



**HAL**  
open science

## **Conception d'un banc de mesures expérimental hybride en courant continu pour les sites isolés autonomes en énergie**

Olivia Bory Devisme, Frédéric Alicalapa, Pierre-Olivier Lucas de Peslouan, Denis Genon-Catalot, Jean-Pierre Chabriat

### ► **To cite this version:**

Olivia Bory Devisme, Frédéric Alicalapa, Pierre-Olivier Lucas de Peslouan, Denis Genon-Catalot, Jean-Pierre Chabriat. 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>

**HAL Id: hal-03877551**

**<https://hal.science/hal-03877551v1>**

Submitted on 29 Nov 2022

**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.



HAL Authorization

# Conception d'un banc de mesures expérimental hybride en courant continu pour les sites isolés autonomes en énergie

Olivia Bory Devisme<sup>1</sup>, Frédéric Alicalapa<sup>1</sup>, Pierre-Olivier Lucas De Peslouan<sup>1</sup>, Denis Genon-Catalot<sup>2</sup>,  
Jean-Pierre Chabriat<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Energy Lab - LE<sup>2</sup>P - EA4079, Université de La Réunion  
15, avenue René Cassin CS 92003 — 97744 Saint-Denis cedex 9

<sup>2</sup>LCIS – EA3747 Université de Grenoble,  
50 Rue Barthélémy de Laffemas, 26000 Valence

[olivia.bory-devisme@univ-reunion.fr](mailto:olivia.bory-devisme@univ-reunion.fr)

**RÉSUMÉ** – Dans le contexte du changement climatique, il est urgent que les territoires insulaires accèdent à l'autonomie énergétique. Aujourd'hui majoritairement dépendante des énergies fossiles comme le charbon et le fioul, l'île de La Réunion dispose pourtant d'un fort potentiel solaire. Malgré l'utilisation croissante importante de l'électricité produite par des panneaux photovoltaïques, les pertes d'énergie dues au transport et les multiples conversions des sources de courant continu en courant alternatif et inversement, réduisent considérablement le rendement électrique. Si nous revenons à la proposition d'Edison, l'architecture DC pour la production et la consommation d'énergie locale présente de nombreux avantages dans le cas de l'énergie solaire. L'analyse réalisée présente une étude comparative sur le plan énergétique et financier, pour la rénovation d'un site isolé. L'autoconsommation du site grâce à des panneaux photovoltaïques, est encouragée et gérée selon différentes priorités entre les besoins de consommation des utilisateurs et le stockage de l'énergie par batteries (lithium fer phosphate). La contrainte principale réside dans la gestion de la ressource solaire sans être secouru par une solution telle que les groupes électrogènes, en se basant sur un modèle de contrôle prédictif. La comparaison est faite sur l'architecture électrique du site existante (DC-AC-DC) et après développement d'une architecture électrique en courant continu (DC-DC). Afin de quantifier précisément ces données, les résultats présentent les mesures obtenues en laboratoire, dans le cadre d'un banc de mesure expérimental permettant d'alimenter en courant continu directement par des panneaux photovoltaïques différents équipements (éclairage, chauffage, stockage). Des capteurs et pilotes environnementaux intérieurs et extérieurs sont utilisés pour identifier les prévisions de production et de consommation d'énergie. Les différences en quantités de convertisseurs, quantités de câblages, facilité de pilotage, surchauffe des équipements, en coût et en consommation énergétique sont également présentées, pour analyser les gains ou pertes obtenues selon deux solutions de gestion de la ressource solaire non secourue.

**ABSTRACT** – In the context of climate change, it is urgent that island territories achieve energy autonomy. Today mainly dependent on fossil fuels such as coal and fuel oil, the island of Reunion nevertheless has a strong solar potential. Despite the significant increasing use of electricity produced by solar panels, the energy losses due to transport and the multiple conversions of sources from direct current to alternating current and vice versa, considerably reduce the electrical yield. If we go back to Edison's proposal, the DC architecture for local energy production and consumption has many advantages in the case of solar energy. The analysis carried out presents a comparative study on the energy and financial level, for the renovation of an isolated mountain refuge at high altitude. Self-consumption of the refuge thanks to solar panels is encouraged and managed according to different priorities between the consumption needs of users and the storage of energy by batteries (lithium iron phosphate). The main constraint lies in the management of the solar resource without being backed up by a solution such as generators, based on a predictive control model. The comparison is made on the electrical architecture of the existing refuge (DC-AC-DC) and after development of an electrical architecture in direct current (DC-DC). In order to precisely quantify these data, the results present the measurements obtained in the laboratory, within the framework of an experimental measurement bench making it possible to supply direct current directly by solar panels to various equipment (lighting, heating, storage). Indoor and outdoor environmental sensors and drivers are used to identify energy consumption forecasts. The differences in quantities of converters, quantities of cabling, ease of control, overheating of equipment, cost and energy consumption are also presented, to analyze the gains or losses obtained according to two management solutions for the unbacked solar resource.

**MOTS-CLÉS** – Micro-réseau, énergie solaire, stockage, courant continu, sites isolés, modèle de contrôle prédictif.

## 1. Introduction

Au niveau mondial, la consommation d'électricité est passée de 10 898 TWh à 24 739 TWh durant les trente dernières années. Or les énergies renouvelables ne représentent que 26 % de la production finale d'électricité selon une étude de l'Agence Internationale de l'Energie publiée en 2018 [1]. Afin de pallier cette problématique, la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTEVC) et ses plans d'actions doivent permettre à la France et ses territoires de contribuer à la préservation de l'environnement. L'un des objectifs de cette loi est d'atteindre à l'horizon 2030, l'autonomie énergétique électrique dans les régions et départements d'outre-mer, dont l'île de La Réunion [2].

Par ailleurs, le décret français BACS (Systèmes d'Automatisation et de Contrôle des Bâtiments) publié en juillet 2020, rend obligatoire d'ici janvier 2025 l'installation de BACS dans tous les bâtiments tertiaires, neufs et existants [3]. Une démarche de gestion électrique intelligente des bâtiments requiert des relevés d'informations, effectués par des capteurs. Ces mesures donnent les valeurs de la consommation énergétique en fonction de l'équipement et du confort thermique. Elles permettent une prise de décisions effectuée par des actionneurs, sur les flux électriques circulant dans un bâtiment.

Depuis quelques années, les études portant sur la distribution électrique à courant continu dans les bâtiments [4][5] démontrent un fort potentiel économique et écologique lorsque la production photovoltaïque est couplée à la gestion intelligente de l'énergie et au stockage sur batterie ou hydrogène. En effet, la distribution du courant alternatif dans le réseau électrique actuel nécessite de transformer à plusieurs reprises l'électricité produite par les centrales pour le transporter jusqu'aux utilisateurs finaux. De même pour l'énergie solaire qui, afin d'être réinjectée dans le réseau, est convertie en courant alternatif, puis est convertie de nouveau en courant continu pour alimenter certains appareils tels que les éclairages par LEDs, tous les équipements bureautiques, de plus en plus de systèmes de ventilation utilisant des moteurs à courant continu et désormais, les bornes de recharges pour véhicules électriques. Ces différentes conversions impliquent des pertes en termes de performances énergétiques et de coûts de matériel [13]. Enfin, en dehors des pertes d'énergie générées lors du transport du courant par effet joule et dans les postes de transformations, des pertes énergétiques sont également présentes en permanence lors de l'exploitation des bâtiments, dues à la partie réactive de la puissance consommée.

En termes de stabilité du réseau électrique, l'augmentation des véhicules électriques implique qu'ils représenteront une future charge importante, à intégrer d'ores et déjà lors des phases de conceptions des bâtiments [6]. Quant à l'équipement bureautique, certaines entreprises proposent déjà des déploiements de technologies PoE (Power Over Ethernet) fonctionnant en courant continu. L'essor de ces innovations amène plusieurs interrogations concernant leur intégration aux bâtiments intelligents et offre de nouvelles perspectives pour les territoires insulaires comme les îles Eparses ou La Réunion, qui est actuellement dépendante à 68,9% des énergies fossiles [7].

Dans le cadre d'une collaboration entre le laboratoire ENERGY-LAB (anciennement LE<sup>2</sup>P), le laboratoire LCIS et l'entreprise INTEGRALE INGENIERIE, l'objectif de ce projet de recherche est de proposer des architectures optimisées de distribution électrique à courant continu avec production d'énergie, stockage hybride et consommation afin de développer un nouveau système de gestion électrique intelligente adapté aux sites isolés.

Un banc de test a été conçu et est partiellement installé pour le moment afin de valider le fonctionnement du système développé et assurer une autonomie de fonctionnement du bâtiment en cas de coupure du réseau électrique. En effet, dans le cas du milieu insulaire tropical de la Réunion, les surcharges électriques sont liées à des pannes de production et à la surconsommation de la climatisation lors des pics de chaleur [8]. Dans le cas des sites autonomes isolés, le secours généralement assuré par des groupes électrogènes a ici comme objectif d'être assuré par une combinaison de plusieurs éléments :

- Réduction des pertes énergétiques liées aux câblages et conversion d'énergie : réduire la consommation énergétique globale du système.
- Développement d'un modèle de contrôle prédictif en bus à courant continu : ajuster la puissance des équipements en fonction des conditions thermiques extérieures, de l'énergie disponible et du confort des usagers.

Enfin, ces travaux de recherches ont pour but d'étayer les réponses aux questions économiques d'installation pour l'utilisation du courant continu dans le bâtiment par rapport aux installations en courant alternatif, décrits dans les articles de recherche [10].

## 2. Micro réseaux et courant continu

### 2.1. Architectures électriques existantes

Nous pouvons constater que les travaux menés sur les micro-réseaux hybrides, incluant l'insertion du courant continu, [11], [12] et [5], sont, à l'heure actuelle, principalement axés sur la modélisation et nécessitent plus d'approches expérimentales afin de valider les potentiels gains d'énergie estimés.

Malgré une absence de normes officielles concernant la distribution électrique en courant continu, quelques niveaux de tension sont majoritairement étudiés par les scientifiques en raison des choix réalisés par les fabricants d'équipements :

- 12 V DC à 24 V DC : tensions généralement choisies pour les équipements bureautiques.
- 48 V DC : tension de référence pour la technologie PoE (Power Over Ethernet). [14]
- 400 V DC : tension des batteries et bornes de recharge des véhicules électriques.

Afin d'apporter une contribution en termes d'étude expérimentale, l'un des objectifs de ce projet est de comparer plusieurs types d'architectures électriques, à la fois en phase théorique et pratique, par la réalisation d'un banc de mesures.

Pour chaque architecture, les éléments suivants seront comparés :

- Consommation énergétique (kWh, €, eqCO<sub>2</sub>)
- Coût matériel (€)
- Durée de vie (ans)
- Impact carbone de fabrication (eqCO<sub>2</sub>)
- Pertes énergétiques (J)
- Quantité de câblages (kg)
- Interopérabilité des équipements
- Sécurité
- Stabilité
- Confort usagers (T°C, H%, Lux)

### 2.2. Etude comparative et description des tests expérimentaux

Dans le cadre de ce projet, différents équipements électriques seront intégrés au sein des architectures électriques qui seront comparées : l'éclairage, la ventilation, les équipements bureautiques et le stockage d'énergie sur batterie. Les couches matérielles et logicielles sont décrites dans la section 3.1. En seconde phase, un système de gestion de l'énergie basé sur un modèle de contrôle prédictif sera implémenté, afin d'assurer la distribution électrique non secourue.

Dans un premier temps, **l'éclairage** est l'équipement choisi pour démarrer une première phase de tests et les architectures électriques suivantes seront comparées :

Tests	Source énergétique	Tension d'alimentation	Conversions d'énergie	Pilotage	Equipement terminal
V1	Réseau électrique	230 V AC	AC-DC	/	Eclairage LEDS
V1.1		230 V AC	Conv. interne leds	Domotique	
V1.2		230 V AC	Conv. interne leds	DALI (Digital Addressable Lighting Interface)	
V1.3		48 V DC	Conv. 230VAC/48 VDC	PoE (Power Over Ethernet)	
V2	PV 200 Wc	24 V DC	DC-AC-DC	/	
V2.1		230 V AC	Onduleur + conv. interne	Domotique	
V2.2		230 V AC	Onduleur + conv. interne	DALI	
V2.3		48 V DC	Onduleur + convertisseur 230VAC/48VDC	PoE	
V3	PV 200 Wc	24 V DC	DC-DC	/	
V3.1		48 V DC	Convertisseur 24/48VDC	Domotique	
V3.2		48 V DC		PoE	

Tableau 1: Détail des tests prévus sur le banc de mesures avec l'éclairage

### 3. Présentation du banc de mesures

#### 3.1. Couche matérielle et logicielle

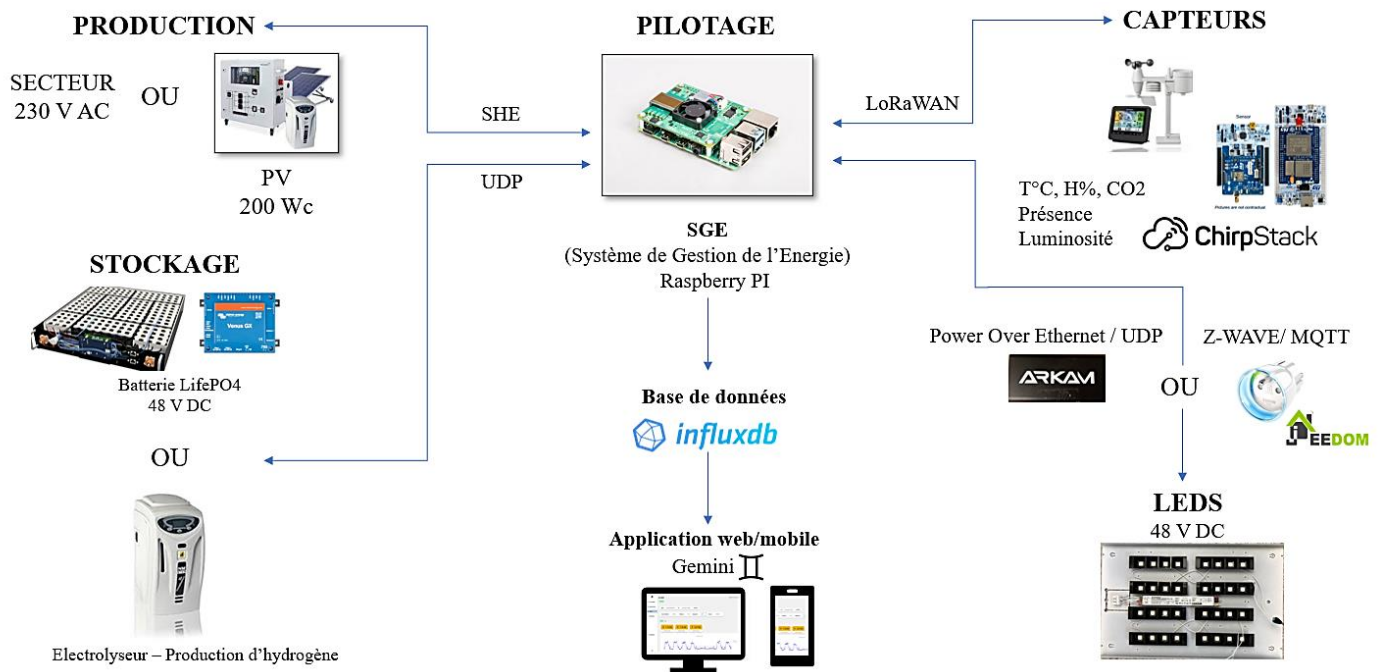


Figure 1 : Schéma fonctionnel du banc de mesures expérimental

Sur ce schéma du micro-réseau, la raspberry joue le rôle de SGE (Système de Gestion de l'Energie) : elle communique avec tous les équipements selon différents protocoles de communication et échange ses informations avec une base de données afin d'ajuster les commandes envoyées aux équipements. Enfin, l'objectif est de connecter la base de données à une interface utilisateur sur application mobile, afin de faciliter la supervision du système et permettre à l'utilisateur d'être acteur de sa consommation énergétique grâce aux commandes (ou sélectionner la gestion automatique).

#### 3.2. Premiers résultats des mesures sur l'éclairage

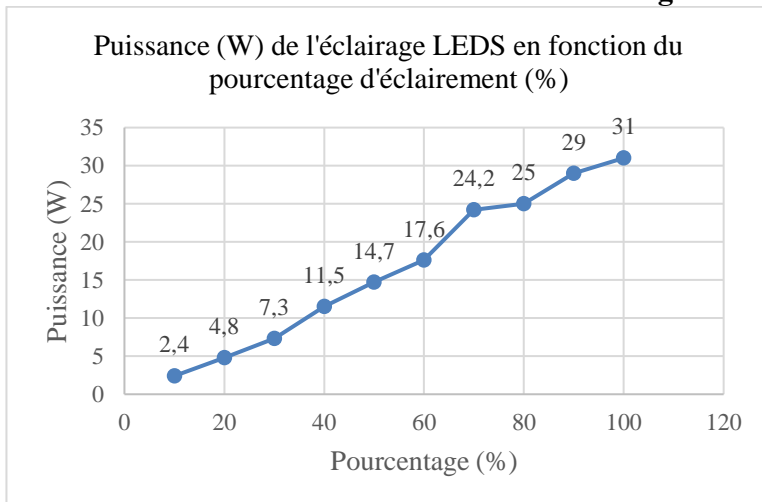


Figure 2 : Mesure de puissance (W) sur l'éclairage LEDS en fonction du pourcentage choisi

Dans un premier temps, la puissance de l'éclairage sur le panneau de leds a été mesurée à l'aide des drivers Power Over Ethernet, selon différents pourcentages.

Les commandes de pourcentage sont envoyées et les mesures sont récupérées à l'aide d'une communication en UDP entre les drivers et la raspberry.

Ces mesures ont permis de quantifier la consommation journalière (cf figure 3) du panneau de leds, lorsque celui-ci est alimenté sans pilotage et lorsqu'une gradation en fonction de la luminosité et de la présence est effective.

La valeur de la luminosité (lux) a également été mesurée grâce à des capteurs de luminosité et correspond à 300 lux pour une puissance de 27 W.

### Comparaison multi-paramètres de l'alimentation électrique 230 VAC pour un éclairage LED

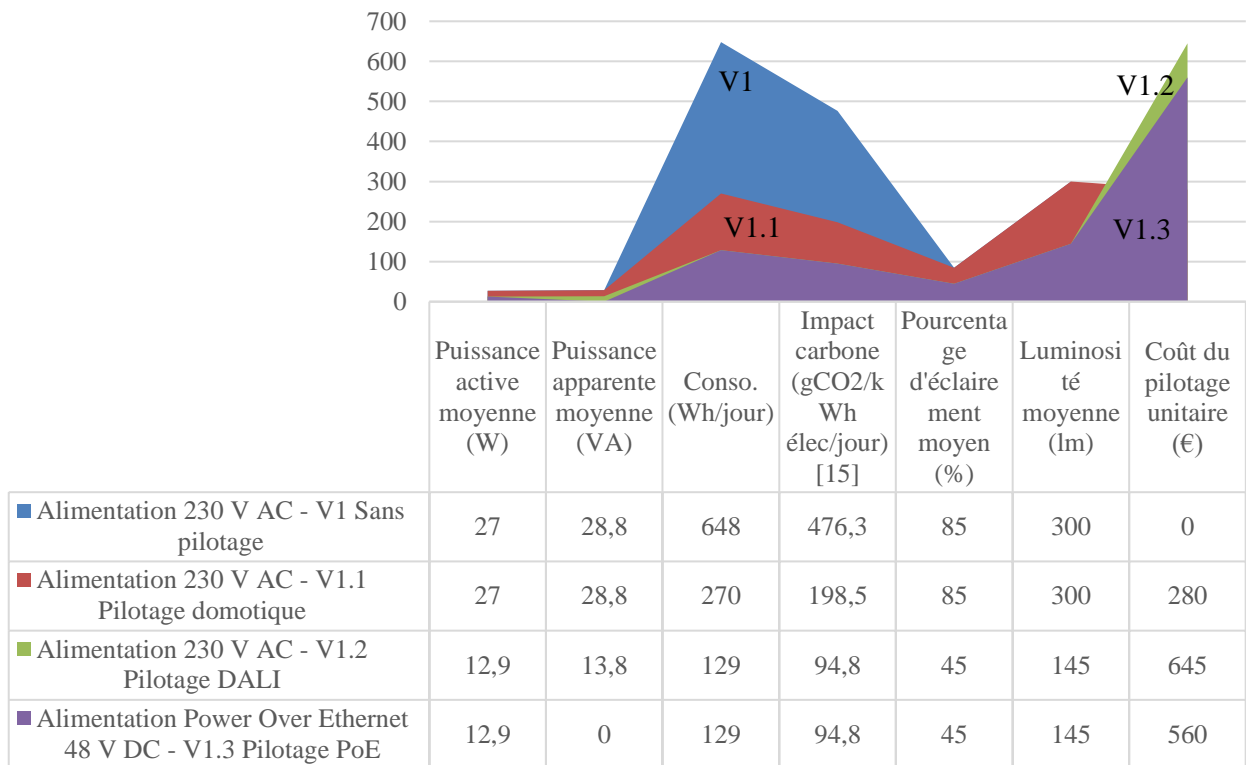


Figure 3 : Représentation sous forme de graphique et tableau de valeurs de la comparaison multi-paramètres sur l'éclairage

L'alimentation électrique 230 V AC sur la figure 3 présentent une comparaison des mesures de consommation journalières qui ont été réalisées grâce aux équipements présentés sur la figure 1. pour un panneau de leds a été comparée selon différents paramètres, en fonction du pilotage choisi. Concernant la consommation énergétique, ces premiers tests sur l'éclairage permettent de mettre en valeur, à des coûts similaires, les gains obtenus par un pilotage DALI ou PoE (70% d'économie en moyenne grâce à la gradation de l'éclairage). Cependant, la distribution en 48 V DC pilotée par la technologie Power Over Ethernet, se démarque en particulier pour la flexibilité de pilotage, l'interopérabilité pour la remontée d'informations et la suppression de la puissance réactive. Par ailleurs, d'un point de vue sécurité de l'architecture électrique, le niveau de tension du PoE étant distribué en 48 V DC, il se situe dans le niveau TBTS (Très Basse Tension de Sécurité), plus faible que dans le cas d'une distribution 230 V AC, située dans le niveau BT (Basse Tension).

#### 4. Conclusion

La conception de ce banc de mesures en courant continu a pour objectif de quantifier les gains potentiels d'énergie par rapport aux architectures électriques classiques, puis de dimensionner une architecture optimisée dans le cas de sites isolés, autonomes en énergie. Les différentes couches matérielles et logicielles présentées correspondent à une première version du système global, qui sera amélioré au cours du projet de recherche. Les perspectives du projet consistent à inclure au SGE les mesures environnementales, d'autres types de charges électriques telle que des moteurs destinés à la ventilation et les équipements bureautiques, afin de proposer un modèle de contrôle prédictif. Ce modèle devra également intégrer la production d'énergie via des panneaux photovoltaïques ainsi qu'un stockage hybride (sur batterie ou réserve d'hydrogène) afin de proposer une architecture électrique optimisée pour les sites isolés, résiliente aux énergies fossiles.

## Remerciements

Une appréciation est adressée à l'entreprise Intégrale Ingénierie, l'Université de La Réunion, l'Université de Grenoble Alpes et l'ANRT pour le soutien à la réalisation et au financement de ce projet de thèse.

## Références

- [1] Agence Internationale de l'Energie (2018) World Energy Outlook.
- [2] Programmation pluriannuelle de l'énergie pour la Réunion, Loi de Transition Energétique pour la Croissance Verte (2020).
- [3] Fédération Française des Intégrateurs Electriciens. Pilotage de l'énergie dans le bâtiment : le décret BACS est publié (2020).
- [4] B. Glasgo, I.L. Azevedo, C. 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, Vol 180, p66-75 (2016).
- [5] V. Vossos, K. Garbesi, H. Shen. Energy savings from direct-DC in U.S. residential buildings. Energy and Buildings, Vol 68, Part A, p223-231 (2014).
- [6] V. Vossos, K. Garbesi, H. Shen. Catalog of DC appliances and solar system. Lawrence Berkeley **National** Laboratory (2012).
- [7] Bilan énergétique à la Réunion, site officiel de la Région Réunion (2019).
- [8] L'utilisation du climatiseur à la Réunion <https://reunion.edf.fr/entreprises/realiser-deseconomies-d-energie/nos-offres-agir-plus-d-edf/climatisation/l-offre-climatisation-0>.
- [9] Pics de consommation et pannes générales à la Réunion (2020). <https://la1ere.francetvinfo.fr/reunion/edf-reunion-coupure-temporaire-pres-10-000-foyersprives-electricite-866562.htm>
- [10] B. Glasgo, I.L. Azevedo, C. Hendrickson. Experts assessments on the future of direct current in buildings. Environmental research letters, Vol 13, number 13 (2018).
- [11] D Ravi Prasad , Dr B. Rajesh Kamath , K. R Jagadisha , S. K Girish. Smart DC Micro-grid for Effective Utilization of Solar Energy. European Scientific Journal October edition vol. 8, No.23 (2012)
- [12] Naoki AyAi\*, Toshiya HisAdA, Toshikazu sHibATA, Hidekazu MiyosHi, Takashi iwAsAki and ken-ichi kiTAyAMA. DC Micro Grid System, SEI Technical review, number 75 (2012).
- [13] B.T.Patterson, IEEE, Emerge Alliance, D.B. Hambrosky, AIA, Nextek Power Systems, G. Reed, PhD, University of Pittsburg ; N. Wilberforce, PNC Financial Services Group. Presentation Re-Inventing Microgrid Power Systems for Net Zero Buildings (2016).
- [14] Normes Power Over Ethernet : <https://www.ieee802.org/3/at/>
- [15] « 735gCO2/kwh élec », Bilan énergétique 2021, Observatoire énergie Réunion, Horizon Réunion.