

Approche pédagogique pour l'étude d'autoconsommation photovoltaïque au niveau Master avec utilisation de l'API de SolarIO en langage Python

Olivia Graillet^{1,2*}, Frédéric Alicalapa¹, Pierre-Olivier Lucas de Peslouan¹,
Denis Genon-Catalot³, Jean-Pierre Chabriat¹

¹ Université de La Réunion, Laboratoire ENERGY-Lab, Saint-Denis La Réunion, France

² Intégrale Ingénierie, L'Eperon, La Réunion, France

³ Université de Grenoble-Alpes, IUT de Valence, Laboratoire LCIS, Valence, France

*Contact mail : olivia.bory-devisme@univ-reunion.fr

RESUME : *L'île de La Réunion, qui fait partie des Zones Non Interconnectées (ZNI), dépend actuellement à 62% des importations d'énergies fossiles pour la production d'électricité. Afin de contribuer à son autonomie énergétique, il est nécessaire de développer les sources d'énergies renouvelables locales. Dans ce contexte, l'unité de recherche ENERGY-Lab et la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université de La Réunion proposent le cursus « Master Energie ». L'un des objectifs du Master est de permettre aux étudiants d'acquérir des compétences pouvant répondre aux problématiques énergétiques actuelles. A La Réunion, le secteur des installations photovoltaïques est particulièrement actif en raison d'un fort potentiel solaire, lié à son climat subtropical. La démarche pédagogique présentée dans ce document est ainsi composée d'activités en lien avec l'optimisation de l'autoconsommation d'une centrale photovoltaïque : établir un plan de sobriété énergétique, affiner la précision du dimensionnement de la centrale PV et simuler des flux de puissances. Les différents outils et technologies utilisés (tableurs, programmation Python et G LabVIEW, API, bases de données) ont été choisis pour s'adapter à la fois à un contexte scientifique et industriel.*

Mots clés : bilan de consommation, sobriété énergétique, dimensionnement photovoltaïque, autoconsommation, simulation de systèmes énergétiques, Python, Application Programming Interface.

Table des matières

I.	Introduction	3
II.	Travaux Dirigés : Bilan de consommation et plan de sobriété énergétique	5
2.1.	Manipuler une feuille de calcul	5
2.1.1.	Formules de base	5
2.1.2.	Remplissage dynamique	6
2.2.	Appliquer un coefficient de foisonnement aux appareils électriques	6
2.3.	Etablir un plan de sobriété énergétique	7
III.	Travaux Dirigés : Dimensionnement photovoltaïque et étude d'autoconsommation.....	8
3.1.	Estimation à partir d'une cartographie - Données Météo France	9
3.2.	Estimation à partir de données satellitaires – Logiciel PV-GIS	10
3.3.	Modélisation d'une centrale PV à partir de mesures réelles d'ensoleillement et de température.....	10
3.3.1.	L'API SolarIO et son apport.....	11
3.3.2.	Modélisation photovoltaïque	12
3.3.3.	Tableau comparatif.....	14
3.3.4.	Dimensionnement d'une centrale photovoltaïque pour un logement	15
3.4.	Etude de l'autoconsommation PV	15
IV.	Travaux Pratiques : Projet bureau d'études pour l'optimisation de l'autoconsommation.....	18
4.1.	Contexte du cas d'étude.....	18
4.2.	Livrables attendus et compétences associées	20
4.3.	Résultats des simulations.....	21
V.	Retours d'expériences des étudiants.....	23
VI.	Conclusion.....	24
VII.	Annexes	26
1.	Résultats sondage retours d'expériences sur l'UE Gestion de l'énergie	26
2.	Tableau de compétences.....	28

I. Introduction

La Réunion est un département français d'outre-mer localisé dans la zone sud-ouest de l'océan Indien. Par sa position géographique, cette île fait partie des Zones Non Interconnectées (ZNI) et n'est rattachée à aucun réseau électrique d'un territoire voisin. Dans le cadre de la transition énergétique, le gouvernement français a ainsi fixé comme objectif pour toutes les ZNI d'atteindre l'autonomie énergétique d'ici 2030 [1].

En 2020, la part des énergies fossiles représente 69% de la production d'électricité de La Réunion tandis que la part de l'énergie solaire représente moins de 9% [4]. Par ailleurs, le secteur des bâtiments tertiaires et résidentiels représente 86% de la consommation annuelle d'électricité de l'île [5]. Enfin, une étude de 2016 sur l'impact carbone de l'électricité produite sur des territoires insulaires a quantifié que 1 kWh produit à La Réunion émet 687gCO₂eq [6].

Dans ce contexte, le Master Energie de la Faculté des Sciences et Technologies adossé à l'unité de recherche UR4079 ENERGY-Lab [7], propose une unité d'enseignement axée sur les énergies renouvelables et leur positionnement dans la gestion de l'énergie électrique [20,21]. Il est composé d'étudiants issus de formations locales (licence Sciences pour l'Ingénieur et licence de Physique), nationales ou internationales (dont une partie de la zone Océan Indien et Afrique).

La formation a pour vocation de former des spécialistes en gestion et caractérisation de l'énergie, capables d'appréhender, de modéliser, de concevoir et d'optimiser des systèmes énergétiques renouvelables intelligents, en mettant en œuvre différentes compétences acquises au cours de leurs deux années de Master.

Une partie de la formation dispensée concerne l'étude et la modélisation de l'énergie solaire photovoltaïque en prenant en compte les liens avec le gisement solaire local et les conditions météorologiques. Compte tenu du décret tertiaire [2] et récemment la mise en application du décret Building Automation and Control System (BACS) [3], la formation a été complétée par un lien entre l'étude de la consommation énergétique des bâtiments, leur instrumentation et leur impact sur l'autoconsommation d'une centrale photovoltaïque.

Ce document présente ainsi l'approche pédagogique progressive qui a été mise en place dans le cadre de cette formation. L'objectif pédagogique consiste à ce que les étudiants puissent apporter un regard critique et analytique, à la fois sur la consommation d'énergie d'un bâtiment, l'étude de dimensionnement photovoltaïque et le potentiel d'autoconsommation, avec l'aide de nouveaux outils en relation avec leur formation. A l'issue de la formation de Master en Energie, il est attendu qu'ils acquièrent les compétences scientifiques et transversales suivantes (le bilan de compétences détaillé est accessible en annexe 2) :

1. Savoir identifier les appareils électriques et les comportements à fort impact sur la consommation d'énergie d'un bâtiment.
2. Connaître les paramètres déterminants dans le dimensionnement d'une centrale photovoltaïque.
3. Savoir modéliser les flux de puissance produite et consommée.
4. Savoir analyser et avoir un regard critique sur des résultats.
5. Proposer des solutions techniques et des perspectives adaptées à une problématique.
6. Présenter oralement et synthétiquement les méthodes employées, les résultats obtenus, les analyses et les solutions.

Pour répondre à ces compétences, des outils innovants ont été développés pour cette formation et sont présentés dans ce document. Ils permettent notamment de communiquer avec des Application Programming Interface (API) en programmation Python pour récupérer des données climatiques ou simuler de systèmes énergétiques dans le logiciel LabVIEW pour affiner la précision d'une étude d'autoconsommation PV. A la suite des étapes de développements et d'analyse, les étudiants ont été confrontés à un cas applicatif réel afin de mettre en pratique leurs compétences.

Les sections de ce document sont ainsi organisées selon trois activités dans lesquelles des exercices permettent d'acquérir les compétences énoncées précédemment :

La section 2 correspond à la première séance d'introduction sous forme de Travaux Dirigés (TD) durant laquelle, l'objectif pédagogique est de réaliser un bilan de consommation énergétique d'un bâtiment et établir un plan de sobriété énergétique. Pour répondre à cet objectif, les étudiants manipulent une feuille de calcul et doivent réaliser un bilan annuel de la consommation énergétique de leur logement. La prise de conscience de leur consommation énergétique et de leur comportement vis-à-vis des équipements, a pour but d'aboutir à un plan de sobriété énergétique. Ce dernier est établi suite à des recherches bibliographiques et est ouvert à des propositions originales de la part des étudiants.

La section 3 concerne l'étude de dimensionnement photovoltaïque selon différents outils. L'objectif pédagogique de cette section est que les étudiants développent leur sens critique, en évaluant la précision des différents outils. Dans un premier temps, l'activité est menée à bien à l'aide du logiciel libre pvGis puis par l'utilisation d'API. Pour la manipulation d'API, les étudiants réalisent une programmation en langage Python leur permettant d'accéder aux données d'OpenWeather ainsi qu'aux données solaires et météorologiques relevées par le réseau de station IOS-net du ENERGY-Lab [13,17]. Les stations sont réparties sur différents territoires insulaires de l'océan Indien, à savoir La Réunion, Maurice, Les Comores, Madagascar et les Seychelles.

Enfin, la dernière section est un cas pratique, pendant lequel les étudiants sont confrontés à un projet « bureau d'études » pour une entreprise du secteur tertiaire. Les objectifs pédagogiques de cet exercice consistent à ce que les étudiants développent des compétences scientifiques au travers de simulations de systèmes énergétiques mais aussi des compétences transversales. En effet, la dernière étape de cet exercice étant une présentation orale de leurs résultats, il est attendu que les étudiants développent des compétences de gestion de projet, de travail en équipe, de capacités d'analyses, de synthèse et d'élocution. Pour ces travaux pratiques, les étudiants ont étudié le potentiel d'autoconsommation de l'entreprise Intégrale Ingénierie en se basant sur des données réelles de consommation énergétiques des locaux [16]. Les étudiants ont réalisé des simulations en langage G propre au logiciel LabVIEW, et ont présenté leurs résultats directement en entreprise, face à la direction et des employés spécialistes des sujets abordés dans la formation (électricité, gestion de l'énergie et qualité environnementale des bâtiments).

En conclusion, les résultats d'un questionnaire de retours d'expérience ayant été transmis aux étudiants à l'issue de la formation est présenté. Les données recueillies permettent de mettre en avant les points forts de cette démarche pédagogique, tout en révélant les axes d'améliorations qui pourraient être mis en place au sein de la formation.

II. Travaux Dirigés : Bilan de consommation et plan de sobriété énergétique

2.1. Manipuler une feuille de calcul

Dans cette première séance de Travaux Dirigés (TD), l'objectif pédagogique est de réaliser un bilan de consommation énergétique d'un bâtiment et établir un plan de sobriété énergétique. Pour cet exercice les étudiants sont amenés à étudier la consommation énergétique de leur propre logement. Une feuille de calcul préremplie est fournie en début de séance et les étudiants doivent implémenter les formules nécessaires à la réalisation d'un bilan de consommation énergétique dynamique. Ce choix technologique a été fait selon les attentes en termes de compétences techniques de la majorité des entreprises, afin que les étudiants puissent s'adapter au secteur privé en cas de besoin. La feuille de calcul contient plusieurs onglets et l'enchaînement des questions du TD correspond au remplissage et aux calculs dynamiques à réaliser entre les différents onglets.

2.1.1. Formules de base

En se basant sur les documents annexes fournis avec le sujet, les étudiants remplissent un planning quotidien de consommation énergétique de leurs équipements, en fonction de leur utilisation, heure par heure [23]. Le coefficient de foisonnement (coefficient de variation de la demande de la charge) est fixé à 1 dans cette partie. Cela signifie qu'en première étape, l'hypothèse est faite que chaque appareil électrique fonctionne en permanence au maximum de sa puissance. Dans le cas où leur logement est équipé d'un compteur Linky, ils doivent ensuite comptabiliser leur consommation énergétique annuelle en kWh et en coût (€), à partir du coût local de l'électricité pour le secteur résidentiel [11].

Heure	ampoule-led			refrigerateur			Mois	Consommation (kWh)	Coût (€)
	Puissance (W)		15.00	Puissance (W)		70.00			
	Quantité	Foisonnement	Total	Quantité	Foisonnement	Total	janv-22	83	11.73
00:00	0.0	1.0	0.0	1.0	1.0	70.0	févr-22	87	12.30
01:00	0.0	1.0	0.0	1.0	1.0	70.0	mars-22	90	12.72
02:00	0.0	1.0	0.0	1.0	1.0	70.0	avr-22	64	9.05
03:00	0.0	1.0	0.0	1.0	1.0	70.0			
04:00	0.0	1.0	0.0	1.0	1.0	70.0			
05:00	0.0	1.0	0.0	1.0	1.0	70.0			
06:00	3.0	1.0	45.0	1.0	1.0	70.0			
07:00	0.0	1.0	0.0	1.0	1.0	70.0			
							Tarif EDF (€/kWh)		
							0.141372		

Figure 1 : Captures d'écrans de l'outil « Bilan de consommation », onglet « Planning quotidien » et onglet « Comparaison EDF »

2.1.2. Remplissage dynamique

Dans la seconde partie, les étudiants automatisent les calculs d'un onglet à l'autre en créant des listes et en ajoutant une sélection avec menu déroulant pour modifier facilement les informations sur les équipements, comme présenté dans la Figure 2. Les types de formules utilisées sont notamment la recherche dans une liste, des sommes et des attributions de valeurs conditionnées pour la partie performance énergétique en dernière étape.

Quelques exemples des formules demandées sont listés ci-dessous :

- Formule recherche dans une liste :
RECHERCHEV(L1;'0-Liste_puissances'!A2:B33;2;FAUX)
- Formule somme sous conditions : SOMME.SI(\$C\$3:\$W\$3;"Total";C4:W4)
- Formule attributions de valeurs sous conditions :
@SI.CONDITIONS(B8<B3;B2;ET(B8>=B3;C3>B8))

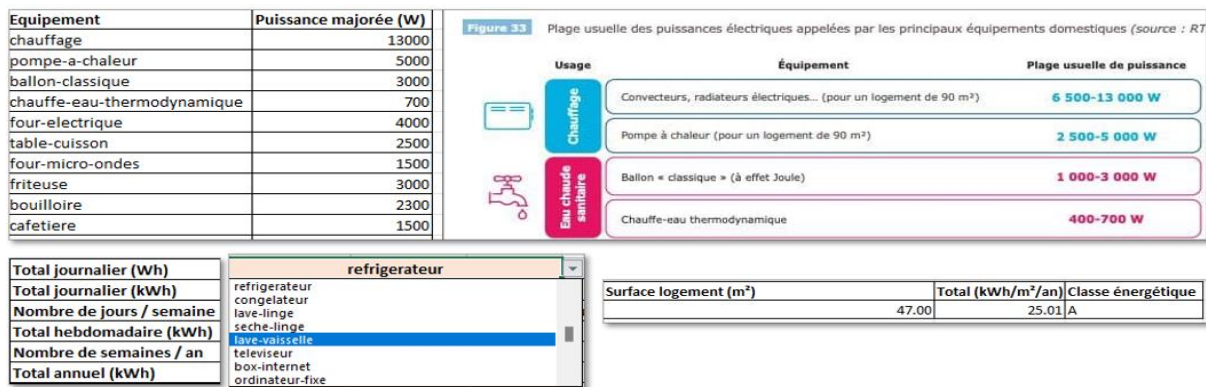


Figure 2 : Captures d'écrans outil "Bilan de consommation" - onglet "Liste équipements" et onglet "Performance résidentiel".

2.2. Appliquer un coefficient de foisonnement aux appareils électriques

Au cours de la séance les étudiants doivent superposer la courbe journalière de leur consommation énergétique théorique (réalisée avec le planning horaire du bilan de consommation) avec celle réelle, extraite de l'application EDF [24]. Dans le cas où les étudiants n'aient pas accès à leurs propres données, un fichier d'exemple de données est accessible. Lors de la superposition des courbes, les étudiants sont amenés à constater une forte différence entre les données théoriques et réelles. Cette différence s'explique principalement par la **notion de foisonnement** des équipements : la puissance d'une machine à laver est de 2500 W d'après sa fiche technique alors qu'en réalité, elle atteint cette puissance par pics, principalement au démarrage, et sa puissance moyenne sur une heure est bien plus faible. Il est donc demandé aux étudiants d'adapter leur bilan de consommation en appliquant un coefficient de foisonnement propre à chaque appareil et selon les heures de la journée, puis de superposer les 3 courbes, comme présenté en Figure 3.

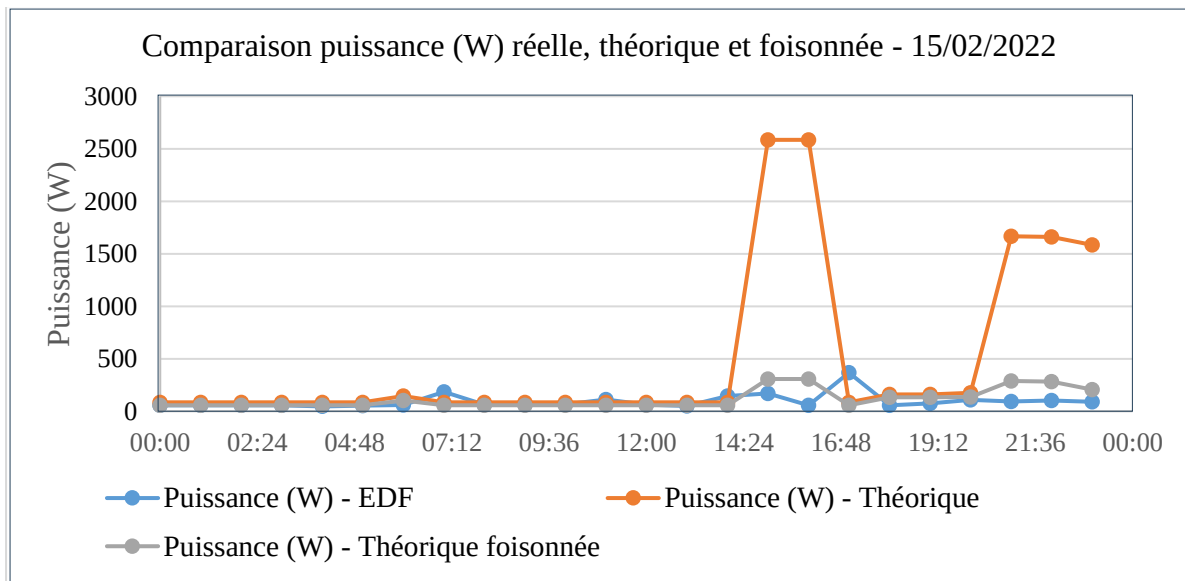


Figure 3 : Comparaison de la puissance journalière théorique et réelle appelée au pas de temps horaire sur une journée pour un logement.

Généralement le pourcentage d'erreurs entre l'estimation théorique foisonnée et les données réelles est de l'ordre de 10 à 20%. Cette marge d'erreur s'explique par le facteur humain car le planning défini n'est jamais totalement identique selon les changements dans le comportement des usagers (périodes de présence au domicile plus importantes, ajout de nouveaux appareils, absences prolongées imprévues...).

Exemple :

Puissance appareil $P(W)$: 250 W

Durée d'utilisation $T(\text{min})$: 20 min par jour sur le créneau 17h - 18h

Coefficient de foisonnement horaire $F_h = \frac{20}{60} = \frac{1}{3}$

Consommation énergétique $C(\text{Wh})$ journalière de l'appareil : $C = \frac{250}{3} = 83.33 \text{ Wh}$

2.3. Etablir un plan de sobriété énergétique

La dernière étape du TD consiste à calculer la consommation énergétique annuelle exprimée en kWh/m² afin de fournir la **classe énergétique** du logement en fonction du DPE (Diagnostic de Performances Energétiques) issu de la RE2020 [24]. Il est à noter que les valeurs ne sont pas réellement conformes au contexte local de La Réunion car le DPE concerne les bâtiments adaptés au climat de la France métropolitaine. Il n'existe pas aujourd'hui de classement adapté de performances énergétiques au climat subtropical de La Réunion. En conclusion, l'étudiant doit une nouvelle fois se documenter à partir des ressources annexes au TD pour présenter un plan de sobriété énergétique pouvant inclure à titre d'exemple les points suivants :

- **Volet comportement utilisateur** : Réduction du temps sur écrans, extinction des appareils inutilisés, limiter l'utilisation de la climatisation.
- **Volet rénovation** : Isolation des toitures, fenêtres à jalousies, installation de brasseurs d'air pour favoriser la ventilation naturelle.
- **Volet instrumentation** : Programmation horaire des équipements, prises électriques avec interrupteurs connectés.

- **Volet efficacité énergétique :** Remplacement des équipements usagés par des équipements performants énergétiquement (classes A++, A, B, C etc).

A l'issue de la réalisation du plan de sobriété énergétique, les étudiants ont validé la compétence de savoir analyser la consommation d'énergie d'un bâtiment et proposer des axes d'amélioration pour réduire cette consommation.

Dans la prochaine section, ils sont amenés à travailler sur une solution de production d'électricité à partir d'énergies renouvelables locales. Ceci dans le but de favoriser l'autoconsommation au sein des bâtiments et réduire globalement leur consommation d'énergie sur le réseau électrique réunionnais qui, comme énoncé précédemment, est actuellement fortement dépendant d'importations d'énergies fossiles.

III. Travaux Dirigés : Dimensionnement photovoltaïque et étude d'autoconsommation

L'énergie solaire étant une des solutions techniques pouvant contribuer à la résilience énergétique de l'île de La Réunion, l'objectif pédagogique est ici d'apporter des bases scientifiques et techniques sur le dimensionnement d'une solution photovoltaïque.

L'unité de recherche ENERGY-Lab localisée sur le campus du Moufia à Saint-Denis est équipée de plusieurs centrales photovoltaïques instrumentées et d'une station solaire et météorologique appartenant au réseau de stations IOS-net (en toiture du bâtiment de la Faculté des Sciences et Technologies) [17]. Afin de quantifier la fiabilité des développements réalisés par les étudiants au cours du TD, les données estimées seront comparées aux données mesurées par ces équipements. Les étudiants auront ainsi comme exercice de comparer les données réelles mesurées de production d'énergie sur la centrale, avec celles estimées à partir de plusieurs sources d'informations sur les conditions météorologiques.

Les spécifications techniques de la centrale photovoltaïque localisée sur la terrasse de l'aile C du laboratoire ENERGY-Lab sont fournies aux étudiants en début de TD :

- **Lieu :** Campus du Moufia, Saint-Denis La Réunion
- **Surface centrale PV :** 50 m²
- **Puissance installée :** 8.5 kWc
- **Type de modules :** Polycristallin
- **Rendement module PV :** 0.17
- **Modèle PV :** BMU 250 Wc (BISOL)
- **Orientation :** Nord
- **Inclinaison :** 15°



Figure 4 : Photographie de la centrale photovoltaïque étudiée dans le TD.

3.1. Estimation à partir d'une cartographie - Données Météo France

Le positionnement de l'Université étant dans la zone 1900-2100 kWh/m²/an dans le nord de l'île, les étudiants réalisent un premier calcul de production annuelle estimée, basée sur cette information en prenant le cas le plus favorable (soit pour la ville de Saint-Denis un ensoleillement annuel de 2100 kWh/m², voir Figure 5).

A cette étape, l'estimation de la production est relativement basique puisqu'elle ne prend pas en compte l'inclinaison et l'orientation des panneaux, ni l'impact de la variation de l'ensoleillement et de la température ambiante sur la production d'électricité. La production estimée est ainsi de **17.85 kWh** :

$$\text{Production PV (kWh)} = \text{Surface PV (m}^2\text{)} \times \text{Ensoleillement (kWh/m}^2\text{)} \times \text{Rendement PV}$$

$$\text{Production PV (kWh)} = 50 \times 2100 \times 0.17 = 17.85 \text{ kWh}$$

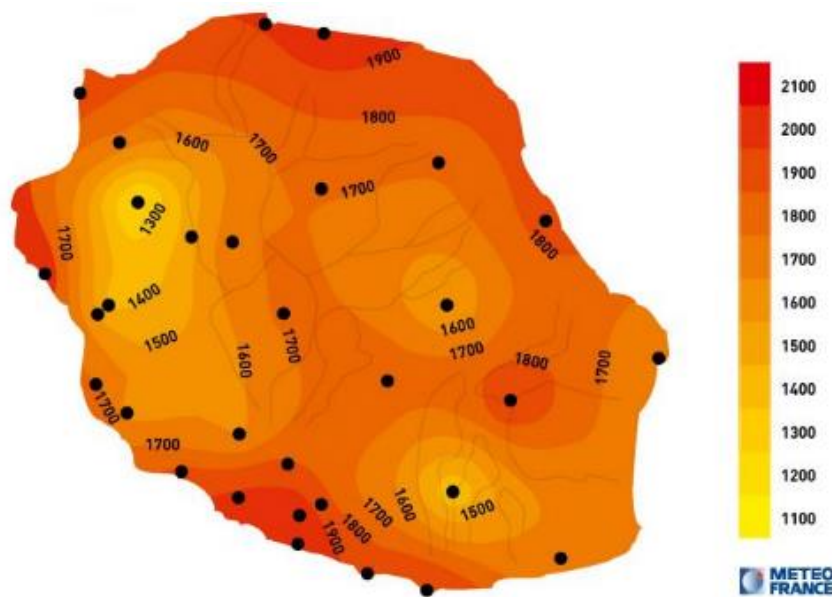


Figure 5 : Cartographie de l'ensoleillement annuel (kWh/m²) pour La Réunion [12].

3.2. Estimation à partir de données satellitaires – Logiciel PV-GIS

En deuxième étape, les données fournies en début de TD sur la centrale photovoltaïque sont renseignées dans le logiciel PV-GIS [14] par les étudiants. Les données de sorties sont l'ensoleillement annuel de la zone géographique et la production photovoltaïque estimée pour chaque mois de l'année. La production annuelle estimée avec le logiciel est de **10.8 kWh**. La Figure 6 représente les données de sorties.

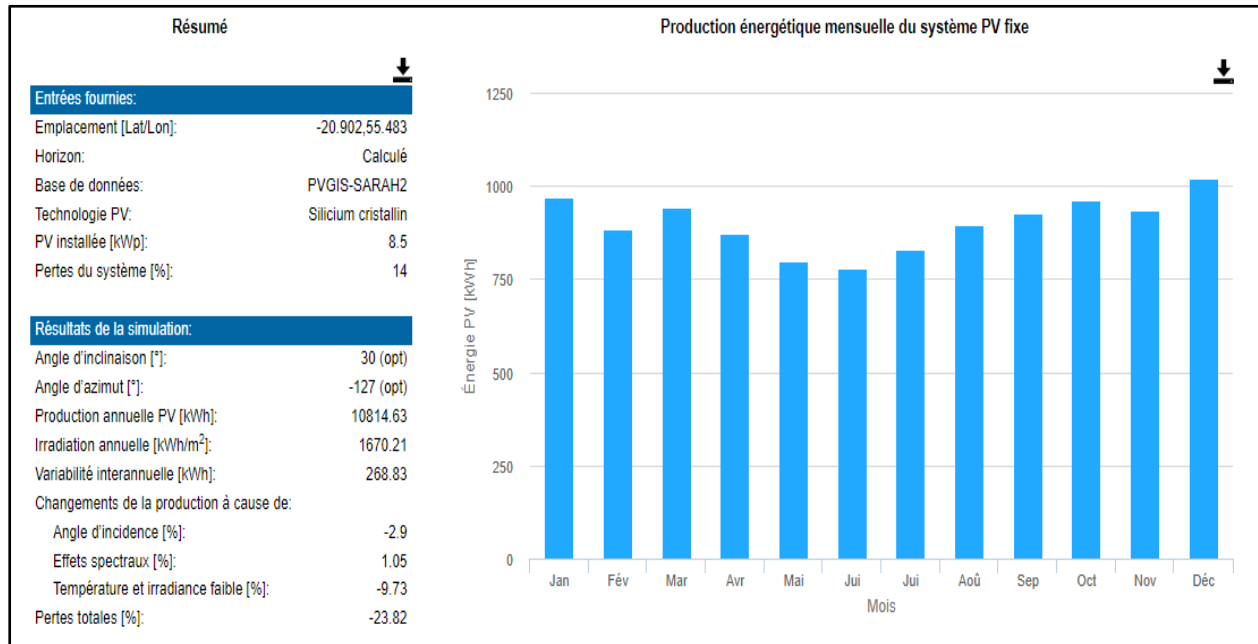


Figure 6 : Résultats de simulation obtenus avec le logiciel PV-GIS pour la centrale étudiée.

3.3. Modélisation d'une centrale PV à partir de mesures réelles d'ensoleillement et de température

En troisième étape il est proposé d'introduire la notion d'API (Application Programming Interface) et de programmation en langage Python aux étudiants, afin d'ajouter d'autres fonctionnalités et d'affiner la précision de leur étude (tracés de courbes, automatisation des calculs, création de figures).

Une API, ou Interface de Programmation d'Application est un ensemble de règles et de spécifications que les applications peuvent suivre pour communiquer entre elles. Elle permet à différentes applications de partager des fonctionnalités ou des données sans avoir à connaître les détails de leur mise en œuvre. Différentes API telles que « OpenWeatherMap » permettent d'accéder gratuitement à des données climatiques.

3.3.1. L'API SolarIO et son apport

Les données estimées dans PVGIS étant réalisées à partir d'une base de données satellitaires, l'objectif pédagogique de cette partie consiste à comparer cette estimation à une étude identique, établie cette fois à partir de mesures réalisées au sol par un pyranomètre de niveau professionnel reconnu dans le domaine scientifique (modèle SPN1). Les étudiants prennent également en compte dans cet exercice l'impact de la température sur les cellules photovoltaïques grâce aux mesures de température réalisées par un capteur type WXT536.

En effet, la valeur de puissance crête indiquée dans la fiche technique des panneaux est annoncée selon des conditions idéales nommées Standard Test Conditions (STC), soit un ensoleillement de 1000 W/m^2 et une température ambiante de 25°C . A La Réunion, en particulier durant l'été austral, de novembre à avril, la température extérieure du littoral peut être quotidiennement proche de 29°C . Ce niveau de température, impliquant une surchauffe des cellules photovoltaïques peut ainsi impacter négativement la production d'électricité.

Pour atteindre cet objectif, les étudiants ont comme tâche de réaliser une modélisation de la centrale photovoltaïque. Ils ont à leur disposition un notebook Jupyter et les questions de la séance sont à remplir directement dans le code. Les étudiants doivent compléter ou implémenter plusieurs fonctions dont les rôles sont les suivants :

- **Fonction 1 :** Modélisation de la puissance produite par la centrale photovoltaïque sur une année, en prenant en compte la valeur de l'ensoleillement, de la température, le rendement et le coefficient de puissance des modules PV.
- **Fonction 2 :** Communication avec l'API SolarIO développée par l'équipe IT du ENERGY-Lab, pour extraire les données d'ensoleillement et de température pour l'année 2022 sur le campus du Moufia. Le code développé doit d'abord passer la phase d'identification avec succès pour ensuite pouvoir interroger l'API et récupérer les données. Les étudiants ont comme support le paquet Python "pysolaradb"[25] également développé par l'équipe IT du laboratoire, accessible sur le Github du ENERGY-Lab.
- **Fonction 3 :** Affichage des courbes et calcul de la quantité d'énergie produite par la centrale PV sur une année.

Le principe de fonctionnement des différents outils cités pour cet exercice est représenté sur la Figure 7 qui suit.

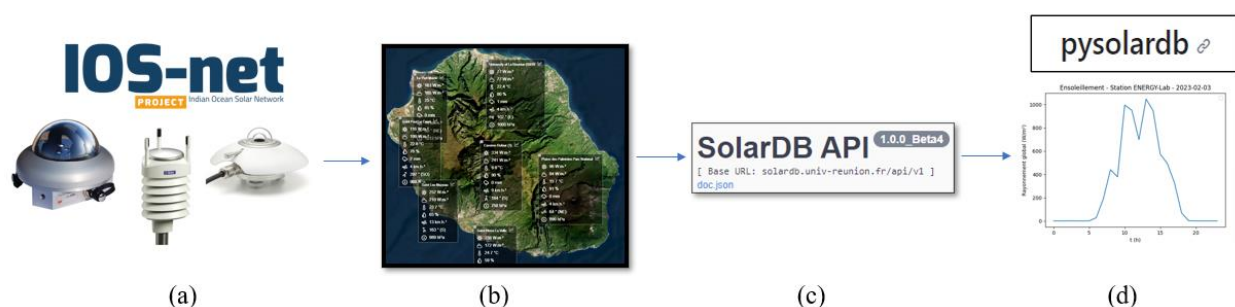


Figure 7 : (a) Instruments de mesures du réseau IOS-net (pyranomètres, capteur météorologique). (b) Cartographie des stations accessible dans l'application web et mobile SolarIO. (c) SolarDB API [15] (d) Utilisation du paquet Python "Pysolaradb"[25].

Un exemple d'extraction de données d'ensoleillement et de température pour la journée du 7 septembre 2023 pour le site de l'Université du Moufia sont représentés en Figure 8. La prochaine section détaille la méthode pour modéliser une centrale photovoltaïque à partir des données d'ensoleillement et de température.

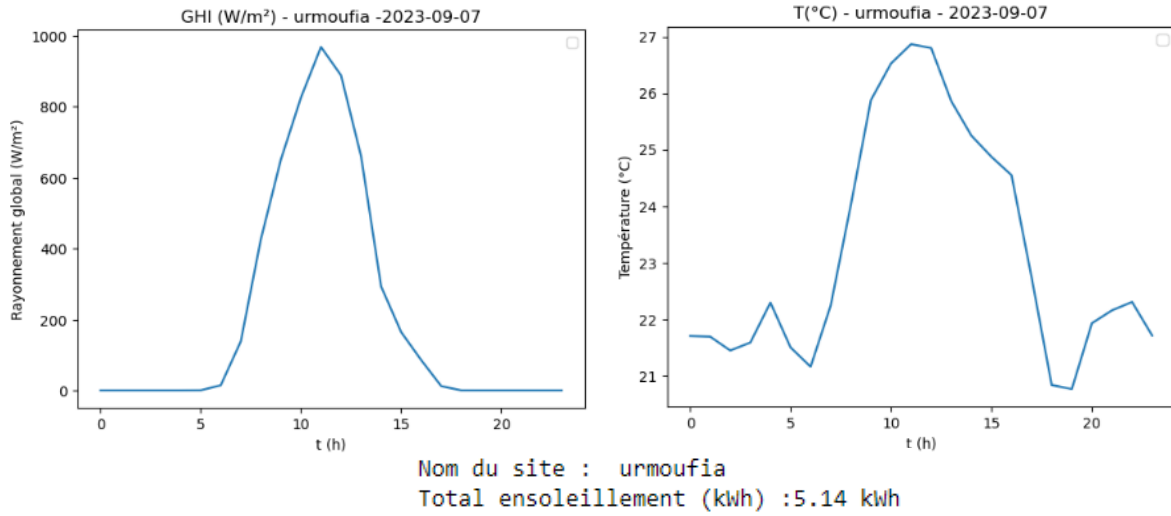


Figure 8 : Affichage de l'ensoleillement (W/m^2) et de la température ($^{\circ}\text{C}$) pour une journée sur le site du Moufia.

3.3.2. Modélisation photovoltaïque

La modélisation photovoltaïque est réalisée dans cet exercice à partir des mesures de l'irradiance et de la température du site ainsi récupérées par l'API de SolarIO (cas d'exemple l'année 2022).

La production d'une centrale photovoltaïque peut être modélisée selon la relation suivante [26] :

$$P_{pv} (W) = \eta_{pv} \times GHI \times S_{pv} \times \left(1 + \left(\frac{Kp * (25 - Temp)}{100} \right) \right)$$

Avec :

- η_{pv} le rendement du module PV
- GHI (W/m^2) l'ensoleillement du site
- S_{pv} (m^2) la surface de la centrale PV
- Kp le coefficient de puissance du module PV
- $Temp$ ($^{\circ}\text{C}$) la température du site

Les résultats de simulation de la production photovoltaïque à partir des conditions météorologiques sont présentés en Figure 9.

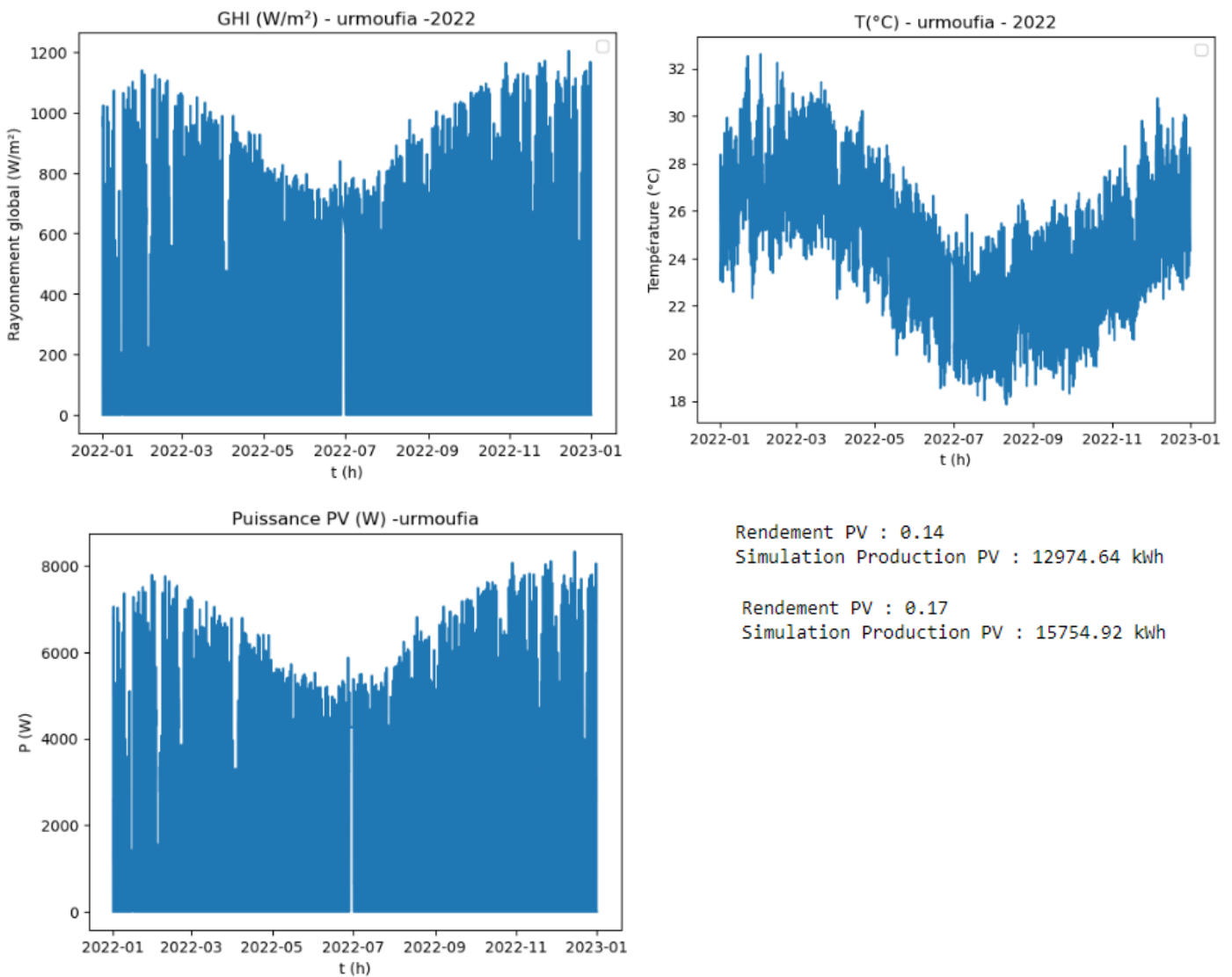


Figure 9 : Résultats de la modélisation de production photovoltaïque à partir des données d'ensoleillement et de température mesurées sur le site du campus du Moufia pour l'année 2022.

L'ensoleillement mesuré sur le site est de **1865.48 kWh/m²** pour l'année 2022 et le résultat de la simulation de production photovoltaïque est de **15.75 kWh** en prenant en compte le rendement de 17% donné par la fiche technique des modules (voir les spécifications indiquées au début de partie III).

Dans le cadre du projet DETECT du ENERGY-Lab [18,19], la centrale photovoltaïque étudiée a été instrumentée, permettant ainsi la mesure en temps réel des données de production. D'après les données réelles de production mesurées sur le site en 2022, soit 13.152 kWh, le rendement réel mesuré sur la centrale pendant un an en 2022 est de 14%. Cet écart avec la valeur de rendement de 17% indiquée dans la fiche technique des modules peut dépendre de plusieurs facteurs non exhaustifs tels que l'ancienneté de l'installation (2014), l'entretien des cellules, l'impact de la température sur la production, la présence de défauts

(ombrages, points chauds, déconnexion de diodes) et les pertes d'énergie liées aux conversions du courant continu vers alternatif.

A cette étape du TD, les étudiants comparent le rendement réel de la centrale PV à celui spécifié dans la fiche technique et ils quantifient la marge d'erreur entre la production estimée à partir de la cartographie, le logiciel PVGIS, les données réelles d'ensoleillement, et les données réelles de production. La marge d'erreur est définie selon un calcul d'erreur relative. L'objectif pédagogique de cet exercice est que les étudiants développent les capacités suivantes :

- Avoir un regard critique sur la cohérence des résultats.
- Savoir préciser la fiabilité des résultats en quantifiant la marge d'erreur.

3.3.3. Tableau comparatif

Tableau 1: Comparaison de l'erreur relative de l'estimation de la production photovoltaïque par rapport à des données réelles, selon les différents outils de modélisation

Outil	Cartographie Météo France	Logiciel PV-GIS	Simulation PV Données station API SolarIO		Données réelles Centrale PV aile C ENERGY-Lab
Ensoleillement annuel (kWh/m ²)	2100	1670.21	1865.48		1865.48
Production PV (kWh)	17.85	10.81	15.754	12.974	13.152
Rendement PV (%)	17 (fiche technique)	13 (calculé)	17 (fiche technique)	14 (valeur réajustée)	14
Pourcentage d'erreur avec données réelles (%)	26	20	17	1.4	/

En réalisant ce tableau comparatif, les étudiants affinent la précision de leur étude d'estimation de la production. Il est constaté que le modèle de simulation qui prend en compte l'impact de la température sur les cellules ainsi que l'ensoleillement mesuré directement sur site est le plus précis. En effet, le modèle de simulation basé sur les données mesurées par la station a un pourcentage d'erreur < 5% tandis que les estimations basées sur la cartographie ou le logiciel PV-GIS ont un pourcentage d'erreur compris entre 20 et 26%.

La simulation de la production photovoltaïque à partir des données de l'API a été simulée selon deux valeurs de rendement : une première fois avec un rendement de 17%, selon la valeur fournie par leur fiche technique des modules PV, puis une nouvelle fois avec un réajustement du rendement à 14%, obtenu selon le calcul réalisé sur les données réelles de production et d'ensoleillement.

Un résultat de **15.75 kWh** a été obtenu pour une simulation de la production avec un rendement de **17%** et **12.97 kWh** pour un rendement de **14%**. Selon un calcul d'erreur relative, le pourcentage d'erreur du modèle de simulation est de **1.4%** avec le réajustement du rendement, alors qu'il était de 17% en suivant les valeurs de la fiche technique. Une fois ce pourcentage d'erreur identifié, la dernière étape du TD consiste à dimensionner la taille d'une centrale photovoltaïque, adaptée au besoin énergétique du logement de l'étudiant.

3.3.4. Dimensionnement d'une centrale photovoltaïque pour un logement

Au cours de cette étape, les étudiants récupèrent les données de puissance consommée au pas de temps horaire par leur logement sur une journée. Bien que ce profil de courbe de consommation puisse varier selon les jours de la semaine, l'hypothèse est faite pour cet exercice qu'il s'agit d'une « journée type » avec un cas défavorable, c'est-à-dire une journée au cours de laquelle une forte quantité d'énergie est consommée. Ils utilisent pour cela les données obtenues à partir de leur planning quotidien théorique, calculé pendant le TD1, ou s'ils y ont accès, les étudiants utilisent leurs données réelles de consommation, obtenues avec l'application d'EDF.

La courbe de leur consommation sur une journée leur permet d'identifier le pic de puissance consommée atteint. Ainsi, selon le modèle et la valeur crête théorique du module PV choisi, le nombre de modules nécessaires est calculé pour répondre au besoin de la puissance maximale atteinte par le logement (voir l'exemple ci-dessous).

Les étudiants doivent également prendre en compte la surface disponible de la toiture. Cette dernière est calculée à partir de la surface totale de la toiture, à laquelle une marge de 20% est soustraite pour permettre la circulation autour des modules pendant l'installation et les éventuelles interventions de maintenance. Dans le cas où la surface de toiture nécessaire à l'installation photovoltaïque soit supérieure à la surface de toiture disponible, il est attendu de l'étudiant qu'il précise en quoi la capacité de la centrale PV à couvrir les besoins énergétiques du logement sera impactée par cette limitation de surface.

Exemple :

- Pic de puissance consommée : 10 600 W
- Surface module PV BMU 250 BISOL : 1.46 m²
- Puissance crête module PV : 250 Wc
- Surface de toiture disponible : 80 m²
- Nombre de modules nécessaires = $\frac{\text{Pic de puissance consommée}}{\text{Puissance crête du module}} = \frac{10\,600}{250} = 42.4 \Rightarrow$
43 modules (arrondi à l'entier supérieur)
- Surface toiture nécessaire = $\text{Nombre de modules} \times \text{Surface module} = 43 \times 1.46 = 62.78 \Rightarrow 63 \text{ m}^2 < 80 \text{ m}^2$

3.4. Etude de l'autoconsommation PV

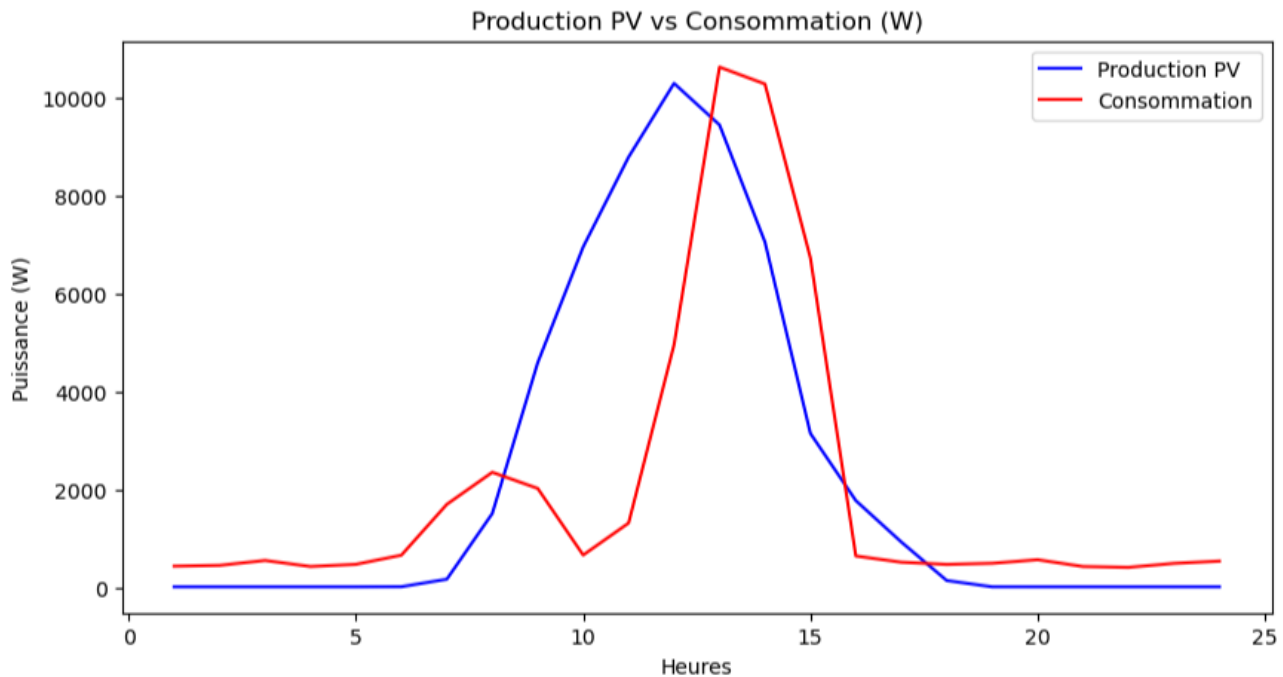
Lors de la dernière étape qui suit le dimensionnement de la centrale photovoltaïque, les étudiants mettent à jour le notebook réalisé en ajoutant les fonctionnalités suivantes :

- **Fonction 4** : Lecture d'un fichier CSV contenant les données de puissance consommée journalière (théoriques ou réelles) par le logement.
- **Fonction 5** : Détermination du nombre de modules nécessaires et réajustement si besoin en fonction de la surface de toiture disponible.
- **Fonction 6** : Superposition de la courbe de production et de la courbe de consommation.
- **Fonction 7** : Calcul du pourcentage d'autoconsommation :

```
# Calculer l'autoconsommation
autoconsommation = sum(min(pv, conso) for pv, conso in zip(production_pv, consommation))
```


- **Fonction 8 :** Analyse de l'autoconsommation par un calcul de l'impact carbone et du coût de l'électricité pour une consommation d'énergie journalière, avec et sans l'autoconsommation PV.

Le résultat obtenu pour les fonctions 6 et 7 sont représentés dans la figure 10, à partir des spécificités de la centrale PV choisi dans la section précédente et une courbe de consommation journalière théorique :



Le pourcentage d'autoconsommation est de 65.77%

Figure 10 : Résultat de l'analyse d'autoconsommation sur une journée.

Le détail des calculs utilisés dans la fonction 8 et un exemple de cas applicatif sont détaillés ci-dessous :

Analyse de l'autoconsommation (€, kWh, kgCO₂) :

$$\text{Impact carbone sans autoconsommation} = \text{Conso} \times \text{CO2}_{\text{RUN}}$$

$$\text{Impact carbone en autoconsommation} = \text{CO2}_1 + \text{CO2}_2$$

$$\text{CO2}_1 = \frac{\text{Autoconso}}{100} \times \text{Conso} \times \text{CO2}_{\text{PV}}$$

$$\text{CO2}_2 = \left(1 - \frac{\text{Autoconso}}{100}\right) \times \text{Conso} \times \text{CO2}_{\text{RUN}}$$

Avec :

- *Autoconso* (%) le pourcentage d'autoconsommation.
- *Conso* (kWh) la consommation d'énergie journalière.
- $CO2_{PV}$ (kgCO_{2eq}) l'impact carbone d'1 kWh produit par les modules PV.
- $CO2_{RUN}$ (kgCO_{2eq}) l'impact carbone d'1 kWh produit sur le réseau électrique réunionnais.

Exemple :

Consommation énergétique journalière : 40 kWh $\Leftrightarrow$ 19.33 €*** $\Leftrightarrow$ **27.48 kgCO_{2eq}****

Pourcentage d'autoconsommation photovoltaïque : 50 %

Consommation énergétique journalière en autoconsommation :

40 kWh $\Leftrightarrow$ 9.67 € $\Leftrightarrow$ $(0.5 \times 40 \times 0.043^*) + (0.5 \times 27.48) = 0.86 + 13.74 =$ **14.6 kgCO_{2eq}**

*1 kWh PV = 0.043 kgCO_{2eq} d'après une étude de l'ADEME sur le bilan carbone [9,10]

**1 kWh = 0.687 kgCO_{2eq} pour le réseau électrique réunionnais [6]

***1 kWh = 0.4832ct tarif EDF Réunion 2023 particulier [11]

A la fin de cette étape, les étudiants ont estimé quel pourcentage d'autoconsommation PV il était possible de réaliser en prenant en compte la consommation d'électricité journalière d'un logement et selon le dimensionnement PV qu'ils ont réalisé. Il serait possible d'améliorer le résultat en choisissant des modèles de module PV très performants, en agissant sur leur inclinaison et orientation ou encore en modifiant l'architecture électrique elle-même (réduction des conversions d'énergie et/ou ajout d'un système de stockage d'énergie). Cependant, dans le cadre de cette formation, il est proposé d'enseigner la notion de pilotage des charges électriques qui ont un fort impact sur la consommation d'énergie.

Dans la prochaine section, un cas pratique sous forme de projet est ainsi présenté avec comme objectif global l'optimisation du pilotage de bornes de recharge de véhicules électriques pour maximiser l'autoconsommation PV.

IV. Travaux Pratiques : Projet bureau d'études pour l'optimisation de l'autoconsommation

4.1. Contexte du cas d'étude

Afin d'introduire la notion d'optimisation énergétique auprès des étudiants, la dernière étape de la formation consiste dans un premier temps à utiliser les compétences acquises au cours des précédents exercices, pour réaliser une étude d'autoconsommation multi-paramètres (économies en kWh, € et kgCO₂). Dans un second temps, les étudiants doivent simuler des actions d'optimisation énergétique, notamment en pilotant des charges électriques pour maximiser l'autoconsommation photovoltaïque. Ceci dans le but de limiter les pertes d'énergie liées à une non utilisation de la ressource d'énergie solaire disponible.

Pour ces séances de travaux pratiques, les étudiants ont été positionnés dans un contexte industriel réel. La promotion de Master 2 constituée d'une dizaine d'étudiants a été répartie en trois groupes autour d'un projet commun alliant recherche et développement, et prenant comme cas d'étude les locaux de l'entreprise Intégrale Ingénierie [16]. La consommation d'électricité des locaux est instrumentée par catégorie d'équipements (éclairage, climatisation, appareils informatiques, bornes de recharges de véhicules électriques) et une station radiométrique et météorologique [13] a été installée en toiture. De ce fait, les étudiants ont pu travailler sur des données réelles de consommation d'énergie associées aux conditions météorologiques.

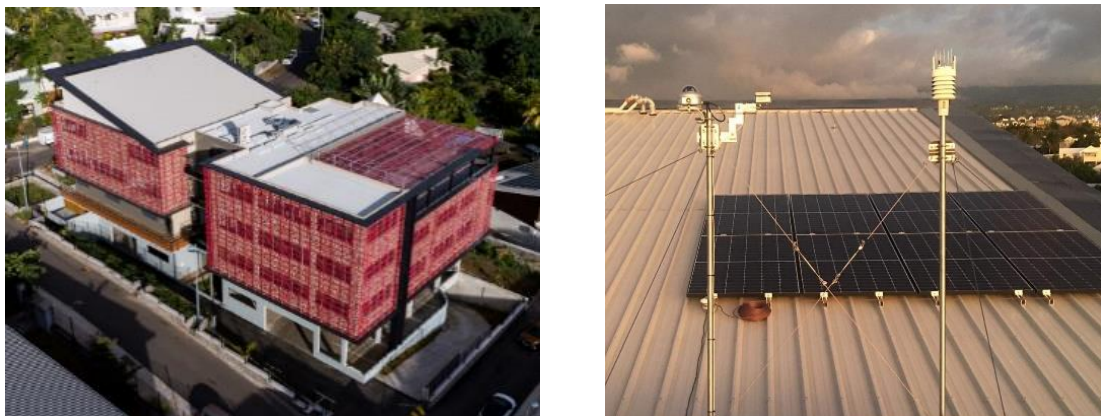


Figure 11 : Photographies des locaux d'entreprise étudiés pour le projet (dernier étage du bâtiment) et de la station solaire et météorologique installée en toiture.

La consommation d'énergie des bornes de recharge représentant 8% de la consommation énergétique annuelle des locaux et générant des appels de puissance conséquents sur le réseau (jusque plus de 7 kW, voir Figure 12), il a été défini comme objectif du projet **d'étudier le potentiel d'autoconsommation d'énergie photovoltaïque, avec et sans optimisation du pilotage des bornes de recharges de véhicules électriques.**

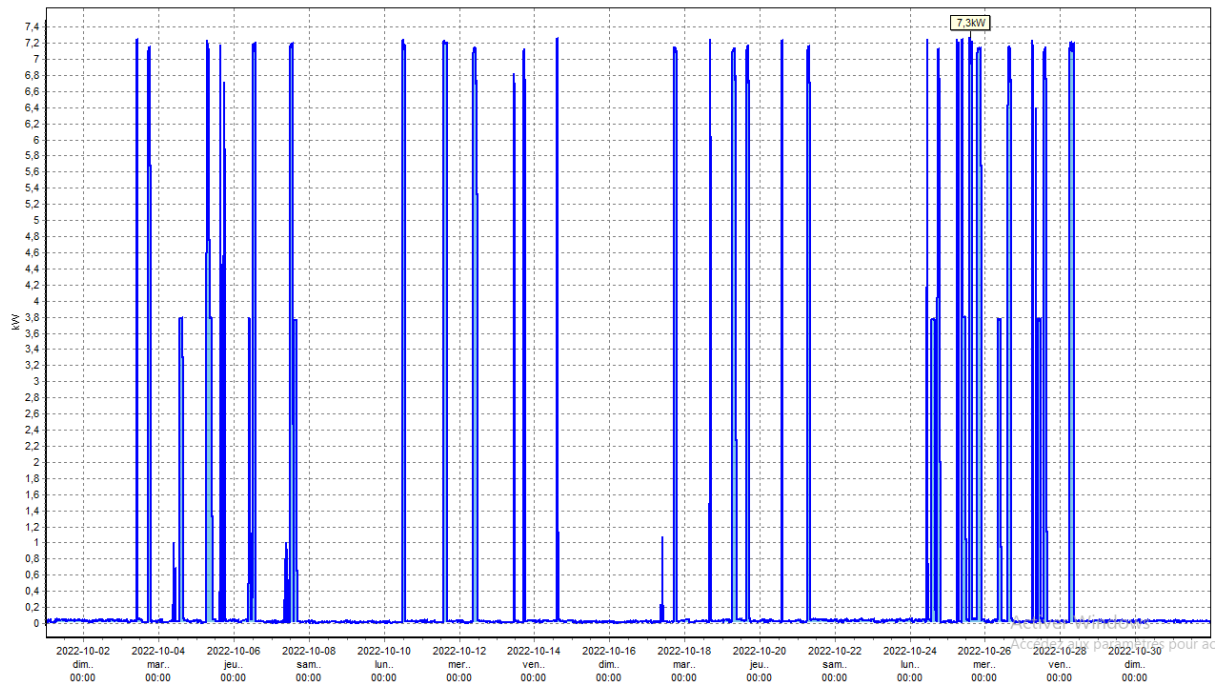


Figure 12 : Puissance (kW) consommée par les bornes de recharge de véhicules électriques durant le mois d'octobre 2022.

Dans ces séances de travaux pratiques, chaque groupe d'étudiants a un objectif de développement différent et tous les développements interagissent les uns avec les autres. Les livrables attendus pour ce projet sont les codes développés ainsi qu'une présentation orale de leur étude qui a été organisée et réalisée dans les locaux de l'entreprise auprès du directeur général et des responsables respectifs des pôles électricité, qualité environnementale du bâtiment et management de l'énergie.

Ce travail a servi notamment d'entraînement d'expression orale en amont de la soutenance de fin des études des M2. Le logiciel LabVIEW a été choisi pour ces séances de travaux pratiques afin de diversifier les environnements de développements et permettre aux étudiants de fournir rapidement une interface graphique. Le détail des livrables attendus par groupe sont détaillés dans la prochaine sous-section.

4.2. Livrables attendus et compétences associées

Tableau 2 : Détail des fonctionnalités attendues pour le TP sous forme de projet.

Groupe	Livrables et compétences	Fonctionnalités à développer
1	Simulation de la production photovoltaïque dans une interface graphique. Compétence : Savoir modéliser un système énergétique.	1. Lecture des données d'ensoleillement et de température à partir de fichiers CSV. 2. Modélisation de la production photovoltaïque. 3. Enregistrement des données dans un nouveau fichier csv.
2	Optimisation de la consommation énergétique des bornes de recharge de véhicules électriques. Compétence : Proposer une solution technique adapté à une problématique spécifique.	1. Lecture des données de production photovoltaïque et de la consommation d'énergie à partir de fichiers CSV. 2. Appliquer un coefficient de foisonnement sur la consommation d'énergie des bornes de recharges de véhicules électriques afin de maximiser l'autoconsommation en fonction des données de production d'énergie. 3. Enregistrement des données de consommation optimisée dans un nouveau fichier CSV.
3	Analyse de l'autoconsommation (kWh, €, kgCO ₂ eq). Compétences	1. Lecture des données de la production photovoltaïque et de la consommation d'énergie à partir de fichiers CSV. 2. Analyse de l'autoconsommation en kWh, €, kgCO₂eq. 3. Implémentation d'indicateurs de couleurs en fonction des résultats obtenus.

Les contraintes imposées par les livrables ont naturellement favorisé les échanges entre les différents groupes d'étudiants, permettant de mobiliser leurs compétences de travail en équipe.

En effet, Pour réaliser la simulation, l'optimisation et l'analyse du potentiel d'autoconsommation, les trois groupes sont interdépendants les uns des autres : la simulation de la production photovoltaïque réalisée par le groupe 1 permet au groupe 2 de superposer la consommation des bornes de recharges de véhicules électriques à la simulation de la production photovoltaïque et d'appliquer les coefficients de foisonnement adéquats pour maximiser l'autoconsommation. Enfin, le groupe 3 réalise l'analyse de l'autoconsommation avec et sans optimisation du pilotage des bornes de recharges. Des conditions par un code couleur ont également été fixées pour l'analyse (Vert : Autoconsommation > 90%, Orange : 60 % < Autoconsommation < 90%, Rouge : Autoconsommation < 50%). Pour leurs développements les étudiants s'appuient sur les TD qui ont été réalisés en amont du TP.

Afin de permettre aux étudiants de développer des compétences en gestion de projet, en plus de leurs compétences scientifiques, les développements et préparations à l'oral ont été

réalisées en autonomie, avec des points d'avancement réguliers avec les encadrants de la formation. Les résultats et les perspectives de l'étude sont présentés dans la prochaine section.

4.3. Résultats des simulations

Dans le cadre de cette étude en simulation, les hypothèses suivantes ont été établies : la production solaire a été anticipée, les bornes de recharges sont pilotables et le comportement utilisateur est fixe (pas de récupération imprévue des véhicules de la part des utilisateurs).

Les résultats de ces simulations ont montré que le pourcentage d'autoconsommation pouvait être augmenté de 15% sur une journée en fixant un coefficient de foisonnement moyen à 0.5 sur les bornes de recharges. La valeur du coefficient de foisonnement a été fixé de manière arbitraire pour cet exercice, afin de présenter dans un premier temps une preuve de concept et un principe de fonctionnement.

Dans le cadre d'une optimisation avancée, le rôle d'un Energy Management System (EMS) dans ce cas d'application serait de fixer le meilleur coefficient de foisonnement pour piloter les bornes de recharges en prenant en compte différents objectifs (coût, impact carbone, conditions météorologiques) et contraintes (besoin utilisateur, état de charge des batteries de véhicules électriques). Les notions d'optimisation avancée n'ont pas été abordées dans la démarche pédagogique présentée dans ce document mais celles-ci sont étudiées dans le cadre de la deuxième partie de la formation. De ce fait, cette dernière activité permet d'introduire aux étudiants le rôle de l'optimisation dans la gestion de l'énergie dans les bâtiments.

Les différentes interfaces utilisateurs développées pour chaque groupe sont présentées ci-dessous.

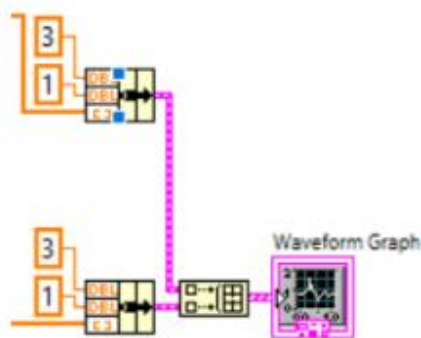


Figure 9 : Code d'affichage graphique

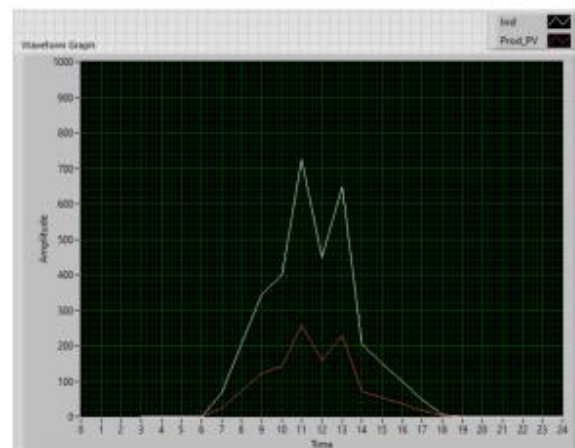


Figure 10 : Représentation graphique de l'irradiance et la production PV

Figure 13 : Capture d'écran – IHM LabVIEW - Simulation photovoltaïque - Groupe 1

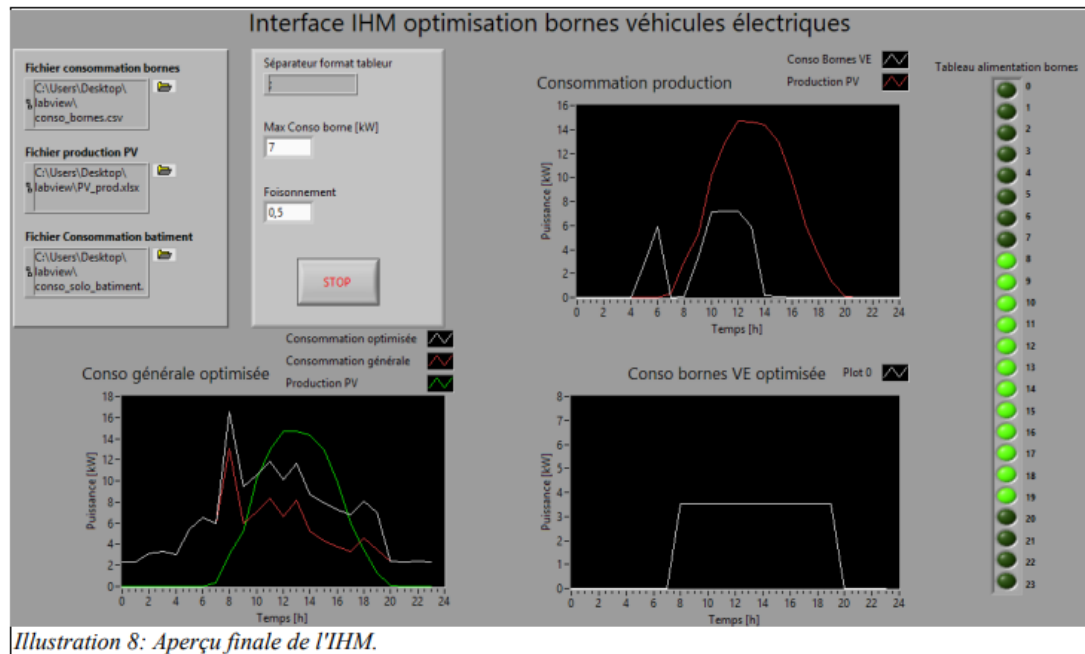


Illustration 8: Aperçu finale de l'IHM.

Figure 14 : Capture d'écran - IHM LabVIEW - Optimisation du pilotage des bornes VE - Groupe 2

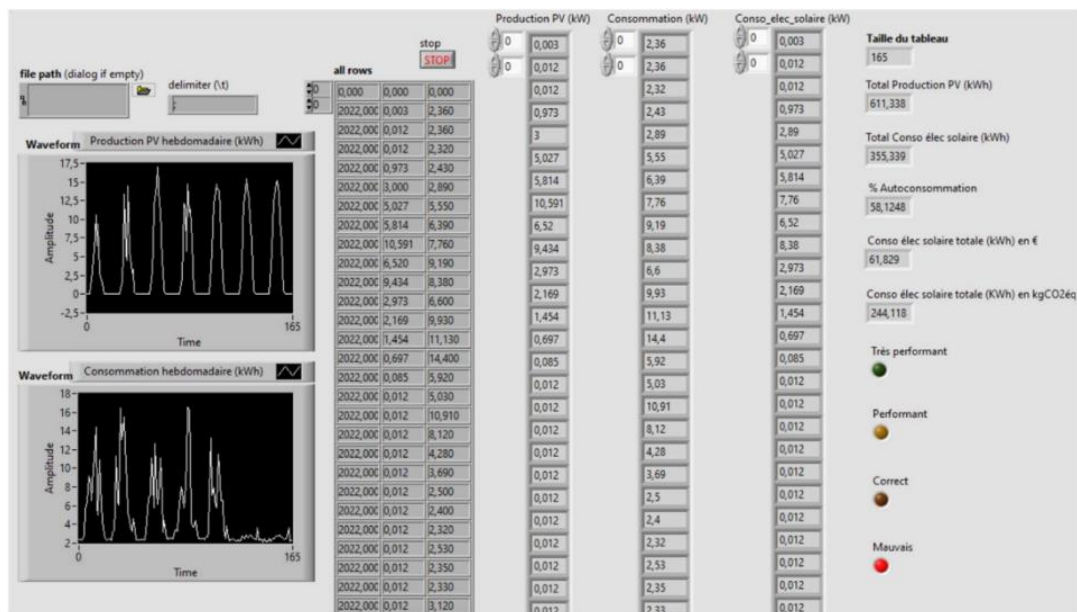


Figure 15 : Capture d'écran - IHM LabVIEW - Analyse de l'autoconsommation avec et sans optimisation - Groupe 3

V. Retours d'expériences des étudiants

A l'issue des travaux pratiques, un questionnaire de retour d'expérience (voir annexe 1) a été transmis aux étudiants afin de connaître leurs ressentis, et identifier les points forts et points à améliorer dans la formation. Une synthèse des éléments mis en avant par les étudiants est détaillée ci-dessous.

- **Points forts :**

- Connaissances sur la réglementation des bâtiments et sensibilisation aux enjeux énergétiques.
- Travail en autonomie.
- Travail sur des conditions réelles.
- Le projet bureau d'études pour préparer la sortie de Master.

- **Points à améliorer :**

- Allouer plus d'heures dans la formation afin de permettre une meilleure assimilation des notions abordées.
- Intégrer d'autres sources d'énergies renouvelables comme cas d'étude.
- Ajout d'autres normes comme la ISO 50001.
- Ajout d'une formation au logiciel PVSyst.

D'après ces retours, le **travail d'équipe** et la **mise en situation dans un cas pratique** sur des **données réelles** sont des éléments de la formation ayant été appréciés par les étudiants. Ils ont estimé que c'était une préparation pertinente à l'approche de leur entrée dans la vie active.

Concernant les axes d'améliorations, il a été soulevé une forte demande concernant **l'augmentation du nombre d'heures** ou un **réajustement des différentes activités** afin de permettre une meilleure **assimilation des connaissances**. Nous pourrions ainsi envisager d'augmenter la quantité d'heures allouées pour la formation ou réduire le nombre d'objectifs, tout en favorisant une approche plus détaillée des notions abordées. En particulier, approfondir les notions d'études sur **l'impact carbone** et les compétences attendues sur les **audits énergétiques** et la **gestion de l'énergie**, à la fois dans le secteur public et privé.

D'un point de vue technique et scientifique, l'approche pédagogique pourrait également être complétée par une **formation au logiciel PVSyst** et par l'étude d'**autres sources d'énergies renouvelables** (éoliennes, biomasse, géothermie ou encore l'énergie thermique des mers actuellement en cours de recherche à La Réunion [27]).

Une autre demande à propos de la préparation à **l'expression orale et des entraînements aux entretiens d'embauche** a été soulevée par les étudiants. Dans le cadre de la formation présentée dans ce document, l'étape de préparation à une présentation orale a été ajoutée sur du temps de travail personnel avec un seul entraînement avant la date de passage. Afin de répondre à la demande des étudiants, il pourrait ainsi être envisagé d'inclure la phase de préparation à l'oral de manière plus poussée dans les derniers exercices de la formation. Des exemples non exhaustifs de solutions pourraient être d'ajouter **plus de séances d'entraînements** en invitant des collègues pour **simuler un jury** ou encore prévoir une introduction de **présentation personnelle des étudiants** en début d'exposé.

VI. Conclusion

Dans le cadre de l'Unité d'Enseignement (UE) « Gestion de l'énergie dans les réseaux électriques » du Master Energie de l'Université de La Réunion, une approche pédagogique a été mise en place pour sensibiliser et former les étudiants aux notions de consommation énergétique des bâtiments et insertion des énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire. Une innovation a été entreprise concernant l'aspect complémentaire de l'approche pédagogique en alliant le domaine de la recherche académique et le domaine industriel.

Les étudiants ont commencé par l'étude de la consommation énergétique de leur logement en établissant un bilan de consommation théorique et en confrontant les résultats aux données réelles. Ils ont également appris à appliquer un coefficient de foisonnement sur l'utilisation des appareils électriques afin d'affiner la précision de leur modèle théorique et se rapprocher de la consommation énergétique réelle. La seconde étape a consisté à estimer la production photovoltaïque d'un site à l'aide de plusieurs outils (cartographie de l'ensoleillement, données satellites, modélisation à partir données de mesures au sol), dimensionner une installation PV pour leur logement et enfin, estimer le potentiel d'autoconsommation PV en fonction de la consommation d'énergie du bâtiment.

Pour finaliser l'intégration de ces nouvelles notions autour d'un projet commun, les étudiants ont été confrontés à un cas d'étude réel en utilisant des données mesurées de consommation d'énergie d'un bâtiment du secteur tertiaire. Le but du projet a été d'étudier le potentiel d'autoconsommation d'énergie photovoltaïque avec et sans l'implémentation d'un pilotage des bornes de recharges de véhicules électriques. Cette dernière étape a permis de créer une transition vers l'optimisation avancée dans la gestion de l'énergie qui concerne la seconde partie de la formation, et qui intègre la gestion du vecteur hydrogène (un des axes de recherche actif au ENERGY-Lab). Les étudiants ont eu la possibilité de présenter oralement leurs résultats auprès des utilisateurs des locaux du bâtiment étudié.

Des technologies variées ont été utilisées (feuille de calcul, programmation Python, manipulation d'API, développements LabVIEW) afin que les étudiants puissent s'adapter à un contexte autant universitaire qu'industriel en sortie de Master. Le bilan des compétences attendues à l'issue de cette formation est fourni en annexe n°3.

Enfin, pour permettre une amélioration continue de la formation, un questionnaire de retour d'expériences a été transmis aux étudiants à la fin des enseignements (voir section V et annexe n°2) afin de connaître leur ressenti et améliorer en fonction de leurs réponses, le contenu de l'UE. D'après les retours des étudiants, il apparaît que les compétences techniques et analytiques ont été maîtrisées mais les notions abordées mériteraient d'être approfondies pour être mieux assimilées. Une forte demande des étudiants a également été soulevée concernant une accentuation des compétences transversales, en particulier l'expression orale.

Les retours des étudiants rejoignent ainsi les perspectives scientifiques et pédagogiques envisagées pour cette UE : formation à d'autres logiciels, étude d'autres sources d'énergies renouvelables et en particulier un réajustement des heures allouées ou du nombre d'activités. Ceci dans le but d'intégrer une préparation plus poussée aux présentations orales et aux entretiens. Ces ajustements pourraient permettre aux étudiants de Master 2 de gagner en

confiance, à la fois sur leur maîtrise des compétences techniques vues en cours et leurs capacités d'élocution, en particulier pour être préparés à leur entrée imminente dans la vie active.

Références bibliographiques

- [1] Décret n° 2017-530 du 12 avril 2017 relatif à la programmation pluriannuelle de l'énergie de La Réunion.
- [2] Décret tertiaire : Décret n° 2021-1271 du 29 septembre 2021 et Décret n° 2022-305 du 1er mars 2022
- [3] Décret BACS : Décret n° 2020-887 du 20 juillet 2020 relatif au système d'automatisation et de contrôle des bâtiments non résidentiels et à la régulation automatique de la chaleur.
- [4] Bilan énergétique de La Réunion 2020, <https://oer.spl-horizonreunion.com/>.
- [5] Consommation électrique par secteur en 2019, <https://opendata-reunion.edf.fr/>.
- [6] V. Rakotoson, L. Adelard, J-P. Praene. *Évaluation des émissions de gaz à effet de serre du mix électrique de territoires insulaires*. Conférence IBPSA France - Marne-la-Vallée Mai 2016, Paris, France. hal-01486543
- [7] Site web ENERGY-Lab : <https://www.energylab.re/>
- [8] <https://rt-re-batiment.developpement-durable.gouv.fr/dpe-logement-r377.html>
- [9] Base Carbone Ademe : <https://bilans-ges.ademe.fr/>
- [10] <https://www.edfenr.com/guide-solaire/bilan-carbone-panneau-photovoltaïque/>
- [11] https://reunion.edf.fr/sites/sei_reu/files/2023-02/bleu_residentiel_reunion.pdf
- [12] <https://meteofrance.re/fr>
- [13] IOS-net open data network : <https://galilee.univ-reunion.fr>
- [14] Outil PV-GIS https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/fr/
- [15] API de SolarIO : <https://solardb.univ-reunion.fr/docs/index.html>
- [16] Site web Intégrale Ingénierie : <https://www.integrale.re/>
- [17] B. Morel, P. Jeanty, M. Delsaut, N. Hassambay, A. Graillet, J-P. Chabriat, *Surface measurement of total solar and ultraviolet irradiance and ancillary meteorological data at the South-West Indian Ocean Solar network (IOS-net) stations*, Data in Brief, Volume 37, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107136>.
- [18] C. Lebreton, F. Kbid, F. Alicalapa, M. Benne, C. Damour. *PV Fault Diagnosis Method Based on Time Series Electrical Signal Analysis*. Engineering Proceedings, 2022, hal-04126498
- [19] A. Graillet, C. Lebreton, C. Tang, F. Kbid, T. Jegado, C. Damour, M. Benne, *Electrical production data of a domestic grid-connected rooftop PV plant in normal and shading faults conditions associated with solar and meteorological data in a tropical climate*, Data in Brief, Volume 46, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108723>.
- [20] Kuang Y., Zhang Y., Zhou B., Li C., Cao Y., Li L., Zeng L., (2016), *A review of renewable energy utilization in islands*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 59 (504-513). <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.014>
- [21] Praene J-P., David M., Sinama F., Morau D. and Marc O., (2012). *Renewable energy: Progressing towards a net zero energy island, the case Reunion Island*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16 (426-442). <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.007>
- [22] Diagnostic de performance énergétique relatif à la RE2020, <https://www.ecologie.gouv.fr/diagnostic-performance-energetique-dpe>
- [23] <https://www.rte-france.com/>
- [24] <https://reunion.edf.fr/particulier/>
- [25] Module python communication API SolarIO : <https://github.com/LE2P/pysolardb>
- [26] Thèse Fabrice KBidi, *Développements et tests de stratégies de gestion de l'énergie à l'échelle de micro réseaux avec stockage et production d'hydrogène*, 2019.

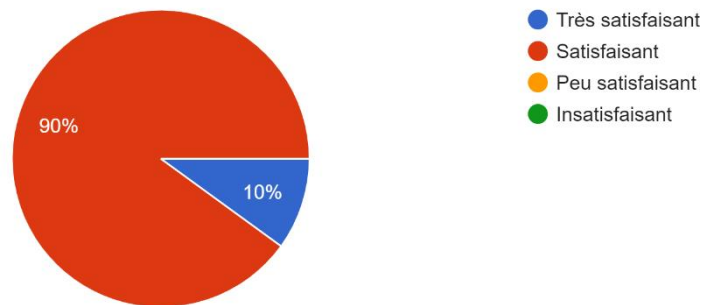
- [27] L. Vatinel, M. Bessafi and M. Panvalkar, "Application of Lagrangian mechanics to the hydrodynamic analysis of a cold-water pipe for Ocean Thermal Energy Conversion," *2022 7th International Conference on Environment Friendly Energies and Applications (EFEA)*, Bagatelle Moka MU, Mauritius, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/EFEA56675.2022.10063831.

VII. Annexes

1. Résultats sondage retours d'expériences sur l'UE Gestion de l'énergie

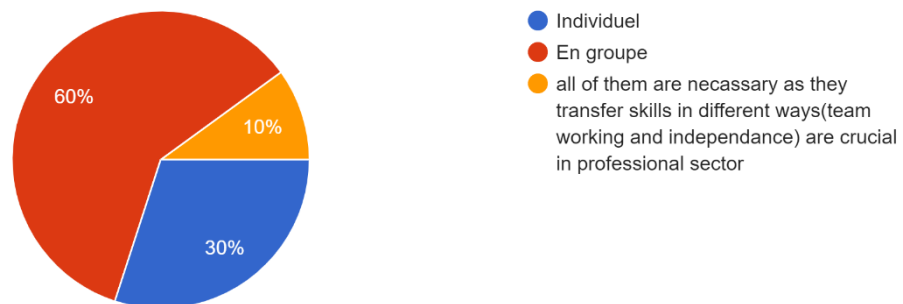
Le module Gestion de l'énergie a-t-il été satisfaisant ?

10 réponses



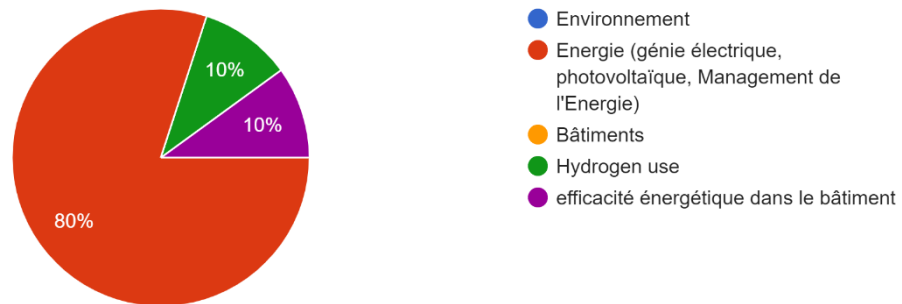
Avez-vous préféré le travail individuel ou en groupe (mode projet) ?

10 réponses



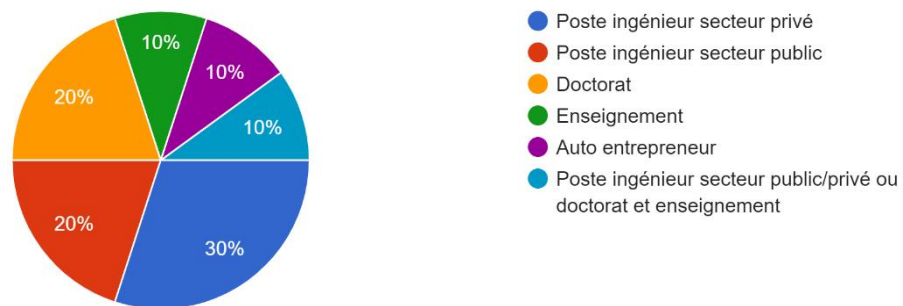
Débouchés : vers quel secteur d'activités voulez-vous vous orienter après le master ?

10 réponses



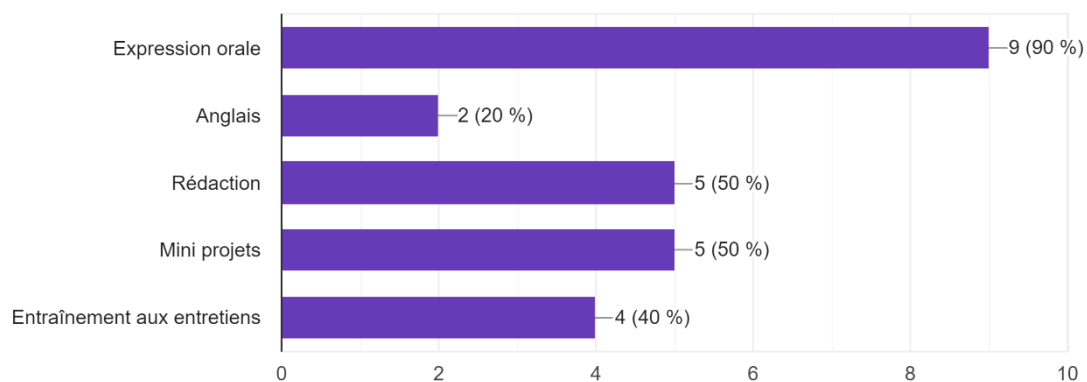
Débouchés : quel type de poste vous intéresserait après le master ?

10 réponses



Quelles seraient vos suggestions de compétences transversales pour améliorer la formation master énergie de manière générale ? (Plusieurs choix possibles)

10 réponses



2. Tableau de compétences

Compétences	Description
Compétences Techniques :	
1. Analyse de la consommation énergétique	- Examiner et interpréter des données de consommation énergétique.
	- Maîtriser des calculs de consommation énergétique (kWh, €, kgCO ₂ eq).
2. Gestion des données énergétiques	- Utiliser des feuilles de calcul pour organiser et analyser les données énergétiques.
	- Automatiser les calculs et créer des listes avec des fonctions avancées.
3. Compréhension des équipements électriques	- Connaître les spécifications techniques des équipements électriques couramment utilisés.
	- Modéliser une centrale photovoltaïque.
	- Appliquer des coefficients de foisonnement aux équipements.
4. Évaluation de la performance énergétique	- Comprendre les critères d'évaluation de la performance énergétique des logements.
	- Classer un logement en fonction de ses caractéristiques énergétiques.
Compétences Analytiques :	
5. Analyse comparative	- Comparer les données de consommation énergétique théoriques et réelles.
	- Identifier les écarts entre la partie théorique et expérimentale et analyser les raisons de ces écarts.
6. Résolution de problèmes énergétiques	- Résoudre des problèmes liés à la consommation énergétique, proposer des solutions.
Compétences de Communication :	
7. Présentation des résultats	- Présenter avec clarté les résultats d'une étude : données d'entrées, hypothèses, modèle utilisé, résultats, conclusion et perspectives des résultats.
	- Communiquer efficacement à l'oral et à l'écrit.
Compétences Transversales :	
8. Travail en équipe	- Collaborer avec d'autres étudiants pour réaliser des tâches complexes.
9. Pensée critique et créative	- Remettre en question les hypothèses et proposer des approches innovantes.
10. Gestion du temps	- Gérer efficacement le temps pour mener à bien les activités du projet.

Biographie des auteurs

Olivia Graillet : Olivia GRAILLET est titulaire d'un diplôme d'ingénieure en systèmes embarqués de l'école d'ingénieurs ISEN Toulon. Elle est actuellement doctorante en 3^{ème} année dans le cadre d'une thèse CIFRE entre l'entreprise Intégrale Ingénierie et le laboratoire ENERGY-Lab basés à La Réunion et le laboratoire LCIS rattaché à l'Université de Grenoble Alpes. Sa recherche porte sur la gestion de l'énergie dans le cadre du déploiement d'un nano-réseau en courant continu (PV, batterie, alimentation Power Over Ethernet) en secteur tertiaire.

Frédéric Alicalapa : Frédéric ALICALAPA est Maître de Conférences en section CNU 63 à la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université de La Réunion depuis 2004. Il est titulaire d'un Doctorat d'Electronique : spécialité électronique de l'Université Bordeaux I. Travaux menés au laboratoire IMS de Bordeaux, en conception de circuits analogiques intégrés, sur la thématique des inductances actives CMOS. Ces recherches actuelles concernent les circuits de conversion d'énergie CMOS et l'approche numérique des systèmes énergétiques (PV, H2, FPGA, programmation appliquée à la mesure et au contrôle). Il enseigne dans le domaine des Sciences Pour l'Ingénieur en Licence 1,2,3 et en Master 2 Energie du laboratoire Energy Lab. Il a enseigné en IUT GEII Bordeaux, Mesures Physiques Bordeaux et à l'ENSEIRB-Matmeca.

Pierre-Olivier Lucas de Peslouan : Pierre-Olivier LUCAS DE PESLOUAN a obtenu un diplôme d'ingénieur en télécommunication et réseaux ainsi qu'un master 2 en télécommunication, radio fréquence et microélectronique (TRFM) à l'université de Nice Sophia Antipolis en 2007 puis un doctorat en microélectronique à l'université de Bordeaux 1 en 2011. Il a effectué sa thèse au laboratoire IMS (Intégration de Matériau aux Systèmes) dans l'équipe conception de circuit intégré. Après plusieurs années d'enseignements et de conduite de projets en tant qu'ingénieur de recherche au sein de laboratoire Energy Lab (projets FEDER), il rejoint l'université de la Réunion, en tant que maître de conférence en 2020. Il effectue ses travaux de recherche au Energy Lab principalement autour de la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs. Ses enseignements sont centrés autour de l'électronique pour les licences de Sciences Pour l'Ingénieur et de Physique.

Denis Genon-Catalot : Denis GENON-CATALOT a obtenu un Doctorat en Physique en 1993 à l'Université Joseph Fourier après le DEA en Systèmes Electroniques à Grenoble INP. Il a effectué sa thèse au Laboratoire d'Instrumentation Microélectronique et Electronique (LIME) à Grenoble. Après 3 années à participer à la création de l'ESISAR de Grenoble INP (Ecole nationale Supérieure d'Ingénieur en Système Avancées et Réseaux) en tant que responsable du département Electronique, il est l'un des 3 fondateurs en 1996 du Laboratoire de Conception et d'Intégration des Systèmes de Valence. Il rejoint, l'IUT de Valence en 1998 en tant que Maître de Conférences, pour la création du département Réseaux et Télécommunications. Il a créé et géré la licence professionnelle Administration et Sécurité des Réseaux (ASUR) de 2002 à 2023. Durant ses mandats de chef de département R&T, il a été Président de l'Assemblée des chefs de départements R&T et a géré la rédaction du nouveau programme pédagogique national R&T de 2013. Il enseigne les télécommunications et les réseaux sans fils aux étudiants en BUT R&T et les réseaux industriels aux étudiants du Master Energie à l'Université de la Réunion où il est chercheur associé au Energy-Lab. Ses recherches portent sur les systèmes de communications sans fils et filaires avec le transport de l'énergie (PoE et PoDL) dans le cadre de contrat industriels et de thèses CIFRE.