano-réseaux, pourrait permettre de faciliter et d'élargir l'adoption du courant continu pour de nombreuses applications dans les bâtiments, démocratisant ainsi son usage à une échelle plus vaste.

Ainsi dans le cadre de l'étude de *A. Othee et al.* [37], l'outil libre Building Electrical Efficiency Analysis Model (BEEAM) a été développé pour permettre de réaliser des comparaisons entre les types de distribution AC et DC dans les bâtiments. Cependant, comme la grande majorité des études référencées en table 1.8, davantage de validations expérimentales pourraient permettre de contribuer à améliorer la précision des modèles employés pour la réalisation des simulations de micro et nano-réseaux.

Dans ces études, différents points de vigilance sont mis en évidence par les auteurs pour réaliser des comparaisons pertinentes entre les types de distribution AC et DC qui sont listés dans la section suivante.

Points de vigilance pour l'évaluation du rendement des nano-réseaux

D'après les conclusions issues de la littérature sur l'efficacité énergétiques des nano-réseaux DC, les paramètres à fort impact peuvent être classés selon trois catégories telles que le dimensionnement, les fluctuations des flux de puissance et le rendement des différents éléments d'un nano-réseau, comme représenté en figure 1.15. Ces paramètres sont à considérer avec attention lors d'études comparatives entre les deux types de distribution électrique AC et DC.

Note : Ces paramètres constituent les points de vigilance à prendre en considération lors d'études comparatives entre la distribution AC et DC.

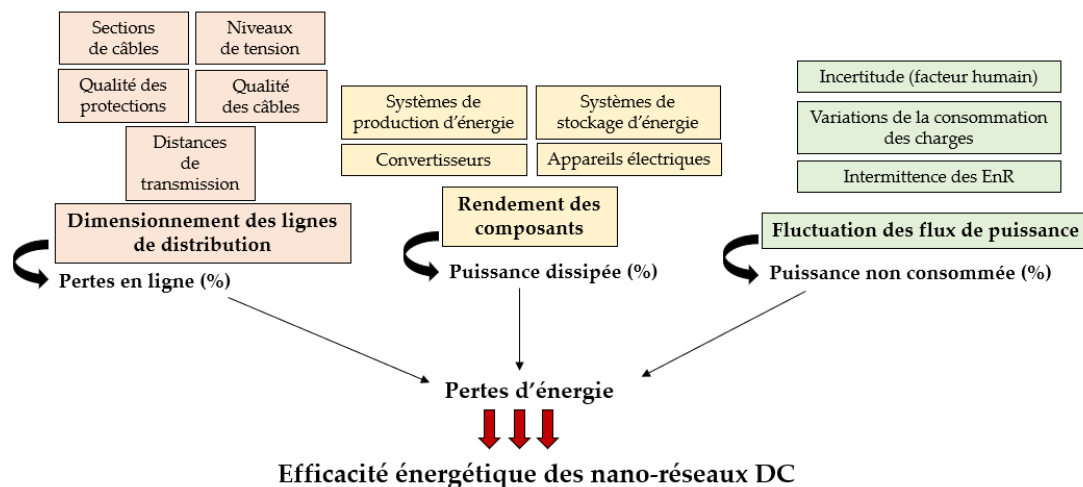


FIGURE 1.15 : Paramètres impactant l'efficacité énergétique des nano-réseaux DC.

- **Dimensionnement des lignes de distribution** : Comme indiqué en section 1.3.1, le dimensionnement des câbles et des sources de production d'énergie au sein du nano-réseau impactera son efficacité énergétique globale, la durée de vie des équipements, la consommation d'énergie en phase d'exploitation et la rentabilité de l'installation en considération de l'investissement initial. Un sous-dimensionnement du câblage entraînerait d'importantes pertes énergétiques, des risques d'échauffement des câbles et des systèmes électriques et induirait des risques sur la sécurité électrique.

- **Rendement des composants :**

- Sources d'énergie : Quelle que soit la source d'énergie (renouvelable ou fossile) le rendement du système de production impactera le rendement global du nano-réseau. Selon le marché actuel, les modules PV ont généralement un rendement énergétique de 20 à 25% et les éoliennes peuvent avoir un rendement allant jusqu'à 30%. Par ailleurs, le comportement de l'utilisateur impactera le pourcentage d'autoconsommation de l'énergie primaire du nano-réseau. Celui-ci correspond au rapport entre la quantité d'énergie consommée et celle produite de manière autonome par le nano-réseau. Celle-ci peut être calculée en temps réel ou sur une période donnée.
- Convertisseurs : Les convertisseurs DC-AC, AC-DC ou DC-DC (buck et/ou boost) sont dimensionnés pour une puissance nominale de fonctionnement. Leur rendement peut ainsi varier de 70% à 99% selon la puissance demandée. De ce fait, un convertisseur sous-exploité aura une chute de rendement, qui contribuera à faire chuter le rendement global du système, comme démontré dans l'étude de *H.E. Gelani et al.* [14].
- Charges électriques (Appareils électriques) : L'efficacité énergétique des appareils électriques utilisés impactera le rendement global du nano-réseau, dans la mesure où selon la conception des appareils, les niveaux de puissance consommée seront différents pour un même service. L'efficacité énergétique est ainsi quantifiée par un ratio entre l'énergie utile associée au service fourni par l'appareil et l'énergie consommée. A titre d'exemple, pour l'éclairage, ce rapport s'exprimera en lumens par watt (lm/W), en mètres cubes par watt-heure (m^3/Wh) pour la ventilation et par le Energy Efficiency Ratio (EER) en (BTU/h/W) pour la climatisation.

- **Fluctuation des flux de puissance** : L'intermittence des énergies renouvelables variables (EnRV) entraîne l'éventualité d'une production d'énergie asynchrone à la consommation des charges dans un nano-réseau. Contrairement aux réseaux électriques centralisés, où un opérateur de réseau tel que RTE maintient en continu l'équilibre entre l'offre et la demande, les périodes de production des énergies renouvelables ne coïncident pas toujours avec les périodes de consommation. C'est dans ce contexte que le stockage d'énergie peut jouer un rôle déterminant pour équilibrer l'offre et la demande d'énergie sur une plage horaire à définir. Il est cependant nécessaire d'implémenter des fonctions de gestion pour assurer les fonctions de régulation et de répartition de l'énergie au sein du nano-réseau.

Par ailleurs, le facteur humain est un paramètre qui doit être également pris en compte dans l'incertitude de la fluctuation des flux de puissance car quel que soit le système de gestion de l'énergie développé, le comportement de l'utilisateur est déterminant sur les pertes énergétiques. Par exemple, l'ouverture de fenêtres malgré l'activation de systèmes de refroidissement ou de chauffage est un comportement à fort impact puisqu'il entraîne un surplus de consommation d'énergie lié aux déperditions thermiques. Un oubli d'extinction d'appareils non utilisés et non automatisés ou encore le branchement permanent des adaptateurs de conversions sont d'autres comportements à impact énergétique négatif.

Conclusion

L'état de l'art sur l'efficacité énergétique des nano-réseaux montre ainsi que le rendement global du système dépend de facteurs multi-paramètres. Les choix réalisés en phase de conception, le choix des équipements, le dimensionnement des sources de production d'énergie, des câbles et des protections, sont déterminants pour maximiser la production d'énergie, minimiser les pertes d'énergie liées aux convertisseurs et les pertes en ligne. En phase d'exploitation, le rendement du nano-réseau dépend de la gestion des flux de puissance produite, consommée ou stockée. Une gestion optimale permettrait de stocker au moment opportun les surplus de production d'énergie pour en disposer lors de périodes de consommation qui ne coïncident pas forcément

avec les phases de production. Ainsi, les pertes d'énergie liées à un faible pourcentage d'autoconsommation impacteront également l'efficacité énergétique du nano-réseau.

Dans la prochaine section seront présentés les Systèmes de Gestion de l'Énergie (SGE) ou Energy Management System (EMS). Le rôle des EMS est de contribuer à l'amélioration de l'efficacité énergétique des nano-réseaux, en implémentant des fonctions de contrôle et de gestion des flux de puissance en phase d'exploitation.

1.3.3 Modèles d'Energy Management System (EMS) pour le contrôle des nano-réseaux

Définition d'un Energy Management System (EMS)

D'après *S. Ali et al.* [38] et *S. Jamal et al.* [39], un Energy Management System (EMS) utilisé dans le contexte des micro et nano-réseaux est un système multi-objectifs prenant en compte les aspects techniques, économiques et environnementaux. Ses objectifs principaux sont d'optimiser les flux d'énergie, la stabilité et la fiabilité du système (aspect technique), tout en considérant d'une part des contraintes liées au coût (aspect économique) et d'autre part l'impact carbone et environnemental de la source d'énergie.

Pour réaliser les objectifs de l'optimisation, l'EMS est connecté à chaque partie du nano-réseau pour effectuer des mesures, des commandes de régulation et de pilotage. Comme détaillé en section 1.3.3, le contrôle réalisé par l'EMS peut s'exécuter de manière centralisée ou décentralisée de chaque élément qui constitue le nano-réseau, grâce à un contrôleur général et des contrôleurs locaux. L'EMS peut agir en mode connecté ou déconnecté du réseau, selon les architectures détaillées en section 1.2.3.

Protocoles de communication d'un EMS

Les échanges d'information entre les différents contrôleurs s'effectuent grâce à un réseau de communication appelé Technologie de l'Information et de la Communication (TIC) [38]. Ce réseau de communication peut être intégré à la fois des capteurs de l'Internet des Objets (IoT), d'équipements domotiques, des compteurs d'énergie communicants, commutateurs communicants, ou encore des relais communicants. Les protocoles de communication employés peuvent varier selon les spécificités de chaque cas d'application et peuvent être classés de manière non exhaustive comme suit :

- **Protocoles filaires** : Ethernet, Modbus, Power Over Ethernet (PoE), Single Pair Ethernet (SPE), Power Over Digital Line (PoDL), Controller Area Network (CAN).
- **Protocoles sans fils** : Wifi, Bluetooth, Zibgee, Z-wave, LoRa/LoRaWAN, NB-IoT, Sigfox.

Contrôle centralisé ou décentralisé

Au niveau de la gestion des éléments à l'intérieur d'un micro ou nano-réseau, le contrôle peut être centralisé ou décentralisé. La décision d'adopter une gestion centralisée ou décentralisée dépend des objectifs spécifiques attribués à l'installation, de la taille et de la complexité du micro-réseau, des coûts d'infrastructure, et du niveau de résilience et d'autonomie souhaitée.

Certains micro-réseaux peuvent adopter une approche hybride, combinant des éléments de gestion centralisée et décentralisée pour exploiter les avantages des deux modes :

Mode centralisé : Dans une gestion centralisée, un système de gestion central prend les décisions concernant la production, la distribution, le stockage, et la consommation d'énergie au sein du micro-réseau. Ce système peut optimiser l'ensemble du micro-réseau pour l'efficacité, la fiabilité et la durabilité, en prenant en

compte les prévisions de demande et d'offre d'énergie. Le contrôle centralisé facilite l'intégration des sources d'énergie renouvelable et la réponse à la demande, mais il peut être vulnérable aux pannes centralisées car elles impacteront le micro-réseau dans sa globalité. Il nécessite des systèmes de communication robustes entre les différents éléments. Sur le schéma 1.16, le Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) correspond à l'interface utilisateur permettant à la fois de superviser les mesures du système et d'effectuer des commandes.

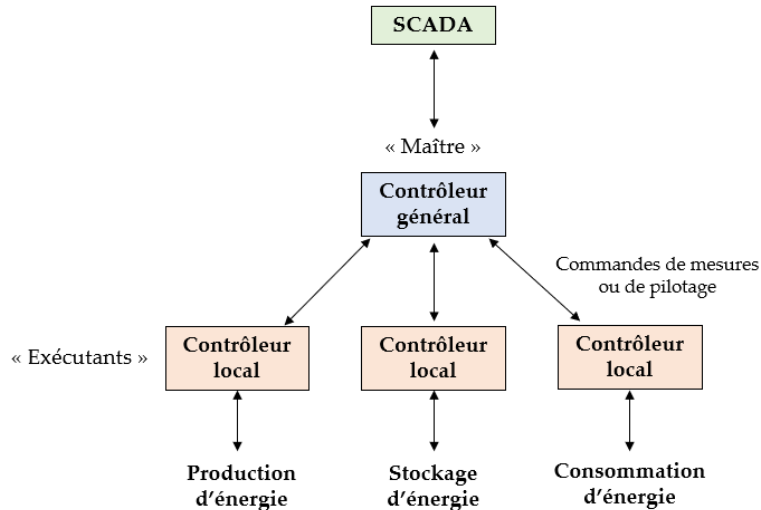


FIGURE 1.16 : Schéma de fonctionnement d'un contrôle centralisé dans un micro ou nano-réseau.

Mode décentralisé : La gestion décentralisée d'un micro-réseau implique une approche plus distribuée, où les différents composants du micro-réseau (comme les générateurs d'énergie renouvelable, les unités de stockage d'énergie, et les charges contrôlables) fonctionnent de manière autonome et n'ont pas à suivre les consignes d'un système de gestion central. Cette autonomie peut augmenter la résilience du système en permettant une réponse rapide aux perturbations locales, sans nécessiter une communication constante avec le contrôleur général. Cependant, cela peut rendre plus complexe l'optimisation du micro-réseau pour des objectifs globaux car cela nécessite une coordination et une communication de qualité entre les éléments.

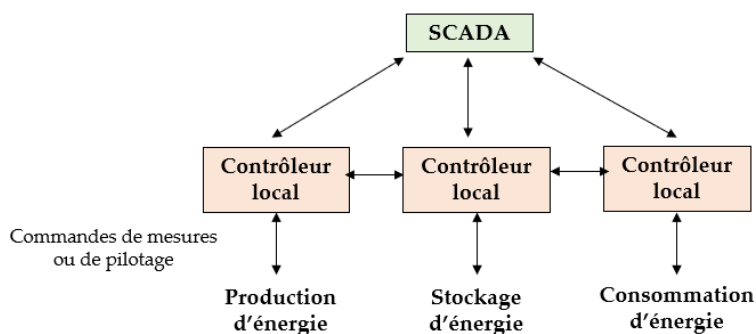


FIGURE 1.17 : Schéma de fonctionnement d'un contrôle décentralisé dans un micro ou nano-réseau.

Les objectifs de contrôle d'un nano-réseau

Le contrôle du nano-réseau est décomposé en différents objectifs : primaires, secondaires et tertiaires. Chacune de ces couches est responsable d'une certaine catégorie d'éléments qui constituent le nano-réseau.

Le contrôle primaire est mis en œuvre sur chaque génération distribuée (DG) locale selon une stratégie de contrôle décentralisé. L'objectif est essentiellement de réguler les tensions et les courants locaux. Il contrôle également les disjoncteurs et les interrupteurs (fonctions marche/arrêt et protection) et le contrôle de charge (fonctions de réduction). Le contrôle primaire peut engendrer des variations de tension du bus de distribution, en particulier lorsque des charges lourdes sont connectées ou déconnectées du micro-réseau. Le système pourrait alors fonctionner de manière anormale ou basculer en protection contre les surtensions ou les sous-tensions.

Le contrôle secondaire permet ainsi d'assurer une stratégie de contrôle distribué pour l'amélioration générale de la qualité de la tension, telle que la compensation du déséquilibre de tension. Pour réguler la tension du bus DC, le contrôle de la chute de tension du bus est recommandé pour renforcer le contrôle de tension des micro-réseaux. Le schéma de contrôle proposé doit être flexible et de ce fait chaque contrôleur serait doté de la propriété plug-and-play (PnP).

Un contrôle tertiaire est mis en œuvre pour tenir compte des problèmes de flux de puissance optimal, de dispatching économique et de planification énergétique optimale dans le micro-réseau. Il constitue ainsi un EMS (Système de Gestion de l'Énergie). L'EMS utilise des entrées (prévisions météorologiques, demande de charge, état de charge des batteries, prix de l'énergie, etc.) pour effectuer des procédures de planification et d'optimisation. Son algorithme détermine les points de consigne optimaux pour la génération distribuée (DG) et le mode d'opération des charges électriques dans le micro-réseau.

Pour réaliser ces objectifs, il existe différentes méthodes employées dans les EMS qui sont détaillées dans la prochaine sous-section.

Algorithmes classiques et algorithmes d'Intelligence Artificielle intégrés à un Energy Management System (EMS)

Selon [38] les types d'algorithmes utilisés par les EMS, ces derniers peuvent être classés en deux grandes catégories : les EMS basés sur des algorithmes classiques et les EMS élaborés à l'aide méthodes relevant de l'Intelligence Artificielle (IA) :

- **Les algorithmes classiques** tels que les algorithmes itératifs, les méthodes de programmation linéaire, la programmation MILP (Mixed-Integer Linear Programming), les techniques stochastiques ou les modèles prédictifs sont présents dans les EMS standards.

Ces méthodes classiques de gestion de l'énergie, comme la Programmation Linéaire Mixte Entière (MILP), les modèles prédictif linéaires ou non linéaires, reposent sur une modélisation explicite du système énergétique, des contraintes et des objectifs clairement définis. L'objectif de ces méthodes est d'obtenir des solutions optimales à des problèmes spécifiques. Elles sont efficaces pour des systèmes aux dynamiques bien définies et pour des systèmes de dimensions modérées. Toutefois, des difficultés d'intégration d'échelle et de complexité algorithmique peuvent survenir pour des systèmes de grande taille ou dont la dynamique est importante.

- **Les processus de l'IA** sont basés sur des algorithmes tels que les réseaux de neurones, les algorithmes évolutionnaires, la logique floue et les systèmes multi-agents. Ces méthodes sont basées sur des modèles paramétriques, un processus d'optimisation des paramètres et des données d'apprentissage. Ces méthodes permettent ainsi de former des relations complexes et non linéaires sans nécessiter une modélisation mathématique explicite du problème. Ces méthodes offrent une flexibilité et une adaptabilité se prêtant à des systèmes perturbés, y compris par des aléas et à la gestion de grandes quantités de données. Toutefois, cette catégorie de modélisation est de type "boîte noire" et nécessite des bases de données

massives pour leur apprentissage.

En définitive, tandis que les approches classiques excellent dans des cadres bien définis avec des solutions mathématiquement optimales, les méthodes d'IA offrent une puissante capacité d'adaptation et de généralisation à des scénarios variés et complexes.

Problèmes linéaires et non linéaires

- **Les problèmes sont linéaires** lorsque les relations entre les variables d'entrée, de sortie et les paramètres sont linéaires. La résolution des modèles mathématiques associées peut être efficace via des méthodes mathématiques bien établies. Leur structure simplifie la recherche de solutions optimales, souvent uniques ou bien définies.
- **Les problèmes non linéaires** incluent au moins une relation ou contrainte non linéaire, complexifiant significativement l'ensemble des solutions possibles et pouvant mener à de multiples optima locaux. Leur résolution nécessite des techniques d'optimisation avancées et souvent un calcul intensif pour naviguer dans leur paysage de solution plus complexe.

Application du modèle Mixed Integer Linear Programming (MILP)

Les modèles MILP (Programmation Linéaire en Nombres Mixtes) permettent de résoudre des problèmes d'optimisation complexes où certaines variables peuvent prendre uniquement des valeurs entières. Ces modèles sont particulièrement utiles pour la gestion de l'énergie et la planification des ressources, car ils peuvent intégrer à la fois des décisions binaires (par exemple, allumer ou éteindre un équipement) et des décisions continues (comme la quantité d'énergie à produire ou consommer). Leur principal avantage réside dans la capacité à trouver des solutions optimales ou quasi-optimales pour des systèmes complexes, en tenant compte des contraintes opérationnelles et techniques.

Au cours de cette thèse, la méthode MILP a été étudiée dans le cadre d'une collaboration avec l'équipe du projet ReFLEX en s'appuyant en particulier sur les travaux de *B. Couraud et al.* [40] afin d'étudier l'optimisation du stockage thermique au sein des bâtiments. Une des raisons qui a introduit cet axe de recherche au sein de ces travaux est la synthèse des sites expérimentaux de micro et nano-réseaux, référencés dans la section suivante.

1.3.4 Référencement de sites expérimentaux de micro et nano-réseaux

Le projet de micro-réseau AC intelligent "NICE Grid" à Carros, France

Le projet "NICE Grid" [41] piloté par ERDF a été déployé en France, dans les Alpes maritimes, à Carros, et étudié entre 2012 et 2017 dans le but d'intégrer une forte proportion de production d'électricité photovoltaïque locale, expérimenter des unités de stockage d'énergie, et d'implanter des équipements électriques communicants chez les foyers volontaires.

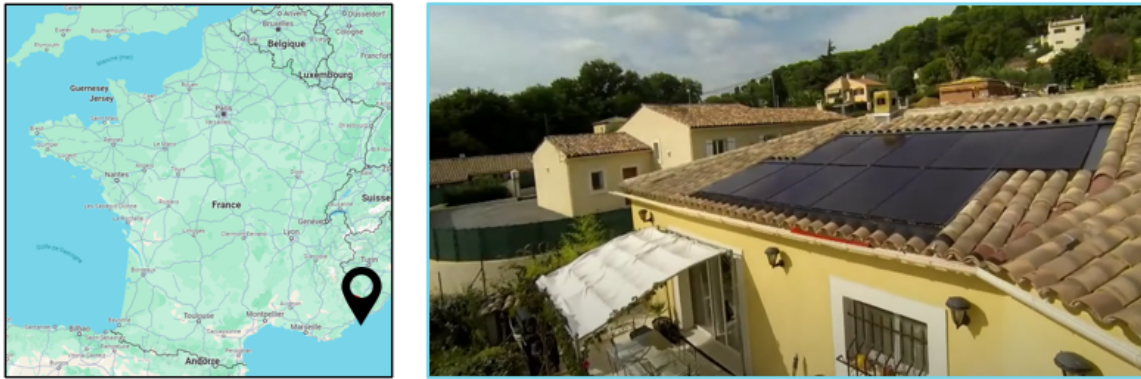


FIGURE 1.18 : Localisation du projet smart grid "NICE Grid" à Carros (06), France.

TABLE 1.9 : Présentation du micro-réseau expérimental "Nice-Grid".

Ref.	Date et lieu	Objectifs	Architecture	Rôle de l'EMS	Retours d'exp.
[41]	Carros (06) 2012-2017.	Tester l'intégration PV, la fonction "îlotage" et la flexibilité de la demande. Améliorer la gestion des pics de consommation.	217 foyers alimentés par le réseau de la ville et par des architectures PV-Batteries-Distribution AC.	Contrôle tertiaire : Maximisation des EnR, gestion de certaines consommations et du stockage pour assurer la sécurité du réseau.	Augmentation de la résilience face aux pannes. Complexité de l'intégration des différents systèmes. Nécessité d'une participation active des consommateurs. Questions réglementaires.

Objectifs : L'ambition du projet était de transformer le consommateur en un "consomm'acteur", capable de gérer son poste énergie de manière optimisée et consciente. Le projet visait également à tester la capacité technique d'îlotage, permettant à une partie du réseau de fonctionner de manière autonome en cas de besoin, ainsi qu'à démontrer l'efficacité de solutions de stockage comme flexibilité pour la conduite et l'exploitation du réseau électrique.

Un total de 217 foyers situés à Carros, ont participé activement au projet, notamment en expérimentant la solution "Chauffage piloté" et "Économies volontaires" pour participer à la maîtrise des pics de consommation électrique et à la réduction des émissions de CO₂. De plus, dans le cadre du projet, EDF avait pour objectif d'accompagner la mise en œuvre d'installations de production d'électricité photovoltaïque chez 100 propriétaires de maisons individuelles sur certains territoires de cette commune.

Résultats : Plusieurs résultats pertinents ont été obtenus sur le projet NICE Grid dans différents domaines. Les expérimentations ont démontré l'importance de l'implication des "consomm'acteurs" et la nécessité d'une

large participation pour maximiser l'effort de gestion de la consommation et de production d'énergie. Il a été mesuré une réduction moyenne de 22% de la consommation d'électricité lors des jours de pointe parmi les foyers participants. Le projet a également prouvé l'efficacité des solutions de stockage et la contribution cruciale de l'infrastructure Linky dans la mise en œuvre de solutions intelligentes à bas coût. Cependant, des défis restent à surmonter, notamment en ce qui concerne le cadre normatif pour l'installation des batteries et les coûts associés à ces technologies innovantes.

Les micro et nano-réseaux DC de l'entreprise Nanoé à Madagascar

L'entreprise Nanoé est spécialisée dans le déploiement de nano-réseaux DC pour les sites ruraux n'ayant pas accès à l'électricité à Madagascar. Dans le cadre de la thèse de *L. Richard* [42], des modules d'interconnexion basés sur l'électronique de puissance, ont été développés et testés expérimentalement pour contrôler le partage de l'énergie entre les nano-réseaux déployés et interconnectés.



FIGURE 1.19 : Localisation des nano-réseaux DC déployés par l'entreprise Nanoé dans le nord de Madagascar.

TABLE 1.10 : Présentation des micro-réseaux DC déployés par l'entreprise Nanoé à Madagascar.

Ref.	Date et lieu	Ojectifs	Architecture	Rôle de l'EMS	Retours d'exp.
[42]	Madagascar Depuis 2017.	Apporter des solutions d'électrification pour les sites ruraux à Madagascar. Autonomie énergétique.	24 nano-réseaux DC interconnectés en micro-réseaux (tensions 48, 24 ou 12 utilisées).	Contrôle secondaire : Assurer le contrôle du partage d'énergie entre les différents micro et nano-réseaux.	La gestion de l'énergie à l'échelle des nano-réseaux peut contribuer à la stabilité globale du partage d'énergie dans les micro-réseaux.

Objectifs : Les principaux objectifs de ces travaux de recherche visaient à améliorer la stabilité entre différents nano-réseaux DC constituant des micro-réseaux DC. Les modules d'interconnexion entre les nano-réseaux ont été développés en laboratoire et testés expérimentalement avec succès sur le terrain à Madagascar.

Résultats : Le résultat majeur de ce projet est la validation de fonctionnement d'installations réelles de déploiement de micro-réseaux DC avec production, stockage et gestion de l'énergie décentralisée. Un élément intéressant des conclusions de ce projet est "qu'il pourrait y avoir davantage de flux d'énergie sur les

micro-réseaux à l'avenir après l'optimisation de leurs panneaux solaires et de leur parc de batteries, réduisant la quantité de temps pendant laquelle les modules d'interconnexion maintiennent une tension de bus DC sans échanger d'énergie, donc moins de situations dans lesquelles les stratégies de déconnexion seraient pertinentes." Ainsi, améliorer individuellement l'efficacité énergétique de la distribution DC à l'échelle des nano-réseaux pourrait contribuer à améliorer l'efficacité énergétique globale à l'échelle de micro-réseaux.

Les micro-réseaux DC de la communauté Living Energy Farm, état de Virginie, USA.

La communauté Living Energy Farm (LEF) localisée dans l'état de Virginie aux USA est constituée d'une douzaine de personnes vivant depuis plusieurs années en autonomie énergétique et alimentaire, à l'aide de micro-réseaux DC.



FIGURE 1.20 : Localisation des micro-réseaux DC de la communauté Living Energy Farm (LEF) aux USA.

En s'appuyant sur les informations recueillies par le Low-tech Lab lors de leur visite à LEF [43], nous avons résumé les principales caractéristiques des micro-réseaux DC mis en œuvre par la communauté dans le tableau 1.11.

TABLE 1.11 : Présentation des micro-réseaux DC de la communauté Living Energy Farm (LEF), USA.

Ref.	Date et lieu	Ojectifs	Architecture	Rôle de l'EMS	Retours d'exp.
[44]	Etat de Virginie, USA Depuis 2012.	Limiter l'utilisation aux composants électroniques et diminuer le recours au stockage d'électricité. Autonomie énergétique.	Différentes centrales PV dépendant des niveaux de tension des équipements terminaux. Batteries Fer-Nickel (NiFe) de seconde vie et stockage thermique.	Pas d'EMS.	L'utilisation de moteurs universels est un avantage pour pallier aux chutes de tension liées à l'intermittence de l'énergie solaire et les batteries Nickel ont une forte durabilité. Les usages des consommateurs dépendent de la disponibilité de l'énergie solaire.

Objectifs : La communauté souhaite favoriser le "daylight drive" soit d'ajuster leurs usages pour utiliser au maximum la production d'énergie photovoltaïque et de réduire au minimum le recours aux systèmes de stockage d'électricité. Afin de répondre à cet objectif, les habitants de LEF ont choisi de réduire leurs besoins en électricité et le recours aux composants électroniques grâce aux actions suivantes :

- Utilisation du **stockage thermique** grâce à des pompes à air chaud : durant la journée, les pompes sont

actives grâce à l'énergie solaire disponible et la chaleur stockée permet d'assurer un confort à l'intérieur des habitations durant la nuit.

- Mise en place de **plusieurs centrales PV décentralisées** : afin de ne pas utiliser de régulateurs de tension, les modules PV sont assemblés en série selon les tensions de fonctionnement des équipements (120V DC pour les moteurs universels, 12V DC pour les batteries).
- Utilisation d'appareils électriques à forte **efficacité énergétique** : Les réfrigérateurs et congélateurs utilisés ont une forte isolation thermique. De ce fait, le refroidissement produit durant la journée est stocké thermiquement à l'intérieur des équipements durant la nuit, ce qui permet de ne pas avoir recours à l'électricité jusqu'au lendemain pour ces appareils.
- Raccordement des **batteries aux charges électroniques** : Durant la nuit, les seuls appareils connectés aux batteries sont les petits appareils électroniques (ordinateurs, téléphones portables) et l'éclairage par leds.

Résultats : Les actions de sobriété énergétique mises en place par la communauté LEF permettent de mettre en évidence la faisabilité de réaliser des installations fonctionnelles de bâtiments alimentés en courant continu. Toutefois, il est à noter que pour assurer la réussite de leur fonctionnement, les habitants de cette communauté ont fortement ajusté leurs usages : les activités de la ferme dépendent de l'énergie solaire disponible et les personnes sont responsables de l'allumage et extinction des appareils car il n'y a pas de systèmes de gestion de l'énergie ou de composants électroniques pouvant assurer un pilotage automatique. Par ailleurs, les chutes de tensions pouvant être occasionnées par l'intermittence de l'énergie solaire nécessitent d'utiliser des moteurs ou appareils ayant une plage de tension de fonctionnement élargie afin d'éviter l'endommagement des appareils.

La maison "DC Nanogrid House" rattachée à l'Université de Purdue, état d'Indiana, USA

Dans le cadre de la thèse de *J. Ore* [45] rattachée à l'Université de Purdue (Virginie, USA), une maison ayant une architecture électrique conventionnelle a été entièrement rénovée en nano-réseau DC entre 2018 et 2021. Des étudiants ont habité la maison avant, durant et après les modifications afin de permettre une analyse de données de consommations énergétiques réelles.



FIGURE 1.21 : Localisation de la maison "DC Nanogrid House" de l'université de Purdue aux USA.

TABLE 1.12 : Présentation du nano-réseau DC "The DC Nanogrid House", Indiana, USA.

Ref.	Date et lieu	Ojectifs	Architecture	Rôle de l'EMS	Retours d'exp.
[45]	Etat d'Indiana, USA Depuis 2018.	Rénover entièrement une maison conventionnelle en maison alimenté en courant continu.	PV-batteries Lithium-Ion. Distribution 380V et conversions DC-DC (48, 5, 3V DC selon les usages). Déploiement de réseaux de capteurs et modules IoT (Internet des Objets).	Pas d'EMS implémenté mais une infrastructure de réseaux de capteurs intérieurs, une station météo et une supervision des données ont été mis en place.	Le système de pompe à chaleur étant le plus gros poste de consommation d'énergie, son adaptation en courant continu alimenté directement par les PV peut permettre d'améliorer fortement l'efficacité énergétique.

Objectifs : Les principaux objectifs de ces travaux de recherche étaient d'améliorer l'efficacité énergétique d'une maison résidentielle existante en réalisant une conversion de l'architecture électrique en distribution DC. Les auteurs ont été confrontés aux problèmes techniques de l'adaptation d'appareils électriques AC en DC et une instrumentation ainsi qu'une analyse de la consommation énergétique de la maison a été réalisée avant et après les rénovations. Différents protocoles de communication ont été utilisés pour les réseaux de capteurs tels que Wifi, Zigbee, I2C, SPI et en particulier la technologie Power Over Ethernet (PoE).

Résultats : L'adaptation des équipements existants AC en prototypes d'appareils équivalents en DC est l'action qui a imposé le plus de difficultés, en raison de l'absence de standardisation des équipements. L'efficacité énergétique du système de pompe à chaleur AC (le poste de consommation d'énergie le plus important de l'habitat) converti en version 350V DC a été fortement analysé grâce à une évaluation psychométrique. Toutefois, l'analyse de l'efficacité énergétique de la pompe DC prenait uniquement en compte son rendement, propre à l'appareil et non la chaîne d'alimentation complète : PV-onduleur-pompe AC ou PV-pompe DC.

Les micro-réseaux AC dans le Cirque de Mafate à La Réunion

Le Cirque de Mafate à La Réunion est le seul des trois cirques de l'île n'ayant pas d'accès routier. De ce fait, les 900 habitants sont répartis sur plusieurs îlets, correspondant à des petits villages en autonomie énergétique. Les habitations ont accès à l'électricité grâce à des centrales photovoltaïques, des batteries au plomb ou lithium-ion et des groupes électrogènes en cas de besoin, pour les appareils résistifs ayant des forts appels de puissance. La distribution électrique des habitations est réalisée selon la norme NFC 15-100 en 230V AC. L'eau chaude des habitations est obtenue grâce à des panneaux solaires thermiques et concernant la cuisine, la cuisson au feu de bois est majoritairement utilisée, avec quelques fois le recours au gaz. L'approvisionnement alimentaire ou matériel, l'évacuation des déchets et les interventions de maintenance des installations électriques des îlets sont réalisés par des déplacements en hélicoptères.

Note : D'après les témoignages des habitants et des installateurs photovoltaïques de La Réunion, les premières installations électriques des sites isolés sur l'île étaient alimentées en 24V DC. Cependant, compte tenu du manque de disponibilités du marché des appareils fonctionnant en basse tension DC, les architectures électriques ont progressivement évolué vers des architectures conventionnelles AC. Par ailleurs, les mêmes installateurs ont également indiqué que la réparation ou le remplacement des onduleurs sur les habitations étaient leurs principales interventions de maintenance.

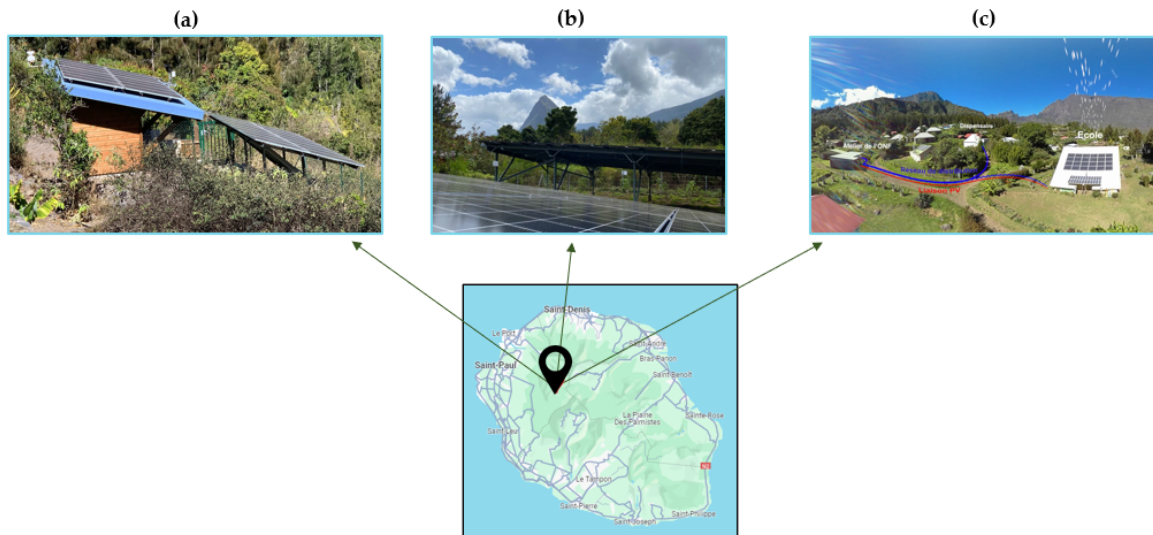


FIGURE 1.22 : Localisation des micro-réseaux dans les îlets de Roche-Plate (a), Ilet à Bourse (b) et La Nouvelle (c) dans le Cirque de Mafate à La Réunion.

Objectifs : Afin de diminuer la dépendance des habitants aux groupes électrogènes et augmenter leur autonomie énergétique en cas de manque de production d'énergie photovoltaïque, 3 projets de micro-réseaux expérimentaux AC [46, 47, 48] localisés en figure 1.22 ont été déployés entre 2017 et 2022. Différentes architectures et modèles de gestion de l'énergie ont été testés. Une synthèse des caractéristiques de ces installations est présentée en table 1.13.

Résultats :

- Micro-réseau à La Nouvelle : Le retour d'expérience de ce projet a mis en évidence l'importance du dimensionnement des micro-réseaux afin d'augmenter la durée de vie des composants, en particulier des systèmes de stockage. Dans le cadre d'infrastructures existantes, une piste pourrait être de réaliser des instrumentations de la consommation d'énergie en amont du déploiement de l'interconnexion des bâtiments, afin d'optimiser le dimensionnement des centrales PV et systèmes de stockage.
- Micro-réseau à Roche-Plate : Ce projet a démontré la complexité de mettre en place un système de gestion de l'énergie adapté aux contraintes des utilisateurs tout en étant ergonomique. Ceci met en évidence l'aspect sociologique de la gestion de l'énergie.

TABLE 1.13 : Présentation des micro-réseaux AC localisés dans le Cirque de Mafate à La Réunion.

Ref.	Date et lieu	Ojectifs	Architecture	Rôle de l'EMS	Retours d'exp.
[46]	Ilet à bourse, depuis 2022.	Tester une production PV centralisée dans le cadre d'un micro-réseau destiné à alimenter plusieurs foyers	PV-batteries Lithium-Ion et distribution AC.	Pas d'EMS mais un volet d'accompagnement en matière de maîtrise de la demande d'énergie prévu.	Pas encore de retours d'expérience disponibles à ce jour.
[47]	Ilet de Roche-Plate, depuis 2018.	Implémenter un EMS pour améliorer l'efficacité du micro-réseau avec une supervision à distance.	PV-batteries Lithium-Ion et distribution AC pour plusieurs foyers.	Contrôle tertiaire : Tester différents scénarios de gestion de la demande par simulation (faible, moyenne et forte implication des utilisateurs) et proposer des actions aux utilisateurs à l'aide d'indicateurs de couleur sur une interface.	L'implication des utilisateurs peut avoir un fort impact sur les économies d'énergie (jusque 22%).
[48]	Ilet de La Nouvelle, depuis 2017.	Tester le stockage hybride à court et long terme (Batteries et chaîne hydrogène) pour une école et le local de l'Office National des Forêts (ONF).	PV-batteries Lithium-Ion- électrolyseur, stockage d'hydrogène et pile à combustible. Distribution 230V AC.	Pas d'EMS.	Un surdimensionnement du système de stockage par batteries peut entraîner une non-utilisation de la chaîne hydrogène et engendrer une dégradation des composants.

Synthèse des retours d'expérience des sites expérimentaux

D'après les retours d'expériences des sites expérimentaux de micro et nano-réseaux AC et DC référencés précédemment, les points de vigilance suivants ont été identifiés pour l'amélioration de leur efficacité énergétique en phase de conception et d'opération :

1. **L'impact utilisateur** peut avoir une importance majeure dans l'amélioration de l'efficacité énergétique des micro-réseaux. Le recours aux énergies renouvelables, intermittentes, implique dans chacun des sites expérimentaux référencés une formation à la gestion de l'énergie et une adaptabilité des utilisateurs.
2. Il a été confirmé expérimentalement que **la non standardisation** des appareils électriques DC peut engendrer des difficultés pour la transition des infrastructures AC vers DC (ou hybride AC et DC).
3. **La stabilité** des micro-réseaux peut être améliorée par des algorithmes de contrôle optimisés et une amélioration de l'efficacité énergétique à l'échelle des nano-réseaux.
4. **Le stockage thermique** est une piste de recherche intéressante pour maximiser l'autoconsommation PV et diminuer la sollicitation des systèmes de stockage sur batteries. Cette solution pourrait potentiellement améliorer l'efficacité énergétique des installations DC tout en augmentant la durée de vie des systèmes de stockage.

A partir de ces éléments, le périmètre d'études de ces travaux a été défini et est présenté dans la section suivante.

1.4 Périmètre d'étude de la thèse : Application de la démarche Low-tech

1.4.1 Définition des Low-tech

Apparue dans les années 1970, la démarche "Low-tech" vise à adopter des technologies simples, durables et accessibles, minimisant l'usage des ressources et l'impact environnemental. Elle privilégie les solutions qui sont faciles à utiliser, à réparer et à recycler, tout en étant économiquement viables. Cette approche se concentre sur l'efficacité et la suffisance, en cherchant à répondre aux besoins fondamentaux avec le minimum de moyens technologiques complexes ou coûteux. Inspirée de la définition proposée par *Arthur Keller et Emilien Bournigal*, la figure 1.23 regroupe les principes de la démarche Low-tech.

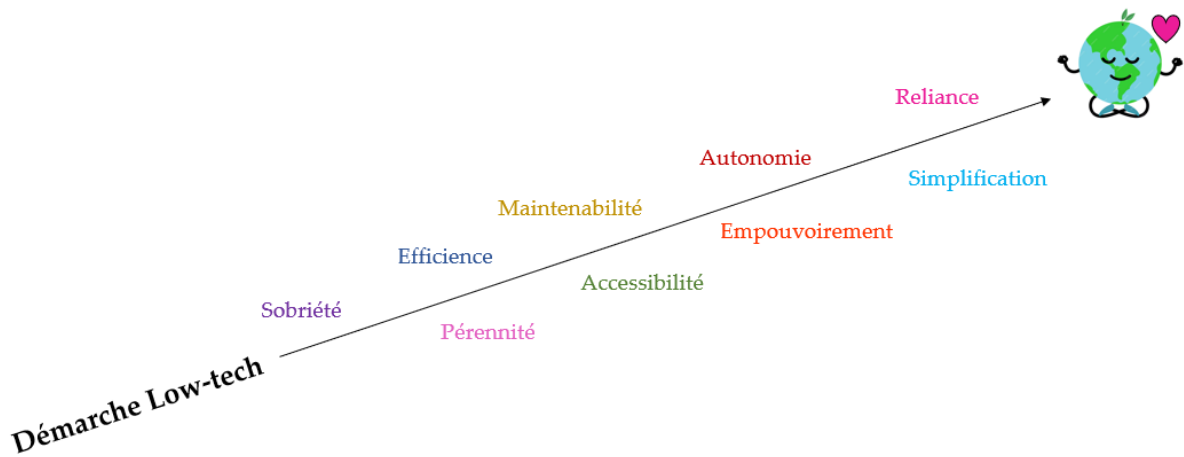


FIGURE 1.23 : Schéma récapitulatif des principes low-tech inspiré de l'infographie "Low-tech : Assurer durablement l'essentiel pour tous" [49].

De manière plus concrète, "la fresque des low-tech par VITO" publiée en 2021 par G. Guimbretière et al. [50], est une illustration regroupant une quantité d'exemples low-tech dont notamment :

- **Le four solaire** dont le but est de capter et concentrer l'énergie solaire par des réflecteurs, sans utiliser de combustibles ni dégager de fumée.
- **L'éolienne Piggott et les mini hydrauliques** qui sont des infrastructures à échelle humaine, facilement réparables et accessibles. Une thèse est d'ailleurs actuellement en cours avec comme objectif d'améliorer le pilotage et le rendement des petits générateurs utilisés pour l'éolien domestique en lien avec les travaux de A. Prévost et al. [51].
- **Machines à manivelle et pédaliers** permettant de faciliter des actions mécaniques telles que la rotation d'un moteur à l'aide d'un pédalier (très bon rendement), activer une machine à coudre ou produire de l'électricité tout en faisant une activité physique grâce à l'effet levier.

Concernant le domaine de l'informatique, la fresque des "low-tech" soulève un point intéressant sur le besoin de "compatibilité universelle des écrans, ordinateurs, batteries" dans une partie des appareils électriques DC. Ce besoin entre en cohérence avec l'absence de normes officielles pour la distribution DC, un des freins non techniques relevé dans l'état de l'art en section 1.1.4. La prochaine section décrit de quelle manière ces travaux proposent de contribuer à un besoin local de La Réunion concernant les enjeux énergétiques tout en appliquant les principes de la démarche low-tech dans le secteur tertiaire, et en contribuant à l'axe de recherche de la distribution DC dans les nano-réseaux.

1.4.2 Contributions de la thèse

Contribution au contexte énergétique de La Réunion et le secteur du bâtiment

Dans les travaux de préparation de la stratégie française énergie-climat (Travaux pilotés par Madame le Ministre de la Transition Énergétique, Madame Agnès PANNIER-RUNACHER, septembre 2023), le groupe de travail n° 6, "Transition énergétique dans les zones non-interconnectées", le cap 2030 devient celui de l'objectif d'un mix électrique 100%EnR, et le nouveau cap 2050 est fixé pour atteindre l'objectif d'autonomie énergétique de La Réunion. Un document d'orientation stratégique (Futurs Énergétiques 2050 La Réunion) coordonné par la région Réunion doit être élaboré d'ici 2026. Quant au secteur du bâtiment sur l'île de La Réunion, celui-ci représente 86% de la consommation d'électricité annuelle selon EDF Réunion [7].

Ces travaux de recherche ont ainsi pour objectif de se focaliser sur la proposition d'une solution alternative pour réduire la consommation d'énergie des bâtiments et faciliter l'utilisation des ressources énergétiques renouvelables locales, dont notamment l'énergie solaire.

Contribution pour le domaine industriel

Ces travaux de thèse, financés et réalisés dans le cadre d'une thèse CIFRE, s'inscrivent dans une approche appliquée au domaine industriel, en complément des objectifs scientifiques. En effet, l'entreprise partenaire du projet, Intégrale Ingénierie, est un bureau d'études Tout Corps d'État (TCE) qui s'engage activement dans la recherche et le développement. Ainsi, la génération de nouvelles connaissances sur la distribution en courant continu et l'acquisition de compétences supplémentaires pour le pôle électricité de l'entreprise contribuent à son développement. Pour cette raison, il a été décidé d'installer un prototype dans les locaux de l'entreprise, permettant ainsi de confronter les travaux au sein de l'équipe de recherche à toutes les problématiques techniques rencontrées lors d'un déploiement réel sur le terrain. Ainsi, ces travaux de thèse proposeront des éléments de réponses aux objectifs industriels suivants :

- Proposer une **méthodologie réutilisable de dimensionnement** de nano-réseaux DC.
- Concevoir et réaliser une **installation réelle** de nano-réseaux DC pour apporter un retour d'expérience appuyé et d'une documentation accessible à l'entreprise.

Contribution pour le secteur scientifique

Le laboratoire ENERGY-Lab est spécialisé dans l'optimisation de systèmes énergétiques solaires ou intermittents intelligents et le Laboratoire de Conception et d'Intégration des Systèmes (LCIS) porte depuis plusieurs années différents projets sur l'étude des micro-réseaux DC [52, 53]. Par ailleurs, les deux laboratoires ayant une expérience forte dans le développement des réseaux de capteurs présentés dans les travaux de *J-M Lebreton* [54] *J. Sibille et al.* , [55] et la gestion de l'énergie, étudiée dans les travaux de thèse de *F. K/bidi* [56], nous avons établi les questions de recherche suivantes :

- Est-ce que la distribution DC couplée au contrôle des flux de puissance peut contribuer à l'optimisation du dimensionnement des nano-réseaux DC en réduisant la consommation d'énergie globale ?
- Comment évaluer par une approche théorique et expérimentale les avantages et inconvénients de la distribution 48V DC ?
- Est-ce que l'optimisation du stockage thermique au travers d'un Energy Management System (EMS) basé sur la méthode MILP pourrait permettre d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments ?

Application de la démarche low-tech dans les actions de recherche

Afin de proposer des éléments de réponse aux questions scientifiques énoncées précédemment, la démarche low-tech sera appliquée pour établir les actions de recherche suivantes :

- **Approche systémique et sobriété** : La Réunion bénéficiant d'un fort potentiel solaire, l'étude de l'énergie solaire photovoltaïque est prise en considération dans ces travaux. Il est à noter que de manière rigoureuse, les panneaux photovoltaïques ne sont pas une technologie low-tech (sauf s'ils venaient à être fabriqués manuellement avec des matériaux biosourcés par exemple). En effet, d'après les études proposées par *D.J. Murphy and C.A.S. Hall* [57] et *J.G. Lambert et al.* [58] sur le Taux de Retour Énergétique

(EROI), celui-ci est défini par le rapport entre l'énergie produite et l'énergie nécessaire pour générer le système de production. D'après les travaux de de G. Guimbretière et al. [59] portant sur la techno-critique pour une recherche durable, l'énergie solaire aurait un ratio inférieur à 15. C'est pourquoi un des objectifs low-tech de ces travaux est de **simplifier** les installations photovoltaïques existantes en diminuant le nombre d'équipements électroniques et en réduisant les pertes énergétiques, afin d'optimiser le dimensionnement lors de nouvelles installations et de réduire le nombre de panneaux photovoltaïques nécessaires.

- **Accessibilité et autonomie** : Nous faisons le choix de favoriser des technologies open source et réaliser des choix permettant de faciliter la **maintenabilité** de l'installation, en particulier pour les sites isolés. La publication en libre accès des méthodologies, résultats et codes de développement contribueront à rendre accessible la démarche employée dans ces travaux à l'ensemble de la communauté scientifique.
- **Efficience et efficacité énergétique** : Dans l'état de l'art présenté dans ce chapitre, un accent a été mis sur "l'efficacité énergétique" des nano-réseaux. Dans cette thèse, les développements et études réalisées auront également pour but de caractériser et améliorer **l'efficacité énergétique ("Energy effectiveness" ou "energy performance" en anglais)** des nano-réseaux DC. En effet, l'efficacité énergétique se concentre sur la capacité à obtenir des résultats souhaités avec une quantité minimale d'énergie utilisée. Cet aspect est investigué au travers de l'étude et l'optimisation d'une plateforme de nano-réseau hybride existant (présenté dans le chapitre 2) et la conception, l'installation et la caractérisation d'un nano-réseau 48V DC déployé en entreprise (chapitre 3). Quant à l'efficacité énergétique, celle-ci met l'accent sur l'utilisation optimale des ressources énergétiques pour atteindre ces résultats, en minimisant le gaspillage et en maximisant l'efficacité du processus énergétique. Cet aspect est abordé dans le chapitre 4 du manuscrit, dont l'objectif est d'optimiser l'utilisation des ressources énergétiques disponibles pour réduire la quantité d'énergie globale nécessaire à un même résultat final, qui est dans le cadre de ces travaux, le rafraîchissement du bâtiment.
- **Reliance** : Au cours de ces travaux, différents projets scientifiques et pédagogiques ont été menés avec les étudiants de Master 1 et 2 de l'Université de La Réunion, permettant de **créer un lien** entre le domaine privé, scientifique et académique. Les projets de travaux pratiques mis en place ont notamment permis de réaliser des études de cas basées sur des données réelles de consommation énergétique provenant de l'entreprise Intégrale Ingénierie, les données réelles de conditions météorologiques et production d'énergie photovoltaïques fournies par le ENERGY-Lab, manipuler des réseaux de capteurs dans le cadre d'un partenariat avec le laboratoire LCIS et enfin, contribuer aux objectifs scientifiques de ces travaux. Pour terminer, une visite de l'entreprise avec une présentation orale des résultats des étudiants a été organisée, avec la collaboration et la présence de l'équipe de recherche et une partie de la direction de l'entreprise.
- **International** : A la suite de la communication présentée à la conférence internationale IEEE TENSYPMP 2023 intitulée "Impact of AC vs DC on system efficiency in a nanogrid office", nous avons eu l'opportunité d'être intégrés au groupe de travail international IEEE "End-to End Direct Current (DC) Power Networks". Ainsi, les échanges réguliers mensuels par visioconférence avec les membres du groupe ont permis d'enrichir la veille technologique sur l'évolution de la distribution en courant continu durant la dernière année de ces travaux.

Chapitre 2. Evaluation de l'efficacité énergétique d'un banc expérimental de nano-réseau hybride DC-AC isolé "Héliocentris"

2.1 Introduction

Afin de contribuer au challenge technique de la compatibilité des composants et en particulier les protocoles de communication au sein des nano-réseaux (voir Figure 1.12), il est proposé dans ce second chapitre, une démarche pour investiguer la question de recherche suivante : **Comment évaluer et améliorer l'efficacité énergétique d'un nano-réseau ?**

Afin d'apporter des éléments de réponse à cette question, il est présenté dans ce chapitre :

1. **Une méthodologie pour évaluer l'efficacité énergétique d'un nano-réseau :** Le nano-réseau expérimental étudié, appelé "Héliocentris" est une fidèle représentation d'une installation photovoltaïque conventionnelle en site isolé, ayant une architecture hybride DC-AC. Le nano-réseau a été modélisé et instrumenté, permettant une analyse de sa consommation d'énergie. Le rendement du nano-réseau a été quantifié, en prenant en compte l'impact des convertisseurs sur l'efficacité énergétique globale.
2. **Des propositions d'actions d'optimisation énergétique et d'interopérabilité :** Certains composants du nano-réseau ont été remplacés et des développements logiciels ont été réalisés afin d'automatiser le ratriement, le stockage et l'analyse des données du nano-réseau "Héliocentris". Le régulateur MPPT et la centrale d'acquisition de données ont été modifiés par des composants communicants.
3. **Une analyse de la consommation d'énergie du nano-réseau avant et après les actions d'optimisation proposées :** Une évaluation de l'efficacité énergétique du nano-réseau suite aux actions d'optimisations énergétiques a été réalisée et a permis de guider les choix technologiques pour la conception, le développement et l'installation en entreprise d'un nano-réseau DC, présenté dans le chapitre suivant.

2.2 Présentation du nano-réseau hybride isolé Héliocentris



FIGURE 2.1 : Photographie du nano-réseau isolé Héliocentris, laboratoire ENERGY-Lab.

Le nano-réseau "Héliocentris" ou "Solar Hydrogen Trainer" (Figure 2.1) est fabriqué par la société Heliocentris Acadomia. Il s'agit d'un banc de test expérimental destiné à l'enseignement sur la génération d'énergie photovoltaïque combiné à un stockage hydrogène produit à l'aide d'un électrolyseur. Ce système est constitué d'une centrale photovoltaïque composée de 2 modules PV associés en parallèle, de deux batteries 12V DC disposées en série, d'un régulateur MPPT, d'un contrôleur BX9000 Beckhoff, d'un onduleur et d'un convertisseur 24V DC vers 12V DC.

Ce nano-réseau Heliocentris est qualifié d'hybride puisqu'il a la possibilité d'alimenter des équipements en 230V AC, 24V DC et 12V DC. Il est également équipé d'un système de stockage hybride à accumulateur électrochimique au plomb et à hydrogène produit à l'aide d'un électrolyseur. Enfin, il est "isolé" ou "hors réseau" puisqu'il fonctionne de manière autonome sans être raccordé au réseau électrique.

2.2.1 Architecture électrique d'un nano-réseau hybride DC-AC isolé

Schéma synoptique et références des équipements

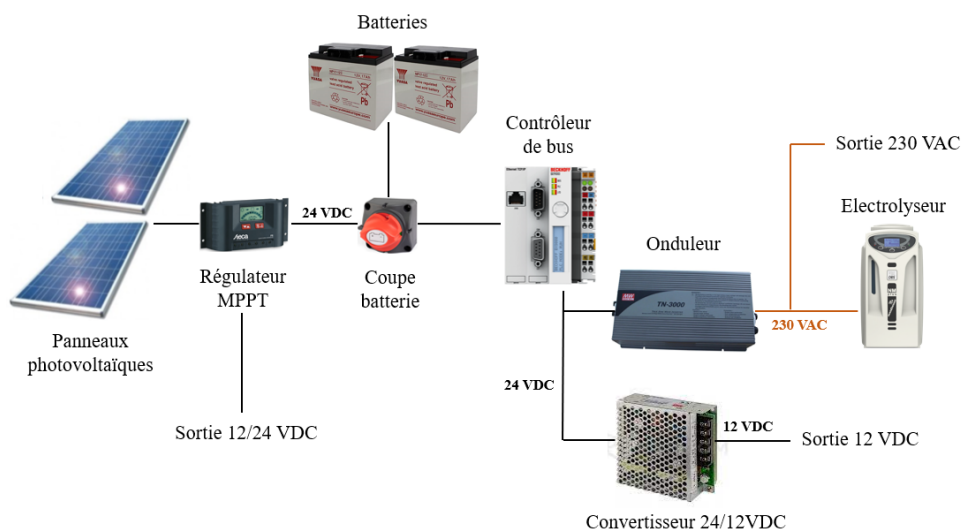


FIGURE 2.2 : Schéma synoptique du nano-réseau isolé "Héliocentris".

Au sein du nano-réseau Héliocentris, les panneaux photovoltaïques convertissent l'énergie du rayonnement électromagnétique solaire en énergie électrique à courant continu. La puissance électrique est régulée par un régulateur de type Maximum Power Point Tracking (MPPT) avant d'être transmise d'une part vers le stockage hybride électrochimique et hydrogène et d'autre part vers un onduleur si une charge est connectée. Le rôle de l'onduleur (ou convertisseur) est de convertir le courant continu en courant alternatif, permettant ainsi d'alimenter des appareils dont la tension nominale de fonctionnement est le 230V AC.

A ce jour, ce type d'architecture électrique est majoritairement utilisé dans la plupart des bâtiments, qu'ils soient raccordés au réseau électrique ou qu'ils fonctionnent en autonomie. La Figure 2.2 représente le schéma synoptique de l'architecture électrique du nano-réseau Héliocentris.

Un contrôleur de bus de type Beckhoff BX9000 équipé des modules d'acquisition et de commandes additionnels (KL3454, KL3062, KL3403 et KL3202) permettent de mesurer les tensions, les courants, l'irradiance et la température des panneaux photovoltaïques. Afin de produire et de stocker de l'hydrogène sur ce banc expérimental, il est possible de connecter en sortie de l'onduleur, un électrolyseur et une cuve d'hydrogène.

Le fonctionnement du nano-réseau est basé sur un bus de distribution 24V DC. Le coupe-batterie a un rôle d'interrupteur général permettant d'allumer ou d'éteindre l'onduleur et le convertisseur 24/12V DC sur lesquels sont branchées les charges électriques.

Les références des équipements du nano-réseau sont récapitulées en table 2.1.

TABLE 2.1 : Références et quantité des éléments du nano-réseau Héliocentris.

Équipement	Référence	Caractéristiques	Quantité
Panneaux photovoltaïques	NeMo P Black 215	Technologie : Polychristallin Puissance crête : 215 Wc MPP current : 8.17 A MPP voltage : 26.32 V	2
MPPT	STECA PR3030	Tension de système : 24 V Tension à vide PV : < 47 V Courant PV : 30 A Courant consommateur : 30 A Consommation propre : 12.5 mA	1
Batterie	PS-12170	Tension : 12V Courant 17Ah Technologie : acide-plomb Durée de vie à 20°C : 10 - 12 ans	2
Onduleur	Mean Well TS-700	Convertisseur 24Vdc -230V ac Puissance sortie 700W Surdimensionnement CC / CA jusqu'à 200%	1
Convertisseur 24/12 VDC	SD-25B-12	Tension d'entrée : de 19 à 36Vdc Tension de sortie : +12Vdc Courant sortie : 2.1A Refroidissement à air libre	1
Contrôleur de bus	Beckhoff BX9000	Automate programmable Mémoire programme 256 KB Mémoire données : 256 KB Programmation : IEC 61131-3 Protocoles : Ethernet, Modbus-TCP CAN, RJ45, RS232, RS485 Extensions 64 modules	1
Electrolyseur	NM-H2 1000	-	1

L'instrumentation du nano-réseau Héliocentris

Le contrôleur assure également la communication via une liaison utilisant le protocole IP, avec les différents capteurs qui équipent l'Héliocentris : un capteur de température extérieure, un pyranomètre et 3 capteurs à effet de hall de type CYHCT-S4 (pour la mesure des courants). Le schéma synoptique du nano-réseau a été réalisé pour les besoins de ces travaux et est présenté en Figure 2.3.

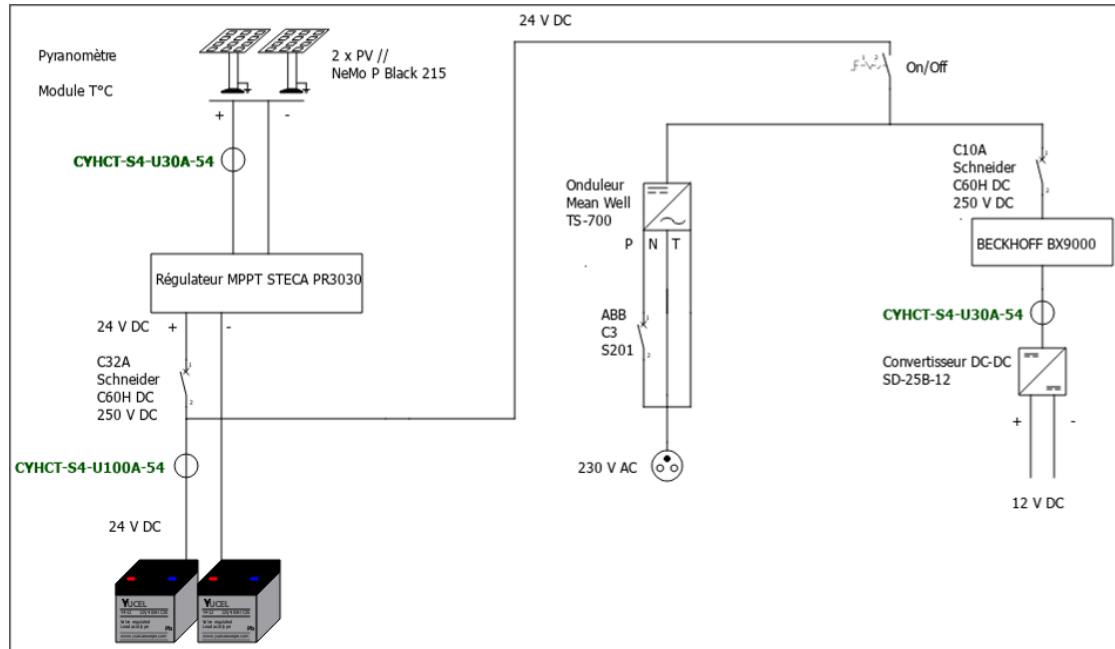


FIGURE 2.3 : Schéma de câblage du nano-réseau isolé "Héliocentris".

Les différents capteurs à effet de hall permettent de réaliser les mesures des grandeurs suivantes :

- le courant circulant dans les modules PV.
- le courant circulant dans l'unité de stockage (stockage ou génération).
- le courant circulant dans le convertisseur DC-DC.
- le courant de sortie de l'onduleur en 230V AC.

Le système initial de gestion du banc est réalisé par un programme propriétaire basé sur le logiciel LabVIEW. Celui-ci est fourni aux utilisateurs à l'achat du banc mais le code source n'est pas accessible, donc l'interface n'est pas modifiable. La prochaine section présente la chaîne de mesure initiale et l'interface utilisateur associée du nano-réseau Héliocentris permettant de réaliser une acquisition de données.

2.2.2 Chaîne de mesures et traitement de données du nano-réseau Héliocentris

Chaîne de mesures

Le contrôleur de terminal de bus Beckhoff BX9000 est intégré dans le système en tant qu'enregistreur de données. Il communique avec plusieurs modules additionnels d'acquisition décrits dans la table 2.2 :

Le contrôleur (BX 9000) collecte les mesures toutes les minutes. Les données sont traitées localement et transmises par une connexion Ethernet utilisant le protocole de communication TCP/IP. Toutefois les procédures de déclenchement d'acquisition et de traitement des données ne sont pas automatisées.

TABLE 2.2 : Références des modules additionnels du contrôleur Beckhoff BX9000.

Modules	Fonctions	Mesures
KL3454	Mesure des courants 4 entrées : 4-20 mA sur 12 bits	Intensité (A)
KL3062	Mesure des tensions 2 entrées : 0-10V sur 12 bits	Tension (V)
KL3403	Mesure de puissance 3 entrées de mesure analogiques sur 16 bits (500V AC- 1A)	Puissance (W)
KL3202	Mesure des capteurs extérieurs (PT100-précision 0,1°C) 2 entrées : 0-10V sur 16 bits	GHI (W/m ²) et T°C

Le fabricant propose une interface utilisateur dédiée et implémentée exclusivement sous le système d'exploitation Windows, permettant de sauvegarder les données dans un fichier texte ou CSV : la figure 2.4 ci-dessous présente la chaîne de mesure initiale du nano-réseau Héliocentris de manière schématique. Le traitement des données est ensuite réalisé manuellement par l'utilisateur. De plus, pour réaliser une acquisition de données, l'utilisateur doit démarrer la prise de mesures depuis l'interface utilisateur dédiée (Figure 2.5) et l'arrêter avec la même interface lorsqu'il souhaite terminer. Cette commande de démarrage/arrêt de l'acquisition et la consultation des données n'est pas réalisable à distance autrement qu'avec cette interface dédiée.

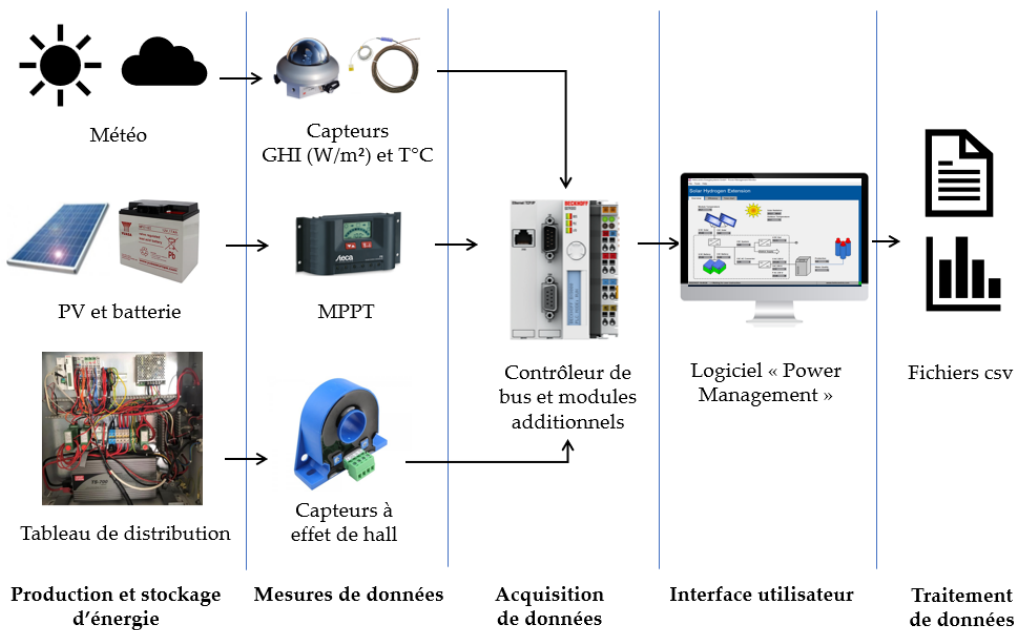


FIGURE 2.4 : Diagramme de la chaîne de mesures du nano-réseau Héliocentris.

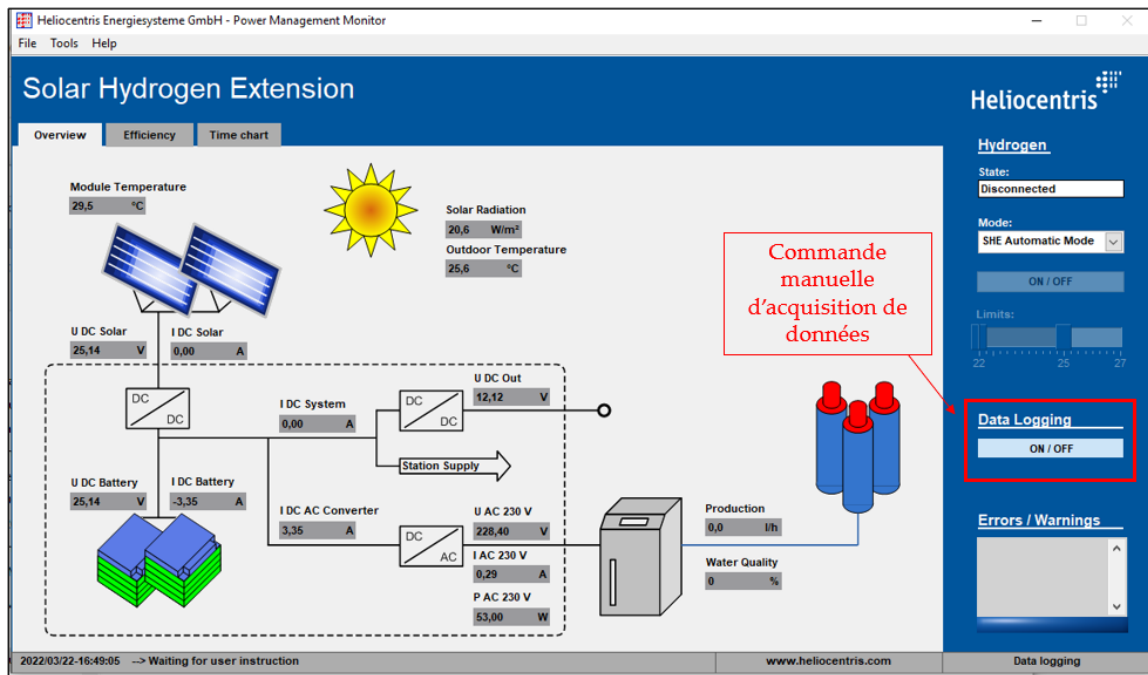


FIGURE 2.5 : Capture d'écran de l'interface utilisateur du logiciel "Power management" associé au nano-réseau Héliocentris.

Problèmes identifiés sur la chaîne de mesures et relatifs à l'architecture électrique du nano-réseau Héliocentris

Malgré une supervision intégrée et une instrumentation précise notamment en courant, nous avons identifié plusieurs lacunes et défauts de fonctionnement :

1. Le contrôleur (BX 9000) qui permet la supervision du nano-réseau est positionné en aval du coupe-circuit. Ainsi, dès que le contrôleur est mis sous tension, l'onduleur et le convertisseur DC-DC sont activés. Pour des raisons de sécurité, le bouton marche/arrêt de l'onduleur et le disjoncteur en amont du convertisseur DC-DC sont placés à l'intérieur du coffret de distribution et difficile d'accès pour l'utilisateur. Ainsi le démarrage de la chaîne d'acquisition entraîne une consommation d'énergie liée au fonctionnement de l'onduleur et du convertisseur DC-DC.
2. L'acquisition des données est réalisée à l'aide d'une interface logiciel propriétaire "Power management" qui requiert d'être installé sur un ordinateur sous Windows relié au contrôleur du banc du nano-réseau. Les informations sur l'interface sont limitées aux modules d'extensions installés sur le BX900 qui sont réduits en termes d'entrées analogiques, en particulier sur la gestion des flux d'énergie (500V, 1A). Comme nous n'avons pas le code source du contrôleur embarqué sur le BX900, nous n'avons aucune possibilité d'extension, ni d'évolution de la gestion et la mesure du nano-réseau. Dans le cadre d'une analyse du système complet, il faut aussi intégrer la consommation d'énergie du PC qui supporte l'interface du logiciel propriétaire, qui est indispensable pour déclencher l'enregistrement des données. Dans la prochaine section, il sera détaillé comment supprimer cette consommation d'énergie additionnelle.

Afin de dépasser ces problèmes et d'évaluer l'efficacité énergétique du nano-réseau Héliocentris, le plan d'action suivant a été mis en place pour identifier des pistes d'optimisation :

- Instrumenter la conversion du courant DC vers AC au sein du nano-réseau.

- Instrumenter la conversion AC vers DC d'appareils électriques DC.
- Modéliser l'architecture électrique du nano-réseau.
- Comparer les résultats de simulation aux mesures expérimentales.

2.3 Evaluation de l'efficacité énergétique du nano-réseau hybride Héliocentris

2.3.1 Instrumentation de la conversion DC-AC

Comme représenté dans le schéma synoptique en Figure 2.3, les mesures de courant sont réalisées par des capteurs à effet de Hall sur la ligne d'alimentation des batteries et en amont des convertisseurs DC-AC et DC-DC. Ces mesures permettent de quantifier la puissance consommée par chacun des éléments ou produite par les batteries. Quant à l'évaluation de la puissance consommée en sortie de l'onduleur, celle-ci est calculée par le module KL3403, connecté à la sortie de l'onduleur (voir table 2.2).

A titre d'exemple, l'instrumentation du nano-réseau a généré les relevés des grandeurs mesurées pour la journée du 16 novembre 2022 (Figure 2.6 ci-dessous). Nous pouvons relever que durant cette journée, l'acquisition de toutes les données a été réalisée effective, mais qu'aucune charge n'était connectée en sortie de l'onduleur.

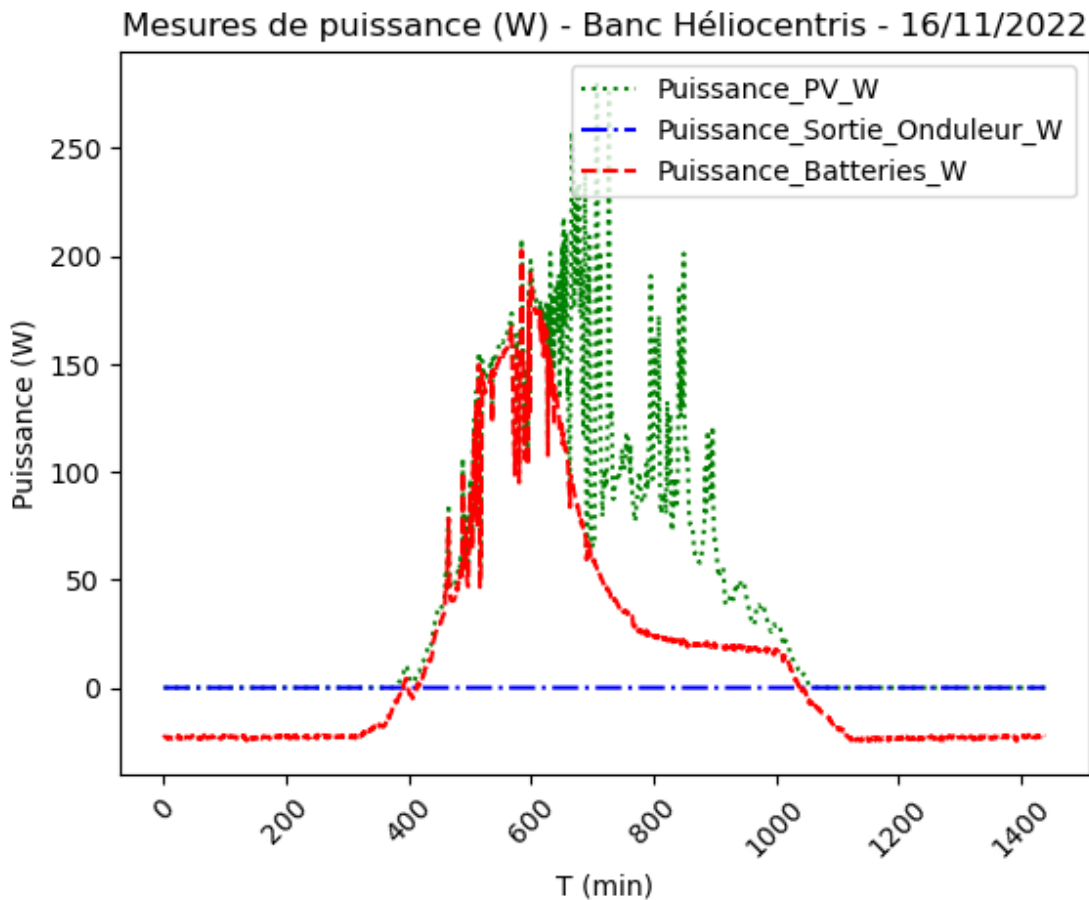


FIGURE 2.6 : Mesures de la puissance (W) délivrée par la centrale PV et consommée par les batteries et l'onduleur.

Analyse des mesures :

- **Calculs des puissances de charge et de décharge des batteries :** Les calculs de la puissance de charge et de décharge des batteries, visualisés sur la figure 2.6, permettent d'identifier que, en dehors des phases de production d'énergie provenant des PV, donc sans ensoleillement, une puissance moyenne de 23 W est appelée consommée sur les batteries.
- **Répartition de la puissance consommée :** Aucune charge n'étant connectée à la sortie 230V AC de l'onduleur, la puissance consommée est imputable aux équipements du nano-réseau Héliocentris, qui étaient en fonctionnement durant les mesures sur le banc. En détail, cette consommation de puissance inclut celle du régulateur MPPT, du contrôleur BX 9000 avec ses modules additionnels, ainsi que les convertisseurs DC-AC et 24-12V DC. Conformément à la fiche technique de l'onduleur (voir figure 2.5c), la puissance dissipée sans charge est inférieure ou égale à 6 W. Ainsi, si cette valeur de 6 W est soustraite à la puissance consommée de 23 W par le banc, nous pouvons estimer qu'une puissance consommée de 17 W correspond majoritairement à la consommation de puissance des autres composants du nano-réseau mentionnés précédemment.

Note : Pour cette phase d'instrumentation, l'ordinateur sur lequel était installé le logiciel d'acquisition de données était alimenté par le réseau électrique, extérieur au nano-réseau Héliocentris.

Afin de compléter cette instrumentation, il est proposé d'analyser dans la section suivante la consommation de puissance liée à la conversion du courant AC vers DC. Ceci dans le but réaliser une analyse détaillée des puissances consommées relatives aux étapes de conversion du courant. Dans le cas d'une architecture électrique conventionnelle, les appareils DC seraient alimentés par la sortie 230V AC du banc Héliocentris avec un convertisseur AC vers DC intégré. Ainsi, nous présenterons l'intégration d'un brasseur d'air ayant un moteur DC, d'un panneau de LED et d'un ordinateur portable, tous équipés d'un convertisseur AC-DC, pour se rapprocher d'un cas réel de déploiement.

2.3.2 Instrumentation de la conversion AC-DC

Banc de mesures

Pour quantifier les pertes de puissance liées à la conversion du courant alternatif (AC) vers le courant continu (DC), un banc de mesures a été installé en laboratoire en présence de charges réelles. L'efficacité de différents modèles de convertisseurs AC vers DC a été évaluée grâce à une instrumentation dédiée (voir figure 2.7 en page suivante).

Les modèles de convertisseurs étudiés dans cette instrumentation sont couramment utilisés pour des équipements présents dans les bâtiments tertiaires, tels que l'éclairage à LED et les ordinateurs portables. Nous avons ajouté dans les tests un brasseur d'air équipé d'un moteur à courant continu (DC), car désormais plusieurs marques proposent des modèles DC équipés de moteurs similaires. Une étude technico-économique faite à la Réunion en 2014 [60] a permis de mettre en avant que les modèles de brasseurs d'air à moteur AC les plus économes en énergie consommaient en moyenne 70 W, tandis que les nouveaux modèles de brasseurs d'air à moteur à courant continu consomment en moyenne 40 W maximum. Toutefois, pour être compatibles avec le réseau électrique actuel, ces modèles de brasseurs d'air DC nécessitent l'intégration d'un convertisseur AC vers DC, adapté à leur tension de fonctionnement spécifique.

Pour la réalisation du banc de mesures, un wattmètre CA8334 a été placé entre la sortie 230V AC d'une prise électrique et entre les 3 convertisseurs AC/DC :

- Convertisseur 230V AC/24V DC pour le brasseur d'air.
- Convertisseur 230V AC/48V DC pour le panneau de leds.
- Convertisseur 230V AC/20V DC pour l'ordinateur portable.

Le wattmètre permet de mesurer la puissance apparente, active, réactive, la tension et l'intensité. Deux multimètres ST-9927T ont également été placés entre le convertisseur et la charge, pour la mesure de la tension et du courant continu. La figure 2.8 représente le schéma du banc de mesures et la photographie de l'installation en laboratoire.

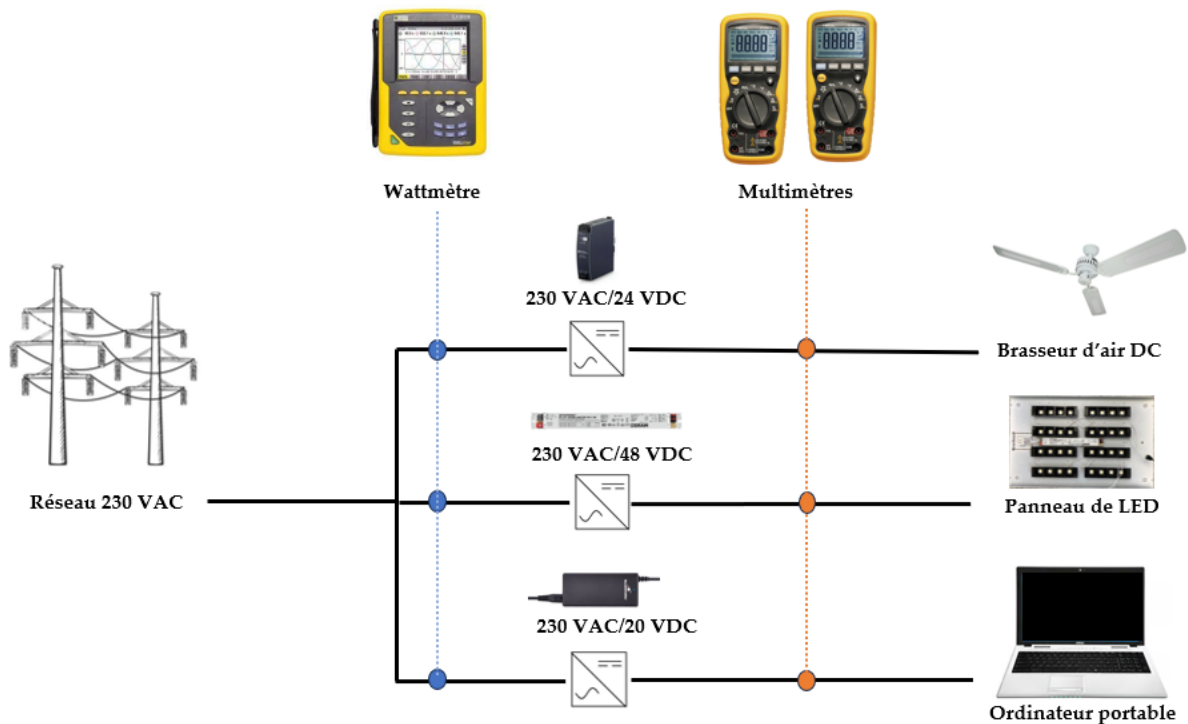


FIGURE 2.7 : Schéma du banc de mesures de l'efficacité énergétique des convertisseurs AC vers DC.

Note : Le redresseur AC vers DC utilisé pour les tests sur le panneau de leds est celui intégré à l'équipement, fourni par le fabricant. Pour le brasseur d'air, il n'y avait pas de convertisseur intégré, fourni lors de l'achat du matériel. Deux convertisseurs AC vers DC ont donc été testés. Le détail des références des équipements est présenté en table 2.3. Les figures 2.10 et 2.9 représentent les courbes de rendement issues des fiches techniques des convertisseurs AC-DC utilisés respectivement pour le brasseur d'air et le panneau de leds.



FIGURE 2.8 : Photographie de l'instrumentation en laboratoire du brasseur d'air DC et du panneau de LED.

TABLE 2.3 : Spécifications techniques des équipements terminaux et des convertisseurs AC/DC utilisés pour les expérimentations.

Référence	OT FIT 35/220-240/700 CS L G2	NI-PS 15 Power Supply	BS-PW-90/FB1
Tension d'entrée AC	198-264 V	200-240 V	100-240 V
Tension de sortie DC	27-51 V	24 V	18.5 - 20 V
Puissance de sortie	13,5 - 35,7 W	144 W	90 W
Puissance dissipée	5,8 W	Non renseigné	Non renseigné
Courant de sortie	500 / 600 / 650 / 700 mA	5 - 6 A	Non renseigné
Facteur de puissance	0,98	0,47	Non renseigné
Efficacité à pleine charge	85%	90,2%	Non renseigné

(a) Convertisseurs AC/DC

Variable	Valeur
Référence	24DC-3-RC-WE
Puissance	19 W
Tension	24 VDC
Vitesse de rotation	220 tr/min
Nb de pales	3
Diamètre	1320 mm
Poids	4,65 kg
Débit d'air	11 200 m ³
Efficacité	598.29 m ³ /Wh

(b) Brasseur d'air DC

Variable	Valeur
Référence	EVOLUX-8-M600-840-250-80D
Puissance	25 W
Flux	3300 lm
Lm/W	132 Lm/W
T°C de couleur	4000 °K
L x l x H	1196 x 296 x 24 mm

(c) Panneau de leds

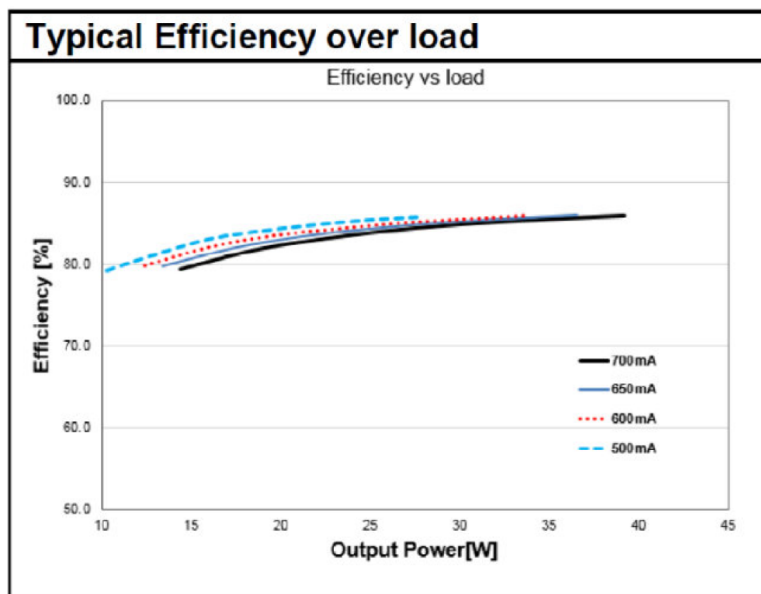


FIGURE 2.9 : Courbe de rendement du convertisseur AC-DC OT FIT 35/220-240/700 CS L G2 du panneau de leds.

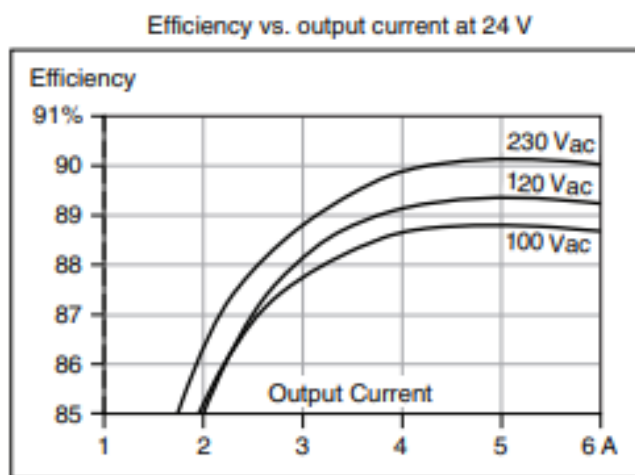


FIGURE 2.10 : Courbe de rendement du convertisseur AC-DC NI-PS 15 du brasseur d'air DC.

D'après les courbes de rendement issues des fiches techniques des convertisseurs OT FIT 35/220-240/700 CS L G2 et NI-PS 15, nous pouvons voir que le rendement des convertisseurs varie en fonction du courant de sortie : plus le courant consommé est faible, plus le rendement est faible, puis, au-delà d'une valeur seuil du courant de sortie, le rendement des convertisseurs va avoisiner la valeur nominale de fonctionnement.

- Pour le convertisseur OT FIT 35/220-240/700 CS L G2 associé au panneau de leds, son rendement varie de 80 à 86% pour un courant de 500 à 700 mA.
- Pour le convertisseur NI-PS 15 associé au brasseur d'air DC, son rendement varie de 85 à 90 %, selon la tension de sortie AC (100, 120 ou 230V AC) et pour un courant de sortie variant de 1.8 à 6A.

Dans la prochaine sous-section, les mesures expérimentales réalisées grâce au banc expérimental représenté en figure 2.7 sont détaillées et analysées afin de comparer les données issues des fiches techniques et les valeurs de rendement mesurées directement sur les appareils.

Résultats des mesures

Les figures 2.11 et 2.12 représentent respectivement la puissance apparente (VA) et la puissance DC (W) mesurées en amont et en sortie des convertisseurs AC-DC utilisés pour alimenter le panneau de LEDS EVOLUX-8 et le brasseur d'air 24DC-3-RC-WE, pour différents niveaux d'éclairage et de ventilation. Le brasseur d'air étant fourni sans convertisseurs, les tests ont été effectués avec deux modèles de convertisseurs distincts pour la conversion AC-DC. Une synthèse des mesures réalisées est présentée en table 2.4.

Le rendement de la conversion AC-DC, η_{AC-DC} , calculé en dernière colonne de la table 2.4 est défini par la formule 2.1 :

$$\eta_{AC-DC} = \frac{P_{DC}}{P_{AC}} \quad (2.1)$$

avec P_{DC} la puissance DC (W) mesurée en sortie du convertisseur et P_{AC} la puissance apparente (VA) mesurée en amont du convertisseur.

TABLE 2.4 : Mesures de la puissance apparente AC (VA) avant convertisseur AC/DC, de la puissance finale DC (W) après convertisseur et calcul du rendement de la conversion AC-DC pour chaque équipement.

Convertisseur	Puissance d'entrée AC (VA)	Puissance de sortie DC (W)	η_{AC-DC}
OT FIT 35/220- 240/700 CS L G2	38,5	32,31	0,84
FP SAW48-24.0-2000	44,13	18,95	0,43
NI PS-15 Power Supply	55,01	18,95	0,35
BS-PW-90/FB1	31	21	0,68

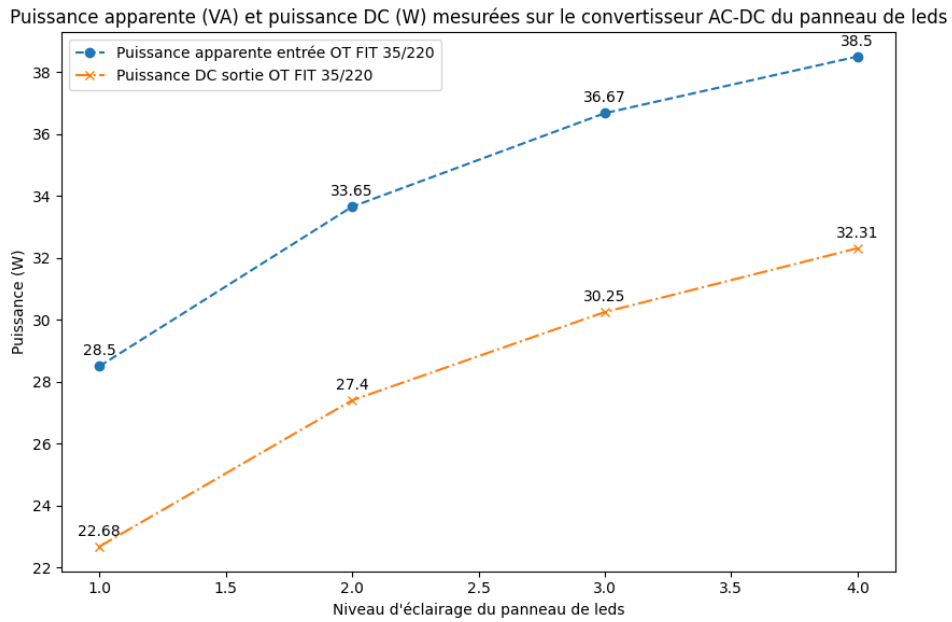


FIGURE 2.11 : Mesure de la puissance apparente AC et de la puissance DC en amont et en sortie du convertisseur AC-DC OT FIT 35/220 associé au panneau de leds.

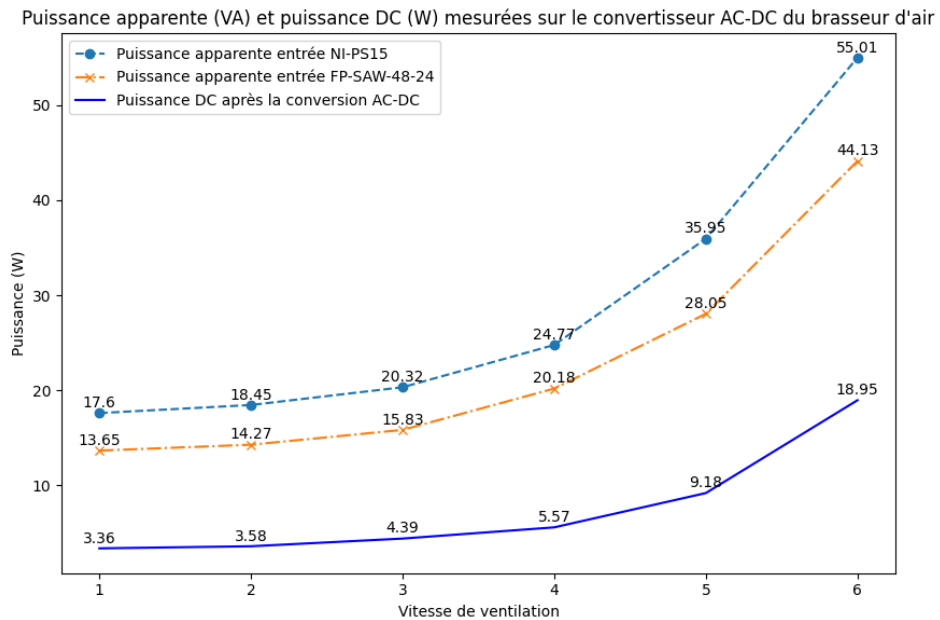


FIGURE 2.12 : Mesure de la puissance apparente AC et de la puissance DC en amont et en sortie des convertisseurs AC-DC NI-PS15 et FP SAW48-24.0-2000 associés au brasseur d'air DC.

Analyse des mesures :

- **Panneau de LEDS :** Le modèle de panneau de leds choisi pour les tests possède 4 niveaux d'éclairage réglables manuellement via des interrupteurs. La puissance DC consommée par le panneau de leds varie de 22.68 W à 32.31 W pour une puissance apparente de 28.5 à 38.5 VA. Le rendement de la conversion AC-DC associée au panneau de leds varie donc de 80 à 84% selon le niveau d'éclairage choisi.
- **Brasseur d'air :** Le brasseur d'air est équipé d'une télécommande à distance qui permet de régler la vitesse de ventilation sur 6 niveaux différents. Pour ces différents niveaux :
 - Une puissance apparente variant de 17.6 à 55.01 VA a été mesurée pour le convertisseur NI-PS15.
 - Une puissance apparente variant de 13.65 à 44.13 VA pour le convertisseur FP-SAW-48-24.

La puissance DC mesurée en sortie des convertisseurs variant de 3.36 à 18.95W, le rendement associé à la conversion AC-DC du brasseur d'air varie plus ou moins fortement selon le choix de convertisseur. Celui-ci varie de 19 à 34% pour le convertisseur NI-PS15 et de 25 à 43% pour le FP-SAW-48-24.

- **Ordinateur portable :** Afin de quantifier également le rendement de la conversion AC-DC nécessaire pour l'alimentation d'un ordinateur portable, un modèle de convertisseur BS-PW-90/FB1 associé à un modèle MSI MS-16GD d'ordinateur portable a également été instrumenté, suivant le schéma présenté en figure 2.7. Comme indiqué en table 2.4, la puissance apparente mesurée était de **31 VA** pour une puissance DC de **21 W**, soit un rendement de 67% pour cette conversion AC-DC, à cette puissance de fonctionnement.

En conclusion, deux éléments pouvant impacter l'efficacité énergétique globale d'un nano-réseau hybride AC et DC ont été mis en évidence de manière expérimentale :

- **Impact du rendement de la conversion AC-DC :** Les mesures effectuées sur le brasseur d'air révèlent un pourcentage de pertes particulièrement élevé : dans le meilleur des cas, 57% de l'énergie requise pour l'alimentation de l'appareil correspond à la conversion AC-DC, voire 66% pour un autre convertisseur. Cet écart entre la puissance DC et la puissance apparente est liée à deux aspects. Celui-ci est lié à la fois au rendement propre des convertisseurs et à la fois à la puissance réactive générée par le moteur du brasseur d'air, une charge électrique inductive, impactant le facteur de puissance. Par contraste, dans le cas du panneau de LED, qui est une charge plus résistive, le facteur de puissance est plus élevé, car la puissance réactive est moins importante. Cette différence souligne l'impact significatif des rendements des différentes conversions AC-DC sur le rendement global d'un nano-réseau.
- **Impact de la puissance de fonctionnement :** Selon le modèle de convertisseur sélectionné, la puissance de fonctionnement de l'appareil impactera plus ou moins fortement le rendement de la conversion AC-DC. Ce phénomène a été constaté pour le convertisseur du panneau de leds, où le rendement varie au maximum de 4% selon le niveau d'éclairage. Concernant les convertisseurs utilisés pour le brasseur d'air, le rendement varie de 15% pour le convertisseur NI-PS15 et 18% pour le convertisseur FP-SAW-48-24 selon le niveau de ventilation.

Afin d'évaluer l'efficacité énergétique du nano-réseau Héliocentris, ces mesures de puissance apparente et de puissance DC en amont et sortie des convertisseurs AC-DC ont permis d'établir une modélisation du nano-réseau, prenant en compte le rendement de chaque convertisseur. Les prochaines sous sections présentent par étapes quelle manière les valeurs de rendement mesurées pour les convertisseurs AC-DC ont pu compléter la modélisation du nano-réseau Héliocentris, afin de représenter une architecture électrique conventionnelle de nano-réseau hybride isolé (PV-Batteries-Distribution AC).

2.3.3 Efficacité énergétique globale du nano-réseau Héliocentris

L'efficacité énergétique du nano-réseau Héliocentris peut être calculée selon les relations suivantes :

$$P_{DC} = \sum_{i=1}^N P_{DC_i} \quad (2.2)$$

$$P_{AC} = (1 + \eta_{AC/DC}) \cdot P_{DC} \quad (2.3)$$

$$P_{onduleur} = (1 + \eta_{onduleur}) \cdot \sum_{i=1}^N P_{AC_i} \quad (2.4)$$

$$P_{PV} = (1 + \eta_{MPPT}) \cdot P_{onduleur} \quad (2.5)$$

$$\eta = \frac{P_{DC}}{P_{PV}} \quad (2.6)$$

$$(2.7)$$

avec P_{DC} la puissance DC totale consommée par les appareils terminaux représentant la charge du réseau, $P_{onduleur}$ qui est la somme des puissances apparentes des équipements, $\eta_{AC/DC}$ le rendement des convertisseurs AC-DC, $\eta_{onduleur}$ le rendement de l'onduleur, η_{MPPT} le rendement du régulateur MPPT et η qui est le rapport entre la somme des puissances DC et la puissance totale consommée par le nano-réseau.

Cas applicatif :

Si nous prenons comme hypothèse pour simplifier les calculs que le panneau de leds, le brasseur d'air et l'ordinateur portable consomment chacun 100 W, ce cas d'application donnerait le résultat suivant :

$$P_{DC} = P_{LED} = P_{BA} = P_{PC} = 100W \quad (2.8)$$

$$P_{DC_{finale}} = 300W \quad (2.9)$$

$$P_{onduleur} = 1,10 \cdot (1,16 \cdot P_{LED} + 1,57 \cdot P_{BA} + 1,32 \cdot P_{PC}) = 445,5 \quad (2.10)$$

$$\eta = \frac{P_{DC_{finale}}}{P_{onduleur} + P_{data}} = \frac{300}{462,5} = 0,65 \quad (2.11)$$

avec P_{data} qui correspond à la valeur de puissance de 17W nécessaire pour faire fonctionner sur le banc Héliocentris l'acquisition de données (voir section 2.3.1).

Ces équations permettent de tracer la courbe d'efficacité globale du nano-réseau Héliocentris pour différents niveaux de puissance et types de charge (LED, brasseur d'air ou PC). Le résultat est représenté en figure 2.13.

Conclusion : Un seuil maximum de 700 W a été défini comme la puissance maximale pouvant être délivrée par l'onduleur dans le nano-réseau (table 2.3). Selon les résultats obtenus en figure 2.13, l'efficacité du nano-réseau peut varier d'environ 45 à 76 %. De plus, il est observé que plus la puissance finale demandée est élevée, plus l'efficacité énergétique du nano-réseau augmente, quel que soit le type de charge (LED, brasseur ou PC). Cette observation s'explique par le fait que les convertisseurs ont une efficacité plus élevée lorsqu'ils sont utilisés à leur puissance nominale de fonctionnement, comme indiqué dans leurs fiches techniques. De plus, la consommation de la chaîne de mesure (P_{data}), n'est pas proportionnelle à la puissance consommée par les équipements (puissance fixe). Ainsi, la **puissance finale demandée** représente un paramètre déterminant

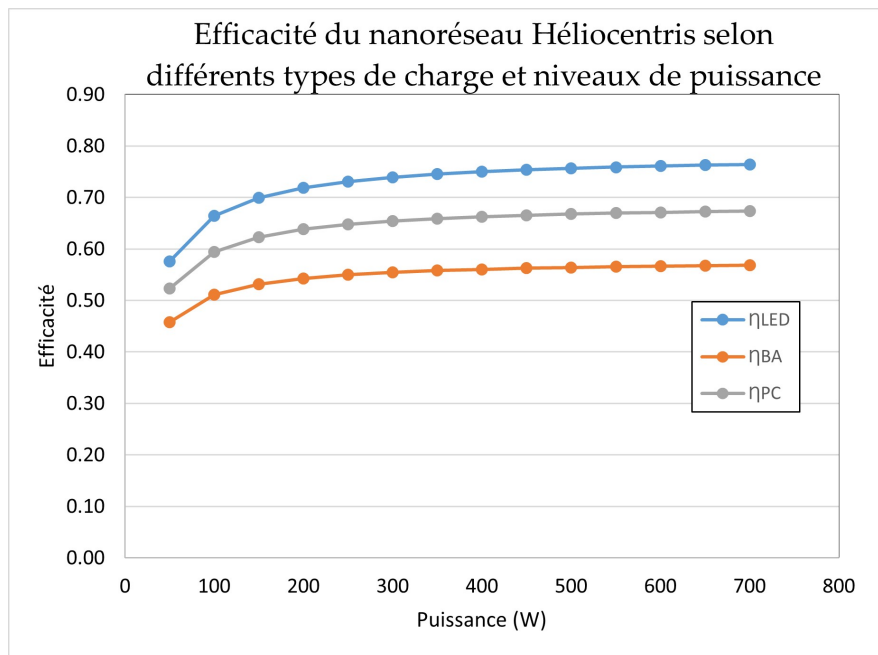


FIGURE 2.13 : Calcul de l'efficacité énergétique globale du nano-réseau Héliocentris pour différents niveaux de puissance et type de charge.

à prendre en compte dans l'évaluation de l'efficacité. Les résultats de cette section ont donc servi de base pour identifier les axes d'amélioration du nano-réseau Héliocentris, conduisant ainsi à des ajustements tant au niveau matériel que logiciel. Les modifications apportées ont été instrumentées afin de quantifier l'impact sur les performances énergétiques globales du système. Les données résultantes, dont les gains énergétiques mesurés, sont détaillés dans la prochaine section.

Note : Si l'on considère une acquisition de données lors de la mesure de la consommation d'énergie du nano-réseau, il conviendrait de prendre également en compte la consommation d'énergie de l'ordinateur sur lequel est installé le logiciel utilisateur permettant l'acquisition de données (voir fig 2.4). De ce fait, l'efficacité énergétique globale du nano-réseau en serait également impactée puisque l'ordinateur serait connecté soit à la sortie de l'onduleur du nano-réseau, soit à une alimentation 230V AC externe. Ainsi dans une évolution de l'architecture hybride de base, la forme et la place de la centrale d'acquisition et de traitement de données de mesure, devra être abordée pour minimiser son impact énergétique.

2.3.4 Modélisation du nano-réseau

Modélisation avec le logiciel Matlab Simulink

L'équation 2.6 obtenue précédemment ainsi que les mesures expérimentales d'efficacité des convertisseurs AC-DC détaillées dans la section précédente ont permis de réaliser la modélisation numérique équivalente simplifiée du nano-réseau Héliocentris. La modélisation a été faite à l'aide du logiciel Matlab Simulink, selon les spécificités techniques des composants listées en table 2.5 et selon les valeurs mesurées expérimentalement dans la section précédente.

La modélisation a été réalisée en prenant comme scénario l'alimentation d'un panneau de leds, un brasseur d'air DC et un ordinateur portable.

Le schéma de modélisation du nano-réseau Héliocentris est représenté en figure 2.14. Sur le schéma de modélisation, les valeurs de rendement des convertisseurs AC-DC mesurées expérimentalement ont été ajoutées

TABLE 2.5 : Spécifications techniques des éléments du nano-réseau Héliocentris

(a) Modules PV		(b) Batteries		(c) Onduleur	
Variable	Valeur	Variable	Valeur	Variable	Valeur
Référence	NeMo P Black 215	Référence	PS-12170	Référence	TS-700 224D
Longueur	1481 mm	Tension	12 V	Puissance	700 W
Largeur	991 mm	Capacité C20	7 Ah	Tension de sortie	230 VAC
Type de cellule	Polycristalline	Type de batterie	Plomb AGM	Courant de sortie	3.04 A
P_{max}	215 Wc	Longueur	151 mm	Tension d'entrée	21 - 30 V
V_{oc}	33,32 V	Largeur	65 mm	Efficacité	90 %
I_{sc}	8,67 A	Hauteur	98 mm	Puissance dissipée	6 W
V_{mp}	26,32 V	Poids	2,18 kg	Longueur	295 mm
I_{mp}	8,17 A	Durée de vie	5 ans	Largeur	184 mm
				Profondeur	70 mm

pour tous les équipements terminaux (valeurs de "etaAC-DC" encadrées en noir sur le schéma).

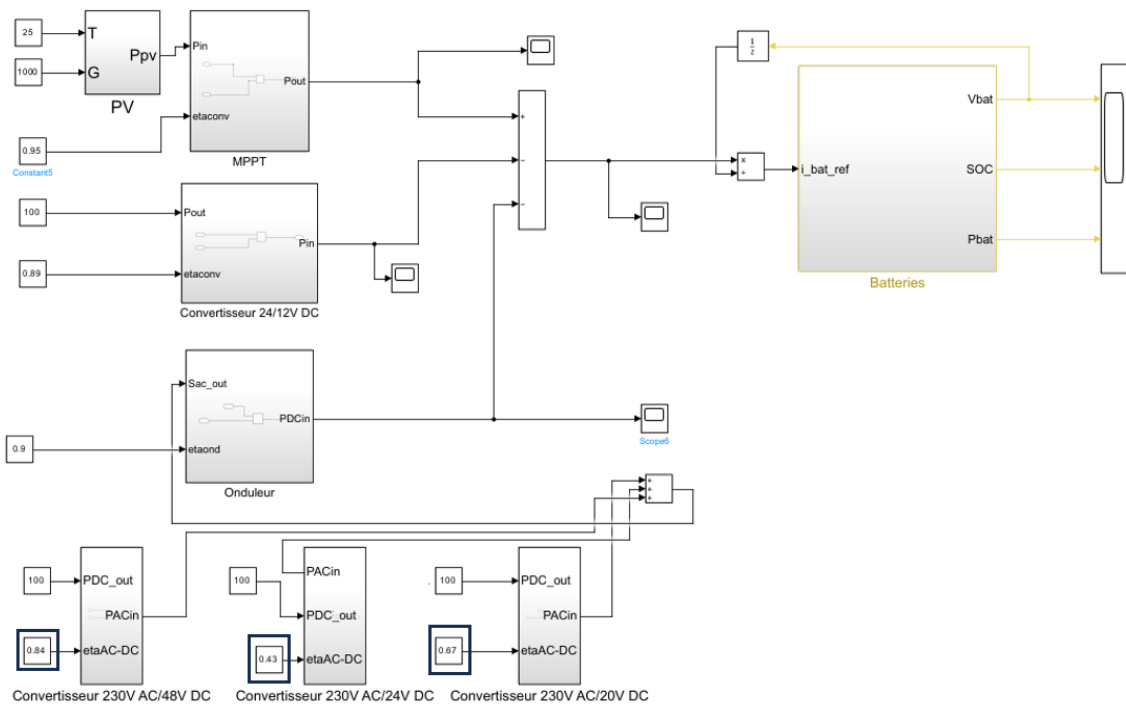


FIGURE 2.14 : Schéma de modélisation Simulink du nano-réseau Héliocentris.

Dans le cas de cette modélisation, nous cherchons à évaluer la puissance produite et consommée au sein du nano-réseau, en fonction du rendement des différents éléments qui le composent : (centrale PV, régulateur MPPT, onduleur, convertisseurs AC-DC), afin d'obtenir un rendement global du nano-réseau, en fonction des profils de charge des appareils électriques terminaux.

Compte tenu des objectifs de recherche de ces travaux et des contraintes temporelles du projet, il n'a pas été possible de réaliser une analyse approfondie des résultats de la modélisation du nano-réseau établie sous Matlab Simulink. Cependant, pour un profil de charge fixe pour les appareils électriques terminaux, une valeur de rendement global avoisinant 60% a été quantifiée. La méthodologie présentée peut ainsi servir de base comme outil de modélisation simplifié des nano-réseaux et à adapter selon les contraintes du projet.

Ce résultat confirme la valeur de rendement établie pour la nano-réseau héliocentris dans la section précédente, soit 65%. Comme axe d'amélioration dans le cadre d'études approfondies concernant la modélisation de

nano-réseaux, il serait nécessaire de réaliser des simulations incluant des profils de charge variables, répartis sur une plage de temps plus importante.

2.4 Optimisation énergétique du nano-réseau hybride isolé "Héliocentris"

Pour optimiser l'efficacité énergétique d'un nano-réseau, il est possible d'agir sur différents aspects, tels que le dimensionnement des câblages, le choix des équipements et la gestion des flux de puissance (voir section 1.3.2).

A la suite des études menées dans la section précédente, trois objectifs d'optimisation ont été déterminés pour le nano-réseau héliocentris :

1. **Automatisation** du traitement des données.
2. **Accès à distance** à la supervision des données.
3. Réduction de la **consommation énergétique** du nano-réseau.

2.4.1 Remplacement du régulateur MPPT et ajout d'une nouvelle centrale d'acquisition

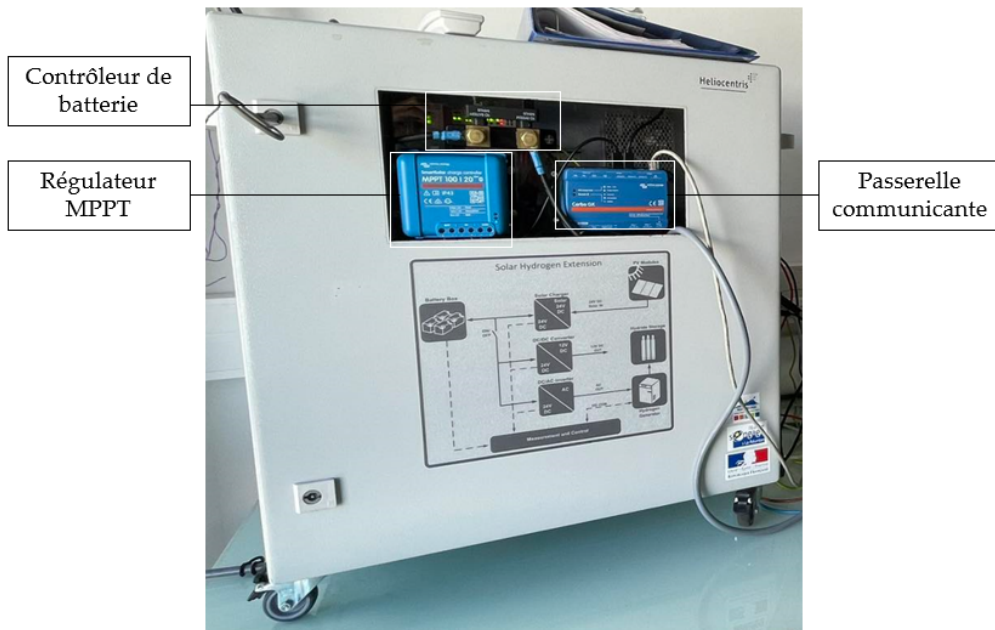


FIGURE 2.15 : Photographie du tableau de distribution du nano-réseau Héliocentris après modification du régulateur MPPT et l'intégration d'une nouvelle passerelle communicante.

Une photographie de la nouvelle version du nano-réseau héliocentris est présentée dans la figure 2.15. Le régulateur MPPT précédent a été substitué par le modèle SmartSolar MPPT 100/20 de Victron Energy, et une centrale d'acquisition communicante a été intégrée. Les nouvelles références sont récapitulées dans la table 2.6.

TABLE 2.6 : Références des composants du nano-réseau héliocentris avant et après modifications.

Composant	Première version	Deuxième version
Régulateur MPPT	STECA PR3030	SmartSolar MPPT 100/20
Passerelle de communication	BX9000	CERBO GX

Les choix technologiques suivants ont été guidés par les performances des appareils et leur polyvalence :

- Le Régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking) SmartSolar MPPT 100/20 assure un suivi rapide de la tension et du courant de sortie des panneaux solaires (PV) et garantit que toute énergie disponible est transmise vers le nano-réseau. Ce régulateur intègre des modules de communication et les fonctions de contrôle et de surveillance à distance du nano-réseau. Pour renforcer cette supervision, et en particulier le suivi de l'état électrique des batteries, le choix a été fait d'introduire un moniteur de batterie Smart Shunt 500A/50mV (Victron Energy). Ce dernier enregistre la tension, le courant, l'énergie et la durée de charge disponible restante. Il est connecté entre le régulateur MPPT et les batteries. Nous avons été amenés à incorporer puisque les accumulateurs électrochimiques associés au nano-réseau Héliocentris sont au plomb et ne sont pas équipés d'un système de gestion intégré (Battery Management System (BMS)) comme le sont à présent les batteries lithium-ion. L'ajout du circuit de surveillance des batteries est nécessaire dans le cadre de cette architecture pour le suivi de la puissance échangée des batteries. Le modèle de MPPT choisi a également la possibilité de s'adapter à une tension de batteries de 48V DC. Ce choix a

été réalisé pour rendre l'installation adaptative à une modification d'accumulateur électrochimique telle que l'ajout de batteries en série jusqu'à 48V DC ou le remplacement des batteries par une batterie de 48V DC.

- La Passerelle de communication CERBO GX (Victron Energy) remplace le fonctionnement du contrôleur de bus BX 9000. Le Cerbo GX est un centre autonome de communication, de surveillance, de collecte de données et de supervision flexible. Tous les autres composants du nano-réseau - tels que les onduleurs/-chargeurs, les chargeurs solaires et les batteries - y sont connectés. Une communication de type VE.bus est effectuée entre le régulateur MPPT et la passerelle. La chaîne de mesure, organisée autour de cette nouvelle passerelle de communication, est présentée à la figure 2.16.

Ces modifications permettent d'une part d'automatiser la collecte et le traitement de données, et, d'autre part, la connexion de la passerelle au réseau IP permet de s'affranchir de la nécessité de disposer d'un ordinateur sous Windows pour récupérer les données, et donc de supprimer la consommation de l'énergie de cet ordinateur. En effet, dans la précédente version du nano-réseau, l'interface utilisateur était installée sur un ordinateur externe et nécessitait l'intervention de l'utilisateur pour activer ou désactiver l'acquisition de données. La connectivité IP ouvre par ailleurs les possibilités de contrôle-commande du système, dont les données entrantes et sortantes sont désormais compatibles avec d'autres systèmes de calculs externes en termes d'optimisation.

Dans la nouvelle version, l'archivage et le traitement des données est déporté sur un serveur de l'entrepôt de données de ENERGY-lab. Ce dernier héberge le Système de Gestion de Base de Données (SGBD) et les scripts développés en interne, relatifs au traitement et l'injection des données.

2.4.2 Automatisation du traitement des données et accès à distance

La nouvelle configuration de la chaîne de mesure du nano-réseau héliocentris est illustrée dans la figure 2.16 ci-dessous.

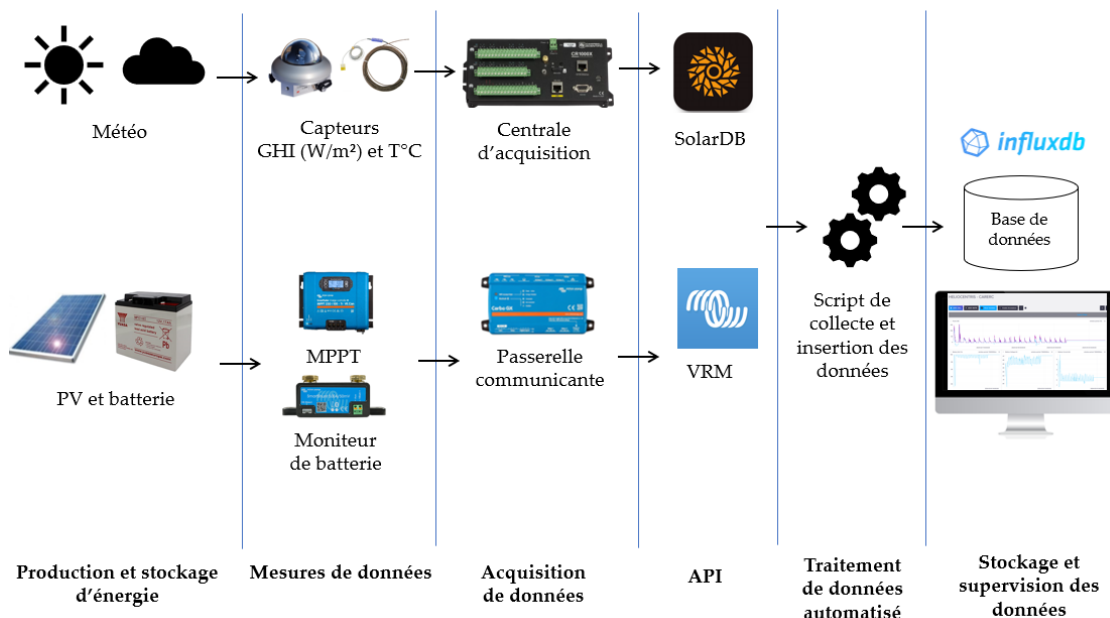


FIGURE 2.16 : Nouvelle version de la chaîne de mesures du nano-réseau Héliocentris.

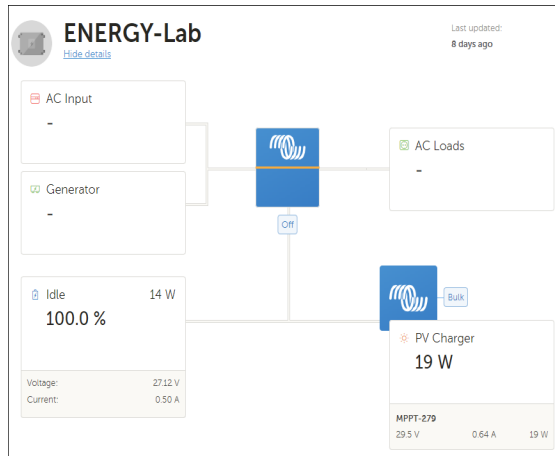
Nous avons fait le choix d'intégrer notre plateforme d'acquisition, de traitement et d'archivage des données dans le système unifié de gestion de base de données de l'unité de recherche ENERGY-Lab :

- Concernant les données météorologiques (flux solaire, température, etc), nous avons utilisé une station de mesures radiométriques et météorologiques du réseau IOS-net (<https://galilee.univ-reunion.fr/>). Cette station est stratégiquement positionnée sur le toit du bâtiment de la faculté des Sciences et Technologies, à proximité immédiate du nano-réseau Héliocentris. Les données collectées par toutes les stations du réseau IOS-net sont centralisées par le serveur THREDDS (Thematic Real-time Environmental Distributed Data Services) du laboratoire. Ce dernier autorise un accès en temps réel et à distance via une supervision intégrée à la base de données ou en utilisant une interface de programmation (Application Programming Interface (API)) pour des traitements supplémentaires.
- Afin de réaliser l'acquisition des données physiques du nano-réseau (surveillance de l'état de la batterie, production énergétique photovoltaïque (PV), etc), nous utilisons la passerelle de communication CERBO GX. Cette passerelle collecte les mesures physiques du nano-réseau notamment en se connectant au régulateur MPPT et au superviseur de batterie via une communication VE.bus. Localement, à quelques mètres du nano-réseau, une application mobile sur Smartphone, communiquant via Bluetooth ("Victron Connect") permet de consulter directement les données de la centrale de mesure. À distance, la passerelle est également connectée au réseau Internet Protocol (IP), permettant l'envoi des données vers l'application web et mobile "VRM".
- Pour procéder à l'archivage et la supervision des données, il a été choisi d'utiliser le système de gestion de base de données InfluxDB, afin d'harmoniser nos développements avec les infrastructures informatiques existantes au sein du laboratoire. Nous avons développé un script adapté pour récupérer les données à partir de l'API de la plateforme de gestion à distance de Victron (VRM) (le script est fourni en A). Cette base de données permet désormais de stocker et visualiser les données de la nouvelle version du nano-réseau Héliocentris.

2.4.3 Mesures expérimentales de la consommation d'énergie après optimisations

Interfaces utilisateur

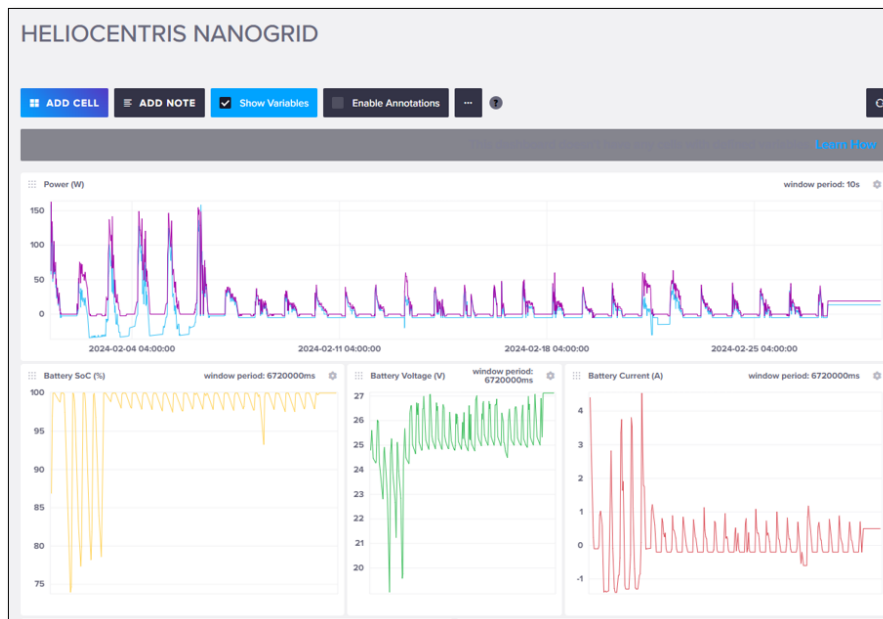
Les données acquises durant le mois de février 2024 sont illustrées dans la figure 2.17 selon les différentes interfaces utilisateurs : les sous figures (a) et (b) correspondent à l'interface fournie par l'application VRM et la sous figure (c) correspond à l'interface associée à la base de données du laboratoire.



(a) Onglet "Tableau de bord" de l'application VRM.



(b) Onglet "Fonctions avancées" de l'application VRM.



(c) Tableau de bord développé dans la base de données influxdb interne au laboratoire.

FIGURE 2.17 : Représentation des mesures effectuées sur la nouvelle version du nano-réseau héliocentris au cours du mois de février 2024.

Description des interfaces :

- La figure 2.17a représente l'onglet "Tableau de bord" de l'interface VRM, dans lequel sont affichés en temps réel la puissance instantanée produite par la centrale PV et l'état de charge de la batterie.
- La figure 2.17b représente l'onglet "Fonctions avancées" de l'interface VRM, dans lequel il est possible d'afficher la totalité des mesures (tension, intensité, puissance, état de charge) selon un sélecteur de

temps.

- La figure 2.17c est une capture d'écran du tableau de bord réalisé dans la base de données de type influxdb nommée "Héliocentris Nanogrid".

Comparaison de la consommation d'énergie avant et après optimisations

La figure 2.18 présente l'état de charge et décharge des batteries du nano-réseau Héliocentris mesuré durant 24h avant et après optimisations technologiques. Dans les deux cas, aucune charge électrique n'est connectée en sortie de l'onduleur, du convertisseur 24/12V DC ou de la sortie 24V DC du régulateur MPPT :

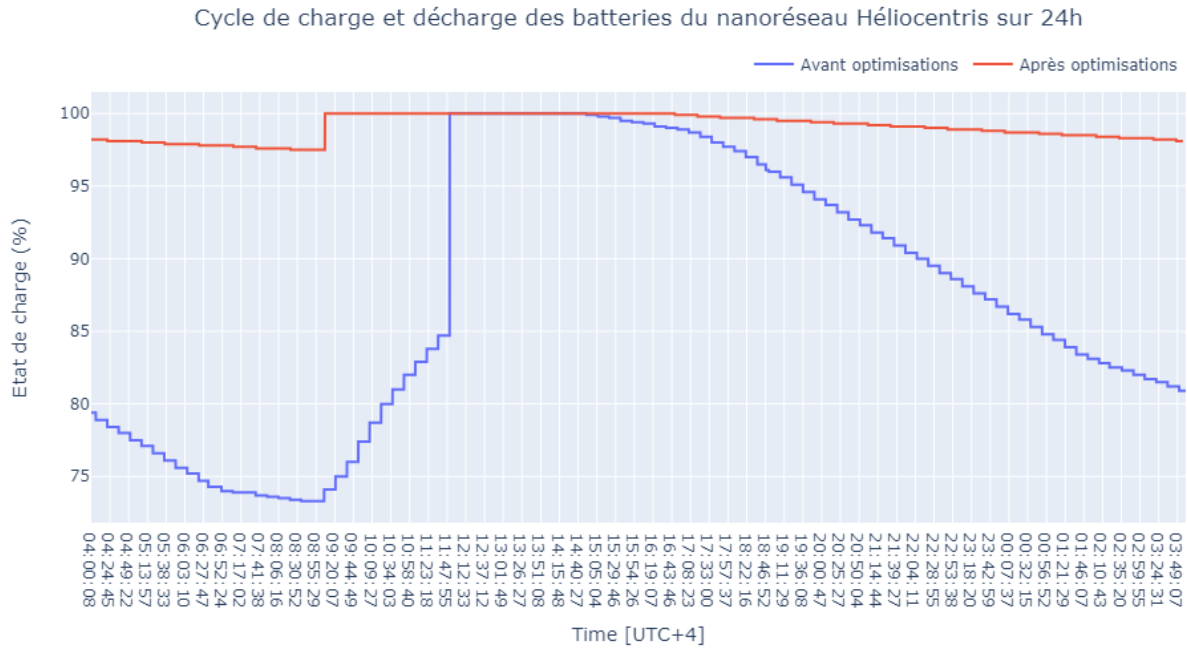


FIGURE 2.18 : Mesure expérimentale de l'état de charge et décharge des batteries du nano-réseau Héliocentris (ancienne et nouvelle version) sur 24h.

Analyse des mesures :

- Dans la configuration initiale avant optimisations, l'ensemble des composants du nano-réseau, soit le régulateur MPPT, la passerelle de communication, le contrôleur de bus, l'onduleur et le convertisseur 24/12V DC sont actifs. La puissance consommée par le nanoréseau est de 23 W en moyenne et durant les phases sans ensoleillement, les batteries atteignent un état de décharge de 74%. Pour rappel, la séquence d'acquisition des données induisait la consommation d'énergie d'un ordinateur externe au nano-réseau.

Il convient de noter qu'il serait possible de déduire la puissance relative aux convertisseurs si les disjoncteurs placés en amont (voir fig 2.3) étaient désactivés. Cependant, les mesures sont réalisées dans un contexte similaire à celui d'une situation réelle où l'utilisateur n'intervient pas dans le tableau de distribution en dehors des interventions de maintenance.

- Dans cette configuration optimisée, les mesures physiques sont réalisées et transmises quel que soit l'état du coupe-batterie (interrupteur du système accessible depuis l'extérieur du tableau de distribution). Dans la version modernisée du nano-réseau, le régulateur MPPT est communicant contrairement à la précédente version (voir figure 2.4). La puissance consommée par le nano-réseau est de 5W en moyenne et durant les phases sans ensoleillement, les batteries atteignent un état de décharge de 97.5%. Ces améliorations sont possibles puisque lorsque le coupe-batterie est en mode « OFF » l'onduleur, le convertisseur 24/12V DC et le contrôleur de terminal de bus sont inactifs.

2.5 Synthèse

Dans ce chapitre, il a été présenté une architecture existante de nano-réseau hybride isolé "Héliocentris" sur lequel deux évolutions technologiques ont été apportées. D'une part le module MPPT (Maximum Power Point Tracking) a été remplacé par un dispositif communicant et d'autre part, le contrôleur du nano-réseau a été remplacé une passerelle de communication récente, qui intègre des protocoles de communication à jour.

Les modifications ont été apportées suite à un diagnostic énergétique du nano-réseau, qui a permis de détecter des défauts de conception. Les modernisations effectuées ont pu faire évoluer la stratégie de contrôle du nano-réseau afin d'en augmenter son efficacité énergétique.

À l'aide d'un banc de mesures de laboratoire, nous avons quantifié l'impact de l'alimentation de charges électriques DC en passant par différentes étapes de conversion du courant (DC/AC et AC/DC) sur l'efficacité énergétique du nano-réseau. Selon l'efficacité des convertisseurs utilisés et le niveau de puissance, l'efficacité peut varier de 45 à 78%. Cette efficacité peut être améliorée en utilisant des charges fonctionnant sur la tension de 24V DC, disponible directement sur une des sorties du régulateur MPPT, tout en éteignant l'onduleur et en disjonctant l'alimentation du convertisseur 24/12V DC.

De plus, le nano-réseau a maintenant la possibilité d'automatiser la collecte des données et d'en assurer la supervision à distance. Un script a été développé pour automatiser le rapatriement des données qui sont stockées dans une base de données orientées série temporelle, la dernière version du système de gestion de base de données Influxdb.

Désormais, l'acquisition de données et la facilité de l'activation ou désactivation des convertisseurs permet de diminuer la consommation énergétique globale du nano-réseau. En particulier lors de la prise de mesures sans qu'aucune charge électrique ne soit connectée. Initialement, la puissance consommée par les équipements dans cette configuration était de 23 W (composants internes) à laquelle il convient d'ajouter au minimum 50 W, soit la puissance consommée par ordinateur portable dédié à la collecte de données, soit environ 73 W. Suite aux modifications effectuées, la consommation d'énergie du nano-réseau lors d'une acquisition de données est de 5 W.

Les développements réalisés dans ce chapitre ont contribué à préciser le périmètre d'étude pour la conception, l'élaboration et l'installation d'un nano-réseau Low Voltage Direct Current (LVDC) à l'échelle d'une entreprise du secteur tertiaire. Les défis suivants ont été identifiés pour ce déploiement :

- Le premier défi est celui d'une intégration ergonomique d'un nano-réseau DC. Au-delà des gains énergétiques apportés par la nouvelle architecture électrique, cette dernière doit assurer a minima le même confort d'utilisation des appareils électriques pour l'utilisateur.
- Le second défi est technico-économique. L'abaissement du niveau de tension à 48V DC induit une augmentation de l'intensité et donc de la section des câbles afin de respecter les normes de sécurité. Cet accroissement de la quantité de matière, de cuivre notamment, entraîne un surcoût de câblage de l'installation électrique. Ainsi, les avantages et les limites de la distribution en DC devront être caractérisés afin de proposer une méthode de déploiement économiquement viable dans les bâtiments. De plus, un pilotage renforcé est à prévoir afin d'ajouter des degrés de contrôle et d'optimisation de l'architecture électrique DC.

Chapitre 3. Développement et implémentation du nano-réseau 48V DC en entreprise

3.1 Introduction

Dans l'état de l'art présenté dans le premier chapitre, nous avons indiqué que la tension de distribution 48V DC respectait la norme de sécurité électrique NF 15-100 qui nous sera précieuse pour permettre le déploiement opérationnel d'un nano-réseau DC dans un bâtiment tertiaire. Dans le domaine scientifique, d'autres tensions sont possibles pour l'élaboration des futures normes DC, mais en 2024 aucune n'est encore légalement applicable dans le secteur du bâtiment.

Dans le chapitre 2, nous avons mis en évidence l'impact des convertisseurs sur l'efficacité énergétique d'un nano-réseau et l'importance de développer des outils pour automatiser la collecte et le traitement de données à distance.

Dans ce chapitre 3, il est proposé d'utiliser les développements réalisés dans le chapitre précédent afin de contribuer à un autre défi technique identifié dans l'état de l'art concernant la conception d'un nano-réseau LVDC (48V DC). Ce challenge a permis dans ces travaux d'être confrontés aux contraintes techniques et réglementaires d'une installation à taille réelle utilisée en entreprise, afin de répondre à la question de recherche suivante : **Quels sont les avantages et les limites de la distribution d'énergie électrique 48V DC lors d'un déploiement opérationnel ?**

Afin d'apporter des éléments de réponse à cette question, ce chapitre est présenté en quatre parties.

1. **Une étude de la consommation d'énergie de l'entreprise Intégrale Ingénierie** : Le but de cette étude est d'analyser la consommation d'énergie des locaux de l'entreprise, afin de quantifier la part des équipements qui, dans la consommation d'énergie globale, pourraient être alimentés directement en courant continu DC. Cette étape doit permettre de réaliser un cahier des charges pour l'intégration d'un nano-réseau DC dans l'entreprise.
2. **La conception et l'installation d'un nano-réseau 48V DC** : Le nano-réseau 48V DC, a été conçu et déployé au sein des locaux d'Intégrale Ingénierie, pour alimenter en 48V DC l'éclairage et la ventilation de deux bureaux individuels. Le nano-réseau est constitué d'une centrale photovoltaïque, un stockage sur batterie et le contrôle et la distribution de l'énergie basée sur la technologie Power Over Ethernet (PoE) pour l'intégration des équipements. Cette section présente l'architecture électrique, les étapes de l'installation et l'interface utilisateur qui a été développée pour l'analyse des données.
3. **Une méthodologie pour l'évaluation de l'efficacité énergétique de la tension 48V DC** : Un outil d'évaluation théorique de l'efficacité énergétique de la tension 48V DC a été développé et un banc de tests expérimental a été mis en oeuvre afin de comparer les résultats de l'outil à des mesures expérimentales, pour différentes sections de câbles (1.5mm² et 2.5mm²). (voir section 3.4)
4. **La synthèse des études et développements** réalisés est présentée dans la dernière section de ce chapitre. L'évaluation théorique et expérimentale de la distribution 48V DC, qui a conduit à l'étude et la modélisation d'un nano-réseau DC, aura comme cas d'application l'alimentation et la gestion de la climatisation. Cette étude est présentée dans le chapitre 4.

3.2 Présentation de l'entreprise Intégrale Ingénierie

Localisation des locaux

L'entreprise Intégrale Ingénierie, partenaire du projet, est un bureau d'étude Tout Corps d'Etat (TCE), spécialisé dans la conception de bâtiments. Implantée sur la côte ouest de l'île de La Réunion, à l'Eperon à 300m d'altitude, l'entreprise occupe les locaux du 3ème étage du bâtiment "Le Carat", totalisant une superficie utile de 583.58 m². En moyenne, quarante collaborateurs travaillent dans ces locaux, sur une plage horaire de 8h à 18h. Les bureaux des employés sont répartis dans des open-spaces et des bureaux individuels. La localisation de l'entreprise est représentée en figure 3.1.

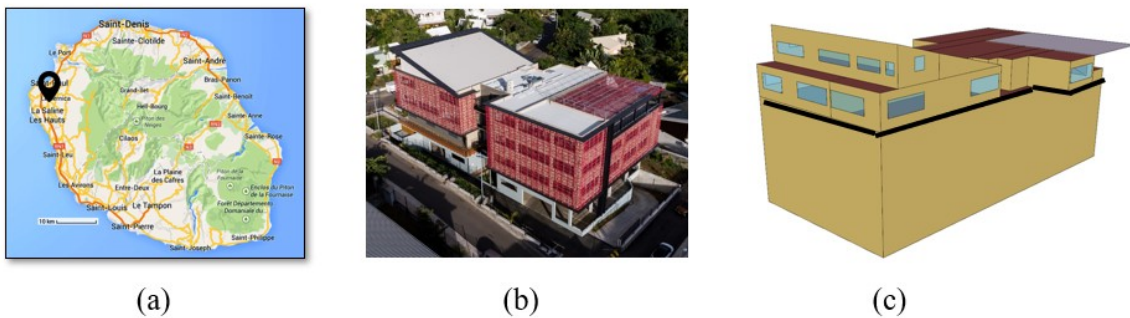


FIGURE 3.1 : (a) Localisation d'Intégrale Ingénierie sur La Réunion. (b) Photo du bâtiment "Le Carat". (c) Localisation des locaux d'Intégrale Ingénierie au 3ème étage du bâtiment.

3.2.1 Instrumentation de la consommation d'énergie avant l'installation du nano-réseau LVDC

Répartition de la consommation d'énergie chez Intégrale Ingénierie

Le comptage d'énergie des locaux est réalisé par catégorie d'équipements, notamment la climatisation, l'éclairage, les équipements informatiques, les bornes de recharge pour véhicules électriques, les brasseurs d'air et les équipements divers. Pour cette instrumentation, les automates de la marque RSW et l'interface utilisateur associée ont été choisis. La centrale d'acquisition, le CKS 4800, est relié à l'ensemble des compteurs d'énergie PM3250 de la marque Schneider Electric, dont chaque catégorie d'appareil est équipée. Le schéma du comptage d'énergie est illustré dans la Figure 3.2 à la page suivante.

Cette instrumentation a permis de comptabiliser une consommation de **83 kWh/m²/an** pour les locaux d'Intégrale Ingénierie en 2022. Cette valeur de consommation énergétique annuelle classe le bâtiment dans la catégorie des bâtiments "performants" énergétiquement selon le rapport d'audit produit en 2022 par Artelia sur plusieurs bâtiments en milieu tropical [61]. Il est à noter que ce classement concerne les bâtiments ayant une conception classique, soit favorisant les systèmes de climatisation pour le rafraîchissement d'air.

A titre de comparaison, l'instrumentation d'un bâtiment bioclimatique (bâtiment "Ilet du centre" à La Réunion), dans le cadre des travaux de thèse de *M. Payet* [62], a permis de montrer qu'un rafraîchissement des locaux majoritairement basé sur la ventilation naturelle, favorise une baisse significative de la consommation énergétique annuelle qui a été mesurée à **57 kWh/m²/an**. Cependant, ce type de bâtiment nécessite une conception spécifique au niveau de l'enveloppe de la structure comme cela est présenté à titre d'exemple dans le "Prébat" [63]. Pour un bâtiment ayant une conception classique, les optimisations énergétiques possibles dépendent donc principalement du choix d'équipements performants, et d'un comportement responsable de

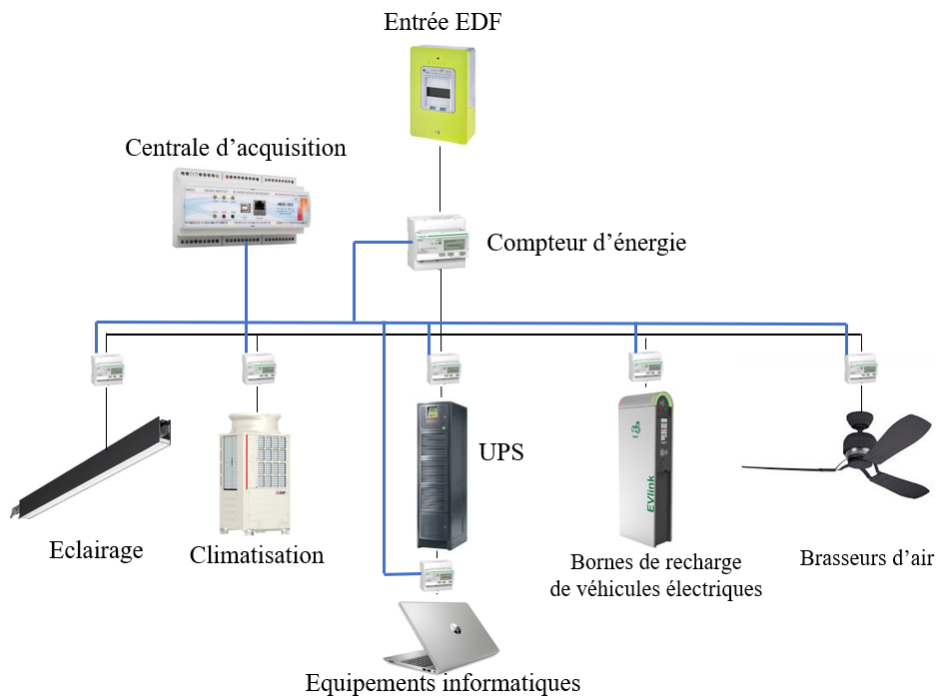


FIGURE 3.2 : Synoptique du comptage d'énergie des locaux.

l'utilisateur.

Comme l'illustre la Figure 3.3, le système de climatisation est le poste de consommation d'énergie le plus important puisqu'il représente **44%** de la consommation annuelle chez Intégrale Ingénierie en 2022. Agir sur la réduction de la consommation d'énergie liée à la climatisation des locaux apparaît donc comme un levier d'action majeur.

Concernant la part des équipements fonctionnant nativement en courant continu tel que l'éclairage par LED, les équipements informatiques et les bornes de recharges de véhicules électriques, ceux-ci représentent **42%** de la consommation d'énergie annuelle.

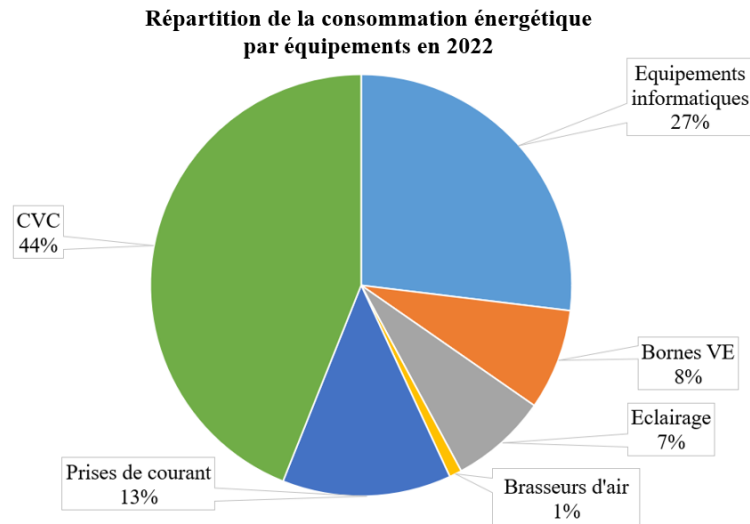


FIGURE 3.3 : Répartition de la consommation énergétique d'Intégrale Ingénierie par catégorie d'équipements en 2022.

3.2.2 Evaluation des pertes énergétiques liées aux conversions d'énergie

Les serveurs et la majorité des écrans et ordinateurs des locaux sont "secourus" par un onduleur sans interruption (Uninterruptible Power Supply ou UPS). Ce terme est employé car le rôle de l'UPS, qui est placé entre l'alimentation électrique générale et les équipements finaux, est de stabiliser la qualité du courant fourni aux équipements branchés en sortie de l'UPS. En cas de coupure électrique, il assure également une autonomie énergétique de quelques minutes pour ces équipements, grâce aux batteries au plomb 12V DC dont il est équipé.

Dans le cadre des besoins de ce projet de thèse, des compteurs d'énergie ont été placés en amont et en sortie de l'UPS ainsi qu'en amont des serveurs, ordinateurs et écrans (voir Figure 3.2). Ceci dans le but de caractériser la consommation d'énergie uniquement relative à l'UPS.

Les mesures réalisées démontrent que le fonctionnement de l'UPS consomme en moyenne une puissance de 200 W soit 18% de l'énergie annuelle dédiée aux équipements informatiques.

Dans le cadre d'une projection d'installation en courant continu, il est supposé qu'un UPS ne serait pas nécessaire puisque l'électricité distribuée ne subirait pas de transformation du courant alternatif vers le courant continu et inversement. De ce fait, il n'y aurait pas besoin d'une stabilisation du courant. Par ailleurs, un système de distribution d'énergie électrique DC qui inclurait un stockage électrochimique à batterie, permettrait d'assurer le rôle de "secours" en cas de coupure électrique, tel que le fait actuellement l'UPS.

Ces différents résultats, obtenus à la fois par le comptage d'énergie chez Intégrale Ingénierie et par le bilan énergétique du banc de mesures en laboratoire décrit dans le chapitre précédent, ont permis de quantifier des gains possibles d'énergie parmi les équipements électriques couramment utilisés dans le secteur tertiaire (éclairage à leds, équipements informatiques, certains modèles de ventilateurs). En parallèle de ces mesures, le périmètre d'actions pour le déploiement d'un nano-réseau LVDC expérimental au sein de l'entreprise a été défini et est décrit dans la section suivante.

3.3 Conception et installation du nano-réseau 48V DC

3.3.1 Schéma synoptique et présentation des composants

Cahier des charges de l'entreprise et contraintes matérielles

En phase de conception, il a été défini de déployer le nano-réseau LVDC expérimental sur deux bureaux individuels, localisés en figure 3.4.

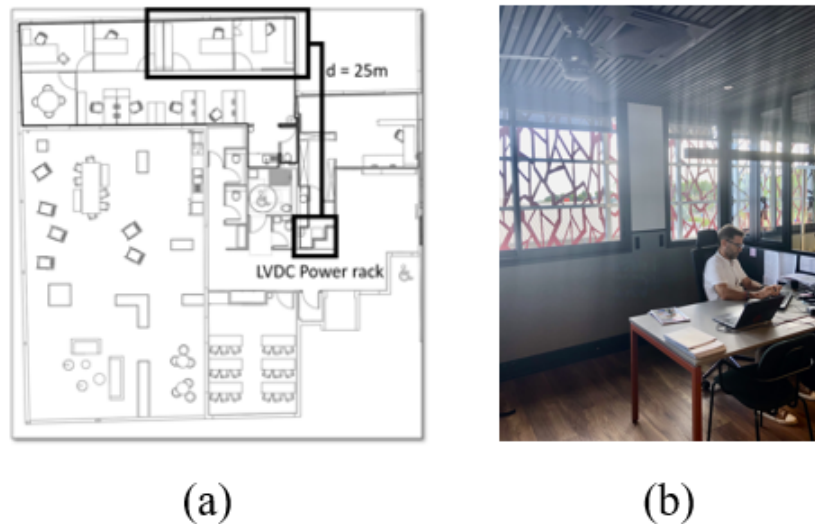


FIGURE 3.4 : (a) Localisation du déploiement du nano-réseau dans l'entreprise. Les deux bureaux individuels sont encadrés en noir sur le plan et situés à 25m du local technique. (b) Photographie d'un des deux bureaux étudiés pour le déploiement.

Ces bureaux sont situés à une distance de câblage d'environ 25 mètres par rapport au local technique, où est installé le coffret de distribution DC du nano-réseau. A la suite de nombreux échanges avec les futurs utilisateurs et les spécialistes du pôle électricité de l'entreprise, le cahier des charges suivant a été établi :

- Considérer et étudier l'éclairage par LED et les brasseurs d'air comme des équipements terminaux.
- Ne pas dépasser une surface totale de 15 m² en toiture pour l'installation d'une centrale photovoltaïque (respect des règles de la copropriété du bâtiment).
- Regrouper l'intégralité des éléments du nano-réseau au sein d'une baie informatique à installer dans le local technique.
- Assurer un confort identique pour l'utilisateur (éclairage avec gradation de la luminosité, détection de présence et brasseur d'air pilotable).

Ces différentes contraintes administratives et matérielles ont guidé les choix des équipements et technologies qui sont présentés dans les pages suivantes.

Elaboration du schéma synoptique

La tension de distribution du nano-réseau LVDC a été fixée à **48V DC** pour les raisons suivantes :

- La tension de 48 VDC est la tension de fonctionnement des batteries lithium-ion, la technologie de batteries la plus déployée à l'heure actuelle, dans le secteur résidentiel ou tertiaire.

- La technologie **Power Over Ethernet (PoE)** fonctionne nativement en 48 VDC. La norme IEEE 802.3bt permet d'alimenter en puissance et fournir le réseau ethernet grâce à un seul câble RJ45, pour une puissance maximum de 100 W. Les panneaux de leds et les brasseurs d'air choisis ne consommant respectivement pas plus de 40 W et 20 W, cette tension de distribution apparaît la plus adéquate dans le cadre de cette installation.

A partir de ces éléments, le schéma synoptique de l'installation a été élaboré et est présenté en figure 3.5.

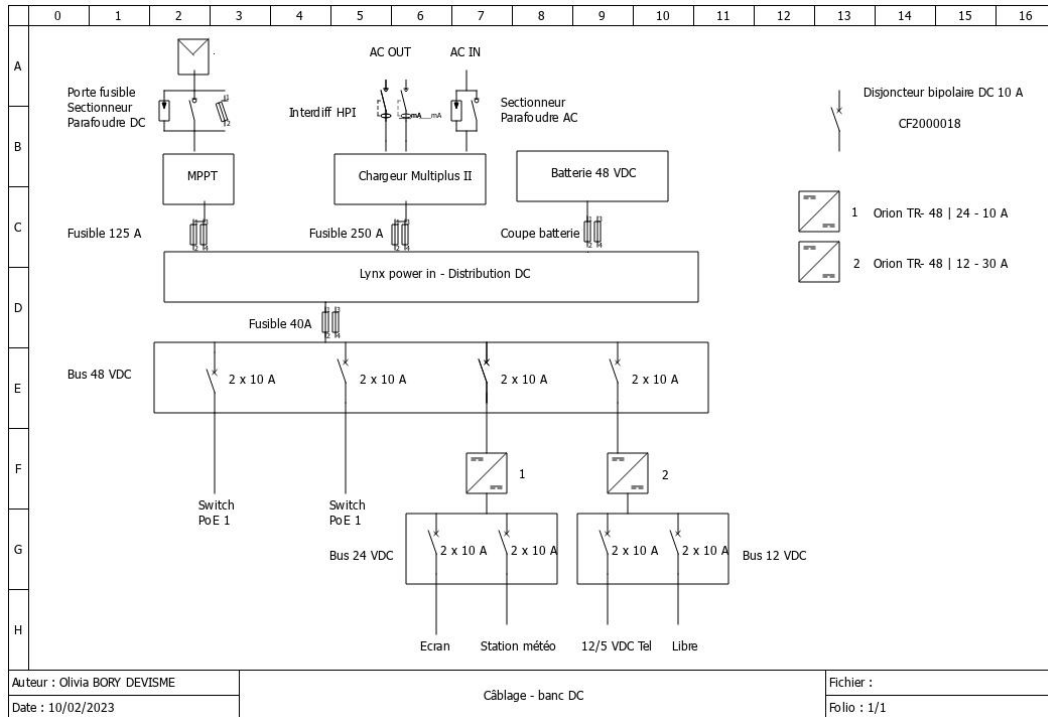


FIGURE 3.5 : Schéma synoptique du nano-réseau 48V DC déployé en entreprise.

3.3.2 Installation du nano-réseau 48V DC sur site

Architecture électrique du nano-réseau 48V DC

Le schéma de l'architecture électrique du nano-réseau 48V DC installé dans les locaux d'Intégrale Ingénierie est représenté en Figure 3.6.

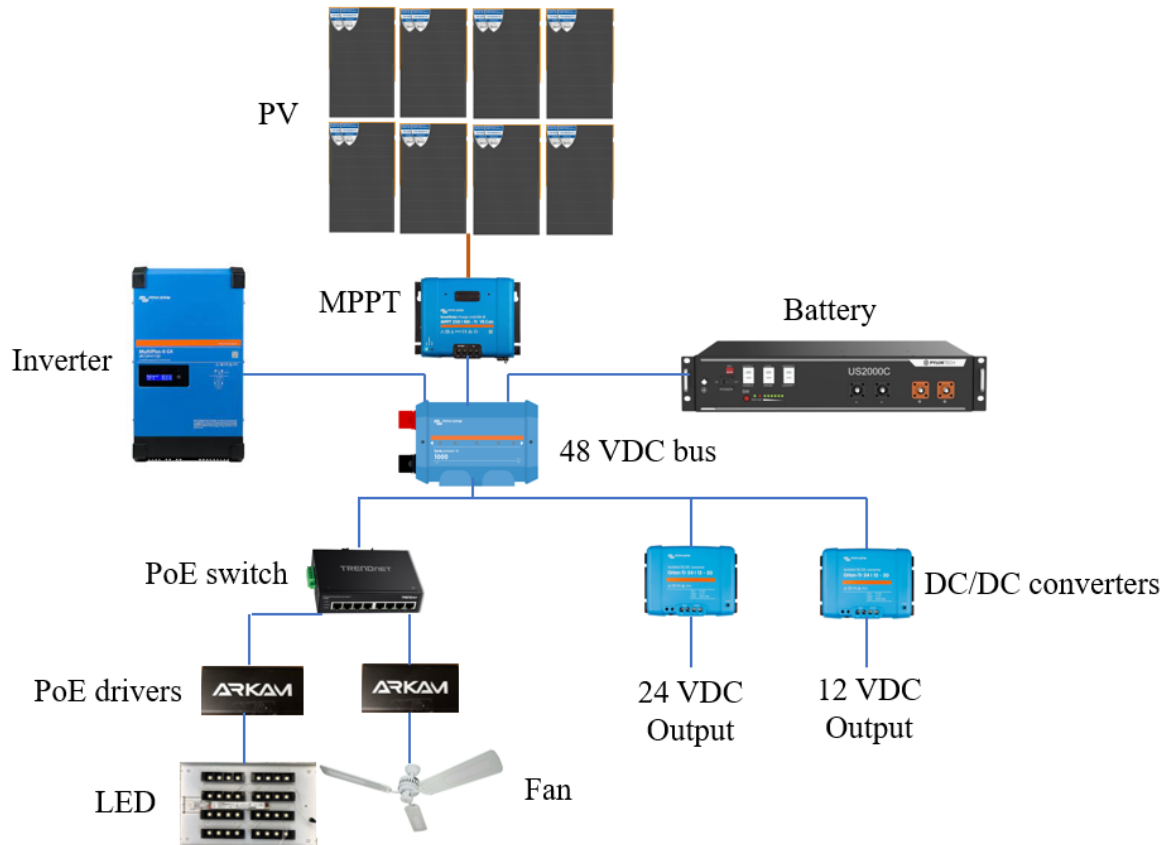


FIGURE 3.6 : Schéma de l'architecture du nano-réseau 48V DC

Choix technologiques :

- **Distribution 48V DC** : La tension de sortie de la centrale PV est régulée à 48V DC par un régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracker). Le bus de distribution de 48V DC peut alors être alimenté soit par les PV, soit par une batterie Lithium-Iron-Phosphate d'une capacité de 2.4 kWh.
- **Ajout d'un onduleur** : Dans le cadre de ce projet, le réseau électrique n'est pas utilisé comme source d'énergie, car le nano-réseau est en mode isolé, c'est à dire déconnecté du réseau. L'onduleur a été installé dans le cadre de ces travaux pour effectuer des tests de décharge de la batterie selon deux configurations : une architecture DC-AC-DC incluant l'onduleur et un convertisseur 230V AC / 48V DC et une architecture 48V DC, pour alimenter une charge programmable. Le but de ces tests étant de quantifier l'efficacité énergétique de l'installation et d'investiguer ses limites.
- **Brasseurs d'air 24V DC** : Malgré une recherche active de brasseurs d'air 48V DC au cours du projet, il n'a pas été possible de trouver des appareils adaptés à cette tension sur le marché. De ce fait, le choix a été fait d'utiliser des brasseurs d'air 24V DC et un adaptateur 48 vers 24 PoE.

- **Station solaire et météorologique :** Afin de corréliser les données météorologiques externes avec les données de production et de consommation d'énergie internes, ainsi que le confort thermique, une station solaire et météorologique du réseau IOS-net [64] développée par le laboratoire ENERGY-Lab a également été intégrée et installée sur le toit, photographiée dans la figure 3.8. Associer des mesures d'ensoleillement aux mesures de production d'énergie solaire peut permettre de calculer régulièrement, en termes de bilan, le rendement d'une centrale photovoltaïque grâce à la relation suivante :

$$\eta_{PV} = \frac{P}{S} \cdot \frac{1}{GHI} \quad (3.1)$$

avec η_{PV} le rendement de l'installation, P la production d'énergie solaire (kWh), S la surface de la centrale PV (m^2) et GHI l'ensoleillement du site (kWh/m^2).

Des photographies du rack de distribution installé dans le local technique et de la centrale photovoltaïque ainsi que la station solaire et météorologique installés en toiture sont représentées en Figures 3.7 et 3.8 ci-dessous.

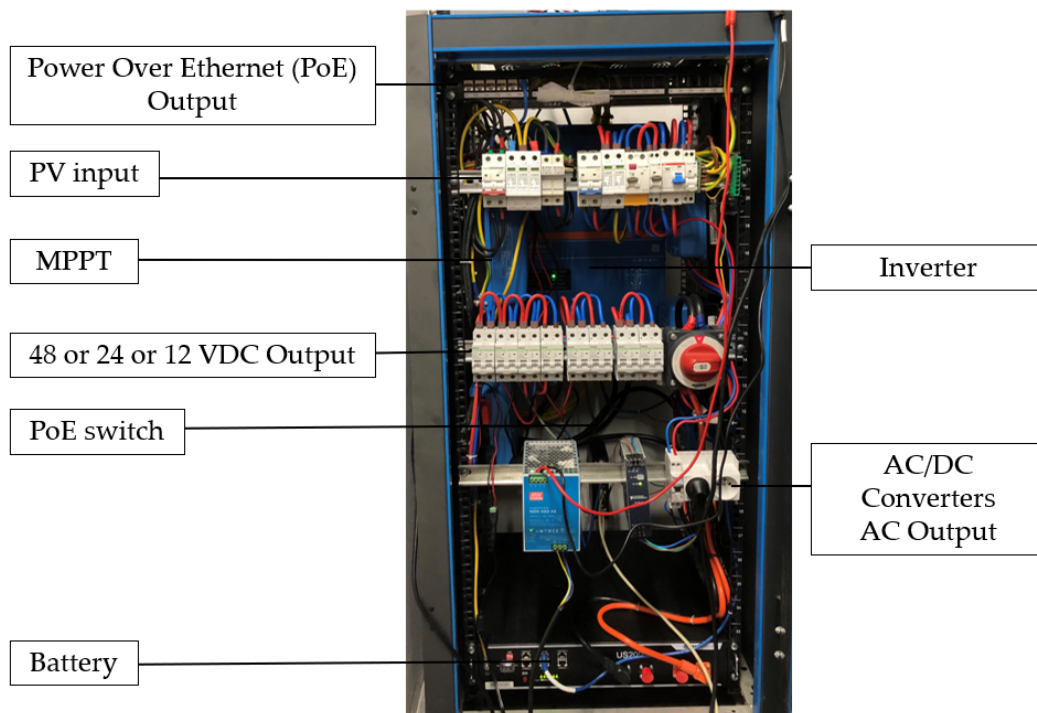


FIGURE 3.7 : Photographie de la baie informatique regroupant les différents éléments du nano-réseau LVDC.

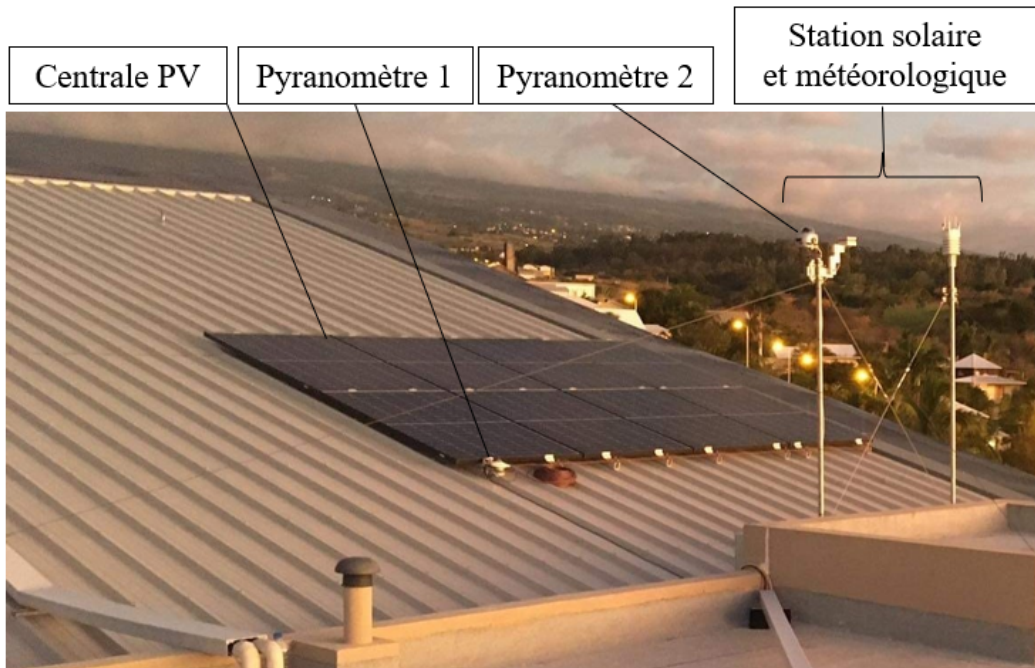


FIGURE 3.8 : Photographie de la centrale photovoltaïque et de la station météorologique en toiture du bâtiment.

Concernant les protocoles de communications et les interactions entre les différents composants du nano-réseau pour l'échange de données, la chaîne de mesures détaillant ces éléments est présentée dans la sous-section suivante.

3.3.3 Chaîne de mesures du nano-réseau 48V DC

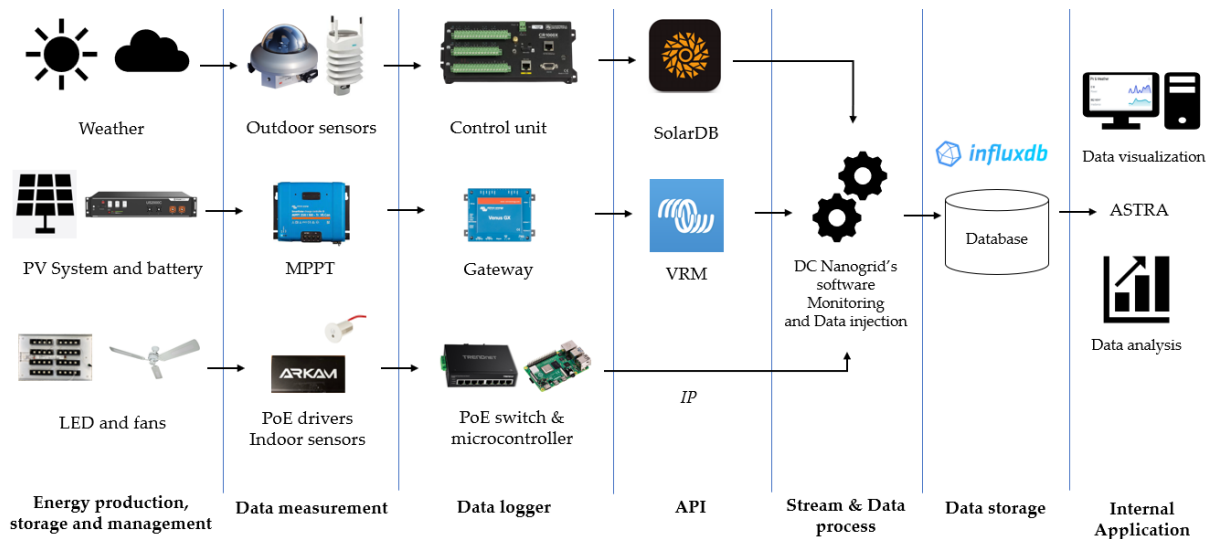


FIGURE 3.9 : Schéma de la chaîne de mesures au sein du nano-réseau 48V DC.

Description des éléments de la chaîne de mesures détaillée en figure 3.9 :

- **Production et stockage d'énergie** : Le régulateur MPPT, l'onduleur et la batterie sont reliés par une communication Ve.bus à une passerelle, qui est connectée au réseau internet local. Les données relatives aux grandeurs électriques, telles que la tension (V), le courant (A) et la puissance (W), mesurées et récupérées par la passerelle sont ensuite transmises à une interface utilisateur appelée "VRM" fournie par le fabricant.
- **Station solaire et météorologique** : La station solaire et météorologique est intégrée au réseau de stations IOS-net supervisé par le laboratoire ENERGY-Lab. Par conséquent, les données ouvertes sont transmises en quasi temps réel via l'application web et mobile "SolarIO" [65].
- **Application Programming Interface (API)** : L'application VRM et l'application SolarIO disposent toutes deux d'une interface de programmation d'applications (API). Les informations sont récupérées à l'aide du protocole de transfert hypertexte (HTTP) en communiquant avec leurs API respectives.
- **Drivers Power Over Ethernet (PoE)** : Pour les drivers PoE, chaque appareil possède une adresse IP (Internet Protocol). Il est donc possible d'obtenir des informations sur la tension (V), le courant (A) et la puissance (W) en interrogeant les pilotes via une communication Secure Socket Shell (SSH). Les pilotes PoE ont deux options d'alimentation possibles : soit une alimentation PoE directe, soit une entrée d'alimentation 48V DC combinée à une entrée Ethernet. Le pilote a trois sorties possibles : deux pour des charges de 48V DC, avec un maximum de 1A, et une sortie série pour la communication avec un capteur. Dans cette configuration, un capteur de luminosité et de présence est connecté au driver, ce qui permet de réguler l'éclairage local en fonction de la présence de l'utilisateur et du niveau de lumière ambiante.

Avantages :

- **Centralisation des données** : Actuellement, l'instrumentation existante des équipements électriques au sein de l'entreprise est segmentée en de multiples interfaces utilisateurs : une pour la climatisation (interface Mitsubishi), une autre pour la consommation énergétique générale (plateforme RSW), une pour la gestion de l'éclairage, une pour les bornes de recharge des véhicules électriques, une autre pour les capteurs environnementaux intérieurs IoT (Internet des objets) (plateforme LoRa), et une dernière pour la station météo. En ce qui concerne spécifiquement l'éclairage, la gradation est réglée à l'aide du protocole DALI (Digital Addressable Lighting Interface) et contrôlée via une application mobile, mais les mesures ne sont pas utilisables. Dans le cas des unités de ventilation, l'utilisateur les contrôle manuellement, à l'aide de télécommandes. L'ensemble de ces interfaces ou plateformes ne permet pas de récupérer les données pour un traitement ultérieur. Lorsqu'elles le sont, c'est typiquement sous la forme de fichiers .csv qu'il faut extraire manuellement. Cette procédure nécessite de nombreuses heures de travail pour l'analyse des données par les ingénieurs en gestion de l'énergie de l'entreprise. Dans le cas du nano-réseau DC déployé pour ce projet, l'objectif d'utiliser des équipements électriques connectés au réseau ou équipés d'une API dédiée a été de simplifier fortement le traitement des données en centralisant la totalité des informations dans une seule interface utilisateur.
- **Facilité d'installation du déploiement PoE** : Le principal avantage de la technologie PoE est de pouvoir alimenter en énergie et en même temps collecter, contrôler et analyser les données de mesure des équipements via un seul câble RJ45. Cette simplification des câblages a permis de faciliter l'installation dans les locaux car les câblages étant normés par le standard IEEE 802.3bt, l'installateur n'est pas en contact avec les fils électriques au moment de la pose des équipements. De plus, cette possibilité de mesurer la consommation d'énergie dans les bâtiments tertiaires peut être un atout majeur, car les propriétaires de

bâtiments sont tenus de transmettre leurs données à la plateforme OPERAT mise en place par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) afin de respecter les objectifs du décret tertiaire.

- **Technologies libres :** Le rapatriement et la supervision des données sont réalisés en deux étapes : dans un premier temps la totalité des mesures du nano-réseau (conditions météorologiques, capteurs environnementaux intérieurs, mesures de tension, courant, puissance, état de charge de la batterie) est stockée dans une technologie libre de base de données (Influxdb). Également, les développements permettant de communiquer avec les API et réaliser l'insertion en base de données ont été codés en langage Python. Ceux-ci sont accessibles en annexe du manuscrit. Une capture d'écran de l'interface influxdb-v2 mise en œuvre est présentée dans la figure 3.10.

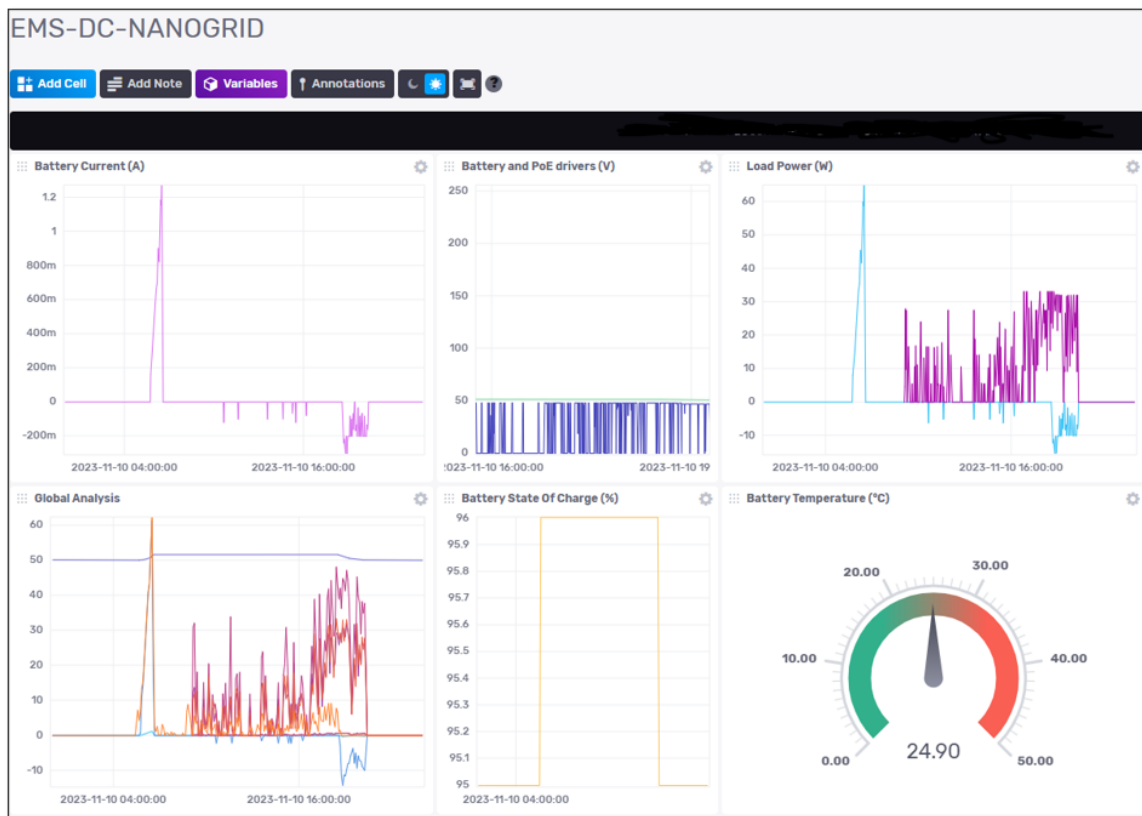


FIGURE 3.10 : Capture d'écran de l'interface influxdb.

Dans un second temps concernant la visualisation des données, une Interface Homme Machine (IHM) a été développée dans le cadre d'une collaboration avec Flavien Bernard, ingénieur de recherche au laboratoire ENERGY-Lab et Intégrale Ingénierie. Les différentes interfaces illustrées par les figures 3.11, 3.12, 3.13 et 3.14, ont été développées à l'aide d'un cadre React.js bien connu appelé Next.js. Cette technologie offre des capacités sans serveur pour fournir des pages web rapides et dynamiques. Étant donné que cette IHM interagit avec des données, il est essentiel de prêter une attention particulière à ses capacités de récupération de données. À cet égard, Next.js fournit des fonctions intégrées, ce qui en fait un choix judicieux pour les tâches données. Une API spécifique a été développée pour interroger les données directement à partir d'InfluxDB dans Next.js, assurant une récupération rapide des données, ce qui est vital pour les tableaux de bord de gestion de l'énergie en temps réel.

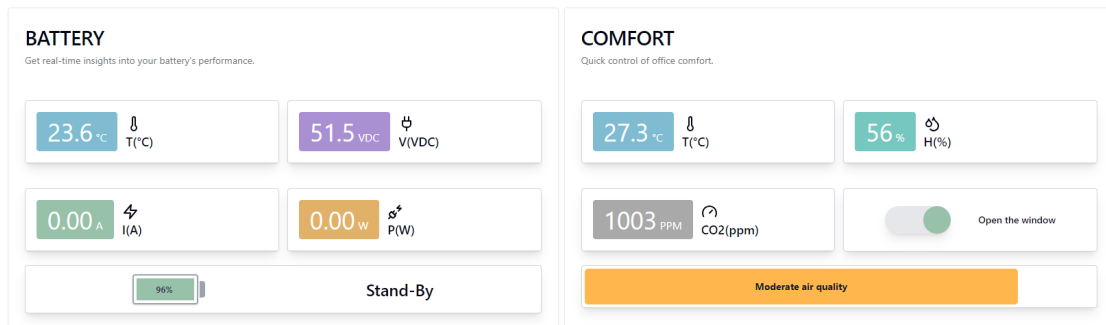


FIGURE 3.11 : Capture d'écran de l'interface utilisateur dans l'application ASTRA - Supervision de la batterie et du confort intérieur.

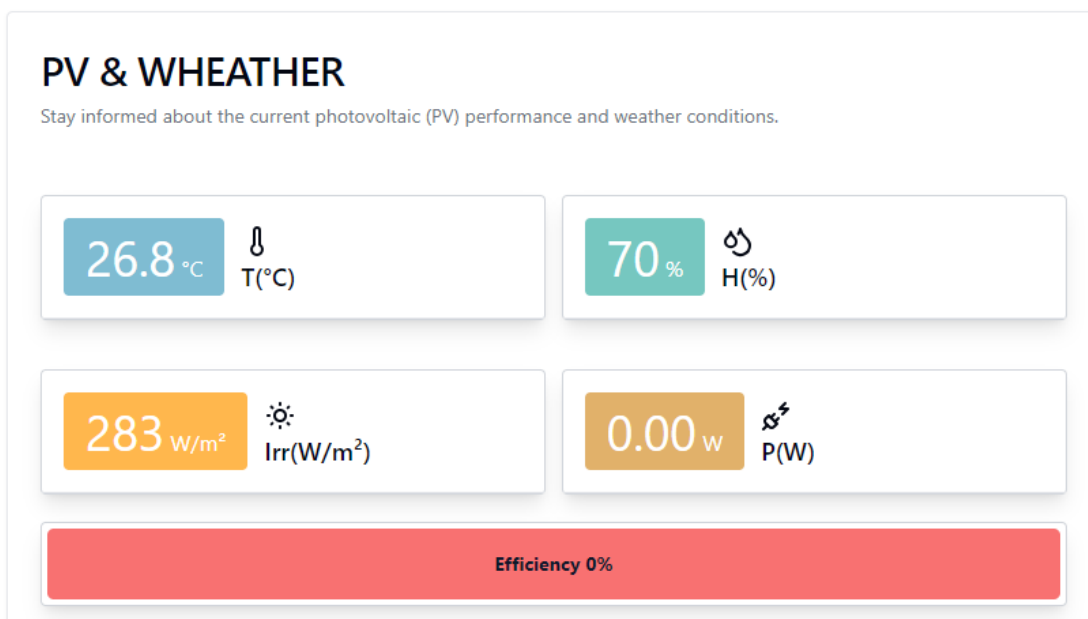


FIGURE 3.12 : Capture d'écran de l'interface utilisateur dans l'application ASTRA - Supervision de la production PV et de la météo extérieure.



FIGURE 3.13 : Capture d'écran de l'interface utilisateur dans l'application ASTRA - Mesures de température et humidité intérieures et extérieures.

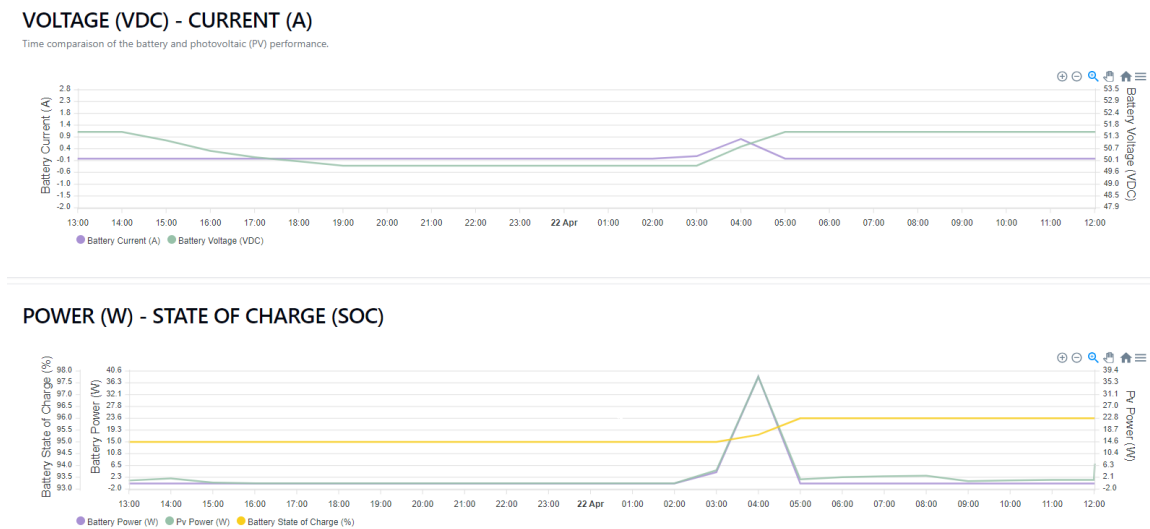


FIGURE 3.14 : Capture d'écran de l'interface utilisateur dans l'application ASTRA - Mesures de tension et courant de la production PV et de la batterie.

En retour d'expérience de l'installation après plusieurs mois d'utilisation, les axes d'améliorations suivants sont proposés :

- **L'intégration d'une alerte de pertes de données :** Afin d'assurer une maintenance régulière de l'installation, des alertes en cas de pertes de données pourraient être implémentées afin de prévenir l'utilisateur et limiter le temps de pertes de données entre deux mesures.
- **L'ajout de boutons de commande :** Une implémentation de boutons de commande avait été envisagée concernant la gestion des drivers PoE, cependant, les drivers ayant une gestion locale automatisée de la gradation de l'éclairage en fonction de la luminosité, ce développement n'a pas été défini comme une priorité.

Afin de comparer l'efficacité énergétique du nano-réseau selon deux configurations (classique ou totalement DC), une méthodologie constituée d'une analyse théorique et un banc de mesures expérimentales a été mis en place et est décrit dans la section suivante.

3.4 Evaluation de l'efficacité énergétique du nano-réseau 48V DC

L'une des principales contraintes liées au déploiement du courant continu dans les bâtiments concerne l'incertitude relative au comportement des bus de distribution DC en termes de stabilité. Une chute importante de la tension de distribution peut entraîner une dégradation des équipements terminaux et une surchauffe des câbles, en raison de l'augmentation de la consommation de courant.

En ce qui concerne l'efficacité globale du système, elle serait de 100% dans le cas où la puissance fournie est égale à la puissance consommée par les appareils. Cependant, les pertes par effet Joule dans les câbles et l'efficacité des composants affectent inévitablement les performances du système.

Pour ces raisons, il a été choisi de quantifier de manière théorique et expérimentale l'efficacité énergétique et les chutes de tension du nano-réseau 48V DC déployé. Afin de comparer ses performances à une architecture hybride classique (PV-batterie-onduleur-convertisseur AC-DC), un banc de mesures expérimentales a été mis en place. L'objectif principal de cette expérimentation est de quantifier les avantages et les limites de l'architecture déployée.

La mesure de l'efficacité énergétique a été réalisée dans deux configurations du nano-réseau. Dans le premier cas, des convertisseurs DC-AC et AC-DC sont intégrés dans la distribution électrique, et dans le second cas, la distribution électrique est entièrement réalisée en courant continu à 48V DC. Les données sont extraites de la base de données intégrée décrite précédemment, et permettent de quantifier l'efficacité énergétique globale du nano-réseau dans les deux configurations.

3.4.1 Evaluation théorique de l'efficacité énergétique d'un nano-réseau 48V DC

Estimation des chutes de tension

Comme précisé dans la section 1.3.1 du chapitre 1, la méthodologie de *S. Moussa et al.* [25] a été suivie pour quantifier les chutes de tension théoriques qui pourraient se produire sur le bus DC. La résistance $r(\Omega)$ du câble est calculée selon l'équation 3.2 pour ensuite estimer le pourcentage (%) de chute de tension (équation 3.3). Ce calcul est basé sur des facteurs tels que la distance, la section du câble, la tension de distribution et la puissance requise :

$$r = \frac{\rho \cdot 2L}{S} \tag{3.2}$$

avec $\rho = 0.01724 \text{ Ohm}\cdot\text{mm}^2/\text{m}$ la valeur de la resistivité du cuivre, L la distance de câblage (multipliée par deux car on tient compte de l'aller-retour en courant continu (m)), et S la section de câble (mm^2). Enfin le taux de chutes de tension exprimé en pourcentage est défini par les équations suivantes :

$$\Delta v^2 - v \cdot \Delta v + r \cdot P_{ch} = 0 \tag{3.3}$$

On suppose Δv^2 négligeable devant $-v \cdot \Delta v$ où Δv correspond à l'écart de tension, v la tension du bus DC (V) et I le courant (A) utilisé, calculé à partir de la puissance de la charge P_{ch} exprimée en (W), on obtient :

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{100 \cdot I \cdot r}{v} \tag{3.4}$$

Note : L'équation 3.4, qui est une simplification de l'équation 3.3, correspond à la formule utilisée dans ces travaux pour les calculs théoriques du taux de chutes de tension et la comparaison avec les valeurs expérimentales. Pour affiner la précision des valeurs théoriques comme dans le cas de simulations, il peut être nécessaire d'utiliser l'équation 3.3.

A titre d'exemple, l'évolution de la chute de tension en fonction de la demande de puissance est représentée dans la Figure 3.15 pour deux sections de câble différentes : 1.5 mm^2 et 2.5 mm^2 . Ce choix de section a été déterminé car il s'agit des sections de câbles les plus utilisées actuellement dans les bâtiments. Les paramètres utilisés dans le calcul des chutes de tension sont une distance de câble de 25m et une tension de 48V DC.

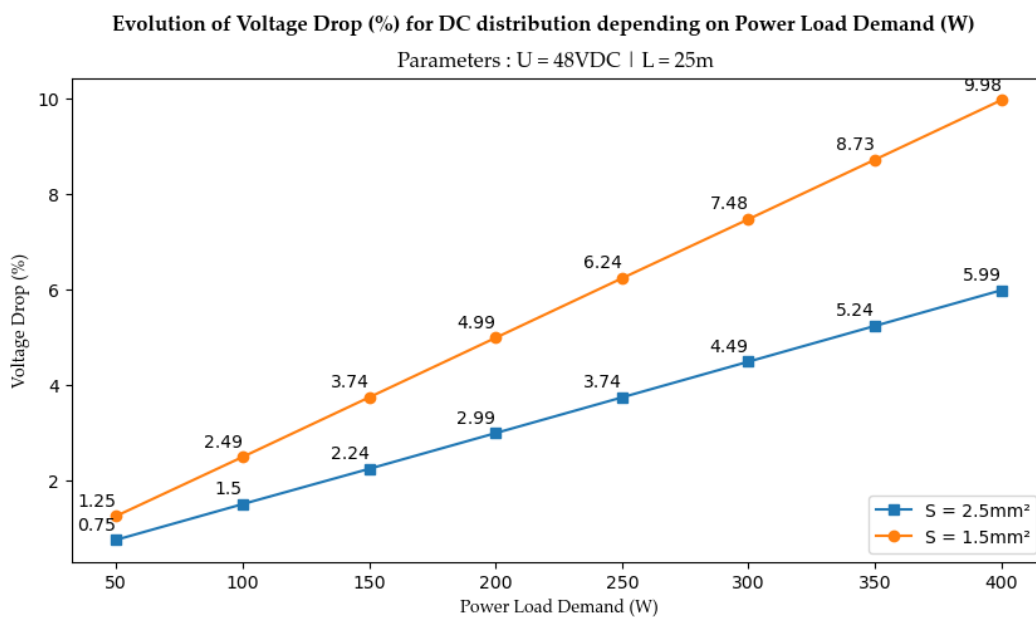


FIGURE 3.15 : Evolution des chutes de tension théoriques en fonction de la puissance finale en 48V DC pour une distance de 25m et pour les sections de câbles 1.5mm^2 et 2.5mm^2 .

Analyse : D'après le calcul théorique des chutes de tension pour les sections de câble 1.5mm² et 2.5mm² détaillé dans l'équation 3.2, on peut constater que plus la section de câble est élevée, plus la résistance du câble est faible. De ce fait, les chutes de tension seront moins élevées, comme on peut le voir en figure 3.15 pour une puissance finale de 50 à 400W : les chutes de tension varient de 1.25% jusque 9.98% pour un câble de 1.5mm² et de 0.75% à 5.99% pour un câble de 2.5mm².

Ces calculs indiquent que théoriquement, dans le respect de la norme NFC15-100 qui requiert une chute de tension de minimum 3% pour l'éclairage et 5% pour les autres appareils, il ne faudrait pas dépasser une puissance d'environ 140W pour un câble de section 1.5mm² et 200W pour un câble de section 2.5mm², dans le cadre d'une distribution électrique en 48V DC.

Efficacité énergétique pour une architecture DC-AC-DC

Pour évaluer l'efficacité énergétique de ce type d'architecture, le système théorique comprend une double conversion du courant : premièrement, du courant continu (produit par les panneaux photovoltaïques ou une autre source en courant continu) en courant alternatif (pour se conformer à la norme électrique actuelle dans les bâtiments), et deuxièmement, du courant alternatif en courant continu pour tous les appareils, tels que les batteries, les équipements électroniques et les LED.

Cette configuration est celle en cours d'usage actuellement dans les bâtiments qui disposent d'un générateur photovoltaïque et utilisent des appareils en courant continu. Ce type d'installation comprend un onduleur, pour transformer le courant continu des panneaux photovoltaïques en courant alternatif standard de 230V AC, et un convertisseur AC-DC, pour alimenter un ou plusieurs appareils en courant continu. Cette étude est basée sur une seule ligne de distribution, donc on suppose qu'il n'y a qu'un seul convertisseur AC-DC pour alimenter un appareil d'une puissance de 50 à 400 W. La figure 3.16 est une représentation schématique de ce type d'installation.

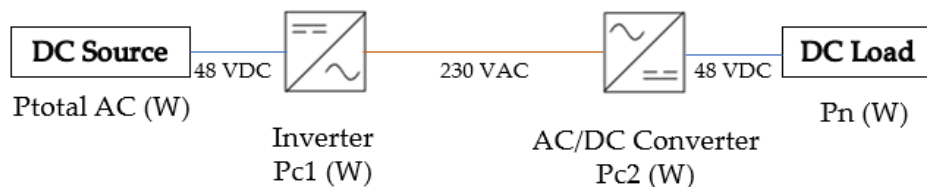


FIGURE 3.16 : Représentation schématique d'une distribution DC-AC-DC selon les normes actuelles.

L'efficacité du système $\eta_{th_{AC}}(\%)$ est calculée dans l'équation (3.5) en divisant la puissance de consommation de l'appareil final $P_n(W)$ par la puissance totale consommée par le système $P_{total_{AC}}(W)$. Dans l'équation (3.6), $P_{total_{AC}}$ est calculée en prenant en compte l'impact de la consommation d'énergie du convertisseur donnée par la fiche technique des composants :

$$\eta_{th_{AC}} = \frac{P_n}{P_{total_{AC}}} \cdot 100 \quad (3.5)$$

$$P_{total_{AC}} = P_n + P_{c1} + P_{c2} \quad (3.6)$$

avec P_{c1} la puissance de consommation de l'onduleur (W) et P_{c2} la puissance de consommation du convertisseur AC/DC (W).

Pour l'étude de l'efficacité énergétique DC-AC, notamment pour la caractérisation des onduleurs, des formules et des protocoles d'essai ont été développés aux États-Unis par la commission "California Energy Commission (CEC)" et les Sandia National Laboratories [66, 67].

En Europe, le même travail adapté au climat local a été réalisé par le Centre Commun de Recherche (CCR), le laboratoire de recherche scientifique et technique de l'Union européenne comme cela a été mis en évidence dans les travaux de *E.D. Dunlop et al.* [68]. Leurs travaux de recherche ont notamment déterminé des coefficients de pondération à appliquer sur différents niveaux de fonctionnement d'un onduleur tout au long de son cycle de puissance. Bien que cela ne soit pas utilisé dans le cadre de cette étude, cela pourrait être intégré en termes de perspectives pour des travaux futurs.

Efficacité énergétique pour une architecture DC

Pour une évaluation de l'efficacité énergétique d'une distribution DC, l'hypothèse est faite que la tension de 48V DC est distribuée de la source à l'appareil terminal DC, directement sans passer par des étapes de conversion du courant, comme représenté en Figure 3.17.

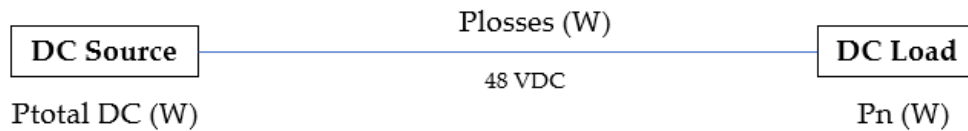


FIGURE 3.17 : Représentation schématique d'une distribution DC selon les normes actuelles.

Le rendement du système $\eta_{th_{DC}}(\%)$ est calculé en Equation (3.7) en divisant la puissance appelée par l'appareil DC $P_n(W)$ par la puissance totale consommée par le système $P_{total_{DC}}(W)$. Dans l'équation (3.9), $P_{total_{DC}}$ est calculé en prenant en compte l'impact des chutes de tension, calculée dans l'équation (3.8) avec $P_{losses}(W)$ comme suit :

$$\eta_{th_{DC}} = \frac{P_n}{P_{total_{DC}}} \cdot 100 \quad (3.7)$$

$$P_{losses} = \left(\frac{P_n}{V}\right)^2 \cdot r \quad (3.8)$$

$$P_{total_{DC}} = P_n + P_{losses} \quad (3.9)$$

avec V la tension du bus DC (V), et r la résistance de câble (Ω) calculée en équation (3.2).

Comparaison de l'efficacité DC-AC-DC vs DC

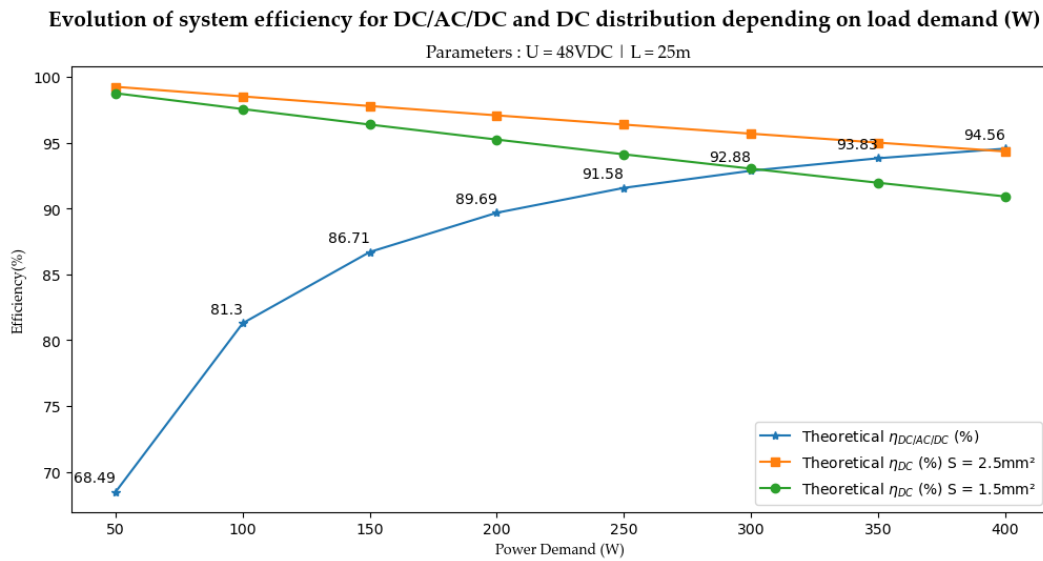


FIGURE 3.18 : Superposition de l'efficacité théorique DC-AC-DC vs DC pour une distance de 25m, une tension de 48V DC et des câbles de section 1.5mm² et 2.5mm².

Analyse : D'après les calculs théoriques des rendements d'un nano-réseau dans les deux configurations (DC-AC-DC et DC), nous pouvons constater sur la figure 3.18 qu'il existe un point d'intersection des efficacités relatives aux deux configurations, ici 300W pour un câble de 1.5mm² et 400W pour un câble de 2.5mm².

Ceci s'explique par le fait que d'une part, le rendement des convertisseurs augmente au fur et à mesure qu'ils fonctionnent à leur puissance nominale de fonctionnement et d'autre part, les pertes en ligne sont proportionnelles au carré du courant de ligne. Or, à puissance constante, le courant de ligne est inversement proportionnel à la tension fournie (voir équation 1.4). Ainsi, en considérant une même puissance consommée par la charge, la distribution AC se faisant en 230V, les pertes en ligne sont beaucoup plus faibles que pour une distribution DC en 48V. En revanche, les pertes liées aux conversions DC-AC et AC-DC sont fixes, leur impact est donc bien plus significatif pour des faibles puissances. Dans le cas d'une distribution DC, l'efficacité énergétique du système va chuter au fur et à mesure que les chutes de tension vont augmenter, car les pertes en ligne vont être plus importantes, et donc la consommation d'énergie globale va augmenter. Par ailleurs, l'échauffement des câbles peut causer des dommages importants en termes de sécurité des utilisateurs et durée de vie des composants.

A titre d'exemple, nous pouvons constater sur la figure 3.18 qu'à 50W, en DC-AC-DC, le rendement est de 68.5 % tandis que les pertes en ligne sont négligeables. En DC, le rendement est supérieur à 95% et les pertes en ligne atteignent quelques watts. A l'inverse, à 400W, le rendement a atteint 95% en DC-AC-DC, tandis qu'en DC, les pertes en ligne sont plus importantes et la valeur du rendement a diminué.

Afin de valider cette méthodologie pour le dimensionnement des câbles dans le cadre de déploiements de nano-réseau DC et la mesure de l'efficacité énergétique selon la configuration choisie, un banc de mesures expérimentales a été mis en place sur l'installation en entreprise.

3.4.2 Evaluation expérimentale de l'efficacité énergétique d'un nano-réseau 48V DC

Banc de mesures expérimental

Le schéma du banc expérimental qui a été développé est présenté à la figure 3.19 :

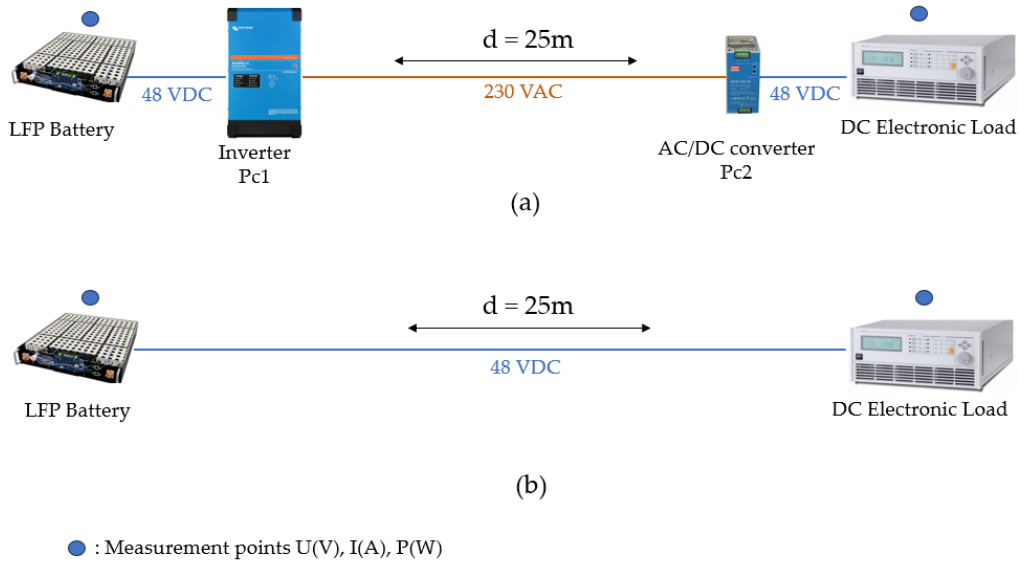


FIGURE 3.19 : Schéma du banc expérimental pour l'évaluation de l'efficacité énergétique du nano-réseau.

Pour les deux architectures, l'objectif est d'obtenir des mesures de courant, tension et puissance fournies ou consommées par la batterie et consommée par la charge. Ces mesures sont directement fournies par la charge électronique DC et la batterie. La batterie transmet ses données grâce à l'API Victron et la charge programmable peut communiquer via une liaison série ou un réseau IP. Ces données sont directement stockées en base de données.

Les mesures ont été effectuées avec des câbles 3G 1.5mm² et 3G 2.5mm², mesurant chacun 25m de long, pour représenter le déploiement réel du nano-réseau dans les locaux de l'entreprise. La batterie LFP est utilisée comme source d'énergie car l'énergie solaire est intermittente, et il aurait été inapproprié de comparer deux mesures prises à des moments différents car l'ensoleillement n'aurait pas été exactement le même. La charge électronique DC permet de simuler une charge consommant une puissance comprise entre 50 à 400W. Toutes les références des équipements et leurs paramètres sont répertoriés dans le Tableau 3.1, selon les données du constructeur. Les sections suivantes présentent les mesures expérimentales obtenues sur le banc d'essai.

TABLE 3.1 : Liste des références des composants utilisés pour le banc de test expérimental.

Composants	Références	Fournisseur	Puissance (W)
Batterie	US2000C	Pylontech	-
Onduleur	Multiplus II	Victron	18 W
Convertisseur 230V AC/48V DC	NDR-240-48	Meanwell	5 W
Charge électronique DC	63800	Chroma ATE	1.8 kW max

Résultats de l'expérimentation

Comparaison de l'efficacité DC-AC-DC vs 48V DC pour une section de câble de 1.5mm²

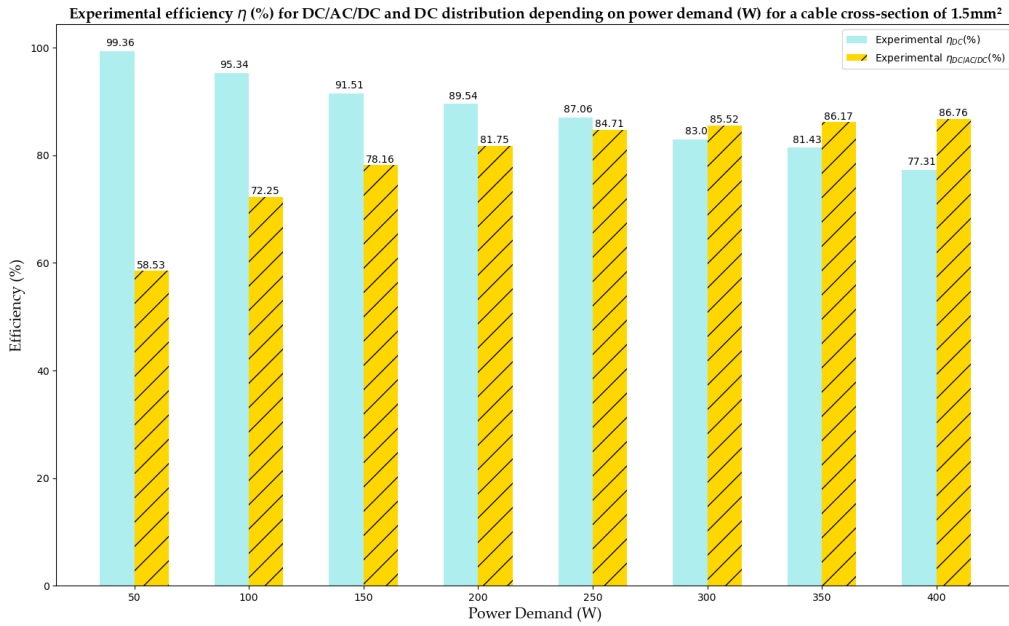


FIGURE 3.20 : Comparaison de l'efficacité énergétique DC-AC-DC vs DC pour un câble de 1.5mm².

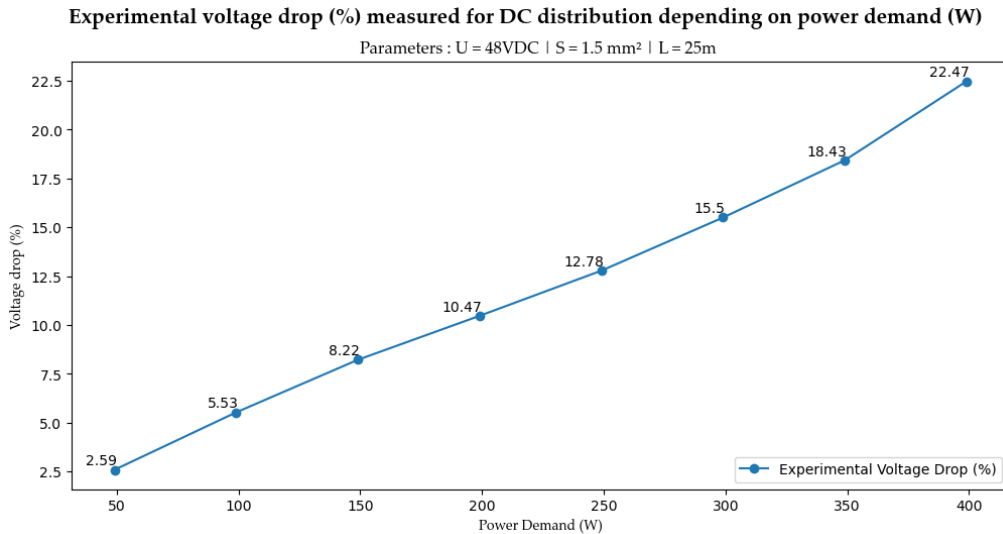


FIGURE 3.21 : Mesures des chutes de tension pour une distribution 48V DC pour un câble de 1.5mm² et une distance de 25m.

Analyse des mesures :

- Efficacité énergétique : La Figure 3.20 représente les mesures d'efficacité énergétique réalisées sur le banc expérimental selon la configuration (a) DC-AC-DC et selon la configuration (b) DC-DC (Figure 3.19). Comme cela a été vu en simulation dans la section précédente, l'efficacité énergétique diminue dans la configuration (b) à mesure que la puissance consommée par la charge programmable augmente. Inversement, pour la configuration (a) l'efficacité énergétique augmente à mesure que la puissance consommée augmente. En s'appuyant sur ces résultats expérimentaux, on peut voir que le rendement dans la

configuration DC est supérieur de 40.8% par rapport à la configuration DC-AC-DC pour une puissance consommée de 50W. Pour une puissance de 100W, le rendement est encore supérieur de 23% pour l'architecture DC. Au-delà de 270W de puissance consommée, on constate que le rendement devient supérieur pour l'architecture DC-AC-DC par rapport à l'architecture DC. Dans la section précédente, il avait été identifié une puissance théorique limite de 300W.

- Chutes de tension : Les mesures de chutes de tension sont représentées en Figure 3.21. On observe des chutes de tension comprise entre 2.59% et 22.47%, pour des puissances consommées comprises respectivement entre 50W et 400W. Cependant, afin de respecter les normes de la NFC-15100 qui limite la chute de tension à 5%, la puissance finale ne doit pas dépasser 100W dans ces conditions expérimentales (câble de 25m, avec une section de 1.5 mm² et une tension à 48V DC).

Comparaison de l'efficacité DC-AC-DC vs 48V DC pour une section de câble de 2.5mm²

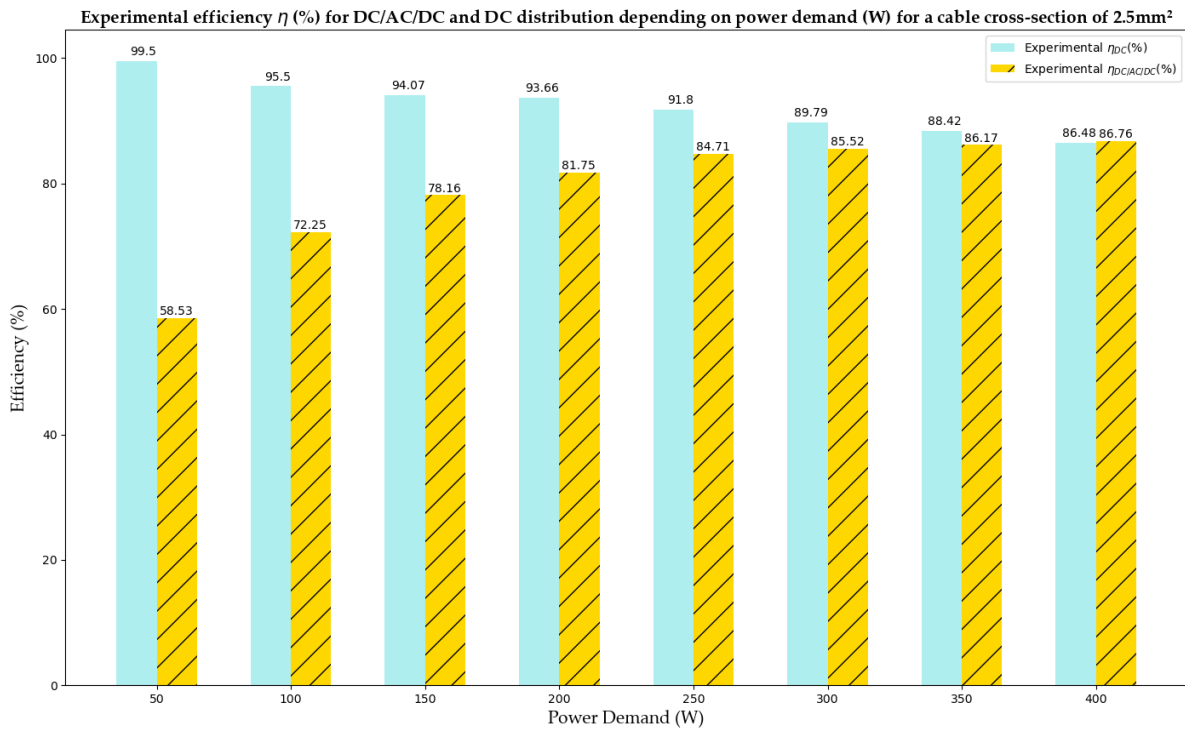


FIGURE 3.22 : Comparaison de l'efficacité énergétique DC-AC-DC vs DC pour un câble de 2.5mm².

Analyse des mesures :

- Efficacité énergétique** : Une deuxième comparaison de l'efficacité énergétique du nano-réseau pour la distribution DC-AC-DC ou DC a été réalisée avec une section transversale de 2.5mm², et les résultats sont présentés dans la Figure 3.22. Comme cela a été constaté en simulation dans la section précédente, le rendement DC est supérieur à celui en DC-AC-DC, jusqu'à environ 400W. À de faibles niveaux de puissance (inférieurs à 50W), le gain d'efficacité est sensiblement égal à celui obtenu avec une section de 1.5mm² (40% de gain), il peut donc être plus économique d'utiliser une section de 1.5mm² pour les appareils à courant continu, qui ne nécessitent pas de puissance d'alimentation supérieure à 50W. Cette valeur de puissance concerne les appareils comme l'éclairage, les écrans, les petits appareils électroniques rechargeables, les systèmes de vidéo surveillance et certains ordinateurs. De plus, ce résultat confirme que la section de câble nécessaire pour utiliser la norme IEEE 802.3 bt reste efficace et qu'il n'est pas nécessaire de modifier les paramètres d'installation pour gagner en efficacité, par exemple en utilisant une section de câble plus haute. En revanche, pour des puissances consommées plus élevées que 100W, il est nécessaire d'envisager des sections de câbles plus importantes.
- Chutes de tension** : En ce qui concerne les chutes de tension représentées sur la Figure 3.23, le même phénomène a été observé qu'avec la section 1.5mm² : les chutes de tension mesurées étaient plus élevées que prévu. Une chute de tension allant de 1,62% pour une puissance consommée de 50W à 13% pour 400W a été mesurée, au lieu de 0.75% et 6% évalués théoriquement dans la section précédente. Ainsi, bien que le rendement reste meilleur pour l'architecture DC jusqu'à des puissances consommées de 400W, la limite de 5% définie par la norme NFC-15100 est atteinte à partir de 150W pour un câble d'une section de 2.5mm², fixant ainsi une limite de consommation, dans ces conditions expérimentales (distribution en 48V DC sur 25 mètres).

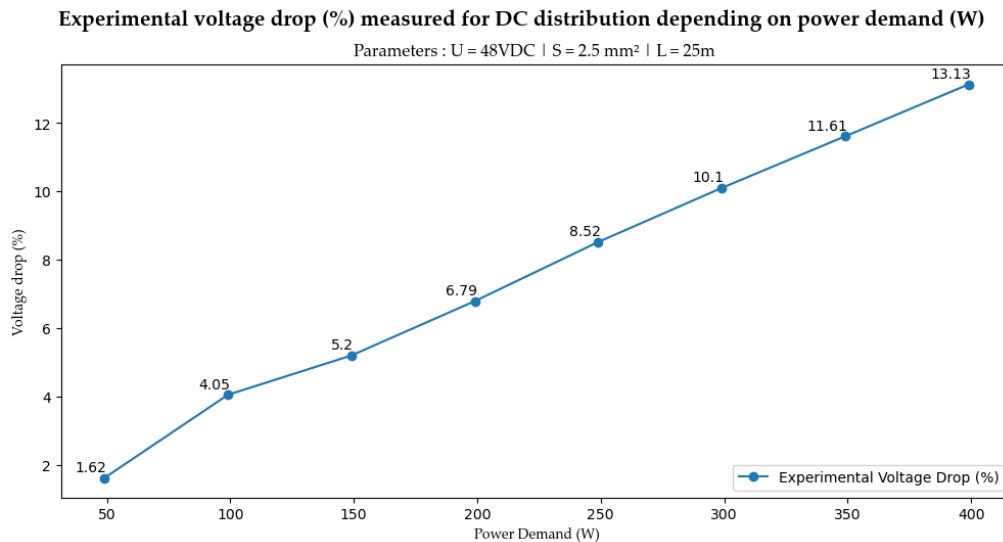


FIGURE 3.23 : Mesures des chutes de tension pour une distribution 48V DC pour un câble de 2.5mm² et une distance de 25m.

3.5 Synthèse

Travaux réalisés : Dans ce chapitre, il a été présenté la conception, les choix technologiques, et les étapes d'installation en entreprise d'un nano-réseau LVDC 48V DC, constitué d'une centrale photovoltaïque, une batterie Lithium-Fer-Phosphate, des panneaux de leds et des brasseurs d'air, alimentés via le protocole Power Over Ethernet 802.3bt.

Concernant les protocoles de communications, le rapatriement ainsi que l'analyse des données (production et consommation d'énergie, conditions thermiques intérieures et extérieures), des technologies libres ont été employées :

- Protocole Power Over Ethernet 802.3bt.
- Base de données influxdb.
- Programmation en langage Python pour la manipulation d'Application Programming Interface (API) et la mise en base de données.
- Bibliothèque react.js pour l'interface utilisateur.

Ces choix technologiques ont été opérés afin de faciliter la mise en oeuvre, l'accessibilité des données et en particulier, la centralisation des différentes mesures dans une interface utilisateur unique. Cette démarche permet ainsi de simplifier les infrastructures logicielles existantes en entreprise pour la gestion de l'énergie, qui contiennent généralement plusieurs interfaces utilisateurs (une par catégorie d'équipements), comme dans le cas de l'entreprise Intégrale Ingénierie.

A propos de l'efficacité énergétique de ce nano-réseau, celle-ci a été mesurée expérimentalement selon deux configurations différentes : une architecture "DC-AC-DC", qui correspond à une architecture électrique conventionnelle (PV, onduleur, convertisseurs AC-DC, appareils électriques à courant continu) et selon une architecture électrique 48V DC sans convertisseurs, de la production d'électricité à la consommation de l'appareil. Une charge électronique programmable en courant continu a été utilisée comme simulateur d'appareil électrique pour effectuer des mesures d'efficacité à divers niveaux de puissance, allant de 50 à 400 watts.

Les conditions expérimentales comprenaient des mesures pour deux sections de câbles différentes (1.5mm² et 2.5mm²) et pour une distance de 25m, qui correspond à la distance de déploiement du nano-réseau, entre le rack de distribution et les équipements terminaux placés dans les bureaux individuels sur le site expérimental. Par rapport à une architecture conventionnelle, un gain d'efficacité de 40% a été quantifié pour une puissance finale consommée de 50W, qui correspond à la puissance demandée par des appareils tels que des panneaux de leds ou des brasseurs d'air. Cette expérimentation a également permis d'étudier les limites d'efficacité du nano-réseau 48V DC, afin de fournir une méthodologie permettant d'identifier l'architecture la plus adaptée selon les conditions de déploiement. Dans les conditions de cette expérimentation, théoriquement, un point de puissance limite de 300W avait été quantifié théoriquement pour une section de 1.5mm² et 400W pour une section de 2.5mm². Expérimentalement, le point de puissance limite a été mesuré à 270W pour du 1.5mm² et 400W pour du 2.5mm².

Par ailleurs, une attention particulière a été portée sur la mesure des chutes de tension. En effet, selon la norme NFC15-100, celle-ci indique un respect de 3% pour l'éclairage et 5% pour les autres équipements. De ce fait, cette étude comparative de la distribution en courant continu par rapport à la distribution en courant alternatif intégrant des convertisseurs a pris en compte ces contraintes, afin de fournir des données adaptées aux exigences des normes législatives. Ainsi, dans les conditions expérimentales de cette étude (distance de 25m) une puissance maximale de 90W a été mesurée expérimentalement pour ne pas dépasser 5% avec une section de 1.5mm² et une puissance maximale de 150W a été mesurée pour du 2.5mm².

Axes d'améliorations et perspectives : Concernant l'interface utilisateur et le stockage des données, des améliorations pourraient être effectuées comme l'ajout d'alertes en cas de pertes de données, la possibilité de piloter des équipements et des modules d'analyse complémentaires.

A propos des mesures expérimentales destinées à étudier les avantages et les limites de la distribution en 48V DC, un écart a été quantifié entre le calcul théorique des chutes de tension et les mesures expérimentales. Celui-ci peut être attribué à plusieurs facteurs, notamment les résistances internes de la batterie et de la charge programmable, la qualité du câblage, les résistances des connecteurs et les dispositifs de protection. Cela souligne l'importance de prévoir une marge d'erreur pour les études de dimensionnement de nano-réseaux. Cette vigilance supplémentaire permettrait de garantir le respect des chutes de tension spécifiées et la conformité de l'installation aux normes en vigueur, afin de prévenir tout risque pour la sécurité des utilisateurs et tout dommage aux équipements terminaux.

Afin de caractériser au mieux de manière expérimentale les possibilités de la distribution en 48V DC, des tests complémentaires pourraient être réalisés avec différentes sections de câble, différentes distances de câblages, d'autres convertisseurs (pour effectuer une comparaison avec une distribution DC-AC-DC) et avec des profils de consommation variables.

Enfin, les mesures de puissance maximale pour respecter la limite des chutes de tension pour une distance de 25m pour des câbles de 1.5mm² et 2.5mm² ne dépassant pas respectivement 90 et 150W, ces résultats confirment que pour des puissances plus élevées et cette distance de câblage, il serait nécessaire d'utiliser des sections de câbles plus importantes ou alors d'utiliser une tension de distribution plus élevée.

En effet, il pourrait être judicieux de combiner la tension 400V DC et 48V DC afin de réduire les sections de câbles pour des distances de distribution supérieures à 30m au sein d'un bâtiment alimenté en courant continu. À proximité immédiate des utilisateurs finaux, une option pourrait être d'utiliser des convertisseurs 400/48V DC pour fournir une alimentation électrique sécurisée, garantissant que les tensions restent inférieures à 120V DC, qui est le seuil de « très basse tension de sécurité » en courant continu.

C'est à partir de cette étape que la possibilité d'utiliser la tension de 400V DC pour la distribution électrique

dans les bâtiments supportant des appareils à fort appel de puissance tels que les systèmes de climatisation ou de chauffage ont été étudiés au cours de ces travaux. Ces appareils étant pilotables, c'est dans cette configuration qu'un Système de Gestion de l'Énergie (SGE) peut jouer un rôle majeur pour réaliser des économies d'énergie, grâce à l'implémentation de commandes de contrôle. Le prochain chapitre présente le modèle de gestion de l'énergie basé sur l'optimisation du stockage thermique dans un bâtiment qui a été développé.

Chapitre 4. Modélisation d'un Modèle de Gestion de l'Énergie (Energy Management System - EMS) pour l'optimisation du stockage thermique

4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, l'instrumentation de la consommation d'énergie des locaux d'Intégrale Ingénierie a permis d'identifier que la part de la climatisation était le poste de consommation d'énergie électrique le plus important de l'entreprise. Par ailleurs, à la suite d'une installation d'un nano-réseau DC dans les locaux, les avantages et les limites de la distribution 48V DC ont été identifiés. L'impact des sections de câble et l'impact de la puissance des équipements terminaux sur l'efficacité énergétique du nano-réseau a été mise en évidence par des mesures expérimentales.

Ces résultats précédents permettent d'aborder ce chapitre avec la question suivante : **Une architecture de distribution DC avec une gestion optimale de la climatisation permettrait-elle d'améliorer la performance énergétique d'un bâtiment tout en conservant un même niveau de confort?**

Afin d'apporter des éléments de réponse à cette question, il est présenté dans ce chapitre :

1. **Une analyse technique de l'autoproduction photovoltaïque d'un système de climatisation en 600V DC sans gestion de l'énergie** : Afin de dépasser les limites de la distribution 48V DC, la possibilité d'alimenter des systèmes de climatisation à Débit de Réfrigération Variable (DRV) a été étudiée. Ainsi il sera présenté l'analyse de l'autoproduction photovoltaïque qui a été réalisée sur un site expérimental existant (entreprise MCFOI à Sainte-Marie, La Réunion), où un système d'alimentation DRV a été mis en place en utilisant la tension de distribution 600V DC directement issue des panneaux photovoltaïques.
2. **La modélisation d'un Energy Management System (EMS) appliqué à la gestion de la climatisation** : Afin d'évaluer l'impact de la gestion de la demande électrique sur la performance énergétique d'un nano-réseau, une modélisation d'un EMS a été réalisée pour optimiser le stockage thermique en agissant sur le pilotage des systèmes DRV.
3. **La synthèse des analyses et développements** réalisés dans ce chapitre est présentée dans la dernière section. Les résultats obtenus ont conduit au besoin d'étudier l'ajout de la gestion optimale d'un système de stockage au modèle d'EMS développé. En effet, dans le cas d'un bâtiment isolé autonome en énergie, le manque d'énergie est généralement assuré par un groupe électrogène. Une étude de cas sur le site du gîte du Piton des Neiges a été réalisée afin d'apporter une perspective d'architecture électrique DC avec une gestion optimale de l'énergie.

4.1.1 La consommation d'énergie des systèmes de climatisation à La Réunion

À La Réunion, les systèmes de climatisation représentent le principal poste de dépense énergétique et sont directement liés à la saisonnalité. Ainsi, bien qu'ils ne fonctionnent que quelques mois par an, la part de la consommation d'électricité des systèmes de climatisation représente 50% de la consommation d'énergie annuelle des bâtiments selon les données d'EDF Réunion[7]. À titre d'exemple, d'après les données de consommation d'énergie mesurées dans les locaux d'Intégrale Ingénierie (voir section 3.3), le poste de climatisation représentait 44% de la consommation d'énergie annuelle des locaux en 2022.

Cependant, contrairement aux autres appareils électriques du secteur tertiaire tels que les ordinateurs, serveurs et autres équipements informatiques, les systèmes de climatisation sont des équipements pilotables. En effet, la puissance nécessaire pour fournir le service de l'équipement (le rafraîchissement et la déshumidification de l'air) peut être ajustée selon la volonté de l'utilisateur. Généralement, la température de consigne est fixée entre 25 et 26 degrés à La Réunion pour obtenir un niveau de confort adéquat durant l'été austral.

Notions sur le confort thermique en milieu tropical

D'après les préconisations des différents référentiels tels que Perene [69] ou Mayenergie [70], il est préconisé de favoriser une température de consigne comprise entre 28 et 29°C, combinée à une utilisation des brasseurs d'air, afin de limiter la consommation d'énergie électrique des bâtiments. Cependant, d'après les retours utilisateurs des occupants des locaux d'Intégrale Ingénierie, ces préconisations ne sont pas toujours applicables car le confort thermique n'est pas de circonstance. En effet, ce dernier dépend de différents paramètres :

- La conception et l'isolation du bâtiment.
- L'activité physique de l'utilisateur.
- La tenue de l'utilisateur.
- Le positionnement d'un bureau (exposition, proximité d'une ouverture).
- Le niveau de sensibilité de l'utilisateur à la fraîcheur ou à la chaleur.

Afin de pallier ces contraintes, en phase de conception, les équipes travaillant au pôle Qualité Environnementale des bâtiments chez Intégrale Ingénierie, réalisent des Simulations Thermiques Dynamiques (STD). Ces simulations ont pour but d'estimer la qualité du confort thermique et la consommation d'énergie du bâtiment, selon différents scénarios. Dans ces scénarios, il est choisi de faire varier différents paramètres tel que :

- Le planning d'occupation des utilisateurs.
- Les températures de consigne.
- Le dimensionnement du système de climatisation.
- L'isolation du bâtiment.

Concernant en particulier le niveau de consigne, ce paramètre est généralement fixé à l'année selon deux scénarios : un scénario à 26 degrés (version de base) et un scénario à 29 degrés avec brasseurs d'air (version optimisée).

4.1.2 Analyse de l'autoproduction PV d'un système de climatisation hybride DC et AC expérimental

Présentation du système de climatisation DRV hybride de l'entreprise MCFOI

Au cours de cette thèse, nous nous sommes intéressés au développement d'un système de climatisation à Débit de Réfrigération Variable (DRV) alimenté directement en courant continu.

La société Mitsubishi, fournisseur de systèmes de climatisation, a été questionnée à ce sujet. Un travail collaboratif a ainsi été réalisé avec M. Théodoric GAZE, responsable technique de l'entreprise Macé Climatisation Froid Océan Indien (MCFOI), distributeur local de la marque Mitsubishi à La Réunion. Un prototype d'installation de système DRV alimenté directement en courant continu par une centrale photovoltaïque et également connecté au réseau a été étudié.

La Figure 4.1 et les photos en Figure 4.2 représentent respectivement le schéma synoptique et les photos de l'installation en question, dans les locaux de la société MCFOI. La référence du modèle de système de climatisation DRV hybride DC-AC utilisé est PUCY-P350YKA.

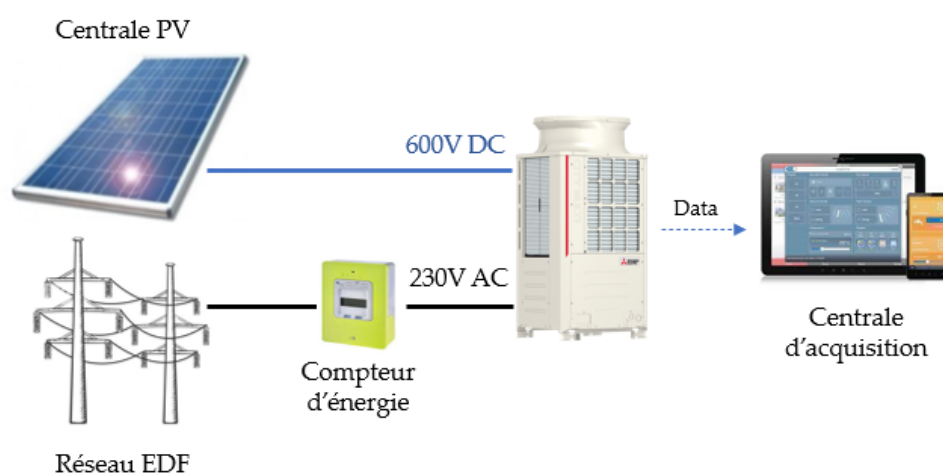


FIGURE 4.1 : Schéma synoptique de l'installation du système DRV alimenté en courant continu par une centrale PV et connecté au réseau, entreprise MCFOI, La Réunion.

Concernant l'architecture électrique de l'installation, la centrale photovoltaïque comporte 15 modules PV (3 lignes parallèles constituée de 5 modules PV en série) qui permettent de fournir une tension d'alimentation de 600V en courant continu DC. Cette source de tension est connectée directement à la carte électronique d'alimentation du système de climatisation DRV par l'intermédiaire de deux composants de protections, deux ponts de diodes.

Comme représenté sur la Figure 4.1, le système de climatisation DRV hybride de l'entreprise MCFOI dispose d'une métrologie d'énergie avancée. D'une part, un compteur d'énergie communicant externe comptabilise l'énergie provenant du réseau EDF et d'autre part, le système de climatisation est instrumenté et équipé d'une centrale d'acquisition propre connectée à un stockage de données en ligne (MCC Cloud) et permet la quantification de l'énergie consommée.

De ce fait, en connectant ou déconnectant la centrale PV à la carte électronique d'alimentation du système DRV (Figure 4.2), il est possible de quantifier l'énergie provenant du réseau ou de la centrale PV, en comparant les données du MCC Cloud à celles provenant du compteur d'énergie EDF.

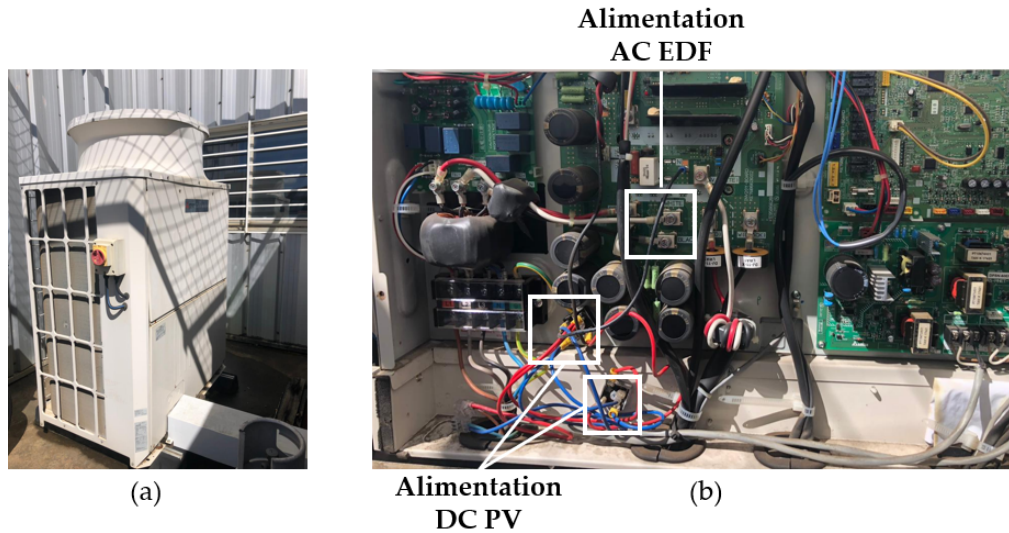


FIGURE 4.2 : (a) Photographie du système DRV hybride, MCFOI. (b) Photographie de la carte électronique du système DRV, câblée de manière hybride à l'alimentation DC provenant des PV et connecté au réseau EDF.

Analyse de l'autoproduction PV du système DRV

Pour des raisons techniques il n'a pas été possible au cours de ces travaux de réaliser une installation identique sur le nano-réseau expérimental déployé dans les locaux d'Intégrale Ingénierie. Cependant, une analyse de l'autoproduction photovoltaïque de l'installation au sein la société MCFOI a été réalisée. La centrale photovoltaïque du site n'étant pas instrumentée, il n'a pas été possible dans le cadre de cette étude d'évaluer le pourcentage d'autoconsommation.

La différence entre le taux d'autoproduction et le taux d'autoconsommation photovoltaïque réside dans leur façon de mesurer l'utilisation de l'énergie produite par une centrale photovoltaïque. Le taux d'autoconsommation quantifie le pourcentage d'énergie produite par la centrale qui est directement consommée sur place, sans être injectée dans le réseau ou stockée dans un système de stockage. En d'autres termes, il mesure l'efficacité avec laquelle l'énergie produite est utilisée pour répondre aux besoins locaux en électricité. Quant au taux d'autoproduction, celui-ci mesure la proportion de l'énergie totale consommée par un bâtiment ou un site qui provient de la production photovoltaïque interne.

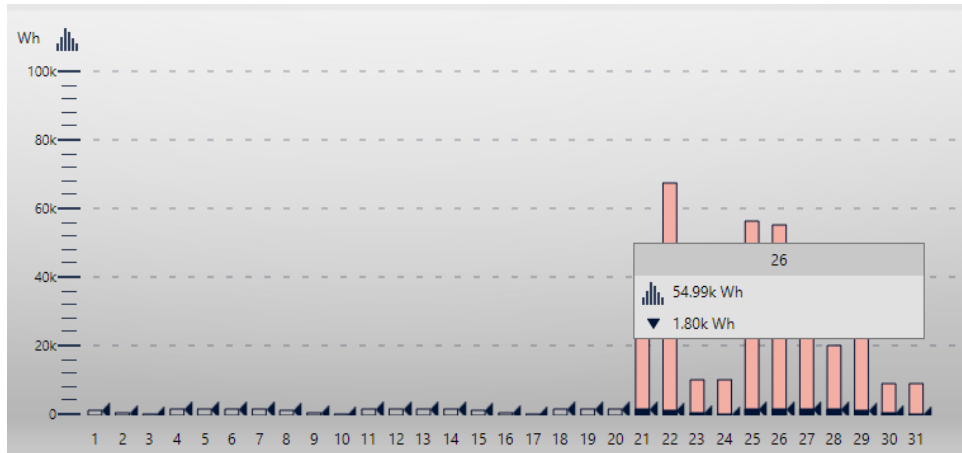
Les relations permettant de calculer le taux d'autoproduction et le taux d'autoconsommation sont respectivement détaillées dans les équations 4.1 et 4.2 ci-dessous :

$$Autoproduction_{\%} = \frac{Energie\ solaire\ consommée(kWh)}{Consommation\ d'énergie\ totale(kWh)} \cdot 100 \quad (4.1)$$

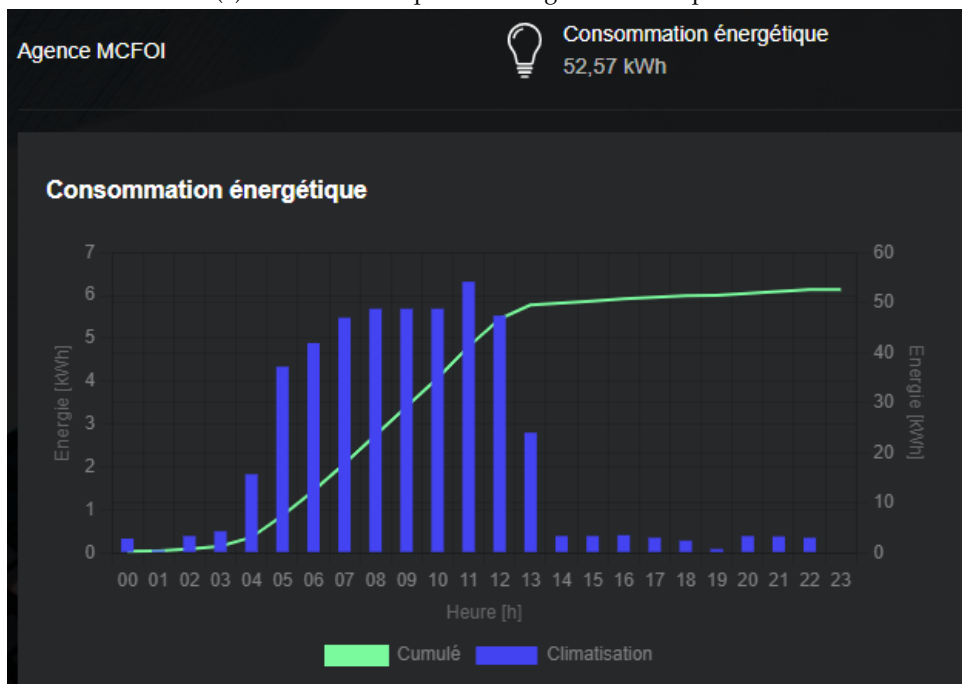
$$Autoconsommation_{\%} = \frac{Energie\ solaire\ consommée(kWh)}{Energie\ solaire\ produite\ (kWh)} \cdot 100 \quad (4.2)$$

Les figures 4.3 et 4.4 représentent respectivement les données de consommation énergétique mesurées par le compteur d'énergie provenant du réseau public et celles mesurées par la centrale d'acquisition interne au système de climatisation DRV pour deux journées différentes :

- **Journée du 26 mars 2024** : Durant cette journée, les panneaux photovoltaïques ont été **déconnectés** du système de climatisation DRV afin de quantifier l'écart d'énergie mesurée entre le compteur d'énergie et la centrale d'acquisition.
- **Journée du 27 mars 2024** : Durant cette journée, les panneaux photovoltaïques ont été **connectés** au système de climatisation DRV, permettant de quantifier le pourcentage d'autoproduction PV de l'installation.

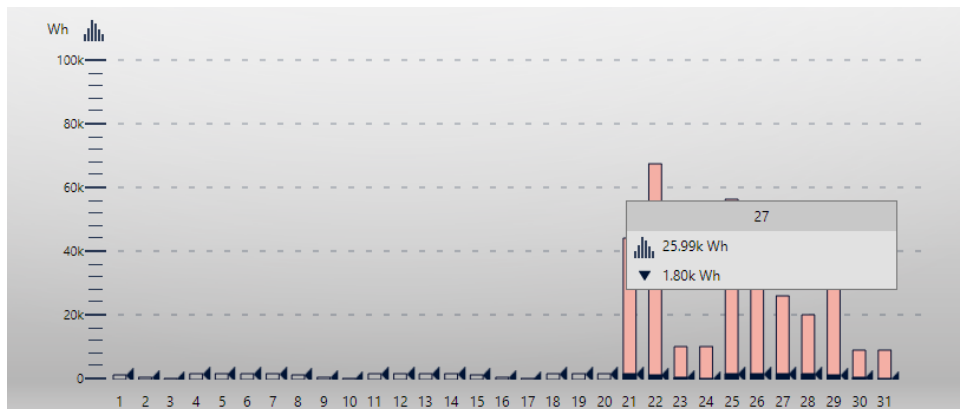


(a) Mesure du compteur d'énergie du réseau public.

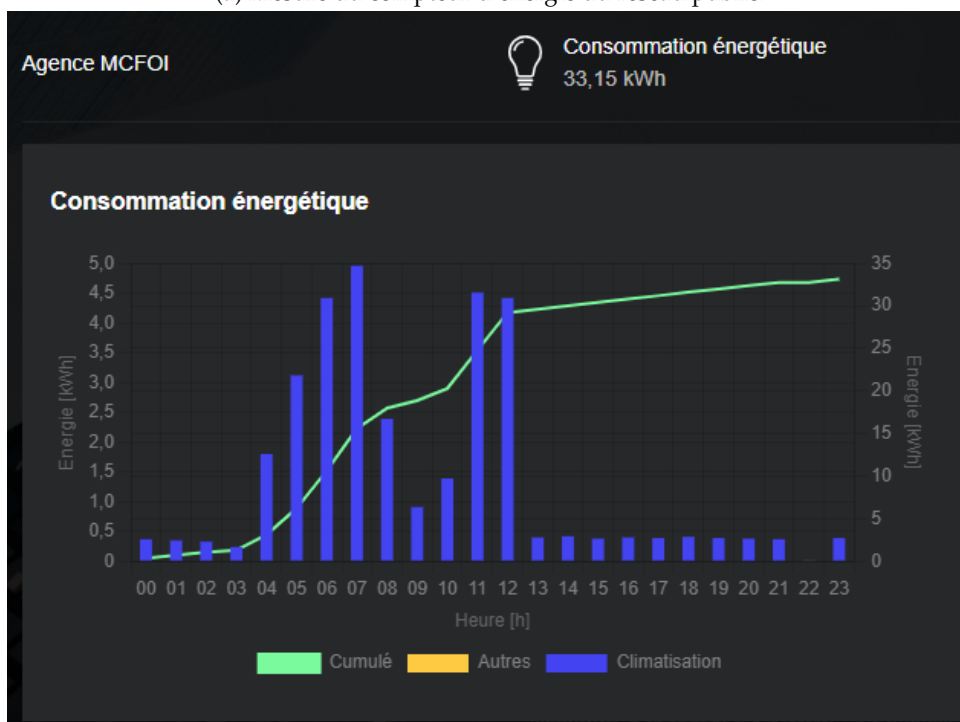


(b) Mesure de la centrale d'acquisition interne.

FIGURE 4.3 : Instrumentation de la consommation énergétique du système DRV pour la journée du 26 mars 2024 sans la connexion de la centrale PV.



(a) Mesure du compteur d'énergie du réseau public.



(b) Mesure de la centrale d'acquisition interne.

FIGURE 4.4 : Instrumentation de la consommation énergétique du système DRV pour la journée du 27 mars 2024 avec la connexion de la centrale PV.

Analyse des mesures : Selon les informations fournies par le responsable technique du site, l'hypothèse proposée est de considérer la mesure réalisée par la centrale d'acquisition interne comme étant la plus proche de la réalité physique.

- **Journée du 26 mars 2024** : D'après les relevés du 26 mars, le compteur d'énergie électrique externe a mesuré 55 kWh tandis que la centrale d'acquisition interne a mesuré 52.57 kWh. Cet écart de 5% entre la mesure du compteur externe et la centrale d'acquisition interne a donc été pris en compte pour la suite des analyses à travers un coefficient de 0.95 appliqué sur la mesure du compteur d'énergie externe. (Cet écart a été vérifié sur plusieurs journées de mesures mais seul l'exemple du 26 mars est présenté dans cette analyse).
- **Journée du 27 mars 2024** : D'après les relevés du 27 mars, le compteur d'énergie externe a mesuré 26 kWh de consommation d'énergie tandis que la centrale d'acquisition a mesuré 33.15 kWh. L'équation 4.3 détaille le calcul de l'énergie produite par la centrale photovoltaïque et l'équation 4.4 détaille le calcul du pourcentage d'autoproduction provenant de la centrale photovoltaïque.

$$Production_{PV} = Conso_{MCC} - 0.95 \cdot Conso_{CPT-EDF} = 33.15 - 24.7 = 8.45 kWh \quad (4.3)$$

$$Autoproduction\% = \frac{Energie_{PV}}{Conso_{MCC}} = \frac{8.45}{33.15} \cdot 100 = 25.5\% \quad (4.4)$$

La même méthodologie a été reproduite pour analyser les données mesurées le 28 et 29 mars 2024. Ainsi, un pourcentage d'énergie provenant de la centrale PV de 25.5 % a été mesuré pour la journée du 27 mars, 26 % pour le 28 mars et 18 % pour le 29 mars.

Note : La centrale photovoltaïque fournit exclusivement du courant continu au système de climatisation DRV, sans alimenter d'autres équipements. Par conséquent, l'énergie mesurée pour calculer le pourcentage d'autoproduction reflète directement le maximum que le système DRV peut obtenir en part d'énergie provenant des modules photovoltaïques. Ce rendement dépend de l'ensoleillement, des capacités de production de la centrale mais également de la manière dont est piloté le système de climatisation.

Conclusions et discussions : D'après les données de consommation énergétiques mesurées entre le 25 et le 29 mars sur l'installation de système DRV hybride (PV-DC et réseau AC) de l'entreprise MCFOI, un pourcentage d'autoproduction variant de 18 à 26 % a été quantifié.

Afin de compléter cette analyse et confirmer ces données, une piste d'amélioration pourrait être de réaliser la même analyse sur une plus longue durée afin de traiter plusieurs types de journées différentes (forte ou faible fréquentation des locaux, fort ou faible ensoleillement). Une analyse complète sur une année permettrait ainsi de quantifier l'impact de la saisonnalité sur le taux d'autoproduction et le taux d'autoconsommation, dans le cas où la centrale photovoltaïque serait instrumentée.

Cependant, pour les éléments complémentaires présentés dans les prochaines sections, le choix a été fait de garder une valeur moyenne de taux d'autoproduction PV de 25 % comme référence pour une installation de système de climatisation DRV ayant une alimentation hybride PV-DC couplée au réseau AC.

Pour augmenter le pourcentage d'autoproduction et d'autoconsommation, une solution pourrait être de redimensionner la centrale photovoltaïque et de moderniser le pilotage du système de climatisation. En effet,

comme il peut être constaté sur la sous figure 4.4b, une extinction quasiment totale du système de climatisation entre 8h et 11h durant la journée du 27 mars peut être à l'origine d'un appel de puissance plus important lors de sa mise en fonctionnement dans les heures suivantes. Pour ces raisons, les sections suivantes présentent le travaux menés sur l'optimisation du pilotage du système de climatisation..

4.1.3 Etude du potentiel d'autoconsommation photovoltaïque pour la climatisation des locaux d'Intégrale Ingénierie

La gestion de la climatisation dans les locaux tertiaires

En phase d'exploitation dans le secteur tertiaire, la gestion de la climatisation est généralement réalisée par les utilisateurs à l'aide de commandes centralisées ou décentralisées au sein des locaux. Dans les zones commerciales, cette gestion est faite à l'aide d'un système de Gestion Technique Centralisée (GTC) ou Gestion Technique du Bâtiment (GTB).

Dans le cas des locaux d'Intégrale Ingénierie, le système de climatisation est un système à Débit de Réfrigération Variable (DRV) pour la majorité des locaux et quelques unités individuelles (splits) pour le local serveurs et le local technique. Les utilisateurs ont accès à une commande centralisée par zone d'occupation (open-space, mezzanine, bureaux administratifs) et par salle de réunion ou formation.

Le système de climatisation DRV est équipé de l'option "gestion de l'énergie" qui permet d'analyser les données de consommation d'énergie par zones, groupes ou unité individuelle et réaliser des commandes de contrôle et de pilotage. Pour effectuer ces commandes et programmations, une interface web utilisateur est accessible en ligne, ainsi qu'une tablette tactile centralisée.

Les commandes de contrôle, pilotage et programmation possibles sont listées ci-après :

- Programmation horaire d'allumage ou d'extinction.
- Contrôle de l'écart entre la température ambiante et la température extérieure.
- Extinction automatique passé un certain délai.
- Fixation d'une limite de niveau de consigne.
- Contrôle de pics de consommation.
- Contrôle de l'écart entre la température ambiante et la température de consigne.

Les avantages du module "Gestion de l'énergie" du système de climatisation DRV sont l'ergonomie de l'interface utilisateur, la facilité d'extraction des données et la quantité de commandes de contrôle et de pilotage. Cependant, concernant le réglage des niveaux de consigne, ces derniers sont fixés de manière arbitraire par les utilisateurs et ne dépendent pas d'une gestion optimisée.

Modélisation d'une centrale photovoltaïque dédiée à la climatisation des locaux

Comme cela a été présenté dans les travaux de thèse de *F. K/Bidy* [56], la puissance photovoltaïque peut être modélisée à partir de l'irradiance et de la température extérieurs selon la formule suivante :

$$P_{pv} = \eta_{pv} S_{pv} G \left(1 + \frac{K_p(25 - T)}{100} \right) \quad (4.5)$$

avec η_{pv} le rendement des cellules PV, S_{pv} la surface de l'installation, G l'irradiance (du gisement solaire), K_p le coefficient de perte de puissance en fonction de la température et T la température ambiante extérieure.

Selon l'analyse annuelle des données de consommation d'énergie électrique du système de climatisation d'Intégrale Ingénierie, les appels de puissance maximale atteignent en moyenne une valeur de 13 à 14 kW. Afin de subvenir à cet appel de puissance et compte tenu de la surface de toiture disponible des locaux d'Intégrale Ingénierie, la centrale photovoltaïque a été modélisée selon les paramètres suivants :

Paramètre	Valeur	Unité
P_{pv}	375	Wc
η_{pv}	17	%
S_{pv}	80	m ²
K_p	0.34	%/°C
$P_{cvc,max}$	14000	W

TABLE 4.1 : Paramètres de la modélisation d'une centrale photovoltaïque adaptée à la climatisation des locaux d'Intégrale Ingénierie.

Les données d'ensoleillement et de température ont été récupérées grâce à la station solaire et météorologique du réseau IOS-net [64] installée sur le toit du bâtiment étudié.

La Figure 4.5 suivante présente la superposition de la production de la centrale photovoltaïque modélisée selon les paramètres en table 4.1 et selon les données de la consommation d'énergie réelle mesurée sur le système de climatisation DRV d'Intégrale Ingénierie pour la journée du 12 mars 2024. D'après les informations relevées sur la plateforme de gestion de l'énergie de l'entreprise, la température de consigne demandée dans les locaux était de 27 degrés pour cette journée.

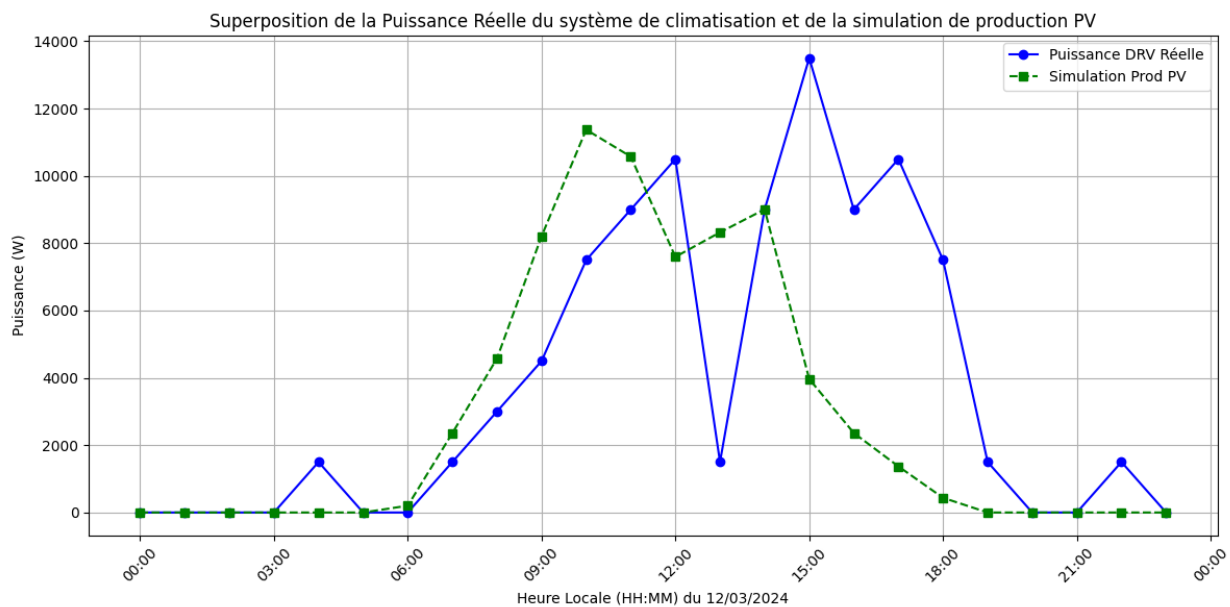


FIGURE 4.5 : Superposition de la modélisation de la production PV et de la consommation d'énergie du système de climatisation DRV d'Intégrale Ingénierie pour la journée du 12 mars 2024.

Analyse de la modélisation de la production d'électricité photovoltaïque : D'après les résultats de la modélisation réalisée pour la journée du 12 mars 2024 au pas de temps horaire, une estimation du pourcentage d'autoconsommation journalier de 74% a été calculée pour un taux d'autoproduction journalier de 56%, comme détaillé dans les équations 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 ci-après :

$$\text{Pourcentage d'autoconsommation} = \left(\frac{\sum \min(P_{PV}, C_{DRV})}{\sum P_{PV}} \right) \cdot 100 \quad (4.6)$$

$$\text{Pourcentage d'autoconsommation} = \frac{51726}{70346} \cdot 100 = 74\% \quad (4.7)$$

$$\text{Pourcentage d'autoproduction} = \left(\frac{\sum \min(P_{PV}, C_{DRV})}{\sum C_{DRV}} \right) \cdot 100 \quad (4.8)$$

$$\text{Pourcentage d'autoproduction} = \frac{51726}{91500} \cdot 100 = 56\% \quad (4.9)$$

avec P_{PV} la simulation de la puissance produite par la centrale photovoltaïque (W), C_{DRV} la puissance consommée par le système de climatisation (W), la fonction $\min(P_{PV}, C)$ qui détermine la plus petite valeur entre la production PV et la consommation d'énergie, et les fonctions \sum qui comptabilisent le total des valeurs.

Conclusions et discussions : Le pourcentage d'autoconsommation estimé étant de 74%, il apparaît que le profil de charge du système de climatisation pourrait être ajusté afin de maximiser ce pourcentage d'utilisation de la ressource d'énergie solaire disponible, tout en conservant un même niveau de confort dans le bâtiment. En effet, entre midi et 13h, il peut être constaté une chute de la consommation d'énergie du système de climatisation, liée à l'extinction automatique lorsque les utilisateurs sont à la pause déjeuner.

Compte tenu de l'état actuel de la gestion d'énergie du système de climatisation des locaux d'Intégrale Ingénierie et du potentiel d'autoconsommation et d'autoproduction photovoltaïque, il a été décidé à cet état d'avancement des travaux d'étudier **l'optimisation du stockage thermique**, afin d'évaluer son impact sur la performance énergétique globale d'un nano-réseau DC, dédié à l'alimentation d'un système de climatisation.

4.2 Modélisation d'un Energy Management System (EMS) dédié à l'optimisation du stockage thermique

4.2.1 Définition du problème d'optimisation

Définition du stockage thermique

Le stockage thermique dans le contexte des bâtiments réfère à la capacité de conserver la chaleur ou le froid pour une utilisation ultérieure. Cette technique peut aider à gérer la demande d'énergie, réduire les coûts et améliorer l'efficacité énergétique. Il fonctionne en accumulant de l'énergie thermique pendant les périodes de faible demande ou lorsque la production d'énergie est moins chère (comme l'énergie solaire pendant la journée), puis en libérant cette énergie pendant les périodes de forte demande ou lorsque la production est plus coûteuse. Les méthodes courantes incluent l'utilisation de matériaux à changement de phase ou de réservoirs d'eau chaude ou froide pour stocker respectivement la chaleur ou le froid.

Comme défini dans le premier chapitre, un Energy Management System (EMS) peut avoir différents objectifs et contraintes d'optimisation, propres aux conditions du site de référence.

Objectifs et contraintes d'optimisation de l'EMS

Dans le cadre de ces travaux, le management de l'énergie sera appliqué à un système de climatisation DRV alimenté par des panneaux photovoltaïques.

L'objectif de l'EMS est d'optimiser la consommation énergétique du bâtiment en valorisant son propre stockage thermique inertiel, afin d'évaluer son impact sur la performance énergétique globale d'un nano-réseau DC dédié à l'alimentation du système de climatisation.

Les contraintes de l'EMS sont de respecter une plage de température permettant d'assurer le confort thermique de l'utilisateur à l'intérieur du bâtiment, tout en respectant une valeur maximale de consommation d'énergie, déterminée selon le dimensionnement du système de climatisation. Plus exactement, la contrainte est une puissance maximale, mais l'optimisation dans un EMS s'étalant sur une journée, avec des données présentant un pas de temps de 30 minutes, il est préférable de considérer des quantités d'énergie.

La Figure 4.6 représente les différentes fonctionnalités attendues par le modèle d'EMS :

- Récupération des données d'ensoleillement et de température extérieure (réseau IOS-net [64]).
- Modélisation de la production photovoltaïque.
- Modélisation de l'inertie thermique du bâtiment.
- Optimisation de l'énergie consommée par le système de climatisation.

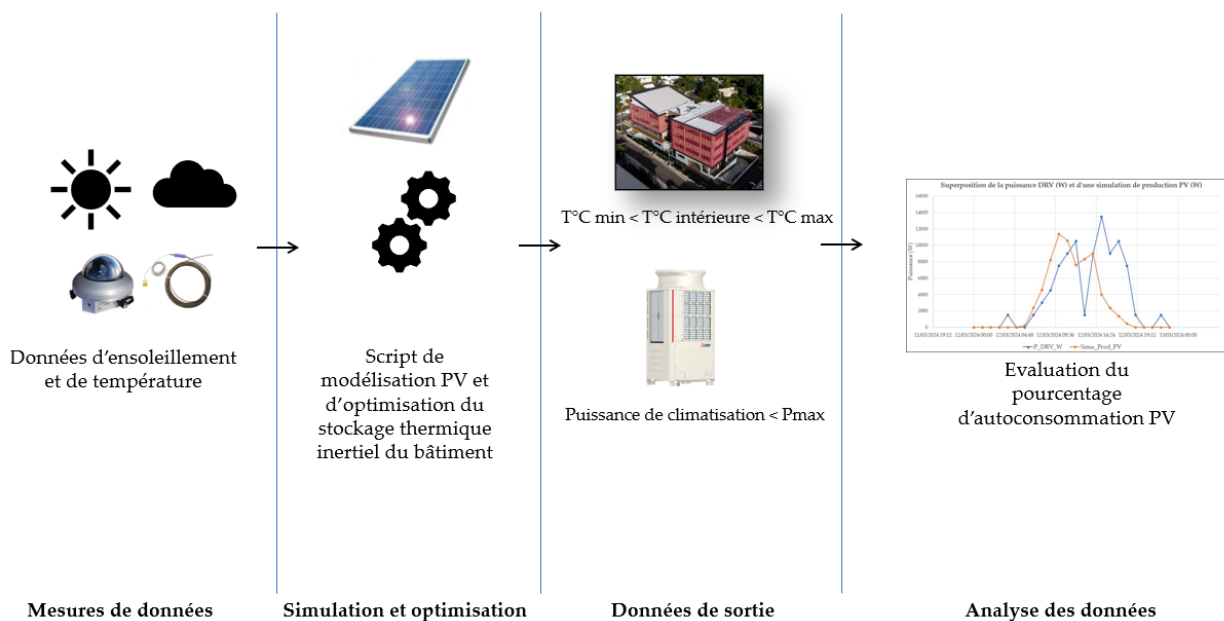


FIGURE 4.6 : Fonctionnalités du modèle d'Energy Management System (EMS).

Les sections suivantes détaillent les méthodologies employées pour la modélisation thermique du bâtiment et l'optimisation du stockage thermique permettant de déterminer le besoin en puissance du système de climatisation.

Modélisation de l'inertie thermique d'un bâtiment

A partir de la loi de refroidissement de Newton définie par Todorovic et al [71], la température à l'intérieur d'un bâtiment peut être modélisée par l'équation 4.10 :

$$T_{int(t)} = T_{int(t-1)} \cdot (1 - \alpha) + \alpha \cdot T_{ext(t)} \quad (4.10)$$

avec α le coefficient de convection thermique du bâtiment ($W/m^2 \cdot K$), T_{ext} la température extérieure et T_{int} la température intérieure du bâtiment.

Application de la méthode Mixed-Integer Linear Programming Model (MILP)

Dans le cadre d'une collaboration avec l'équipe du projet ReFLEX (Responsive Flexibility), spécialisée dans la flexibilité de l'énergie et en s'appuyant notamment sur les travaux de B. Couraud et al. [40], un travail commun a été réalisé afin d'associer la modélisation de la production d'énergie photovoltaïque à un modèle d'optimisation de la gestion du stockage thermique inertiel du bâtiment. Le modèle avait été développé à l'origine pour réaliser un algorithme de contrôle pour les batteries résidentielles qui détermine la planification et le fonctionnement optimaux des batteries un jour à l'avance dans le but de minimiser les factures d'énergie des ménages et dans le contexte de tarifs d'électricité dynamiques en fonction du temps d'utilisation [72], il a donc fallu l'adapter à notre besoin.

Fonction objectif

A partir de la loi de refroidissement de Newton définie dans l'équation 4.10, celle-ci a été appliquée pour modéliser l'inertie thermique d'un bâtiment selon les équations 4.11 à 4.13.

Soit f la fonction à minimiser telle que :

$$\min_x f(x) = cx, \quad (4.11)$$

$$\text{s.t. } Ax < b, \quad (4.12)$$

$$A_{eq}x = T_{int}(t-1) \cdot (1 - \alpha) + \alpha \cdot T_{ext}(t) = T_{int}(t) = b_{eq}. \quad (4.13)$$

Ainsi l'objectif de la fonction f est de minimiser le coût de l'énergie consommée (coût donné par le produit entre la consommation d'énergie et le prix d'achat) pour atteindre les contraintes. La fonction f est représentée par les inégalités et égalités données par les équations 4.12 et 4.13 respectivement. Les contraintes devront intégrer la contrainte thermique du bâtiment, à savoir le profil de température minimal pour assurer le confort des habitants.

Dans le cas de cette étude, l'énergie disponible est répartie entre la production photovoltaïque, et l'énergie provenant du réseau, qui est accessible en dehors des heures d'ensoleillement. Il est ainsi considéré que le coût

de l'énergie provenant de la centrale photovoltaïque est nul comparativement au coût de l'énergie provenant du réseau public, car le coût d'achat des modules photovoltaïques n'est pas pris en compte.

Contraintes

Dans tout problème d'optimisation, il est nécessaire de formuler les contraintes liées au cas applicatif. Dans le cas de cette étude, les contraintes doivent être formulées en intégrant l'équation qui relie la température intérieure au fonctionnement de la climatisation. L'équation générale pour ce système, adaptée au cas du refroidissement, est la suivante :

$$T^i - \alpha_{cool} E_{cool}^i - (1 - \alpha_{loss}) T^{i-1} = \alpha_{loss} T_{ext}^{i-1*} + \alpha_{rad} \phi_{rad}^{i*} \quad (4.14)$$

Où T^i représente la température intérieure à l'instant i , E_{cool}^i est l'énergie fournie par le système de climatisation, et les autres paramètres sont relatifs aux pertes thermiques (α_{loss}), aux échanges radiatifs (α_{rad} , ϕ_{rad}) et à la température extérieure T_{ext}^{i-1*} .

4.2.2 Modélisation de l'EMS en langage Python basée sur la méthode MILP

La méthode Mixed-Integer Linear Programming Model (MILP) (définie dans le chapitre 1) a été employée pour réaliser le modèle d'optimisation. Le module "milp" de la librairie "scipy" en langage Python a été utilisé. Le détail du code qui a été développé dans le cadre de ces travaux est fourni en annexe B en fin de manuscrit.

Les paramètres utilisés pour réaliser la modélisation sont détaillés dans la table 4.2. Concernant la valeur de α , celui-ci a été fixé à partir des données de température intérieure mesurées à l'intérieur des locaux d'Intégrale Ingénierie, afin de fixer un modèle thermique proche de la réalité. La sous section suivante présente les résultats de simulations obtenus.

Variable	Valeur	Unité
α	0.144	W/m ² .K
T_{min}	23	°C
T_{max}	27	°C
$P_{cvc,max}$	12000	W

TABLE 4.2 : Paramètres utilisés dans le modèle d'optimisation du stockage thermique.

4.2.3 Résultats des simulations de l'optimisation du stockage thermique

Pour comparer la modélisation des données de production d'énergie photovoltaïque, le profil de consommation énergétique réel (voir figure 4.5) de la climatisation et le profil de consommation obtenu après optimisation, les résultats de simulation présentés ci-dessous ont été obtenus en utilisant les conditions météorologiques de la journée du 12 mars 2024.

Les résultats de la simulation effectuée selon les paramètres détaillés dans la table 4.2 sont présentés en figure 4.7 et 4.8.

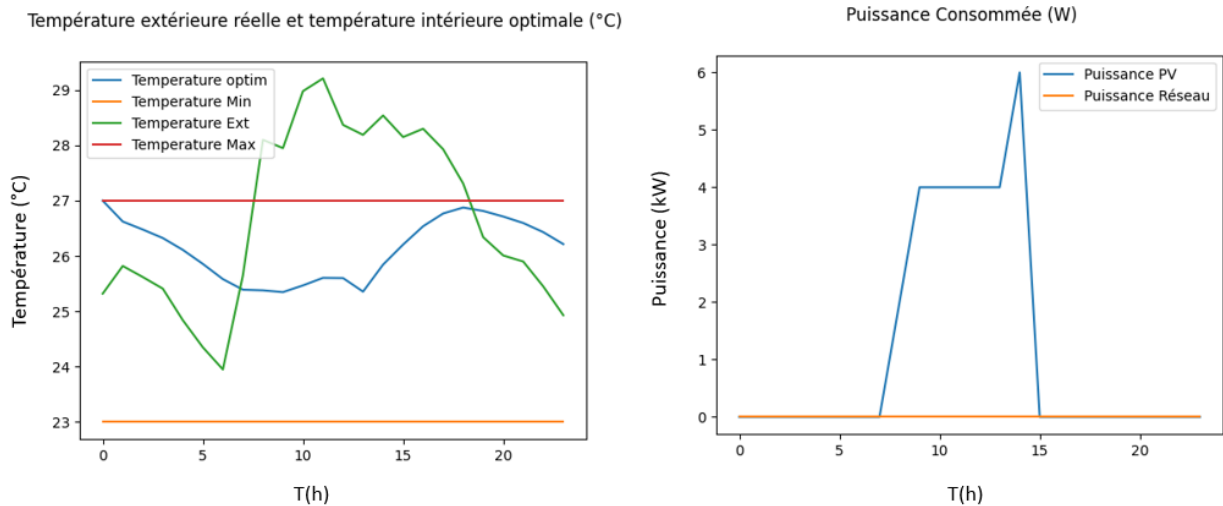


FIGURE 4.7 : Résultats des simulations de l'optimisation du stockage thermique pour la température intérieure (°C) et puissance de climatisation (kW) pour la journée du 12 mars 2024.

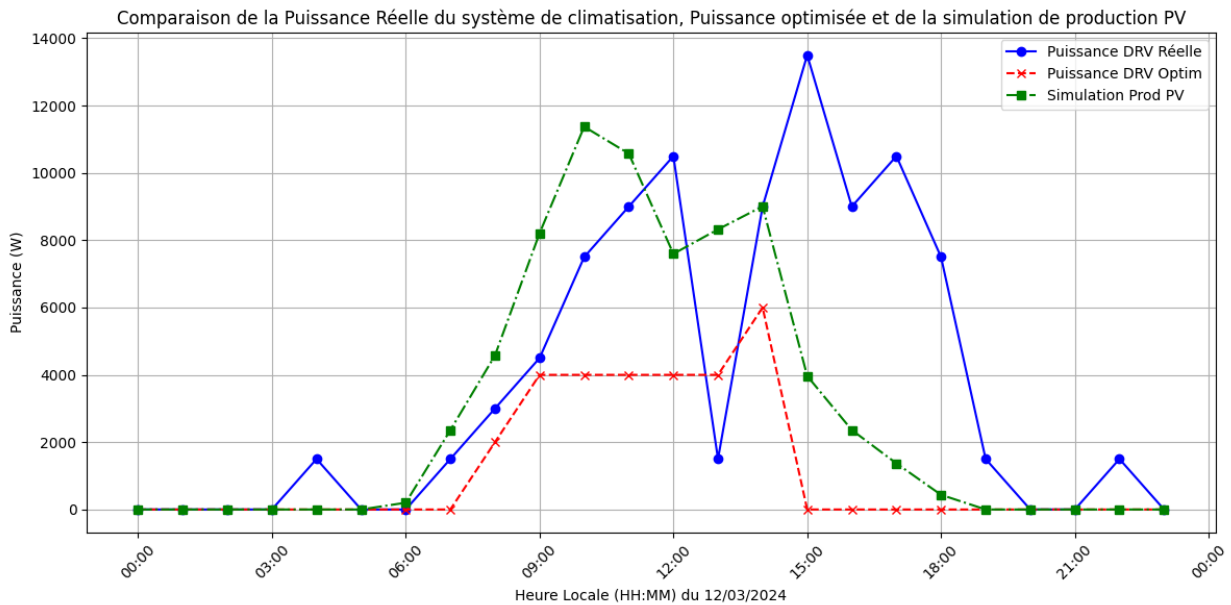


FIGURE 4.8 : Superposition de la puissance de climatisation optimisée à la modélisation de la production photovoltaïque et les données réelles de climatisation pour la journée du 12 mars 2024.

Analyse des résultats : D'après les résultats de la simulation obtenus en figure 4.7 pour la valeur de la température intérieure optimisée, on peut constater que les limites de température minimale et maximale à l'intérieur du bâtiment sont respectées : la température intérieure varie de 25.5°C degrés à 26.8°C. Il peut donc être considéré que le confort des utilisateurs serait respecté.

Quant au profil de consommation nécessaire au fonctionnement du système de climatisation, la figure 4.8 représente la superposition de la puissance de climatisation optimisée (W) moyennée au pas de temps horaire à la courbe de production photovoltaïque modélisée, ainsi que la puissance réelle de climatisation dans les locaux pour la journée du 12 mars 2024. Selon le résultat de l'optimisation, le besoin en énergie électrique serait ainsi de 28 kWh avec un appel de puissance moyenné à 6 kW entre 14h et 15h. A titre de comparaison avec les données réelles mesurées pour cette journée, la consommation d'énergie totale du système de climatisation était de 91.5 kWh avec un appel de puissance de 13.5 kW à 15h.

Comme nous pouvons le constater sur la figure 4.8, le besoin énergétique du système de climatisation optimisé est totalement couvert par la production photovoltaïque, ce qui représente un pourcentage d'auto-production journalier de 100%. En revanche, d'après le calcul du pourcentage d'autoconsommation journalier, celui-ci a désormais une valeur de 40 % dans la version optimisée comme détaillé dans l'équation 4.15 :

$$\text{Pourcentage d'autoconsommation} = \frac{C_{optim}}{P_{pv}} = \frac{28000}{70346} \cdot 100 = 40\% \quad (4.15)$$

A titre de comparaison avec le taux d'autoconsommation de 74 % obtenu précédemment, ce résultat qui démontre une réduction du pourcentage d'autoconsommation ouvre de nouvelles perspectives en termes d'optimisation du dimensionnement des centrales photovoltaïques dédiées à l'usage de la climatisation ou du chauffage. En effet, pour un niveau de confort identique, il pourrait être ainsi envisageable d'utiliser moins de puissance de climatisation tout en utilisant de manière efficiente la puissance photovoltaïque disponible.

Par ailleurs, concernant le dimensionnement du générateur photovoltaïque, il avait été défini une surface de panneaux photovoltaïques de 80m² pour la modélisation de la centrale photovoltaïque (voir table 4.1), afin de subvenir aux besoins en puissance de la climatisation basés sur les données réelles du 12 mars 2024. Le résultat obtenu dans la modélisation de l'EMS, qui présente quant à lui un besoin diminué en puissance de climatisation indique que le dimensionnement envisagé à l'origine pour la centrale photovoltaïque pourrait être également diminué d'un tiers, soit une surface de centrale photovoltaïque de 53m² au lieu de 80m².

Afin de tester les fonctionnalités du modèle d'EMS développé pour un site en autonomie énergétique ayant un besoin en chauffage du bâtiment, une étude de cas a été réalisée dans le cadre de la rénovation du gîte du Piton des Neiges à La Réunion.

4.3 Cas d'application au gîte du Piton des Neiges

Dans cette section, le modèle de gestion de l'énergie basé sur l'optimisation du stockage thermique qui a été développé et présenté précédemment, a été mis en application dans le cadre du projet de reconstruction du gîte du Piton des Neiges.

4.3.1 Présentation du site existant

Le gîte du Piton des Neiges est localisé à 2400 mètres d'altitude, dans le massif du Piton des Neiges (voir figure 4.9 ci-dessous).



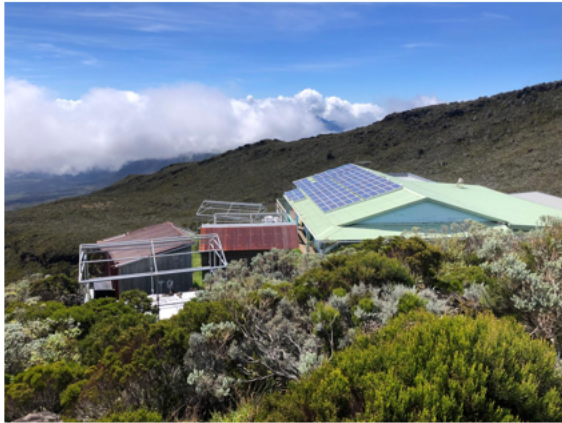
FIGURE 4.9 : Localisation du gîte de la caverne Dufour sur l'île de La Réunion.

Le gîte est en totale autonomie énergétique et hydrique. L'énergie solaire est la principale ressource pour la production d'électricité et le site est ravitaillé en eau grâce à des systèmes de récupération des eaux pluviales. Le gîte est également relié à une source d'eau située à quelques mètres en contrebas.

En cas de coupure de la production d'électricité, le gîte est équipé d'un groupe électrogène et d'un parc de batteries qui peuvent assurer une autonomie de deux jours. L'évacuation des déchets, l'approvisionnement en bonbonnes de gaz pour la cuisson, ainsi que la maintenance électrique du gîte sont assurés par hélicoptère.

En 2018, un concours a été mis en place par le Département de La Réunion pour entreprendre un projet de reconstruction du gîte avec différents objectifs : agrandir les locaux existants, améliorer le confort thermique à l'intérieur du gîte et diminuer fortement l'impact carbone de la gestion de l'énergie et la gestion des déchets du site.

La figure 4.10 représente les photographies des équipements permettant la production d'électricité du site, soit la centrale photovoltaïque installée en toiture, l'onduleur, le chargeur de batterie, le parc de batteries et le groupe électrogène.



(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURE 4.10 : Photographies du gîte équipé en toiture d'une centrale photovoltaïque (a), du local technique contenant l'onduleur et le chargeur de batteries (b), du parc de batteries (c) et du groupe électrogène (d).

Architecture électrique DC-AC du gîte

Comme le montre la figure 4.11, l'architecture électrique actuelle du gîte est celle d'une installation photovoltaïque classique pour un site isolé, avec un bus de distribution principal alimenté en 230V AC. L'excédent d'énergie est stocké dans des batteries au plomb. En cas de déficit de production photovoltaïque, un groupe électrogène prend le relais pour fournir l'énergie électrique nécessaire.

Le chauffage du gîte est actuellement assuré par un réseau de radiateurs alimentés en eau chaude, distribués dans les différentes pièces. L'eau est chauffée par une chaudière à bois située à l'extérieur du gîte. Ce système de chauffage, étant indépendant des besoins en énergie électrique, n'est pas représenté dans le schéma de la figure 4.11.

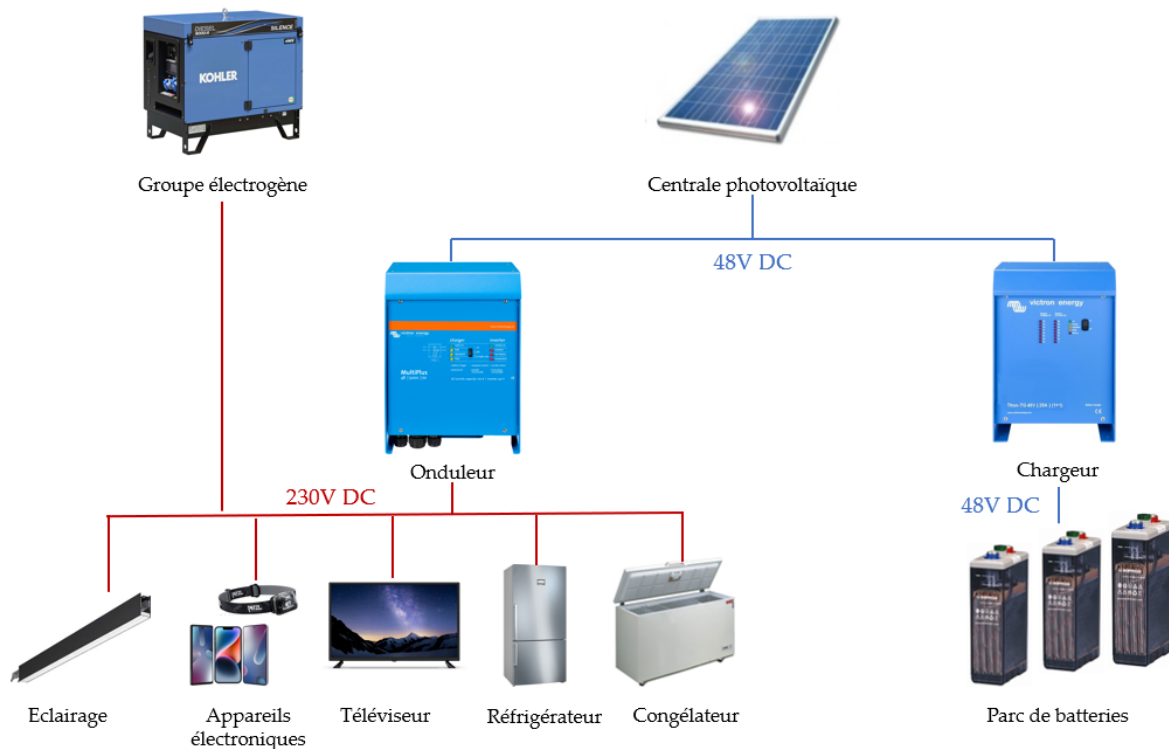


FIGURE 4.11 : Schéma de l'architecture électrique actuelle du gîte du Piton des Neiges.

Présentation du futur système de chauffage du gîte

Dans le cadre du projet de reconstruction du gîte du Piton des Neiges, il est prévu que le futur système de chauffage soit assuré par différents éléments :

- Des panneaux solaires thermiques pour la production d'eau chaude.
- Des ballons d'eau chaude.
- Un plancher chauffant dans lequel circulera l'eau chaude.
- Une pompe à chaleur air/eau ayant un besoin d'énergie électrique.

L'objectif du dimensionnement de ce futur système de chauffage est de privilégier la production d'eau chaude via les panneaux solaires thermiques. En cas de faible ensoleillement, une pompe à chaleur complètera les besoins en chauffage. L'énergie électrique nécessaire au fonctionnement de cette pompe sera fournie par la centrale photovoltaïque et le parc de batteries. Pour dimensionner ce système, une Simulation Thermique Dynamique (STD) a été réalisée en amont à partir du modèle 3D du futur bâtiment, afin de quantifier les besoins thermiques annuels du gîte.

Etude de Simulation Thermique Dynamique (STD) du futur gîte

L'entreprise Intégrale Ingénierie étant le bureau d'études mandaté pour la conception du nouveau bâtiment, une Simulation Thermique Dynamique (STD) du futur gîte a été effectuée par le pôle Qualité Environnementale de la société.

Une STD est une méthode qui permet de modéliser et d'analyser la performance énergétique des bâtiments en simulant leur comportement thermique au fil du temps. Elle prend en compte les variations des conditions

climatiques, l'usage des locaux, et les caractéristiques des matériaux pour optimiser le confort et la consommation d'énergie.

Dans le cadre du projet de reconstruction du gîte du Piton des Neiges, la STD a été réalisée à partir des données météorologiques obtenues grâce à la station du réseau IOS-net installée à proximité du gîte en juillet 2021 [64]. L'enveloppe du futur bâtiment sera constituée d'une ossature en bois isolée par un matériau minéral, avec des bardages en bois ou en zinc. À ce stade des études, il est estimé que le bâtiment bénéficiera d'une forte inertie thermique grâce à l'isolant prévu, permettant un bon déphasage thermique.

Les calculs de Simulation Thermique Dynamique (STD) ont été effectués pour chaque jour de l'année. Cependant, dans cette étude, nous nous concentrerons sur l'analyse des besoins électriques de la pompe à chaleur pour la journée la plus froide de l'année, le 1er juillet 2023, afin de simuler des conditions météorologiques défavorables.

Selon les hypothèses établies pour la Simulation Thermique Dynamique (STD), la température de consigne est fixée à 16 °C. Elle sera contrôlée pendant les périodes d'occupation estimées, de 5h à 9h et de 17h à 21h, correspondant aux heures de forte fréquentation des locaux. Le détail des paramètres utilisés sont présentés en annexe 3 du manuscrit.

Le résultat de la puissance requise par le système de pompe à chaleur pour la journée du 1er juillet 2023 est présenté en figure 4.12 ci-dessous. Il est considéré que pour cette journée, la totalité de l'apport thermique est généré par la pompe.



FIGURE 4.12 : Puissance (W) requise par le système de pompe à chaleur du gîte du Piton des Neiges pour le 1er juillet 2023 issue de l'étude de STD.

Comme nous pouvons le constater sur la figure 4.12, la pompe à chaleur engendre un pic de consommation

électrique d'environ 1.1 kW à 5h30, suivi d'un second pic de 2.96 kW à 18h30. Ce comportement est étroitement lié au planning d'occupation établi précédemment, qui prévoit l'activation de la pompe à chaleur pour maintenir la température de consigne entre 5h et 9h, puis entre 17h et 21h. La consommation d'énergie totale du système de pompe à chaleur prévue pour cette journée est ainsi de 18.24 kWh.

Afin d'évaluer si le modèle d'optimisation du stockage thermique développé dans ces travaux pourrait permettre d'optimiser la gestion de la pompe à chaleur, tout en permettant une optimisation du dimensionnement du parc de batteries, la prochaine section présentera les résultats de simulation obtenus pour 3 scénarios différents, avec comme référentiel le résultat calculé par la STD.

4.3.2 Proposition d'architecture 400V DC avec optimisation du stockage thermique

Architecture 400V DC

En raison des limitations de puissance d'un nano-réseau en 48V DC, mieux adapté aux appareils de faible puissance, nous adoptons pour cette étude l'architecture électrique 400V DC illustrée en figure 4.13.

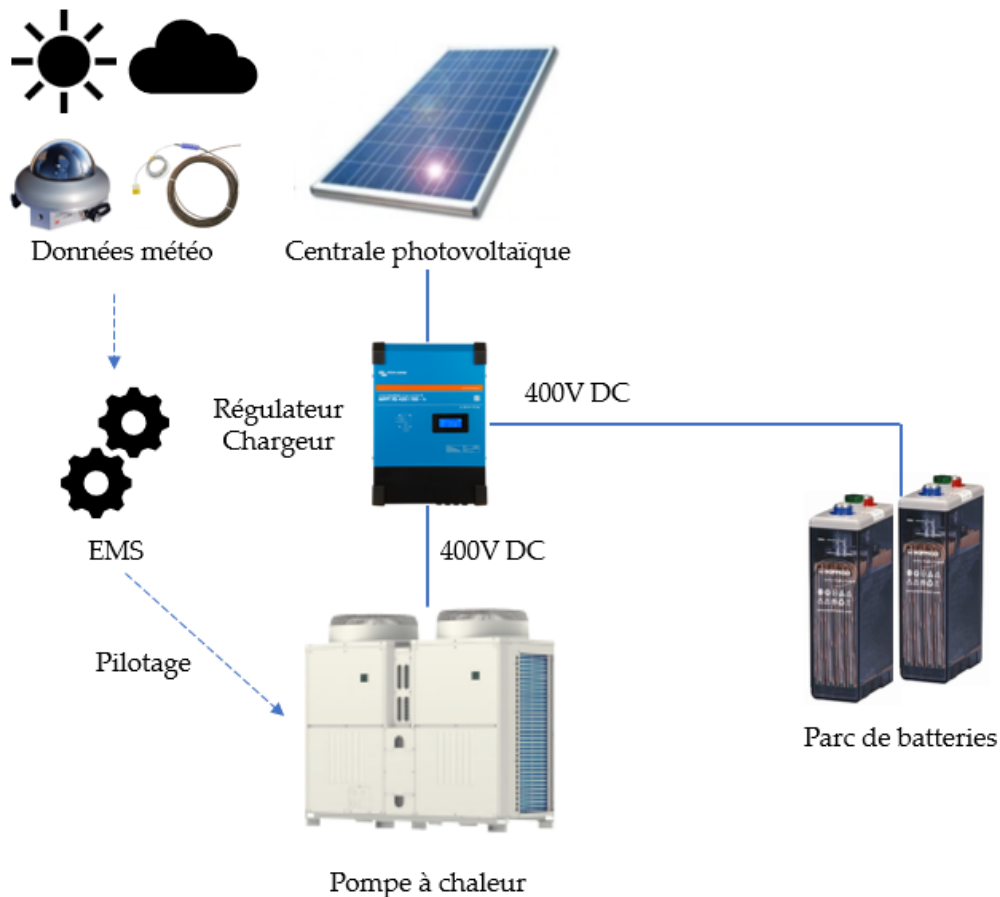


FIGURE 4.13 : Schéma représentant l'architecture 400V DC proposée pour l'alimentation du système de pompe à chaleur.

Dans cette configuration, nous faisons les hypothèses suivantes :

- La pompe à chaleur est un modèle compatible avec une alimentation en 400V DC.
- Le régulateur MPPT est capable de réguler la tension des panneaux photovoltaïques à 400V DC.
- Les batteries sont configurées pour fournir une tension d'alimentation de 400V DC.
- Le modèle d'optimisation représenté par l'EMS a la capacité d'implémenter les commandes de pilotage sur la pompe à chaleur, en fonction des résultats de simulations obtenus à partir des données météorologiques.

A partir de cette architecture 400V DC, l'objectif des simulations réalisées visent à évaluer comment l'optimisation du stockage thermique peut affecter le dimensionnement des batteries nécessaires pour le fonctionnement de la pompe à chaleur.

Définition des scénarios de simulation

Les simulations incluent la modélisation de la production d'énergie issue des panneaux photovoltaïques et l'optimisation du stockage thermique selon le modèle présenté dans la section précédente. La table 4.3 détaille les paramètres des trois scénarios, qui seront comparés à un référentiel "scénario 0" correspondant aux résultats obtenus par la STD.

TABLE 4.3 : Détail des paramètres des scénarios de simulation pour la gestion de la pompe à chaleur.

Scénario	Puissance PV (kWc)	Nombre de modules PV	Optimisation
0	3.3 kWc	8	✗
1	1.5 kWc	4	✓
2	3.3 kWc	8	✓
3	6.6 kWc	16	✓

Les choix suivants ont été faits pour les différents scénarios :

- Dans le "scénario 0", nous envisageons une centrale photovoltaïque d'une puissance crête de 3,3 kWc, afin de répondre à une demande de 3 kW pour la pompe à chaleur, selon les calculs de la Simulation Thermique Dynamique pour la journée du 1er juillet 2023. Dans cette configuration, la pompe à chaleur fonctionnant principalement en dehors des heures d'ensoleillement, la consommation d'énergie totale de la pompe à chaleur entre minuit et 8h et entre 17h et minuit détermine la capacité nécessaire du parc de batteries.
- Dans le "scénario 1", nous envisageons une centrale photovoltaïque d'une puissance de crête de 1.5 kWc et le modèle d'optimisation de la gestion de la pompe à chaleur est implémenté. La centrale photovoltaïque est volontairement sous dimensionnée dans ce scénario afin d'évaluer le comportement du modèle d'optimisation.
- Dans le "scénario 2", nous envisageons une centrale photovoltaïque d'une puissance de crête de 3.3 kWc et le modèle d'optimisation de la gestion de la pompe à chaleur est implémenté. Dans ce scénario, nous faisons l'hypothèse que la centrale photovoltaïque est dimensionnée de manière optimale pour répondre aux besoins énergétiques de la pompe à chaleur et du parc de batteries.
- Dans le "scénario 3", nous envisageons une centrale photovoltaïque d'une puissance de crête de 6.6 kWc et le modèle d'optimisation de la gestion de la pompe à chaleur est implémenté. Dans ce scénario, nous

faisons l'hypothèse que la centrale photovoltaïque est surdimensionnée pour répondre aux besoins énergétiques de la pompe à chaleur et du parc de batteries.

Pour chacun des scénarios, la capacité nécessaire pour le parc de batteries sera calculée, en comptabilisant la quantité d'énergie électrique requise par la pompe à chaleur en dehors des heures d'ensoleillement.

Résultats des simulations

Pour chaque scénario, la production photovoltaïque a été modélisée en fonction des conditions météorologiques du 1er juillet 2023, afin d'évaluer l'impact de l'optimisation du stockage thermique pour la journée la plus froide de l'année, comme cela a été le cas dans l'étude de la Simulation Thermique Dynamique (STD) présentée précédemment.

Les données météorologiques utilisées proviennent de la station météorologique du réseau IOS-net et la centrale photovoltaïque a été modélisée selon les mêmes spécificités techniques présentées en table 4.1.

Concernant l'optimisation du stockage thermique, un coefficient de convection thermique α de $0.134 \text{ (W/m}^2\cdot\text{K)}$ a été utilisé. Ce coefficient a été fixé en considérant l'hypothèse que le futur bâtiment aura une bonne isolation thermique.

Pour chaque scénario, la consommation d'énergie de la pompe à chaleur en dehors des heures de production photovoltaïque a été quantifiée. La valeur obtenue en kWh représente la capacité de batterie nécessaire.

Les résultats des simulations obtenus sont présentés ci-dessous et la synthèse est récapitulée en table 4.4.

Scénario 0

La figure 4.14 représente la superposition de la modélisation de la puissance photovoltaïque (selon les paramètres du scénario 0 listés en table 4.3) et de la puissance électrique de la pompe à chaleur obtenue par le calcul de STD.

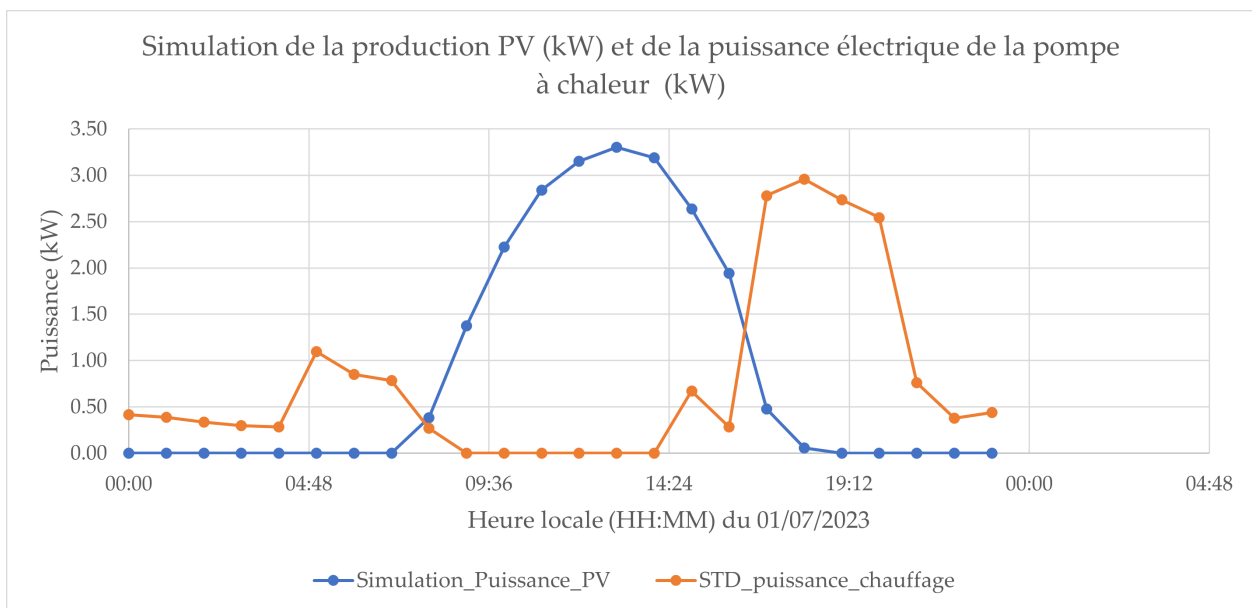


FIGURE 4.14 : Superposition de la modélisation de la puissance photovoltaïque et de la puissance électrique de la pompe à chaleur obtenue par le calcul de STD.

Comme nous pouvons le calculer à partir des résultats présentés à la figure 4.14, la consommation totale d'énergie électrique du système de pompe à chaleur est de 18.24 kWh dont 17.02 kWh en dehors des heures d'ensoleillement.

Ce résultat indique que dans ce scénario, 93% de l'énergie électrique requise par le système de pompe à chaleur pour la journée du 1 juillet 2023 proviendrait d'un parc de batteries d'une capacité d'au moins 17 kWh.

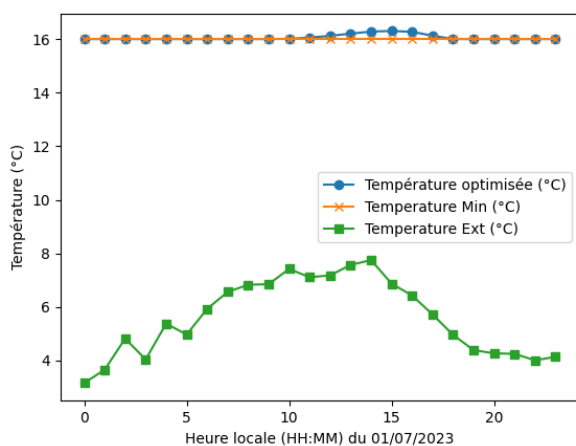
Scénario 1

D'après les résultats de simulation pour le scénario 1, illustrés dans la figure 4.15a nous pouvons observer que la consigne de température à l'intérieur du bâtiment est respectée. En effet, la température modélisée par l'optimisation reste toujours supérieure ou égale à 16°C. Contrairement au scénario 0, où le contrôle de la température est limité aux heures d'occupation, l'optimisation assure un contrôle continu de la température tout au long de la journée.

La figure 4.15b représente la superposition des courbes de modélisation de la puissance électrique de la pompe à chaleur et de la puissance produite par une centrale photovoltaïque volontairement sous-dimensionnée (voir table 4.3). Pour cette journée, la consommation totale d'énergie de la pompe à chaleur est de 31.81 kWh. Cette valeur, plus élevée que dans le scénario 0 (18 kWh), peut s'expliquer par le fait que le coefficient de convection thermique a été fixé en prenant une valeur moyenne, correspondant à une bonne isolation thermique du bâtiment. Réaliser de nouvelles simulations en ajustant le coefficient de convection thermique, en prenant en considération un bâtiment ayant une plus forte isolation pourrait permettre de diminuer la quantité d'énergie requise pour le fonctionnement de la pompe à chaleur. Hors des heures d'ensoleillement, la consommation d'énergie est de 22.11 kWh.

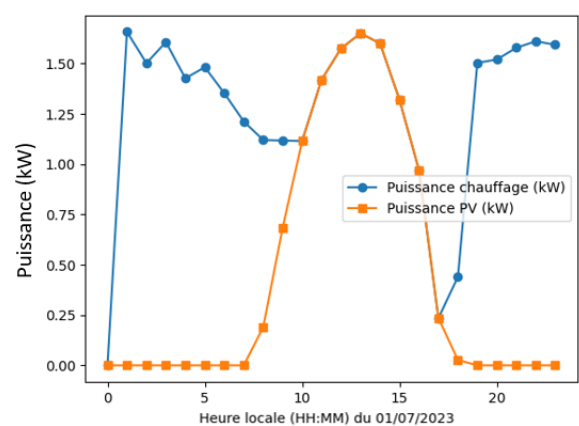
Ce résultat indique que dans ce scénario, 70% de l'énergie électrique requise par le système de pompe à chaleur pour la journée du 1 juillet 2023 proviendrait d'un parc de batteries d'une capacité d'au moins 22 kWh. Cependant, comme nous pouvons le constater sur la figure 4.15b, l'énergie produite par la centrale photovoltaïque n'a pas la capacité de recharger les batteries, donc la quantité de modules photovoltaïques n'est pas suffisante.

Température intérieure optimisée et température extérieure (°C)



(a) Simulation de la température intérieure optimisée du gîte pour le scénario 1.

Puissance consommée par le système de pompe à chaleur (kW)



(b) Puissance électrique de la pompe à chaleur et puissance des panneaux photovoltaïques pour le scénario 1.

FIGURE 4.15 : Résultats de simulations pour l'optimisation du stockage thermique du gîte selon les paramètres du scénario 1.

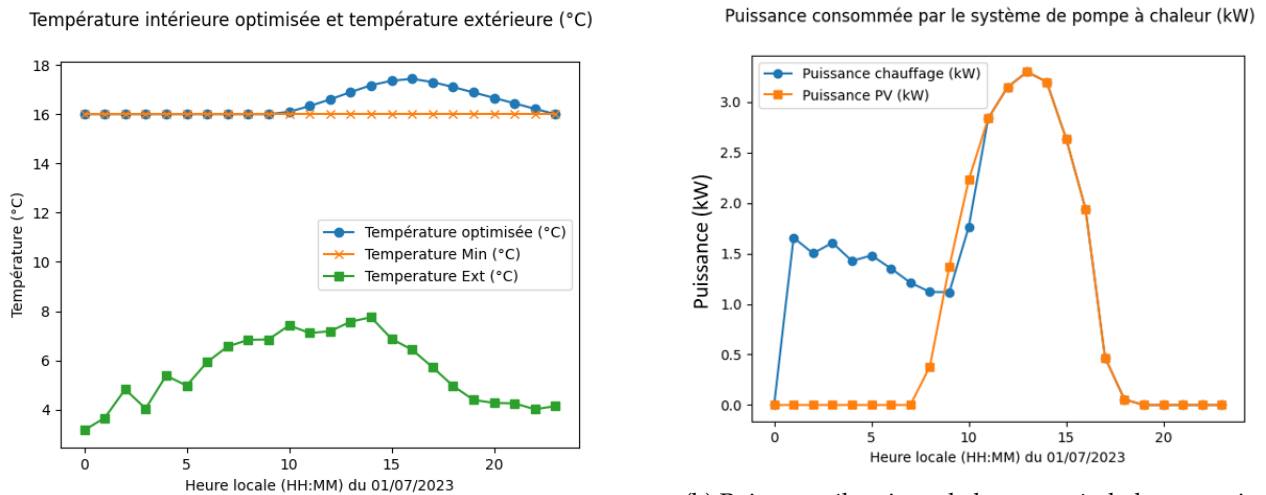
Scénario 2

Dans le scénario 2, les paramètres de modélisation de la production d'énergie photovoltaïque sont identiques à ceux du scénario 0 (voir table 4.3).

D'après les résultats de simulation pour le scénario 2, illustrés dans les figures 4.16a et 4.16b, nous pouvons constater que l'augmentation du nombre de panneaux photovoltaïques a eu un impact sur le comportement de l'optimisation du stockage thermique.

Dans cette configuration, la simulation de la puissance électrique de la pompe à chaleur montre que l'énergie photovoltaïque a suffi pour couvrir les besoins énergétiques en soirée. La température intérieure atteint 17.8°C entre 16h et 17h, permettant théoriquement de garantir un stockage thermique suffisant pour maintenir une température de 16°C à l'intérieur du bâtiment.

En revanche, entre minuit et 7h, un besoin énergétique de 11.33 kWh est nécessaire pour maintenir une température de consigne de 16°C. La consommation d'énergie totale de la pompe à chaleur pour cette journée étant de 31.81 kWh, ce résultat indique que dans ce scénario, 36% de l'énergie électrique requise par la pompe à chaleur proviendrait du parc de batteries. Cependant, dans cette configuration il est supposé que le parc de batteries serait chargé pour répondre au besoin énergétique entre minuit et 7h. Or comme nous pouvons le constater sur la figure 4.16b, la totalité de l'énergie photovoltaïque est utilisée pour répondre au besoin énergétique de la pompe à chaleur et ne permet pas le chargement des batteries. Ainsi, selon les paramètres de ce scénario et de la même manière que dans le scénario 1, la quantité de modules photovoltaïques n'est pas suffisante pour répondre aux besoins énergétiques du fonctionnement de la pompe à chaleur et le chargement des batteries.



(a) Simulation de la température intérieure optimisée du gîte pour le scénario 2.

(b) Puissance électrique de la pompe à chaleur et puissance des panneaux photovoltaïques pour le scénario 2.

FIGURE 4.16 : Résultats de simulations pour l'optimisation du stockage thermique du gîte selon les paramètres du scénario 2.

Scénario 3

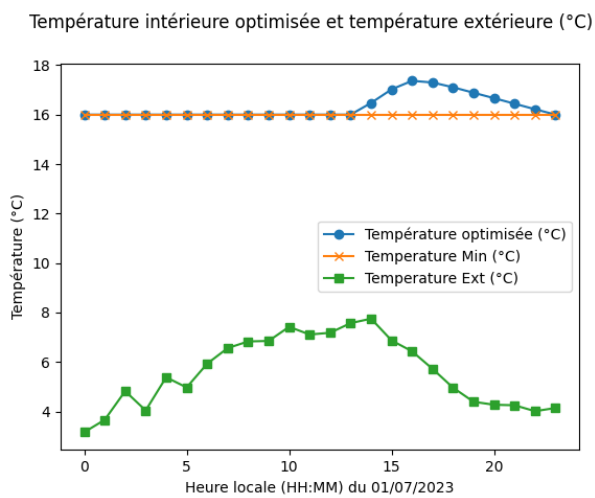
Dans le scénario 3, le nombre de modules photovoltaïques a été doublé (voir table 4.3).

D'après la figure 4.17a, nous pouvons constater que de la même manière que dans le scénario 2, la température intérieure atteint 17.8°C entre 16h et 17h, permettant de réaliser un stockage thermique optimal et

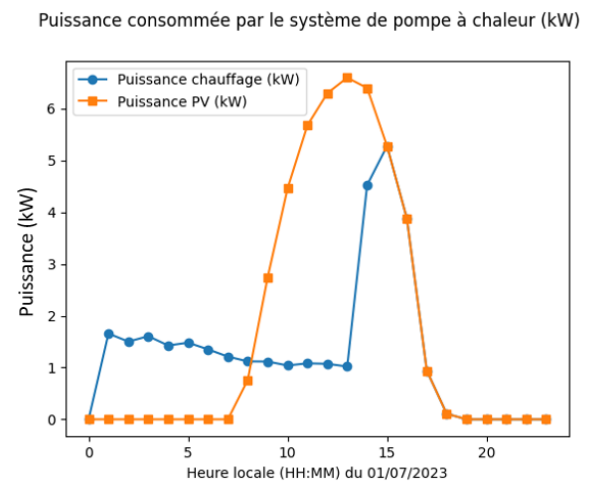
maintenir 16°C à l'intérieur du bâtiment sans avoir recours à l'énergie provenant des batteries durant la soirée.

Entre minuit et 7h, les résultats présentés dans la figure 4.17b permettent de calculer que la quantité d'énergie nécessaire pour garantir la température de consigne représente un total de 11.35 kWh. Dans cette configuration, le système de pompe à chaleur a été activé moins longtemps que dans le scénario 2, mais avec un plus fort appel de puissance (5 kW à 16h).

La consommation d'énergie totale de la pompe à chaleur pour cette journée étant de 31.41 kWh, ce résultat indique que dans ce scénario, 36% de l'énergie électrique requise par la pompe à chaleur proviendrait du parc de batteries. Cependant, contrairement au résultat obtenu dans le scénario 2, nous pouvons quantifier grâce aux résultats présentés sur la figure 4.17b que le surplus d'énergie photovoltaïque non utilisé (22.30 kWh) pourrait permettre le chargement des batteries.



(a) Simulation de la température intérieure optimisée du gîte pour le scénario 3.



(b) Puissance électrique de la pompe à chaleur et puissance des panneaux photovoltaïques pour le scénario 3.

FIGURE 4.17 : Résultats de simulations pour l'optimisation du stockage thermique du gîte selon les paramètres du scénario 3.

Synthèse des résultats de simulations

Les résultats de simulation obtenus pour les scénarios 0 à 3 sont synthétisés dans la table 4.4 ci-dessous :

TABLE 4.4 : Synthèse des résultats de simulation pour la gestion de la pompe à chaleur.

Scénario	Nb modules PV	Prod. PV (kWh)	Conso. chauffage (kW)	Capacité batteries (kWh)	Groupe électrogène
0	8	21.57	18.24	17.02	Non
1	4	10.78	31.81	22.11	Oui
2	8	21.57	31.81	11.33	Oui
3	16	43.14	31.41	11.35	Non

En prenant en considération un objectif de diminution de la quantité de batteries par rapport au scénario de référence (scénario 0), les résultats de simulation indiquent que le scénario 3 représente la configuration la plus optimale. Dans ce scénario, l'utilisation du modèle d'optimisation de gestion de la pompe à chaleur et la quantité de modules photovoltaïques garantissent le maintien continu de la température de consigne de 16°C à l'intérieur du bâtiment sur 24 heures. Dans ce scénario, la capacité du parc de batteries est de 11.35 kWh. A titre de comparaison, le calcul réalisé par la STD, qui prévoit un contrôle de la consigne de température de 16°C uniquement durant les heures d'occupation, la capacité nécessaire pour le parc de batteries est de 17.02 kWh. Ces résultats obtenus par le modèle d'optimisation indiquent ainsi une diminution de 33% de la capacité des batteries par rapport au scénario de référence.

Il est à noter que bien que la capacité du parc de batteries soit la même dans les scénarios 2 et 3, le nombre de modules photovoltaïques, deux fois plus élevé dans le scénario 3, permet à la fois de charger les batteries pendant la journée tout en assurant le fonctionnement de la pompe à chaleur, sans recourir au groupe électrogène.

En conclusion, afin d'améliorer la fiabilité des résultats obtenus par le modèle d'optimisation du stockage thermique et potentiellement, diminuer la quantité de modules photovoltaïques et la quantité d'énergie requise par la pompe à chaleur, les points suivants pourraient être ajoutés ou modifiés :

- Coefficient de convection thermique : Dans le cadre de cette étude de cas, le coefficient de convection thermique α a été fixé arbitrairement à 0.134 (W/m².K), une valeur moyenne utilisé en faisant l'hypothèse que le bâtiment a une bonne isolation thermique. Des études complémentaires concernant la capacité du futur bâtiment à limiter les échanges d'air avec l'extérieur pourraient permettre d'affiner la valeur de ce coefficient, afin de réaliser une simulation de son inertie thermique plus réaliste.
- Simulations sur plusieurs journées : Afin de fiabiliser les résultats obtenus par le modèle, il serait intéressant de réaliser des simulations sur plusieurs journées ayant des niveaux d'ensoleillement différents.
- Capteurs de température intérieure : Dans un contexte de développement expérimental du modèle de gestion de la pompe à chaleur, une communication avec des capteurs de température intérieure apporterait une évolution au modèle développé. En effet, le modèle étant actuellement un exemple de système en boucle ouverte, il serait pertinent de le transformer en un système en boucle fermée. Ceci permettrait au modèle de réaliser une comparaison entre la température de consigne et la température réelle, afin de corriger les erreurs éventuelles et affiner sa précision.

4.4 Synthèse

Travaux réalisés : Dans ce chapitre, l'autoproduction d'énergie photovoltaïque d'un bâtiment en exploitation à La Réunion a été analysée. Le bâtiment en question, appartenant à la société MCFOI, est équipé d'une centrale photovoltaïque, directement connectée en courant continu à un système de climatisation DRV, opérant à une tension de 600V DC. L'installation est également connectée au réseau électrique, afin de subvenir aux besoins énergétiques du système de climatisation lorsque l'énergie solaire photovoltaïque est insuffisante. L'analyse effectuée a révélé une réduction de 26% en moyenne de la consommation d'énergie du système de climatisation sur le réseau grâce à l'utilisation de la centrale photovoltaïque.

Afin de poursuivre l'objectif de réduction de la consommation d'électricité sur le réseau des systèmes de climatisation, tout en maximisant l'utilisation de l'électricité photovoltaïque disponible, un travail collaboratif a été réalisé pour développer un modèle de gestion de l'énergie (EMS), dédié à l'optimisation du stockage thermique.

Le modèle de gestion de l'énergie qui a été développé est décomposé en plusieurs étapes :

- La modélisation de la production photovoltaïque à partir des données réelles d'ensoleillement et de température extérieure mesurées sur le site.
- La modélisation de l'inertie thermique du bâtiment à partir des conditions de température extérieure.
- L'optimisation du besoin en énergie électrique du système de climatisation, en fonction du coût de l'énergie et des contraintes de niveaux de consigne.

Dans le cadre de cette étude, il a été suggéré que l'énergie produite par la centrale photovoltaïque correspond à l'énergie non facturée, comparativement à l'énergie du réseau électrique qui représente un coût facturé par le fournisseur d'électricité. Le modèle d'optimisation a été soumis à différentes contraintes proches des besoins utilisateurs, tels qu'un seuil de température maximum et un seuil de puissance de climatisation maximale, défini selon les spécificités de l'équipement.

Les résultats de simulation obtenus ont démontré que pour un même niveau de confort à l'intérieur du bâtiment, soit une température inférieure à 27 degrés, la puissance requise par le système de climatisation pouvait être diminué, tout en étant répartie selon les heures d'ensoleillement, soit au moment où l'énergie photovoltaïque est disponible. La diminution du pourcentage d'autoconsommation obtenu a par ailleurs indiqué qu'il pourrait être envisageable de réduire la quantité de modules photovoltaïques d'un tiers dans le cadre de cette étude, dans le cas d'une centrale photovoltaïque dédiée exclusivement à l'usage de la climatisation ou du chauffage d'un bâtiment.

Enfin, les fonctionnalités du modèle d'optimisation ont été testées dans le cadre d'une étude de cas portant sur un système de pompe à chaleur destiné au chauffage du futur gîte du Piton des Neiges. Le modèle a été évalué selon trois scénarios de dimensionnement d'une centrale photovoltaïque. Pour chacun de ces scénarios, la capacité nécessaire du parc de batteries a été calculée. En comparaison avec les calculs réalisés par Simulation Thermique Dynamique (STD) du pôle Qualité Environnementale d'Intégrale Ingénierie, les résultats du modèle d'optimisation suggèrent qu'une capacité de batteries de 11.35 kWh, au lieu de 17 kWh, pourrait suffire, soit une réduction de 33%.

Cette réduction de la capacité des batteries nécessite toutefois de doubler le nombre de modules photovoltaïques. Ceci permettrait, durant les heures d'ensoleillement, d'activer la pompe à chaleur et d'assurer un stockage thermique optimal pour limiter l'utilisation des batteries durant la soirée, tout en chargeant les batteries simultanément.

Axes d'améliorations et perspectives : Pour compléter les résultats obtenus dans ces deux études comparatives, il serait nécessaire de réaliser des simulations sur plusieurs journées types, ayant des niveaux d'ensoleillement et de température différents. Par ailleurs, des études complémentaires sur la capacité des bâtiments à limiter les échanges d'air avec l'extérieur, permettrait d'ajuster le coefficient de convection thermique du modèle d'optimisation, afin d'affiner la précision des résultats.

Les perspectives technologiques et expérimentales de ces développements pourraient consister à implémenter le modèle de gestion de l'énergie sur un microcontrôleur, tout en connectant directement les commandes en puissance à un système de climatisation ou un système de chauffage. Il pourrait être envisagé d'utiliser la technologie Power Over Ethernet (PoE) comme protocole de communication avec le système de climatisation. Également, réaliser des mesures de température à l'intérieur du bâtiment pourraient permettre de valider ou non les résultats de simulation, et éventuellement affiner le modèle d'optimisation. La figure 4.18 ci-dessous représente la proposition d'architecture associant la distribution électrique en courant continu sur la tension 380 (ou qui pourrait être 400 selon les futures normes) et 48V DC et l'association d'un système de gestion de l'énergie pour l'optimisation du stockage thermique.

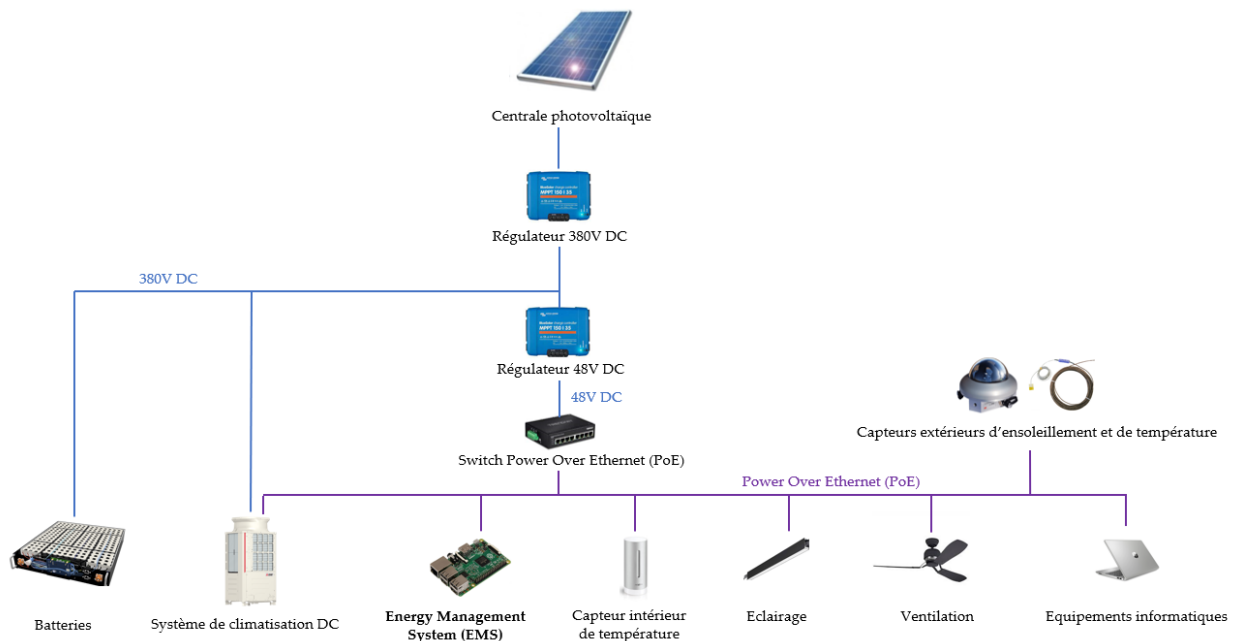


FIGURE 4.18 : Schéma représentant l'architecture proposée pour l'association de la distribution 400/48V DC et l'optimisation du stockage thermique.

Dans cette architecture, la distribution électrique en 380V DC est employée pour alimenter le système de stockage sur batterie et le système de climatisation, qui représentent la part la plus importante de la consommation d'énergie. Sur le schéma, la tension 380V DC est régulée en 48V DC afin d'alimenter les appareils électriques en courant continu qui requièrent une puissance d'alimentation moins importante. Le système de gestion de l'énergie (EMS) est représenté par un microcontrôleur, sur lequel serait implémenté le modèle d'optimisation du stockage thermique.

La communication en PoE entre les différents éléments permettent à l'EMS d'accéder à toutes les informations relatives à la production ou consommation d'énergie, ainsi que les mesures provenant des capteurs environnementaux intérieurs et extérieurs. Concernant le rapatriement et l'analyse de données qui correspondent à la chaîne de mesure du système, celle-ci correspondrait au schéma présentée en figure 3.9 dans le chapitre 3.

Afin d'intégrer tous les équipements électriques présents dans le secteur tertiaire et représenter une architecture électrique complète, une perspective pourrait être d'ajouter également le pilotage des bornes de véhicules électriques, afin de limiter les forts appels de puissance de ces équipements tout en respectant les contraintes des utilisateurs.

Conclusion générale

La révolution silencieuse du courant continu semble bien débuter en ce début de 21^{ème} siècle. “Le courant alternatif, dominant depuis la fin du XIX^e siècle, va perdre sa suprématie. La montée en puissance des énergies renouvelables marque la revanche du courant continu.” (cf Les Echos, La révolution silencieuse du courant continu, Frank Niedercorn, 11 juin 2024). Cet article présente le nouveau bâtiment WAVE qui héberge la direction régionale de Vinci Energies à Lille. Ce démonstrateur montre comment le courant continu a la possibilité de s’étendre, car il peut contribuer à faciliter la transition énergétique, en particulier avec l’intégration de l’énergie solaire photovoltaïque et de l’éolien.

Dans ce contexte d’évolution du réseau électrique, distribué en courant alternatif vers un réseau hybride mixte AC/DC, nos travaux de recherche et d’expérimentations, résultats d’une collaboration entre les laboratoires ENERGY-Lab, LCIS, et l’entreprise Intégrale Ingénierie, ont eu pour objectif principal de produire une approche expérimentale et une stratégie de la distribution d’énergie électrique LVDC (48V-DC), tout en prenant en compte les problématiques locales concernant la gestion de l’énergie dans les bâtiments.

Concernant l’approche expérimentale de la distribution d’énergie électrique LVDC (48V-DC), nous avons déployé un nano-réseau constitué d’une centrale photovoltaïque, une batterie lithium-fer-phosphate, et des panneaux de leds alimentés en Power over Ethernet (PoE) pour deux bureaux individuels au sein de l’entreprise Intégrale Ingénierie.

Pour une distance équivalente de 25m, un gain de rendement électrique de 40% a été quantifié par rapport à une installation conventionnelle, incluant un onduleur et des convertisseurs AC-DC. Afin de rechercher les limites de l’efficacité énergétique de l’installation, un banc de tests expérimental a été mis en œuvre et a permis de mettre en place une méthodologie permettant d’identifier selon le cas applicatif, le meilleur choix d’architecture électrique entre une distribution électrique 230V AC ou une distribution électrique 48V DC. Face aux perspectives de déploiement du courant continu, l’importance de prendre en considération les chutes de tensions, la section des câbles, les distances de transmission et le rendement des convertisseurs a été mise en évidence. Sur une distance de 25m, les résultats de ces expérimentations ont permis d’identifier pour une puissance utilisée de 100W avec une section de câble de 1.5mm² et de 150W pour une section de câble de 2.5mm², en respectant les exigences en termes de chute de tension de la norme NFC15-100.

La gestion intelligente de l’énergie au sein des bâtiments a constitué une question centrale de notre démarche. Ainsi, nos travaux ont permis d’y contribuer sur deux aspects.

Dans le chapitre 3, nous avons proposé une infrastructure logicielle basée sur des technologies numériques en accès libres pour la collecte, le stockage et l’analyse des données à distance. L’avantage majeur de cette infrastructure est de centraliser au sein d’une interface unique la totalité des informations (données de consommation, de production, de stockage d’énergie et d’autres données provenant de capteurs environnementaux intérieurs et extérieurs). Dans le cadre du décret tertiaire dont l’objectif est la réduction de la consommation d’énergie des bâtiments, cette proposition d’infrastructure pourrait contribuer à faire évoluer la plateforme OPERAT proposée par l’ADEME, en facilitant la collecte et l’analyse de données de consommation d’énergie des bâtiments.

Dans le chapitre 4, nous avons développé un modèle de gestion de l’énergie ayant comme objectif d’optimiser le stockage thermique au sein des bâtiments. Ce modèle d’optimisation énergétique, est basé sur la méthode Mixed-Integer-Linear-Programming (MILP). Le chauffage ou le rafraîchissement des bâtiments représentant la part de consommation d’énergie la plus importante (50% de la consommation totale), les résultats de simula-

tion obtenus par le modèle ont permis de mettre en évidence que ce contrôle optimisé des appels de puissance du système de climatisation pouvait permettre de conserver un niveau de confort identique pour les usagers tout en consommant moins d'énergie.

Par ailleurs, le coût de l'énergie a été pris en compte comme contrainte du modèle de gestion de l'énergie. Hors coût d'investissement, nous avons considéré dans le cadre de cette étude que l'électricité produite à partir d'une centrale photovoltaïque était moins coûteuse que l'énergie provenant du réseau électrique public (ou d'un groupe électrogène).

Par cette optimisation du stockage thermique, les résultats de ces simulations ont démontré que la performance énergétique globale d'un bâtiment par un nano-réseau en courant continu pouvait être améliorée. En effet, la puissance du système de climatisation, optimisée sous contrainte du coût de l'énergie et des consignes de température intérieure, a mis en évidence un besoin énergétique réduit, donc une quantité d'énergie photovoltaïque limitée, permettant néanmoins de conserver un niveau de confort identique dans le bâtiment. Nous avons démontré qu'une diminution importante du pourcentage d'autoconsommation d'énergie photovoltaïque, est obtenu après optimisation. En effet, le pourcentage d'autoconsommation passe de 74% à 30%. Par ailleurs, il n'est plus nécessaire d'avoir recours à l'électricité du réseau public en dehors des heures d'ensoleillement.

Afin d'effectuer le transfert technologique, caractéristique d'une thèse CIFRE, les fonctionnalités du modèle d'optimisation développé ont été testées à travers une étude de cas portant sur un site isolé et autonome en énergie : le gîte du Piton des Neiges, situé à 2400m d'altitude sur l'île de la Réunion. L'impact de l'optimisation de la gestion d'un système de pompe à chaleur sur le dimensionnement du nombre de batteries nécessaires a été évalué. Comparativement au fonctionnement de référence basé sur des calculs de Simulation Thermique Dynamique (STD), les résultats de simulation ont montré qu'en doublant le nombre de modules photovoltaïques, le modèle de gestion de l'énergie permettait de réduire de 30% la capacité des batteries en optimisant le fonctionnement de la pompe à chaleur.

Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives d'optimisation de nano-réseaux DC. Effectivement, d'une part, le dimensionnement des centrales photovoltaïques et des batteries pourrait être réduit grâce à des simulations de l'optimisation du stockage thermique. D'autre part, réduire la quantité de composants nécessaires pour la gestion de l'énergie contribue à répondre aux contraintes environnementales présentes et à venir concernant les ressources en métaux et combustibles fossiles.

Désormais l'utilisation de la tension d'alimentation 400V DC devient une solution envisageable pour pallier aux limitations en puissance de la tension 48V DC en particulier pour les charges électriques importantes telles que les systèmes de climatisation ou de chauffage, les bornes de recharge de véhicules électriques et les transmissions de longues distances dans les bâtiments.

Enfin, optimiser la gestion des appels de puissance tout en respectant les contraintes des usagers dans les bâtiments est un axe de recherche pertinent. Cette approche permet à la fois d'optimiser le nombre de modules photovoltaïques et l'énergie de stockage nécessaire dans les installations dans les bâtiments, tout en contribuant également à la stabilité du réseau électrique. En effet, participer à la réduction de pics de consommation du réseau public et améliorer la consommation énergétique globale peuvent contribuer à réduire le bilan carbone.

Concernant les sites autonomes en énergie, la simulation de la gestion optimale du stockage thermique durant les études de conception des bâtiments, peut contribuer à optimiser le dimensionnement de l'architecture électrique en courant continu. Les nouveaux systèmes de production, de stockage et de distribution de l'énergie électrique ouvrent la voie à la limitation voire la suppression au recours d'énergies fossiles en optimisant

L'utilisation des énergies renouvelables.

Lors de ces travaux de recherche et de développement, nous avons pris l'initiative d'intégrer une démarche de développement durable, spécifique aux îles et de type « low-tech ». Nos travaux ont été identifiés comme une telle démarche lors du webinaire organisé par l'ambassade de France aux états-unis « Low-tech innovation - A french american discussion, resilient solutions for climate change » le 5 avril 2022. Les perspectives majeures concernant les architectures électriques DC de nano-réseaux pourraient ainsi être les suivantes :

- L'utilisation de batteries de seconde vie permettrait à l'île de La Réunion de faire face à un nombre croissant de batteries usagées issues de véhicules électriques. La détérioration de batteries lithium-ion étant un frein à leur exportation, une infrastructure locale de réparation pour l'usage stationnaire dans les bâtiments pourrait permettre de réduire le nombre d'importations de batteries lithium-ion neuves pour les installations photovoltaïques.
- L'optimisation de systèmes de gestion de l'énergie tel que le modèle d'optimisation du stockage thermique développé dans ces travaux pourrait être implémenté sur un site démonstrateur expérimental dans le cadre d'un projet de recherche futur, afin de valider expérimentalement les résultats de simulation. Concernant la mesure de confort thermique à l'intérieur des bâtiments, les réseaux de capteurs employés pourraient être remplacés par des réseaux basse consommation, basés sur la récupération d'énergie sans fils, comme proposé dans les travaux de thèse de J. Sibille et T. Fougeroux (2024).
- Les technologies de transmission et de communication en DC permettraient de s'affranchir de la limitation en puissance de la technologie PoE, tout en utilisant les câbles électriques existants dans les bâtiments, les travaux de thèse de K. Hafsi (2024), ont permis de mettre en évidence les avantages de la distribution Power Over Digital Line (PoDL) et Single Pair Ethernet (SPE), couplée à la gestion de l'énergie basée sur une approche distribuée avec un système multi-agent.
- La diversification des sources de production et de stockage d'énergie, comme cela a été étudié dans la thèse de A. Prevost (2024) propose une perspective intéressante concernant la diversification des sources de production d'énergie au sein des micro et nano-réseaux en courant continu, tel que l'éolien domestique. Par ailleurs concernant la diversité des systèmes de stockage, de nombreux travaux réalisés au ENERGY-Lab par F. Aubras (2018), E. Dijoux (2019), C. Lin Kwong Chon (2020), M. Ait Ziane (2023) et I. Sinapan (2024) ont contribué à l'amélioration du contrôle de fautes et au diagnostic de l'état de santé des électrolyseurs et des piles à combustibles. Ces systèmes dont la maturité technologique est encore en cours de développement constituent également une piste de recherche pour diversifier les systèmes de stockage au sein des micro et nano-réseaux.

Enfin, à la suite de la présentation de nos travaux lors de la conférence internationale "IEEE TENSYP 2023" qui s'est déroulée à Canberra en septembre 2023, nous avons pu intégrer le groupe de travail international "IEEE Power and Energy Society Adhoc Committee on End-to-End Direct Current Power Networks". La thématique de ces réunions de travail, a été d'identifier les challenges majeurs de la distribution HVDC et LVDC pour les années à venir. Les conclusions majeures indiquent que les applications de distribution électrique en courant continu LVDC, en particulier, doivent être développées le plus rapidement et requièrent une mobilisation mondiale.

En conclusion de nos travaux de recherche et d'expérimentation, les différents résultats obtenus concernant la distribution LVDC à 48V-DC et l'optimisation du stockage thermique permettent d'ouvrir des perspectives de recherche concernant la proposition d'architectures électriques optimales alimentées en courant continu. Cet axe de développement ouvre également de nouvelles perspectives d'apprentissage pour la formation des

générations à venir. Cette réflexion a été menée dans le cadre des cours dispensés au niveau Licence et Master à la Faculté des Sciences et Technologies pendant cette thèse. Nous avons conçu et mis en oeuvre un module d'enseignement durant lequel les étudiants, ont été sensibilisés à travers des exemples issus de ces travaux de recherche et ont présenté leur travail lors d'une immersion en entreprise. Ces actions, sont des exemples pouvant s'inscrire dans le cadre des enseignements sur la Transition Écologique pour un Développement Durable qui vont devenir obligatoires pour tous les étudiants du premier cycle Universitaire.

Annexe A. Script de collecte et insertion des données entre l'application VRM de Victron et une base de données de type influxDB

```
1 import time
2 from datetime import datetime
3 from influxdb_client import InfluxDBClient, Point, WritePrecision
4 from influxdb_client.client.write_api import SYNCHRONOUS
5 import json
6 import requests
7
8 # Init static variables
9
10 USER_ID = "YOUR_USER_ID"
11 USER_PWD = "YOUR_PASSWORD"
12 SITE_ID = "YOUR_SITE_ID"
13 BUCKET = "YOUR_BUCKET"
14 ORG = "YOUR_ORG"
15
16 login_url = "https://vrmapi.victronenergy.com/v2/auth/login"
17 diags_url = "https://vrmapi.victronenergy.com/v2/installations/"+"YOUR_SITE_ID"+"/diagnostics?count=1000"
18 batterysummary_url = "https://vrmapi.victronenergy.com/v2/installations/"+"YOUR_SITE_ID"+"/widgets/BatterySummary"
19
20 login_string = '{"username":"YOUR_USER_ID","password":"YOUR_PASSWORD"}'
21
22
23 # Use the name and password you log into VRM with
24 response = requests.post(login_url , login_string)
25 token_victron = json.loads(response.text) ["token"]
26 headers = {'X-Authorization': "Bearer " + token_victron }
27 data = response.json()
28
29 # Recovering battery summary informations
30 get_battSummary = requests.get (batterysummary_url,headers=headers)
31 print_batt = json.dumps (get_battSummary.json (), indent=4)
32
33
34 # Informations base de donnees
35 token = "YOUR_TOKEN"
36 org = "YOUR_ORG"
37 bucket = "YOUR_BUCKET"
38 url = "YOUR_URL"
39 client = InfluxDBClient(url=url, token=token, org=org)
40 write_api = client.write_api(write_options=SYNCHRONOUS)
41
42
43 while(True):
44
45     ## VICTRON
46     # Recovering diagnostics informations
47     get_diags = requests.get (diags_url,headers=headers)
48     print_diags = json.dumps (get_diags.json (), indent=4)
49     data_diags = get_diags.json () ["records"]
50
51     ## Battery State of Charge (%)
52     batterySoC=[element['formattedValue'] for element in data_diags if element['code']=="SOC"][0]
53
54     ## Battery Current charge or discharge (A)
55     batteryCurrent=[element['rawValue'] for element in data_diags if element['code']=="I"][0]
56
57     ## Battery Voltage (V)
58     batteryVoltage=[element['rawValue'] for element in data_diags if element['code']=="V"][0]
59
```

```

60
61  ## Solar Power (W)
62  solarPower=[element['rawValue'] for element in data_diags if element['code']=="Pdc"][0]
63
64
65  ## Battery Power (W)
66  batteryPower = round(float(batteryVoltage)*float(batteryCurrent),2)
67
68  # Conversion des string en nombre
69  batterySoC = batterySoC.split('%')
70  batterySoC = float(batterySoC[0])
71
72  # Affichage des valeurs
73  print("SoC (%) :", batterySoC)
74  print("Battery Charge / Discharge (A) :",batteryCurrent)
75  print("Battery Voltage (V) :",batteryVoltage)
76  print("Solar Power (W) : ",solarPower)
77  print("Battery Power (W): ",batteryPower)
78
79
80  ##### Insertion en base de données
81
82  pPV = Point("energy").tag("site", "energy-lab").tag("mac_address","MPPT-100-20-Victron").tag("equipment","pv").
      field("power_w",float(solarPower)).time(datetime.utcnow(), WritePrecision.NS)
83  pBatt1 = Point("energy").tag("site", "energy-lab").tag("mac_address","YUASA_REC50_12L_12").tag("equipment","
      battery").field("current_a",float(batteryCurrent)).time(datetime.utcnow(), WritePrecision.NS)
84  pBatt2 = Point("energy").tag("site", "energy-lab").tag("mac_address","YUASA_REC50_12L_12").tag("equipment","
      battery").field("voltage_v",float(batteryVoltage)).time(datetime.utcnow(), WritePrecision.NS)
85  pBatt3 = Point("energy").tag("site", "energy-lab").tag("mac_address","YUASA_REC50_12L_12").tag("equipment","
      battery").field("power_w",float(batteryPower)).time(datetime.utcnow(), WritePrecision.NS)
86  pBatt4 = Point("energy").tag("site", "energy-lab").tag("mac_address","YUASA_REC50_12L_12").tag("equipment","
      battery").field("soc_percent",float(batterySoC)).time(datetime.utcnow(), WritePrecision.NS)
87
88  write_api.write(bucket, org, [pPV,pBatt1,pBatt2,pBatt3,pBatt4])
89  print("Inserted influxdb")
90
91  time.sleep(10)

```

Listing A.1 : Code de collecte et d'insertion en base de données des mesures depuis l'application VRM

Annexe B. Script du modèle d'Energy Management System (EMS) dédié à l'optimisation du stockage thermique selon la méthode MILP

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 import scipy as sc
4 import datetime as dt
5 import math
6 from scipy.io import loadmat
7 from pandas import read_csv
8 import pandas as pd
9
10 # import gurobipy as gp
11 import sys
12 import scipy as sc
13 from scipy.optimize import LinearConstraint
14 from scipy.optimize import milp
15
16
17 LengthOptim = 24
18
19 # TemperatureMin = 18 * np.ones(LengthOptim)
20 IrradianceInertia = 15 * np.array(
21     [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 1, 1, 0, 0, 0]
22 )
23
24 Simu_PV = [
25     0.00,
26     0.00,
27     0.00,
28     0.00,
29     0.00,
30     0.00,
31     200.71,
32     2358.10,
33     4575.85,
34     8208.39,
35     11373.63,
36     10573.71,
37     7595.32,
38     8323.37,
39     9006.41,
40     3965.29,
41     2360.84,
42     1368.68,
43     435.63,
44     0.00,
45     0.00,
46     0.00,
47     0.00,
48     0.00,
49 ]
50 weightEnv = 0.5
51 weightCost = 0.5
52
53 CO2emissions = np.array(
54     [
55         175.3832496,
56         153.1666087,
57         140.7375224,
58         178.1145482,
59         184.0737135,
```

```

60     160.3737913,
61     121.2004819,
62     124.9227102,
63     155.6844156,
64     179.8172943,
65     181.9825352,
66     186.7212864,
67     175.3832496,
68     153.1666087,
69     140.7375224,
70     178.1145482,
71     184.0737135,
72     160.3737913,
73     121.2004819,
74     124.9227102,
75     155.6844156,
76     179.8172943,
77     181.9825352,
78     186.7212864,
79 ]
80 )
81
82 GridPrice = np.array(
83     [
84         113.4,
85         110.4,
86         106.5,
87         117.4,
88         150.8,
89         161,
90         167.1,
91         148.7,
92         319.4,
93         345.8,
94         156.2,
95         118.4,
96         113.4,
97         110.4,
98         106.5,
99         117.4,
100        150.8,
101        161,
102        167.1,
103        148.7,
104        319.4,
105        345.8,
106        156.2,
107        118.4,
108    ]
109 )
110 GridPrice = 100 * np.ones(LengthOptim)
111
112 EnergyDeficitCost = 10
113 flexCost = 10
114 Priority = np.ones((LengthOptim))
115 # alphaThermal2 = 0.021 * 1440 / 120
116 # alphaThermal1 = 0.065 * 1440 / 120
117 # alphaThermal2 = 0.015 * 1440 / 120
118 # alphaThermal1 = 0.075 * 1440 / 120
119 alphaThermal2 = 0.009 * 1440 / 120
120 alphaThermal1 = 0.0015 * 1440 / 120
121 alphaThermal1max = 0.008 * 1440 / 120 # 0.002 * 1440 / 120
122 alphaThermal1max = 0.012 * 1440 / 120 # 0.002 * 1440 / 120
123 alphaThermal1min = alphaThermal1max # 0.0015 * 1440 / 120 #alphaThermal1max #
124
125 alphaThermal1 = (alphaThermal1min + alphaThermal1max) / 2
126 BPrice = weightEnv * CO2emissions + weightCost * GridPrice
127 EmaxDaily = 10000

```

```

128 Pmaxchauf = 12000
129 TemperatureMin = 23 * np.ones(LengthOptim)
130 TemperatureMax = 27 * np.ones(LengthOptim)
131
132 # Lecture d'un fichier csv pour les donnees de temperature exterieure, climatisation reelle
133 file_name = "2024-03-12_data_avec_clim.csv"
134 df = pd.read_csv(file_name, sep=";")
135 tab_temp = df["T_C"]
136 tab_drv = df["P_DRV_kW"]
137 print("Temp ext :", len(tab_temp))
138 Temperature_Ext = np.array(tab_temp)
139 Puissance_DRV = np.array(tab_drv)
140
141 ProductionSeller = EmaxDaily * np.ones(LengthOptim)
142 ProductionSeller = 2 * np.array(
143     [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 3, 3, 2, 2, 2, 2, 1, 1, 0, 0, 0]
144 )
145
146 DemandRequired = 0 * np.ones(LengthOptim)
147 TemperatureInit = 27
148
149
150 f = np.r_[
151     BPrice, # Demand supplied from the grid/gas engine
152     0 * BPrice, # Demand supplied from PV
153     BPrice, # Heat/cooling Demand supplied from the grid/gas engine
154     0 * BPrice, # Heat/cooling Demand supplied from PV
155     np.zeros([LengthOptim]), # Temperature
156     np.zeros([LengthOptim]), # alpha
157 ]
158
159 Aeq2 = np.c_[
160     np.eye(LengthOptim),
161     np.eye(LengthOptim),
162     np.zeros((LengthOptim, LengthOptim)),
163     np.zeros((LengthOptim, LengthOptim)),
164     np.zeros((LengthOptim, LengthOptim)),
165     np.zeros((LengthOptim, LengthOptim)),
166 ] # Energy from grid + energy from PV = DemandRequired
167 Aeq3 = np.c_[
168     np.zeros((LengthOptim, LengthOptim)),
169     np.zeros((LengthOptim, LengthOptim)),
170     alphaThermal2 * np.eye(LengthOptim),
171     alphaThermal2 * np.eye(LengthOptim),
172     -(1 - alphaThermal1)
173     * (np.tri(LengthOptim, LengthOptim, -1) - np.tri(LengthOptim, LengthOptim, -2))
174     + np.eye(LengthOptim),
175     -np.eye(LengthOptim) * (Temperature_Ext)
176     + np.eye(LengthOptim)
177     * np.r_[np.array([TemperatureInit]), np.zeros(LengthOptim - 1)],
178 ] # thermal physical law
179
180 Aeq = np.concatenate([Aeq2, Aeq3], axis=0)
181 Beq2 = DemandRequired
182 Beq3 = (1 - 0) * np.r_[
183     np.array([TemperatureInit]), np.zeros(LengthOptim - 1)
184 ] + 0.1 * IrradianceInertia / 100
185 Beq = np.concatenate([Beq2, Beq3], axis=0)
186
187 A1 = np.c_[
188     np.zeros((LengthOptim, LengthOptim)),
189     np.eye(LengthOptim),
190     np.zeros((LengthOptim, LengthOptim)),
191     np.eye(LengthOptim),
192     np.zeros((LengthOptim, LengthOptim)),
193     np.zeros((LengthOptim, LengthOptim)),
194 ] # demand for supply from PV + demand for heating from PV < PV production
195

```



```

196 # A = np.concatenate([A1, A2, A3, A4, A5, A6], axis=0)
197 A = np.concatenate([A1], axis=0)
198
199 b = np.r_[ProductionSeller]
200 lb = np.r_[
201     np.zeros((LengthOptim)),
202     np.zeros((LengthOptim)),
203     np.zeros((LengthOptim)),
204     np.zeros((LengthOptim)),
205     TemperatureMin,
206     (alphaThermallmin) * np.ones((LengthOptim)),
207 ]
208 ub = np.r_[
209     EmaxDaily * np.ones((LengthOptim)),
210     EmaxDaily * np.ones((LengthOptim)),
211     Pmaxchauf * np.ones((LengthOptim)),
212     Pmaxchauf * np.ones((LengthOptim)),
213     TemperatureMax,
214     (alphaThermallmax) * np.ones((LengthOptim)),
215 ]
216
217
218 ##### Scipy #####
219
220 # A = np.concatenate([A1, A2, A3, A4, A5, A6, Aeq, np.eye(f.shape[0])], axis=0)
221 A = np.concatenate([A1, Aeq, np.eye(f.shape[0])], axis=0)
222 b1 = np.concatenate([-9e99 * np.ones_like(b), Beq, lb], axis=0)
223 bu = np.concatenate([b, Beq, ub], axis=0)
224
225 constraints = LinearConstraint(A, b1, bu)
226 # integrality = Index_binary
227
228 res = milp(c=f, constraints=constraints) # , integrality=integrality)
229 solution = res.x
230 print("Solution:", solution)
231 time = [0]
232 temperature_optim = [TemperatureInit]
233
234 # np.set_printoptions(linewidth=300)
235 output = ""
236 print("Output Temperature: ")
237 for i in range(LengthOptim - 1):
238     output = output + str(solution[solution.shape[0] - 2 * LengthOptim + i]) + ", "
239     time.append(time[i] + 1)
240     temperature_optim.append(solution[solution.shape[0] - 2 * LengthOptim + i + 1])
241 print(output)
242
243 PuissanceHeatPV = [0]
244 PuissanceHeatGrid = [0]
245 PuissanceHeattotal = [0]
246
247 for i in range(LengthOptim - 1):
248     PuissanceHeatPV.append(solution[solution.shape[0] - 3 * LengthOptim + i])
249     PuissanceHeatGrid.append(solution[solution.shape[0] - 4 * LengthOptim + i])
250     PuissanceHeattotal.append(
251         solution[solution.shape[0] - 4 * LengthOptim + i]
252         + solution[solution.shape[0] - 3 * LengthOptim + i]
253     )
254
255 print(len(time))
256 print(len(temperature_optim))
257 print(len(TemperatureMin))
258 print(len(Temperature_Ext))
259 print(len(TemperatureMax))
260 # print(len(Tamb))
261 print(PuissanceHeattotal)
262 print(len(500 * solution[solution.shape[0] - 1 * LengthOptim : solution.shape[0]]))
263

```

```

264 plt.figure()
265 plt.suptitle("Température extérieure réelle et température intérieure optimale (°C)")
266 plt.plot(
267     time,
268     temperature_optim,
269     time,
270     TemperatureMin,
271     time,
272     Temperature_Ext,
273     time,
274     TemperatureMax,
275 )
276 plt.legend(
277     [
278         "Temperature optim",
279         "Temperature Min",
280         "Temperature Ext",
281         "Temperature Max",
282     ]
283 )
284 # plt.xticks(rotation=90)
285 plt.show()
286
287
288 plt.figure()
289 plt.suptitle("Puissance Consommée (W)")
290 plt.plot(time, PuissanceHeatPV)
291 plt.plot(time, PuissanceHeatGrid)
292 plt.legend(["Puissance PV", "Puissance Réseau"])
293 # plt.xticks(rotation=90)
294 plt.show()
295
296
297 x = np.linspace(0, LengthOptim, LengthOptim) # ,LengthOptim)
298 # Plot the array
299 plt.plot(x, Temperature_Ext, label="Temp Ext")
300 plt.plot(x, TemperatureMax, label="Temp Max")
301 plt.plot(
302     x,
303     solution[solution.shape[0] - 2 * LengthOptim : solution.shape[0] - 1 * LengthOptim],
304     label="Temp Int",
305 )
306 plt.plot(
307     x,
308     1000 * solution[solution.shape[0] - 1 * LengthOptim : solution.shape[0]],
309     label="Alpha",
310 )
311
312 # Add labels and title
313 plt.xlabel("Time")
314 plt.ylabel("Temperature")
315 plt.legend()
316
317 plt.show()
318
319
320 print("Required Energy: ")
321 output = ""
322 for i in range(LengthOptim - 1):
323     output = output + str(solution[solution.shape[0] - 3 * LengthOptim + i]) + ", "
324 print(output)
325 sys.stdout.flush()

```

Listing B.1 : Code d'optimisation du stockage thermique à partir de la méthode MILP

Annexe C. Paramètres utilisés pour la Simulation Thermique Dynamique (STD) du futur gîte du Piton des Neiges

Template		Salle à manger		
Construction		Vitrage		
Murs extérieurs	0,134 W/(m ² .K)	Uf	1,3 W/(m ² .K)	
Murs intérieurs	0,248 W/(m ² .K)	Ug	1,1 W/(m ² .K)	
Plancher	0,122 W/(m ² .K)	TL	83 %	
Toiture	0,134 W/(m ² .K)	FS	0,71	
Infiltration: 24h/24h	0,0002 m ³ /s.m ² façade			
Conditions intérieures				
T° Consigne	16°C			
%HR	Non contrôlée			
T° Hors occupation	Non contrôlée			
%HR hors occupation	Non contrôlée			
0h-5h	5h - 9h	9h-17h	17h - 21h	21h-0h
Nc	16°C	Nc	16°C	Nc
Occupation:				
Densité	80 personnes			
Charge sensible	79 Watts par personne			
Charge latente	21 Watts par personne			
<i>Scénario d'occupation</i>				
0h - 6h	5h - 9h	10h - 18h	18h - 21h	21h - 0h
0%	50%	0%	100%	0%

FIGURE C.1 : Détail des paramètres utilisés pour la STD du futur du gîte du Piton des Neiges.

Résumé

Les nano et micro-réseaux sont fortement étudiés par la communauté scientifique et le secteur industriel pour leur capacité à faciliter l'insertion et le stockage des énergies renouvelables dans les bâtiments. Les micro-réseaux en courant continu (DC) présentent l'avantage de réduire les étapes de conversion du courant par rapport aux micro-réseaux en courant alternatif (AC). Ceux-ci représentent donc une des solutions possibles pour réaliser des économies d'énergie, en particulier pour les sites isolés tels que l'île de La Réunion.

Les études étant majoritairement basées sur des simulations numériques, des retours d'expérience sur des sites expérimentaux peuvent contribuer à l'évolution des normes électriques actuelles. Dans le cadre de ces travaux, un nano réseau à courant continu (DC) expérimental a été déployé au sein d'une entreprise du secteur tertiaire à La Réunion. Le nano-réseau est constitué d'une centrale photovoltaïque, une batterie lithium-fer-phosphate et les équipements terminaux sont alimentés et pilotés par la technologie Power Over Ethernet (PoE). Les avantages et les limites de la distribution en 48 VDC ont été caractérisés d'un point de vue matériel (gains énergétiques, distances de communication, pertes en ligne) et logiciel (interfaces, protocoles de communication). L'efficacité énergétique du nano-réseau a été évaluée selon un modèle multi-paramètres avec validation expérimentale.

Concernant la gestion de l'énergie, un modèle d'Energy Management System (EMS) a été développé pour l'optimisation énergétique du stockage thermique dans les bâtiments. Afin d'assurer la duplicabilité de cette contribution, les outils développés ont été testés sur une étude de cas, pour un site isolé en haute altitude.

Mots clés : nano-réseau ; courant continu ; photovoltaïque ; batterie ; Energy Management System (EMS) ; power over ethernet ; efficacité ; optimisation stockage thermique.

Abstract

Nano and micro-grids are heavily studied by the scientific community and the industrial sector for their ability to facilitate the integration and storage of renewable energies in buildings. Direct current (DC) microgrids offer the advantage of reducing current conversion steps compared to alternating current (AC) microgrids. Therefore, they represent one of the possible solutions for achieving energy savings, especially for isolated sites such as Reunion Island.

As studies are mostly based on numerical simulations, feedback from experimental sites can contribute to the evolution of current electrical standards. As part of these efforts, an experimental DC nano-grid was deployed within a tertiary sector company in Reunion Island. The nano-grid consists of a photovoltaic plant, a lithium-iron-phosphate battery, and terminal equipment powered and controlled by Power Over Ethernet (PoE) technology. The advantages and limitations of 48 VDC distribution were characterized from both a hardware perspective (energy gains, communication distances, line losses) and software (interfaces, communication protocols). The energy efficiency of the nano-grid was evaluated using a multi-parameter model with experimental validation.

Regarding energy management, an Energy Management System (EMS) model was developed for optimizing thermal storage in buildings. To ensure the replicability of this contribution, the developed tools were tested on a case study for an isolated site at high altitude.

Keywords: nanogrids; direct current; photovoltaic; battery; Energy Management System (EMS); power over ethernet; efficiency; thermal storage optimization.

Bibliographie

- [1] GIEC. Climate change 2014: Synthesis report. contribution of working groups i, ii and iii to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2014.
- [2] GIEC. Special report on global warming of 1.5°C, 2018.
- [3] JORF. Décret n° 2019-771 du 23 juillet 2019 relatif aux obligations d'actions de réduction de la consommation d'énergie finale dans des bâtiments à usage tertiaire. JORF n°0173 du 25 juillet 2019, 2019. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000038836947>.
- [4] JORF. Décret n°2020-992 du 7 août 2020 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions de bâtiments. JORF n°0180 du 8 août 2020, 2020. <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/decret/2020/8/7/TREP1923401D/jo/texte>.
- [5] ADEME. Plateforme OPERAT. <https://www.operat.ademe.fr/>, 2022.
- [6] République Française. Loi relative à la transition Énergétique pour la croissance verte, 2015. Loi n° 2015-992 du 17 août 2015.
- [7] EDF Réunion. Open data edf réunion, 2022. https://opendata-reunion.edf.fr/pages/page-consommation_annuelle_commune/.
- [8] SPL Horizon Réunion. Bilan énergétique de la réunion en 2022, 2023.
- [9] R. Kandari and J.M. Guerrero. Microgrids modeling, control and applications. *Elsevier*, 2022.
- [10] T.J. Higgins. Evolution of the three-phase 60-cycle alternating-current system. *American Journal of Physics*, 1945.
- [11] Syndicat Départemental de l'électricité des Vosges, 2024. <https://www.sdev88.fr/a-propos-de-lelectricite/le-parcours-de-lelectricite/>.
- [12] Projet Celtic-Interconnector, 2024. <https://www.celticinterconnector.eu/>.
- [13] Garbesi, Karina and Vossos, Vagelis and Shen, Hongxia. Catalog of dc appliances and power systems. *Berkeley National Laboratory*, 12 2017.
- [14] Gelani, H.E.; Dastgeer, F.; Siraj, K.; Nasir, M.; Niazi, K.A.K.; Yang, Y. Efficiency comparison of ac and dc distribution networks for modern residential localities. *Applied Sciences*, 2019. doi: <https://doi.org/10.3390/app9030582>.
- [15] Gelani, H.E.; Dastgeer, F.; Nasir, M.; Khan, S.; Guerrero, J.M. Ac vs. dc distribution efficiency: Are we on the right path? *Energies*, 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/en14134039>.
- [16] Brock Glasgo et al. Expert assessments on the future of direct current in buildings. *Environ. Res. Lett.*, 2018. doi: [10.1088/1748-9326/aaca42](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaca42).
- [17] Brock Glasgo, Inês Lima Azevedo, Chris Hendrickson. How much electricity can we save by using direct current circuits in homes? understanding the potential for electricity savings and assessing feasibility of a transition towards dc powered buildings. *Applied Energy*, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.036>.

- [18] Daniel L. Gerber, Richard Liou, Richard Brown. Energy savings from direct-dc in u.s. residential buildings. *Applied Energy*, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.089>.
- [19] Brenguier, J.; Vallet, M. and Vaillant, F. Efficiency gap between ac and dc electrical power distribution system. In *2016 IEEE IAS 52nd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)*, 2016. doi: 10.1109/ICPS.2016.7490224.
- [20] Site de l'Emerge Alliance, 2024. <https://www.emergealliance.org/>.
- [21] IEEE Power and Energy Society, 2024. <https://ieee-pes.org/>.
- [22] D. Burmester, R. Rayudu, W. Seah, and D. Akinyele. A review of nanogrid topologies and technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67:760–775, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2016.09.073.
- [23] Moslem Uddin, Huadong Mo, Daoyi Dong, Sondoss Elsayah, Jianguo Zhu, Josep M. Guerrero. Microgrids: A review, outstanding issues and future trends. *Energy Strategy Reviews*, 2023.
- [24] Mael Riou. *Conception optimisée d'un microgrid isolé à forte intégration renouvelable avec objectif de fiabilité*. PhD thesis, 2022.
- [25] Sonia Moussa, Manel Jebali-Ben Ghorbal, and Ilhem Slama-Belkhodja. Bus voltage level choice for standalone residential DC nanogrid. *Sustainable Cities and Society*, 46:101431, April 2019. ISSN 2210-6707. doi: 10.1016/j.scs.2019.101431. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670718312654>.
- [26] Outil pvGis, 2024. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/fr/.
- [27] Logiciel PVsyst, 2024. <https://www.pvsyst.com/fr/>.
- [28] L. J. O., R. Chacko, R. R. Eapen and V. Sankar. A study on lvdc systems for commercial building applications. In *2022 IEEE 19th India Council International Conference (INDICON), Kochi, India, 2022*. doi: 10.1109/INDICON56171.2022.10039905.
- [29] M.S. Keerthana, G. Uma, U. Sowmmiya. A study of a solar PV and wind-based residential DC NanoGrid with dual energy storage system under islanded/ interconnected/grid-tied modes. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108473>.
- [30] A. Almasri, B. Al Shabrawi, A. Sardar, A. Al Atifi, A. Al Harbi and A. Ammous. Contribution to the realization of dc nano-grid including pv source. In *2020 Industrial and Systems Engineering Conference (ISEC), Makkah, Saudi Arabia, 2020*. doi: 10.1109/ISEC49495.2020.9230136.
- [31] Sulaeman, I.; Chandra Mouli, G.R.; Shekhar, A.; Bauer, P. Comparison of AC and DC Nanogrid for Office Buildings with EV Charging, PV and Battery Storage. *Energies*, 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/en14185800>.
- [32] Meshari Alshammari and Maeve Duffy. Comparative analysis between ac and dc distribution systems in a photovoltaic system: A case study of a school in ireland. In *PCIM Europe 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, pages 1–8, 2019.
- [33] Cvetkovic et al. A testbed for experimental validation of a low-voltage dc nanogrid for buildings. In *2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*, 2012. doi: 10.1109/EPEPEMC.2012.6397514.

- [34] M. Anees, T. Moaz, S. Hussain, H. A. Khan and M. Nasir. Evaluation of system losses for 48v and 380v solar powered lvdc microgrids. In *2020 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Montreal, QC, Canada, 2020*. doi: 10.1109/PESGM41954.2020.9281704.
- [35] R. K. Chauhan and B. S. Rajpurohit. Dc distribution system for energy efficient buildings. In *2014 Eighteenth National Power Systems Conference (NPSC), Guwahati, India, 2014*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.089>.
- [36] Anis Ammous, Ammar Alsaedi, Ahmed N. M. Alahmadi, Fahad Alharbi, Kaiçar Ammous. Efficiency performances of lvdc supplies for residential building. *Computer Systems Science and Engineering*, 2023. doi: 10.32604/csse.2023.029389.
- [37] Othee, A.; Cale, J.; Santos, A.; Frank, S.; Zimmerle, D.; Ghatpande, O.; Duggan, G.; Gerber, D. A Modeling Toolkit for Comparing AC and DC Electrical Distribution Efficiency in Buildings. *Energies*, 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/en16073001>.
- [38] Ali, S.; Zheng, Z.; Aillerie, M.; Sawicki, J.-P.; Péra, M.-C.; Hissel, D. A review of dc microgrid energy management systems dedicated to residential applications. *Energies*, 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/en14144308>.
- [39] Jamal, S.; Tan, N.M.L.; Pasupuleti, J. A review of energy management and power management systems for microgrid and nanogrid applications. *Sustainability*, 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/su131810331>.
- [40] Benoit Couraud and Merlinda Andoni and Valentin Robu and Sonam Norbu and Si Chen and David Flynn. Responsive flexibility: A smart local energy system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023.
- [41] Projet Nice-Grid, 2015. <https://www.smartgrids-cre.fr/projets/nice-grid>.
- [42] Lucas Richard. *Micro-réseaux solaires à courant continu avec moyens de production et stockage décentralisés pour l'Électrification Latérale de l'Afrique rurale*. PhD thesis, Université de Grenoble Alpes, 2023.
- [43] Article du Low-Tech lab sur Living Energy Farm, 2023. <https://lowtechlab.org/fr/actualites-blog/nomade-des-mers-living-energy-farm-une-communauté-sans-pétrole>.
- [44] Site de la communauté Living Energy Farm, 2020. <https://livingenergyfarm.org/>.
- [45] Jonathan Ore. *The DC Nanogrid House: Converting a Residential Building from AC to DC Power to Improve Energy Efficiency*. thesis, Purdue University Graduate School, May 2021. URL https://hammer.purdue.edu/articles/thesis/The_DC_Nanogrid_House_Converting_a_Residential_Building_from_AC_to_DC_Power_to_Improve_Energy_Efficiency/14519604/1.
- [46] Article de presse sur l'inauguration du micro-réseau de Ilet à Bourse à Mafate, 2022. <https://imazpress.com/actus-reunion/mafate-un-micro-reseau-electrique-inaugure-a-lilet-a-bourse>.
- [47] Abbezzot, C.; Francou, J.; Calogine, D. Demand side management applied to a standalone microgrid. *Int. J. Smart Grid Clean Energy*, 2022.
- [48] Beretta, D.; Mocoteguy, P.; Sessa, G.; Limagne, M.; Boucher, J.-E. A 100% renewable isolated microgrid in mafate. In *CIREN 2018 Ljubljana Workshop on Microgrids and Local Energy Communities*. CIREN, 2018.
- [49] Arthur Keller et Emilien Bournigal. Infographie « low-tech : Assurer durablement l'essentiel pour tous » regroupant les critères de toute démarche d'innovation low-tech., 2022.

- [50] Guillaume Guimbretière et Romane Quintin Victor Locuratolo. La fresque des low-tech par vito., 2021. [hal-03451043](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03451043).
- [51] Adrien Prévost, Romain Delpoux, Vincent Léchappé, Xavier Brun. Evaluation de deux stratégies de conversion ac/dc pour les éoliennes équipées de génératrices synchrones à aimants permanents. *Conférence des Jeunes Chercheurs en Génie Electrique 2022*, 2022.
- [52] Thanh Kha Tran. *Power Line Communication (PLC) for DC Microgrid systems*. PhD thesis, 2020.
- [53] Karem Hafsi. *Approche distribuée basée sur un système multi-agent pour l'optimisation énergétique d'un micro-réseau de distribution*. PhD thesis, 2024.
- [54] Jean-Mickaël Lebreton. *Systèmes et protocoles de télé-réveil appliqués à l'optimisation énergétique des réseaux de capteurs sans fil. Réseaux et télécommunications*. PhD thesis, Université de La Réunion, 2017.
- [55] J. Sibille, P. O. Lucas de Peslouan, T. Fougeroux, A. Douyère, J. P. Chabriat and D. Genon-Catalot. Wireless energy harvesting performance of 2.45 ghz rectennas array inside wall. *2023 IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO), Balaclava, Mauritius*, 2023.
- [56] Fabrice K/Bidi. *Développements et tests de stratégies de gestion de l'énergie à l'échelle de micro réseaux avec stockage et production d'hydrogène*. PhD thesis, Université de La Réunion, 2019.
- [57] David J. Murphy and Charles A. S. Hall. Year in review—EROI or energy return on (energy) invested. *ANNALS OF THE NEW YORK ACADEMY OF SCIENCES*, 2010.
- [58] Lambert, Jessica G.; Hall, Charles A.S.; Balogh, Stephen; Gupta, Ajay; Arnold, Michelle. Energy, EROI and quality of life. *Energy Policy, Elsevier*, 2014. doi: {10.1016/j.enpol.2013.07.001}.
- [59] Guillaume Guimbretière, Benjamin Pillot. Techno-critique et techno-réalisme contextuels : des clefs vers une Recherche durable. 2022. doi: {10.13140/RG.2.2.24616.65286}.
- [60] Esiroi Imageen. Le brasseur d'air à la réunion. etude technico-économique comparative., 2014.
- [61] Artelia. Rex des consommations d'électricité des bâtiments tertiaires à la réunion et en guadeloupe, 2020.
- [62] Maäréva Payet. *Simulation du comportement des usagers dans les bâtiments tertiaires à faible consommation énergétique, en zone tropicale. Eco-conception*. PhD thesis, Université de La Réunion, 2022.
- [63] PREBAT. Livret 2 - concevoir une enveloppe bioclimatique, 2016.
- [64] ENERGY-Lab. Réseau de stations IOS-net, 2024. <https://galilee.univ-reunion.fr/>.
- [65] ENERGY-Lab. Application web et mobile SolarIO, 2024. <https://galilee.univ-reunion.fr/SolarIO/>.
- [66] CEC. Département de l'efficacité de la commission californienne de l'énergie. <https://www.energy.ca.gov/about/divisions-and-offices/efficiency-division>.
- [67] Sandia National Laboratories. Cec inverter test protocol. <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-guide/dc-to-ac-conversion/cec-inverter-test-protocol/>.
- [68] Dunlop E.D.; Gracia Amillo A.; Salis E.; Sample T.; Taylor N. Determination of the efficiency of inverters. c2 energy efficiency and renewables directorate energy, transport and climate, joint research centre., 2018.
- [69] Région Réunion, LPBS, Imageen. Guide Perene : Performances énergétiques des bâtiments à La Réunion, 2019. <https://imageen.re/project/referentiel-perene-pour-la-conception-thermique-des-batiments-a-la-reunion>.

- [70] Imageen, ESIROI. Charte Mayénergie-Plus, 2013. https://ocean-indien.ademe.fr/sites/default/files/charte_mayenergie.pdf.
- [71] Jadranka Đurović Todorović, Zoran Tomić, Nebojša Denić, Dalibor Petković, Nenad Kojić, Jelena Petrović, Biljana Petković. Applicability of newton’s law of cooling in monetary economics. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2018.
- [72] B. Couraud, S. Norbu, M. Andoni, V. Robu, H. Gharavi and D. Flynn. Optimal residential battery scheduling with asset lifespan consideration. *2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), The Hague, Netherlands*, 2020.
- [73] Projet ANR Hyles. <https://projects.femto-st.fr/hyles/>.
- [74] Muhammad Umair Mutarraf, Yajuan Guan, Luona Xu, Chun-Lien Su, Juan C. Vasquez, and Josep M. Guerrero. Electric cars, ships, and their charging infrastructure – a comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52:102177, 2022. ISSN 22131388. doi: 10.1016/j.seta.2022.102177. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213138822002296>.
- [75] Cédric Abbezzot. *Système inertiel de stockage d’énergie couplé au générateur photovoltaïque et piloté par un simulateur temps réel*. PhD thesis, Université Pascal Paoli, 2014.
- [76] Vagelis Vossos, Karina Garbesi, Hongxia Shen. Energy savings from direct-dc in u.s. residential buildings. *Energy and Buildings*, 2014.
- [77] D. J. Hammerstrom. Ac versus dc distribution systems did we get it right? In *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, USA*, 2007. doi: 10.1109/PES.2007.386130.
- [78] J. P. Ore and E. A. Groll. Analysis of a residential house for the design and implementation of a dc nanogrid. In *2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), The Hague, Netherlands*, 2020. doi: 10.1109/ISGT-Europe47291.2020.9248788.
- [79] Ammous A, Assaedi A, Al ahdal A, Ammous K. Energy efficiency of a novel low voltage direct current supply for the future building. *Int J Energy Res.*, 2021. doi: <https://doi.org/10.1002/er.6809>.
- [80] Yerasimos Yerasimou, Marios Kynigos, Venizelos Efthymiou, and George E. Georghiou. Design of a Smart Nanogrid for Increasing Energy Efficiency of Buildings. *Energies*, 14(12):3683, January 2021. ISSN 1996-1073. doi: 10.3390/en14123683. URL <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/12/3683>. Number: 12 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [81] Alessia Arteconi, Eleonora Ciarrocchi, Quanwen Pan, Francesco Carducci, Gabriele Comodi, Fabio Polonara, Ruzhu Wang. Thermal energy storage coupled with pv panels for demand side management of industrial building cooling loads. *Applied Energy*, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.025>.
- [82] Seydali Ferahtia, Ali Djeroui, Hegazy Rezk, Azeddine Houari, Samir Zeghlache, Mohamed Machmoum. Optimal control and implementation of energy management strategy for a dc microgrid. *Energy*, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121777>.