



HAL
open science

Les énergies renouvelables accélérateur de l'électrification rurale décentralisée

Minayegnan Toure

► **To cite this version:**

Minayegnan Toure. Les énergies renouvelables accélérateur de l'électrification rurale décentralisée. Energie électrique. HESAM Université; Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (Yamoussoukro, Côte d'Ivoire), 2022. Français. NNT : 2022HESAC016 . tel-03958481

HAL Id: tel-03958481

<https://theses.hal.science/tel-03958481v1>

Submitted on 26 Jan 2023

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.



Institut National
Polytechnique
Houphouët Boigny
Yamoussoukro (RCI)



École Doctorale Polytechnique

UMR 58 - LAPISEN

le cnam



Laboratoire

Lafset
EA7341

THÈSE en COTUTELLE

Présentée par : **Minayégnan TOURE**

soutenue le : **09 décembre 2022**

En vue de l'obtention du

**DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE
FELIX HOUPHOUËT BOIGNY DE YAMOOUSSOUKRO**

Discipline ou spécialité : Génie Energétique

Ecole doctorale : Ecole Doctorale Polytechnique (EDP)

Unité de recherche : Laboratoire des Procédés Industriels de Synthèse,
de l'Environnement et des Energies Nouvelles (LAPISEN) UMRI 58

Et

**DOCTORAT DU CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
DE PARIS**

Discipline ou spécialité : Génie Energétique

Ecole doctorale : Ecole Doctorale Sciences et Métiers de l'Ingénieur n°432

Unité de recherche : EA 7341 - Laboratoire du froid et des systèmes
énergétiques et thermiques (Lafset)

Les énergies renouvelables, accélérateur de l'électrification rurale :

Cas de la Côte d'Ivoire

THÈSE dirigée par :

M. Christophe MARVILLET, Professeur du Cnam, Paris

M. Mohamed SAKO, Maître de conférences INP-HB, Yamoussoukro

JURY

M. Boko AKA, Professeur Titulaire, Université Nangui Abrogoua, Côte d'Ivoire

M. Richard KOUITAT, Maître de conférences, Université de Lorraine, France

M. Namory COULIBALY, Maître de conférences, Université de San Pedro, Côte d'Ivoire

M. Lounes TADRIST, Professeur, Université Aix Marseille, France

M. Prosper GBAHA, Professeur Titulaire, Institut National Polytechnique – HB, Côte d'Ivoire

Président

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

T
H
È
S
E

Affidavit

Je soussigné Minayégnan TOURE, déclare par la présente que le travail présenté dans ce manuscrit est mon propre travail, réalisé sous la direction scientifique de **Christophe MARVILLET** (directeur de thèse) et de **Mohamed SAKO** (co-directeur de thèse), dans le respect des principes d'honnêteté, d'intégrité et de responsabilité inhérentes à la mission de recherche. Les travaux de recherche et la rédaction de ce manuscrit ont été réalisés dans le respect de la charte nationale de déontologie des métiers de la recherche.

Ce travail n'a pas été précédemment soumis en France ou à l'étranger dans une version identique ou similaire à un organisme examinateur.

Fait à Paris, le 09 décembre 2022

Signature



Affidavit

I, undersigned, Minayégnan TOURE, hereby declare that the work presented in this manuscript is my own work, carried out under the scientific direction of Christophe MARVILLET (thesis director) and of Mohamed SAKO (co-thesis director), in accordance with the principles of honesty, integrity and responsibility inherent to the research mission. The research work and the writing of this manuscript have been carried out in compliance with the French charter for Research Integrity.

This work has not been submitted previously either in France or abroad in the same or in a similar version to any other examination body.

Place Paris, date December 09, 2022

Signature



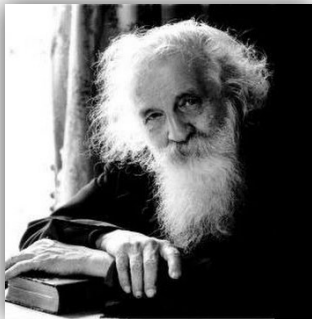
L'évidence première est-elle une vérité fondamentale ?

« ... Il suffit que nous parlions d'un objet pour nous croire objectifs. Mais, par notre premier choix, l'objet nous désigne plus que nous ne le désignons... »

En fait, l'objectivité scientifique n'est possible que si l'on a d'abord rompu avec l'objet immédiat, si l'on a refusé la séduction du premier choix, si l'on a arrêté et contredit les pensées qui naissent de la première observation.

Toute objectivité, dûment vérifiée, dément le premier contact avec l'objet. Elle doit d'abord tout critiquer : la sensation, le sens commun, la pratique même la plus constante, l'étymologie enfin, car le verbe, qui est fait pour chanter et séduire, rencontre rarement la pensée. »

Gaston BACHELARD



Dédicace

A ma très chère Mère

Source inépuisable de tendresse, de patience et de sacrifices.

A ma très chère épouse et à mes filles

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon amour et mon attachement, pour tous les efforts et sacrifices consentis pour que cette œuvre scientifique soit une réalité.

A mon Mentor, feu Marcel ZADI KESSY, ex-Président du groupe CIE-SODECI

Le temps qui passe ne saurait altérer nos mémoires, nos souvenirs, ... Tes conseils ont une résonance en boucle infinie en nous ! Comment t'oublier ? Ta bonté reste encore gravée dans ma mémoire, j'imagine quelle serait ta joie aujourd'hui, j'aurai voulu que tu assistes à l'aboutissement de ces années de dur labeur, le sort en a décidé autrement. Que la paix éternelle te soit accordée.

Remerciements

La réalisation de cette thèse a été possible grâce à la participation de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma reconnaissance au Professeur **Christophe MARVILLET**, Professeur au CNAM et au Professeur **Mohamed SAKO**, Professeur à l'INP-HB pour avoir accepté de m'encadrer. Je voudrais vous remercier pour vos disponibilités, pour tous vos conseils, et surtout pour votre patience qui ont permis à ce travail d'aboutir. Faire cette thèse sous vos directions, pour moi a été un grand honneur et un immense bonheur. Pendant mes moments de doutes et d'incertitudes vous n'étiez jamais très loin, à Paris comme à Abidjan ou Yamoussoukro.

Je voudrais remercier tout particulièrement les entreprises **CIE** et **SMART ENERGY**, pour leur soutien matériel. Ce mémoire n'aurait pas pu voir le jour sans ce soutien inestimable.

Dans le village pilote d'ELOKATO, je remercie le Chef de village, les notables et surtout Mr Francis ANOUGBA qui a facilité les enquêtes et la collecte des données du modèle de consommation.

Je désire aussi remercier tous les Docteurs ainsi que les Professeurs, qui, par leur pédagogie, leur patience, leur disponibilité, et leur dévouement, m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de ce travail.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers mes collaborateurs qui m'ont apporté leur soutien tout au long de ma thèse.

Enfin, je tiens à témoigner toute ma gratitude à ma famille pour sa confiance et son soutien inestimable et surtout sa patience durant cette longue aventure humaine.

J'exprime ma gratitude aux membres du Jury pour l'intérêt accordé à la thèse :

M. Prosper GBAHA, Professeur Titulaire, Institut National Polytechnique – HB, Côte d'Ivoire ;

M. Boko AKA, Professeur Titulaire, Université Nangui Abrogoua, Côte d'Ivoire ;

M. Lounes TADRIST, Professeur, Université Aix Marseille, France.

M. Richard KOUITAT, Maître de conférences, Université de Lorraine, France ;

M. Namory COULIBALY, Maître de conférences, Université de San Pedro, Côte d'Ivoire ;

Résumé

En 2021, en Côte d'Ivoire, **1737 localités dans les zones rurales n'étaient pas encore électrifiées** sur un total de 8518 soit 20%. Les programmes d'électrification rurale initiés par l'Etat ivoirien, avec le soutien des institutions financières et des partenaires au développement, ne prenaient pas suffisamment en charge les localités de moins de 500 habitants situés à plus de 20 km du réseau électrique interconnecté.

Pour accélérer l'électrification rurale et prendre en compte, avec diligence, les besoins en électricité de ces populations, deux scénarios sont possibles. **Le premier** consiste à accélérer le raccordement de ces localités au réseau national interconnecté, par l'intensification de la construction et de l'extension des réseaux HTA/BT. **Le second** consiste à l'électrification par des mini-réseaux décentralisés via des sources d'énergie renouvelables ou par des groupes électrogènes.

En Côte d'Ivoire, la politique d'électrification rurale actuelle privilégie le premier scénario. Notre thèse porte sur le deuxième scénario, l'électrification par des mini-réseaux décentralisés. Pour ce faire, une identification pertinente des besoins et des usages de l'énergie électrique dans les zones rurales est essentielle pour un dimensionnement optimisé de ces mini-réseaux.

Les logiciels XLSTAT, ENERGY SENTINEL, QGIS, HOMER ENERGY PRO, nous ont permis, à travers la collecte et l'analyse des données de consommations d'électricité, de déterminer les besoins journaliers, d'identifier les courbes de charges de l'ensemble des ménages et d'élaborer les profils horaires de quatre (4) villages électrifiés en Côte d'Ivoire : Elokato, Attiékoï, Ouffoué-diékro et Dokaha.

Pour ainsi, l'étude de cas du village d'ELOKATO avec le logiciel HOMER ENERGY, a permis d'identifier treize (13) scénarios considérés comme les plus rentables. Pour faire les simulations nous avons introduire, entre autres, les paramètres de ressources énergétiques disponibles dans ce village et proposé les systèmes énergétiques potentiellement pertinents à utiliser pour produire de l'électricité. Toutes ces données ont été saisies dans ce logiciel. Le scénario, le plus optimal et le plus viable, techniquement et économiquement, sur les treize identifiés selon nos simulations, est celui de la configuration constituée par un **système hybride photovoltaïque/hydrolienne/stockage/groupe électrogène**. Cette solution est rentable si la distance entre la localité à électrifier et le réseau interconnecté est supérieur à 1,90km. Cette solution coûtera environ 620 000 \$US avec un coût actualisé de l'énergie (LCOE) de US 0,203\$/kWh. Ce scénario et sa variante **PV/Genset/batterie** pour les localités qui n'ont pas de cours d'eau sont des alternatives crédibles à l'électrification rurale par extension de réseaux. Bien que ces solutions aient des coûts d'investissement initiaux plus élevés que les coûts d'extension de réseaux, elles présentent des coûts d'exploitation et des impacts environnementaux faibles. Cependant, aujourd'hui les coûts d'investissements initiaux ont une tendance baissière, grâce aux progrès technologiques (performance stockage, capacité des panneaux...).

Notre thèse a permis, pour la première fois en Côte d'Ivoire, à partir des données de consommations obtenues par mesurage et celles extraites du logiciel de gestion des abonnés de la Compagnie Ivoirienne d'Electricité, d'élaborer pour les zones rurales des profils de charge à pas horaires et une cartographie des consommations spécifiques journalières par ménage pour chaque localité (kWh/ménage/jour). Ces données précises serviront au dimensionnement optimal des systèmes décentralisés.

Pour ainsi, notre travail est une contribution à l'accélération de l'électrification rurale. Cette contribution vise à éclairer les décideurs, en charge des politiques nationales d'électrification rurale, sur l'opportunité d'utiliser les énergies renouvelables et les mini-réseaux décentralisés pour faciliter voire accélérer l'électrification rurale. Cela, pour le bien-être des populations et pour la consolidation des initiatives de développement de proximité.

Mots clef : Electrification rurale, Energies renouvelables, cartographie énergétique, XLSTAT, ENERGY SENTINEL, QGIS, HOMER ENERGY PRO.

Abstract

In 2021, in Côte d'Ivoire, 1737 localities in rural areas were not yet electrified out of a total of 8518 or 20%. The rural electrification programs initiated by the Ivorian State, with the support of financial institutions and development partners, did not sufficiently support localities with less than 500 inhabitants located more than 20 km from the interconnected electricity network.

To accelerate rural electrification and diligently consider the electricity needs of these populations, two scenarios are possible. The first consists in accelerating the connection of these localities to the national interconnected network, by intensifying the construction and extension of MV/LV networks. The second consists of electrification by decentralized mini grids via renewable energy sources or by generators.

In Côte d'Ivoire, the current rural electrification policy favors the first scenario. Our thesis focuses on the second scenario, electrification by decentralized mini grids. To do this, a relevant identification of the needs and uses of electrical energy in rural areas is essential for an optimized dimensioning of these mini grids.

The XLSTAT, ENERGY SENTINEL, QGIS, HOMER ENERGY PRO software enabled us, through the collection and analysis of electricity consumption data, to determine daily needs, to identify the load curves of the whole households and to develop hourly profiles of four (4) electrified villages in Côte d'Ivoire: Elokato, Attiékoï, Ouffoué-diékro and Dokaha.

For this reason, the case study of the village of ELOKATO with the HOMER ENERGY software, made it possible to identify thirteen (13) scenarios considered to be the most profitable. To carry out the simulations, we entered, among other things, the parameters of the energy resources available in this village and proposed the potentially relevant energy systems to be used to produce electricity. All this data was entered into this software. The scenario, the most optimal and the most viable, technically, and economically, out of the thirteen identified according to our simulations, is that of the configuration consisting of a **hybrid photovoltaic/tidal turbine/storage/generator system**. This solution is profitable if the distance between the locality to be electrified and the interconnected network is more than 1.90 km. This solution will cost approximately US\$620,000 with a Levelized Cost of Energy (LCOE) of US\$0.203/kWh. This scenario and its **PV/Genset/battery** variant for localities that do not have rivers are credible alternatives to rural electrification by extension of networks. Although these solutions have higher initial investment costs than network expansion costs, they have low operating costs and environmental impacts. Power generation systems with renewable energy sources require high initial investments but have relatively low operating costs. Today, initial investment costs are on a downward trend, thanks to technological progress (storage performance, panel capacity, etc.).

Our thesis has made it possible, for the first time in Côte d'Ivoire, from consumption data obtained by measurement and those extracted from the subscriber management software of the Ivorians Electricity Company (CIE), to develop profiles for rural areas. load in hourly increments and a mapping of specific daily consumption per household for each locality

(kWh/household/day). This precise data will be used for optimal sizing of decentralized systems.

Thus, our work is a contribution to the acceleration of rural electrification. This contribution aims to enlighten decision-makers in charge of national rural electrification policies on the opportunity to use renewable energies and decentralized mini-grids to facilitate or even accelerate rural electrification. This, for the well-being of the populations and for the consolidation of local development initiatives.

Keywords: Rural electrification, Renewable energies, energy mapping, XLSTAT, ENERGY SENTINEL, QGIS, HOMER ENERGY PRO.

Table des matières (Synthétique)

1

Chapitre 1 : Etat des lieux de l'électrification rurale en Afrique de l'Ouest (Page 24)

2

Chapitre 2 : Etat des lieux des technologies de production décentralisée d'électricité (Page 48)

3

Chapitre 3 : Identification et modélisation des besoins en électricité et des ressources disponibles dans un village rural en Côte d'Ivoire (Page 86)

4

Chapitre 4 : Mesurages des consommations en électricité dans différents villages ivoiriens et comparaison des résultats de simulation (Page 139)

5

Chapitre 5 : Proposition d'un système de production décentralisée d'électricité répondant aux besoins du village d'ELOKATO (Page 164)

Table des matières

Dédicace	4
Remerciements	5
Résumé	6
Abstract.....	8
Table des matières (Synthétique).....	10
Table des matières.....	11
Introduction : Contexte et problématique	15
Chapitre 1 : Etat des lieux de l'électrification rurale en Afrique de l'Ouest	24
I. Contexte : Electrification rurale en Afrique de l'Ouest	25
1. En Afrique.....	25
2. La sous-région : Espace CEDEAO-UEMOA	25
3. En côte d'ivoire.....	26
II. Etats de lieux de la situation de l'électrification rurale en Afrique et en Côte d'ivoire	27
1. Etat des lieux des politiques énergétiques.....	27
1.1. La mise en place des Politiques Énergétiques.....	27
1.2. La mise en place de politiques énergétiques CEDEAO-UEMOA	27
1.3. La mise en place de la politique énergétique de la Côte d'Ivoire	28
2. Etat des lieux des plans directeurs	30
3. Etat des lieux des programmes mis en place.....	32
4. Etat des lieux du secteur électrique Africain et en particulier ivoirien	33
5. Les différents modes de l'électrification rurale.....	37
5.1. Le raccordement au réseau électrique par intensification de la construction et extension du réseau de transport et de distribution.....	37
5.2. Par électrification rurale décentralisée	43
6. Les faiblesses de l'électrification rurale en Côte d'ivoire	44
7. Les freins éventuels à l'évolution rapide de l'électrification rurale	44
8. Les opportunités qu'offre l'électrification rurale	44
9. Les stratégies adoptées pour accélérer l'électrification rurale	45
10. Conclusion	46
Chapitre 2 : Etat des lieux des technologies de production décentralisée d'électricité	48
I. Etats des lieux des technologies de production décentralisée des énergies renouvelables.....	49
1. L'Énergie Solaire photovoltaïque	49
1.1. Principe de fonctionnement de l'énergie solaire photovoltaïque	49
1.2. Technologies de l'énergie solaire photovoltaïque.....	49
1.3. Avantages et inconvénients.....	51
1.4. Applications du solaire photovoltaïque.....	51
2. Énergie solaire thermique à haute température CSP	52
3. Énergie éolienne.....	57
4. La biomasse	60
4.1. Valorisation de la biomasse par combustion.....	61
4.2. Technologies de valorisation des biomasses.....	61
4.3. Avantages et inconvénients de la biomasse	63
4.4. Applications du potentiel énergétique de la biomasse	63
5. L'énergie hydraulique.....	64

5.1.	Principe de fonctionnement de l'énergie hydraulique.....	64
5.2.	Technologies de l'énergie hydraulique	64
5.2.1.	Hydroélectricité.....	65
5.2.2.	L'énergie marémotrice.....	66
5.2.3.	Hydrolienne	67
6.	Les systèmes hybrides.....	68
6.1.	Principe de fonctionnement des systèmes hybrides	68
6.2.	Applications des systèmes hybrides.....	71
6.3.	Avantages et inconvénients des systèmes hybrides	72
7.	Energie géothermique	73
7.1.	Principe de fonctionnement de la géothermie.....	73
7.2.	Technologie de valorisation de l'énergie géothermique	73
7.3.	Applications de l'énergie géothermique	75
7.4.	Avantages et inconvénients de l'énergie géothermique.....	76
II.	Etat des lieux des ressources énergétiques renouvelables disponible en Côte d'Ivoire	77
1.	L'hydraulique.....	77
1.1.	Répartition géographique et potentiel de la ressource Hydraulique.....	77
1.2.	Technologie utilisée pour la ressource hydraulique en Côte d'Ivoire	78
2.	Le solaire.....	78
3.	La biomasse	79
4.	L'éolien.....	81
III.	Evaluation des technologies de production décentralisée adaptées à l'environnement Ouest-Africain et en particulier à l'environnement ivoirien	82
1.	Technologies solaires adaptées à l'environnement Ouest-Africain	83
2.	Technologies de valorisation de biomasse adaptées à l'environnement Ouest-Africain.....	83
3.	Technologies hydrauliques adaptées à l'environnement Ouest Africain	84
4.	Technologies éoliennes adaptées à l'environnement Ouest Africain.....	84
5.	Conclusion	84
Chapitre 3 :	Identification et modélisation des besoins en électricité et des ressources disponibles dans un village rural en Côte d'Ivoire.....	86
Introduction.....	87
I.	Identification et modélisation des besoins énergétiques et des ressources disponibles d'un village... 88	
1.	Identification des besoins en électricité d'un village en milieu rural	88
2.	Evaluation des besoins en électricité d'un village par enquête	93
2.1.	Présentation du village d'Elokato	93
2.2.	Méthodologie de l'enquête.....	94
a.	Elaboration de formulaires d'entretiens d'enquête du village d'Elokato	95
b.	La répartition des groupes par zones à Elokato.....	95
c.	Echantillonnage : rencontre avec les ménages du village d'Elokato.....	96
2.3.	Résultats de l'enquête effectué dans le village d'Elokato	97
2.3.1.	Usages individuels	97
a.	Eclairage	99
b.	Electroménagers et climatisation	101
c.	Climatisation et confort.....	102
2.3.2.	Usages collectifs	103
2.4.	Conclusion	105
3.	Courbes de charge des consommations du village d'Elokato	106
3.1.	Classification des courbes de charge des consommations par catégories à partir des enquêtes à Elokato	106

3.2.	Courbes de charge de la consommation des besoins domestiques du village d'Elokato	115
4.	Modélisation des besoins en électricité d'un village en milieu rural	120
4.1.	Modélisation de la demande : profil journalier	120
4.2.	Modélisation des besoins domestiques	121
4.3.	Modélisation des besoins communautaires du village	124
4.4.	Modélisation des besoins liés aux activités génératrices de revenus du village.....	126
4.5.	Modélisation des besoins totale domestique d'un village en milieu rural.....	132
5.	Identification et modélisation des ressources énergétiques renouvelables disponibles.....	133
5.1.	Modélisation de l'énergie solaire disponible dans le village.....	133
5.2.	Modélisation de l'énergie biomasse disponible dans le village	135
5.3.	Modélisation de l'énergie éolienne disponible dans le village.....	137
6.	Conclusion	138

Chapitre 4 : Mesurage des consommations en électricité dans différents villages ivoirien et comparaison des résultats de simulation 139

I.	Mesurage des consommations électriques sur différents villages ivoiriens	140
1.	Introduction.....	140
2.	Présentation des logiciels	141
2.1.	Appareil installé pour la collecte des données : Logiciel ENERGY SENTINEL (Energy Team, Italie)	141
2.2.	Logiciel statistique de traitement et analyse de données XLSTAT.....	141
2.3.	Logiciel Cartographique de traitement et analyse de données QGIS.....	142
3.	Installation du système de mesurages dans un village Ivoirien.....	143
4.	Collectes des données par mesurages dans quatre villages	144
4.1.	Lieux des collectes de données	144
4.2.	Le besoin en énergie électrique à couvrir.....	144
5.	Traitements et Analyses des données.....	145
5.1.	Profil de charges à pas horaire (journalier, mensuel, annuel) village d'ELOKATO.....	146
5.1.1.	Impacts des consommations de l'éclairage public sur le profil de charges à pas horaire du village d'Elokato	147
5.2.	Les profils de charge à pas horaire obtenus à partir d'Energy Sentinel village d'Attiekoi (Alépé). 149	
5.3.	Les profils de charge à pas horaire obtenus à partir d'Energy Sentinel village d'Ouffouediekro....	150
5.4.	Les profils de charge à pas horaire obtenus à partir d'Energy Sentinel village de DOKAHA	151
6.	Comparaison des profils de charge obtenus à partir des données de l'enquête et des données mesurées	152
II.	Elaboration de la cartographie de base des consommations moyenne par jour par ménage pour les localités à électrifier	156
1.	Objectifs et méthodes d'élaboration.....	156
a.	Objectifs.....	156
b.	Processus d'élaboration des cartes et système de coordonnées.....	156
2.	Collecte des données	156
2.1.	Base de données clientèles CIE.....	156
2.2.	Bases de données statistique INS.....	157
2.3.	Géolocalisation des localités électrifiées/non électrifié : QGIS	157
3.	Traitement des données.....	157
4.	Analyse des données	158
5.	Cartographie de base des consommations.....	162
6.	Conclusion	163

Chapitre 5 : Proposition d'un système de production décentralisée d'électricité répondant aux besoins du village d'ELOKATO.....	164
1. Présentation des logiciels	165
1.1. Modélisation et simulation sur HOMER.....	165
2. Paramètres du système	166
2.1. Demande	166
2.1.1. Choix du village de Elokato comme site expérimental.....	166
2.1.2. Profil (journalier, mensuel, annuel) – village ELOKATO	167
2.2. Ressources et composants disponibles pour couvrir les besoins du village d'Elokato	168
2.2.1. Panneau photovoltaïque	168
2.2.2. Eolienne	170
2.2.3. Hydrolienne	172
2.2.4. Système de stockage	174
2.2.5. Groupe électrogène	175
3. Paramètres du système : Critères d'évaluation des performances technico-économiques du système	176
3.1. Indicateur de viabilité économique	176
3.2. Indicateur de la fiabilité technologique (pénurie de capacité).....	177
3.3. Indicateur d'impact environnemental	178
3.4. Paramètres de simulation	178
4. Résultats et discussions	179
4.1. Scénarios optimisés.....	179
4.2. Solution la plus économique	180
4.3. Coût du système optimisé pouvant couvrir les besoins.....	181
4.4. Coût des différents équipements du système optimisé.....	181
4.5. Durée de vie des équipements.....	182
4.6. Part des énergies renouvelables dans la solution proposée	182
4.7. Simulation du scénario de production durant une année.....	183
5. Discussion sur la distance d'extension du réseau à l'équilibre : Mini-réseau Vs Réseau interconnecté	184
5.1. Comparaison des coûts d'installation : Mini réseau vs Réseau interconnecté	184
5.2. Distance d'extension du réseau à l'équilibre : Mini-réseau Vs Réseau interconnecté	185
5.3. Les énergies renouvelables accélérateur de l'électrification rurale décentralisée	188
6. Conclusion	189
Conclusion générale :.....	190
Références.....	192
Annexes	205

Introduction : *Contexte et problématique*

Contexte général

Une politique énergétique mondiale remise en question

L'énergie, au sens étendu du terme, est une nécessité pour la vie quotidienne. Elle reste essentielle à toute activité humaine et est indispensable à la satisfaction des besoins journaliers (transport, cuisson, bureautique, etc.). Elle est multiple, se présente sous plusieurs formes et constitue un facteur essentiel pour le développement social et économique d'un pays. Nos modes de consommation d'énergie et leurs impacts n'ont sans doute jamais été autant au cœur des débats internationaux que pendant ce siècle. Depuis quelques années, avec les conséquences visibles du dérèglement climatique et de l'augmentation des dépenses énergétiques, la transition énergétique est devenue une question centrale dans toutes les politiques de développement économiques, sociales et environnementales. Alors que les besoins en énergie et les coûts ne cessent de croître, mettant en péril la souveraineté énergétique de la plupart des pays développés ou en voie de développement.

Face à l'augmentation significative des coûts de l'énergie liée à une demande mondiale de plus en plus croissante, les réserves d'énergie conventionnelles, existantes s'amenuisent et se raréfient. Leurs utilisations engendrent un important impact néfaste sur notre environnement, dû à un essor sans précédent des émissions de gaz à effet de serre qui participent de façon prépondérante au réchauffement climatique, et engagent les fragiles équilibres des écosystèmes établis depuis des millénaires. Il est donc, de toute nécessité, qu'une remise en question et une modification de nos modes conventionnels de consommations énergétiques soient désormais une évidence pour tous. A ce sujet, le défi majeur lancé par les Nations Unies est que les États doivent apporter des solutions durables afin de garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables, durables et moderne à un coût abordable (ODD7) [1].

En Afrique, les pays se heurtent à de nombreux défis pour l'amélioration du bien-être de leurs populations. Au nombre de ces défis, figure le manque d'accès à des services énergétiques modernes, abordables et fiables. Les estimations montrent que l'Afrique est le continent qui affiche le plus bas taux d'électrification. Seulement 43 % de la population africaine a accès à l'électricité, laissant environ 568 millions d'Africains sans accès à l'électricité. Il convient de constater que la majorité de ces personnes non-desservies sont dans les zones rurales, et quand bien même que les villes soient électrifiées, l'on observe des insuffisances et des inégalités d'accès importantes. Il est d'utilité de noter que le manque d'accès aux services énergétiques modernes constitue un obstacle au développement des entreprises et à l'expansion d'autres opportunités. Cela affaiblit la compétitivité, et ne facilite pas, l'accès des producteurs africains aux marchés régionaux et mondiaux. Le manque d'accès aux services énergétiques de base est en fait un frein majeur à la course de l'Afrique vers la réalisation des objectifs de développement durable (ODD) [1].

Face à ce constat, plusieurs pays concernés par le manque d'accès à l'électricité, ont pris des initiatives et des mesures, qui ont porté le taux d'accès à l'électricité dans les zones rurales d'Afrique subsaharienne de 17 % à 28 % entre 2010-2020. Cela a fait doubler le nombre de personnes ayant accès à l'électricité pour la première fois, passant de 9 millions par an entre 2000 et 2013 à plus de 20 millions par an entre 2014 et 2018 dépassants la croissance démographique pour la première fois [2-4]. Ce chiffre a baissé à 19 millions en 2020 [5] du fait de la pandémie en raison des retards des projets, annulant plusieurs années de progrès constant.

Selon des données préliminaires du World Bank 2022 [6], plusieurs pays, dont la Côte d'Ivoire, le Ghana, le Kenya, le Rwanda et le Sénégal, ont continué à réduire ou à stabiliser le nombre de personnes sans accès, même si les nouvelles connexions ont été ralenties par la pandémie du Covid-19 et la guerre en Ukraine. Néanmoins, plusieurs localités n'ont pas encore été électrifiées.

C'est dans ce contexte, que notre thèse vise à proposer des pistes de solutions en vue d'accroître et d'accélérer l'électrification rurale.

Pour ce faire, deux (02) options techniques s'offrent à nous :

- *L'intensification et l'accélération de l'électrification par le raccordement des localités non électrifiées au réseau national interconnecté ;*
- *L'électrification par des réseaux décentralisés off-grid (nano, micro, mini-grid) via les énergies de sources renouvelables (EnR) ou par des groupes électrogènes.*

La première est en général l'option classique la plus privilégiée pour l'électrification rurale. La seconde est l'alternative que nous voulons mettre en évidence dans notre étude, l'électrification par des réseaux décentralisés off-grid (Nano-Micro-grid) basée sur des sources hybrides d'énergie renouvelable.

Les énergies renouvelables, une solution pour l'électrification rurale

La motivation pour les énergies renouvelables est aussi bien d'ordre environnemental, technique, qu'économique.

D'un point de vue environnemental, les études réalisées pendant de nombreuses années ont permis de montrer que la plupart des sources d'énergie renouvelable, telles que le solaire et l'éolien, sont de très loin les plus respectueuses de l'environnement comparativement aux sources d'énergie fossile, telles que le charbon et le pétrole.

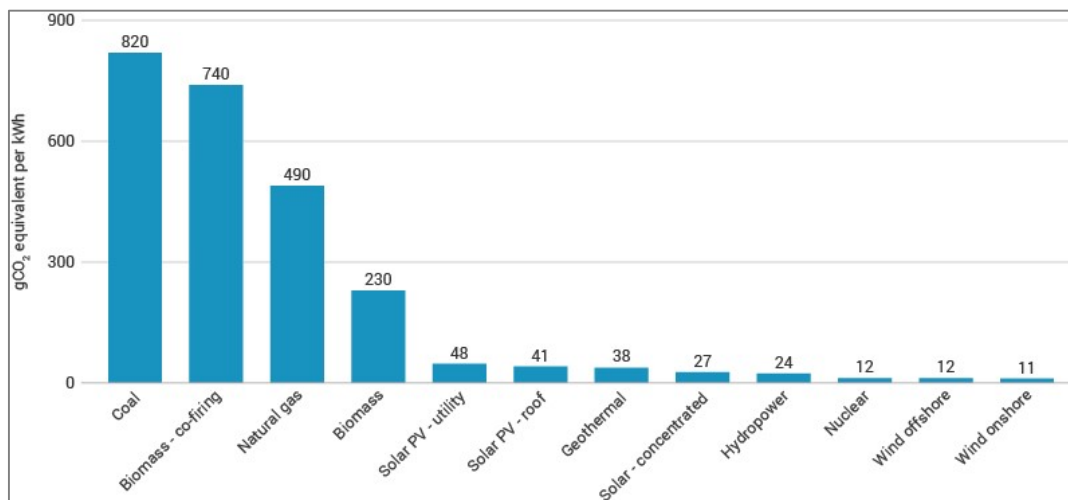


Figure 1. Émissions des différentes sources d'énergie au long de leur cycle de vie (source : IPCC)

La figure ci-dessus montre bien que plus de 40 % des émissions de CO₂ liées à l'énergie sont dues à l'utilisation de combustibles fossiles pour la production d'électricité, quoique toutes les technologies de production d'électricité émettent des gaz à effet de serre à un moment donné de leur cycle de vie.

Du point de vue technique, il est nettement plus facile d'installer une centrale photovoltaïque ou éolienne qu'une centrale thermique. Et une centrale PV est moins bruyante (ou totalement silencieuse, en l'absence de générateurs diesel et de batteries) et nécessite moins de maintenance qu'une centrale thermique.

Enfin, du point de vue économique, le recours aux systèmes de production d'électricité à base de sources renouvelables présente des avantages qui dépendent de plusieurs facteurs, tels que la taille du système et son emplacement. Pour l'électrification rurale, l'AIE 2020 (World Energy Outlook IAE, 2020) estime que les sources d'énergie renouvelable sont abondantes et peuvent être exploitées pour réaliser plus rapidement l'accès universel à l'électricité.

Au titre des gisements en solaire, les pays africains en général, et la Côte d'Ivoire en particulier, dispose d'un énorme potentiel d'énergie renouvelable (solaire). La Côte d'Ivoire est située au niveau de l'équateur (niveau du globe terrestre) où l'ensoleillement maximal est observé. Selon la SODEXAM (Société d'exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique), l'ensoleillement moyen quotidien, en Côte d'Ivoire est d'environ **2 à 5 kWh/m²/j** avec une durée moyenne d'ensoleillement de **6 h** par jour, équivalent à une irradiation solaire globale moyenne de **1607 kWh/m² par an**. Cette moyenne est au-

dessus de celle de l'Allemagne (**2 à 3 kWh/m²/j et 1241 kWh/m²/an**), qui a elle seule, produit plus de 45 TWh par an depuis 2018 [7]. Par comparaison, le gisement solaire est inexploité, en Côte d'Ivoire. Le déploiement des systèmes solaires, aussi bien pour la filière photovoltaïque que thermique, reste très lent voire même à l'étape embryonnaire. En effet, plusieurs centrales solaires à savoir Korhogo solaire (25 MWc), Poro Power (66 MWc), CI-ENERGIES (37,5 MWc) sont en phase de projet ou d'avant-projet. Et plusieurs autres centrales sont en phase d'étude de faisabilité. L'exploitation de ces projets pourrait accélérer l'électrification rurale [8].

Au titre des gisements en biomasse, la Côte d'Ivoire a une économie basée sur l'agriculture, essentiellement des cultures de rentes. Elle produit du café, du cacao, et de l'hévéa, en grande quantité ; puis de l'huile de palme, des noix de cajou, et de la canne à sucre, à quantité moyenne. Chaque année, après les récoltes, des millions de résidus sont abandonnés, et souvent exploités sous forme de bois de chauffe, de charbon de bois, de résidus agricoles, d'agro-industriels et forestiers. Pourtant, ces déchets peuvent, être valorisés afin de produire de l'électricité ou même du biocarburant, sous forme liquide, solide et gazeuse en utilisant des procédés chimiques.

Au titre des gisements éoliens, la Côte d'Ivoire ne dispose pas actuellement d'atlas permettant d'avoir une idée précise du gisement éolien. Les seules données disponibles relèvent des applications météorologiques et indiquent des vitesses de vent inférieures à 4 m/s, à environ 50 m de hauteur, entre 4 et 6 m/s pour des hauteurs allant de 100 à 150 m et entre 6 à 7 m/s pour une hauteur de 200 m [9].

L'utilisation de toutes ces ressources à bon escient selon l'ODD7, pourrait garantir l'accès à l'énergie à tous et surtout aux populations vivantes en Zone rurale. Aujourd'hui SE4FORALL a mis en place des programmes qui visent à déployer les énergies renouvelables pour les populations rurales mal desservies, afin d'accélérer l'électrification rurale.

Pour ainsi, nous pensons que l'utilisation des gisements de sources renouvelables pour produire de l'énergie électrique en mode décentralisée peut accélérer l'électrification rurale. L'idée étant de rapprocher les sources de production des centres de consommations. C'est dans cette optique que s'inscrit notre thèse.

Intérêts pour la compagnie Ivoirienne d'électricité

La Compagnie Ivoirienne d'Electricité (CIE), qui a financé cette thèse, a été créée en novembre 1990. La CIE assure la commercialisation de l'électricité aux usagers nationaux et internationaux (pays voisins interconnectés), l'exploitation et la maintenance des ouvrages de production, de transport, de distribution depuis plus de 30 ans.

La participation de la CIE à cette thèse a pour objectifs stratégiques de contribuer à réduire l'empreinte carbone de son activité de producteur et de gestionnaire des réseaux électriques.

Les stratégies visant à atteindre les populations qui n'ont pas accès à l'électricité mettent en œuvre diverses options, leurs raccordements aux réseaux nationaux ou régionaux existants en est une. Mais, tant que les coûts élevés du transport de l'électricité sur de longues distances rendront onéreux les projets d'extension des réseaux, les options décentralisées demeureront les réponses les plus pertinentes aux besoins des populations rurales dispersées sur de vastes territoires.

Le déploiement des mini-réseaux décentralisés est une des solutions pour l'amélioration de la qualité du produit, parce que ces réseaux isolés ne sont pas impactés par les incidents HTB ou HTA du réseau interconnecté. En plus, lorsque ces mini-réseaux sont connectés au réseau national, ils peuvent servir au réglage de la fréquence sur le réseau interconnecté en cas de nécessité.

Intérêts pour la recherche

Cette thèse est une contribution pour faciliter l'accès à l'énergie aux populations dans les zones rurales. Plusieurs thématiques scientifiques sont explorées à cet effet :

- *Méthodologie d'évaluation des besoins ;*
- *Méthodologie d'évaluation des ressources renouvelables ;*
- *Méthode d'optimisation.*

Ce travail de thèse vise donc à proposer un système hybride innovant fiable, durable et plus économique que les systèmes connus. Pour ce faire, une bonne connaissance des besoins en énergie électrique des ménages, de façon plus fiable et plus précise, est nécessaire.

Dans la littérature, plusieurs travaux de recherches [10-12], sont menés sur des modèles plus robustes pour mieux caractériser les besoins. Ces modèles permettent de générer des données précises et des algorithmes propres à chaque pays.

Notre thèse fait la comparaison de deux méthodologies de modélisation (enquêtes et mesurages), appliquée à la Côte d'Ivoire, afin de montrer les avantages et les limites de chacune d'elles. Pour au final, recommander la plus adaptée pour les localités situées en zone rurale.

Notre travail a également permis, l'élaboration d'une cartographie de référence des besoins journaliers en électricité par ménage par jour. Ce résultat est une perspective de recherche qui pourra être explorée et complétée par d'autres chercheurs et inciter d'autres scientifiques à le fiabiliser et à l'étendre à d'autres pays dans le monde, où les problématiques d'électrification se posent avec acuité.

Pour finir, notre travail apporte une contribution à la recherche sur l'accélération de l'électrification rurale par les mini-réseaux décentralisés hybrides.

Objectif de la recherche

Le travail de recherche proposé dans le cadre de cette thèse s'inscrit dans l'axe de recherche sur « l'électrification rurale ». Il s'agit pour nous de proposer une solution à caractère renouvelable durable, économique, techniquement performante et facile à mettre en œuvre en vue d'accélérer l'électrification en Côte d'Ivoire. En effet, le manque d'accès aux services énergétiques modernes constitue également un obstacle au développement des villes et surtout celles situées en zone rurale.

L'option retenue est de proposer un système énergétique qui permettra d'accélérer l'électrification rurale décentralisée.

Le sujet complet s'articule autour de quatre (04) étapes de développement complémentaires en vue d'identifier un système énergétique optimisé et adapté à l'électrification rurale :

1. *Identifier et modéliser les besoins : **demande** de consommation en électricité ;*
2. *Identifier et modéliser les ressources disponibles : **ressources disponibles** pour satisfaire ces besoins ;*
3. *Élaborer **une cartographie de référence** des consommations moyennes par jour par ménage pour les localités à électrifier ;*
4. *Identifier **les systèmes énergétiques** optimisés pour mobiliser ces ressources de façon les plus appropriés.*

Les deux premiers points ont pour objectif de développer une méthodologie de modélisation afin d'identifier et de modéliser de façon précise les besoins énergétiques des localités. Il est de toute nécessité de noter que la disponibilité de données précises est un facteur essentiel au dimensionnement optimal des systèmes énergétiques.

Le troisième point a pour objectif de fournir à tous les acteurs du secteur électrique, une base de données cartographiques des consommations moyennes par jour par ménage de toutes les localités situées sur tout le territoire national. À l'aide d'outils informatiques, statistiques et géographiques nous avons élaboré une cartographie des consommations spécifiques journalière par ménage à partir d'une base de données clientèle de la compagnie ivoirienne d'électricité CIE et des données de l'Institut national de statistique (INS).

Le quatrième point a pour objectif de proposer plusieurs systèmes énergétiques qui seront comparés afin de retenir le meilleur en se basant sur la comparaison du coût actualisé de l'énergie (LCOE), le coût total net actuel (NPC) et la rentabilité. Cette partie s'appuiera sur le logiciel de simulation énergétique HOMER PRO (Hybrid Optimization of Multiple Energy Ressources) développé par le National Renewable Energy Laboratory des États-Unis. Ce logiciel de conception de systèmes distribués d'énergie renouvelable (dimensionnement des panneaux photovoltaïques, éoliennes, batteries, systèmes hydrauliques, production combinée de chaleur et d'électricité, biomasse), a déjà montré par des cas de faisabilité la possibilité de générer des systèmes fiables, viables, durables et économiques.

Organisation du manuscrit

Ce travail de thèse comprend quatre parties, développées comme suit dans ce manuscrit :

Les **chapitres 1 et 2** concernent une étude bibliographique que nous avons réalisée autour de deux axes suivants :

- *L'électrification rurale en Afrique de l'Ouest : il fait un état des lieux du secteur électrique en Afrique de l'Ouest et en Côte d'Ivoire ;*
- *Les technologies de production d'électricité, les gisements existants : il fait un état des lieux des ressources à caractère renouvelable disponibles et un état de l'art des technologies utilisées pour la production d'électricité et enfin une analyse qui a pour but de montrer les ressources et technologies adaptées à la Côte d'Ivoire pour faciliter l'électrification décentralisée.*

Le chapitre 3, présente les travaux effectués à ELOKATO qui ont permis d'identifier et de modéliser les besoins en énergie électrique du village. Les ressources énergétiques disponibles à caractère renouvelable pour couvrir ces besoins ont été identifiées également. Dans un premier temps, il s'agissait pour nous de conduire une enquête sur le terrain, dans cette localité électrifiée, afin d'identifier les équipements électriques utilisés, les puissances appelées et les usages dans chaque ménage. Puis dans un second temps, de réaliser une étude de modélisation des besoins, qui nous a permis d'obtenir des courbes de consommations et des profils journaliers de charge à pas horaires. Enfin, nous avons proposé un modèle de base qui permettra de caractériser la demande et de concevoir des systèmes optimisés pour un village.

Le chapitre 4, est dédié en premier lieu à l'évaluation des besoins à pas horaires. Il fait l'objet d'un plan de mesurage à ELOKATO et dans trois autres villages ivoiriens pour confirmer et valider le profil de charge observé. Il s'agissait de recueillir des données de consommation précises et fiables en installant, dans chaque village, des compteurs énergétiques intelligents au niveau des transformateurs. Ces données recueillies ont permis de modéliser le profil horaire de chaque village. Ces profils ont été comparés au profil de charge obtenu à partir des données de l'enquête afin de déterminer la marge d'erreur entre les deux méthodologies. En second lieu, ce chapitre est dédié à l'élaboration d'une cartographie des besoins de consommation journaliers. Il était question dans ce chapitre d'élaborer une base de données cartographiques des consommations moyennes par jour par ménage de toutes les localités électrifiées, et de faire une extrapolation aux localités voisines non-électrifiées sur toute l'étendue du territoire national, à partir de la base de données des abonnés de la CIE et des données de population de l'INS. Cette carte serait un « atlas » des consommations spécifiques qui servirait au dimensionnement optimal des mini-réseaux décentralisés en Côte d'Ivoire.

Le chapitre 5 présente les travaux effectués dans le cadre d'une étude technico-économique des systèmes hybrides. Dans cette partie, il s'agissait de trouver le meilleur système énergétique (solution hybride) à caractère renouvelable fiable, durable et abordable qui pourra répondre de manière efficace aux besoins des localités.

Chapitre 1 : *Etat des lieux de l'électrification rurale en Afrique de l'Ouest*

I. Contexte : Electrification rurale en Afrique de l'Ouest

1. En Afrique

Avec 1.2 milliard d'habitants, l'Afrique est aujourd'hui le second continent le plus peuplé au monde, derrière l'Asie qui abrite 4.4 milliards d'habitants selon Partenariat Afrique-UE pour l'énergie [13]. Paradoxalement, c'est également la région du monde où l'on consomme le moins d'énergie. En effet, malgré la demande locale croissante, la consommation annuelle moyenne par personne s'élève à 496 kWh en Afrique subsaharienne, contre 6 944 kWh en France et 12 972 kWh aux Etats-Unis. Le niveau de consommation est étroitement lié à la quantité d'énergie produite sur ce continent dont la puissance installée est de 160.000 MW [3]. En matière d'électricité, l'Afrique est le continent des paradoxes : il est à la fois un géant énergétique par les ressources dont il dispose, et un nain électrique par les capacités réelles sur lesquelles il peut s'appuyer aujourd'hui. L'enjeu majeur est de faciliter l'accès à l'énergie à tous les Africains afin d'améliorer leurs conditions de vie.

2. La sous-région : Espace CEDEAO-UEMOA

L'UEMOA représente un ensemble plus vaste, la CEDEAO (Communauté Economique des Etats de l'Afrique de l'Ouest) regroupe des pays francophones et anglophones. Le territoire de l'UEMOA s'étend sur quatre zones climatiques (semi-arides, sahel, soudano-sahélien, tropical humide), qui entretiennent une végétation forte contrastée où on retrouve les formations désertiques au Nord, la forêt tropicale dense le long du Golfe de Guinée, en passant par de vastes espaces de savane. Il inclut deux grands bassins hydrographiques africains (Niger et Sénégal). La zone désertique saharienne constitue un immense espace aride très peu peuplé. À l'opposé, la frange littorale sud est très peuplée.

La situation énergétique des états membres de l'Union est caractérisée par un bilan énergétique dominé par l'utilisation massive de la biomasse traditionnelle (bois de feu, charbon de bois et déchets végétaux) à environ 73 %, une forte dépendance vis-à-vis des approvisionnements en hydrocarbures (21 %) ; un accès très limité à l'électricité (le taux d'électrification de l'ensemble de l'Union se situe autour de 30 %) ; la part de l'électricité dans le bilan énergétique de l'Union est d'environ 5 % (UEMOA, 2006) [14]. Aussi, au regard des risques qu'encourt la zone UEMOA, suite aux effets négatifs des changements climatiques, les États membres de l'Union n'auront d'autres choix que de s'engager dans les mesures préventives, particulièrement à travers le développement des sources d'énergies renouvelables (ENR) et l'efficacité énergétique pour satisfaire les besoins des populations en énergie. Dans l'espace CEDEAO, environ 180 millions de personnes ont des problèmes d'accès à l'électricité, soit environ 60% de la population, dont 77 % vivent en milieu rural. Seulement 45 % de la demande en énergie est satisfaite et la consommation énergétique par tête d'habitant n'est que de 150 kWh/jour, soit l'une des plus faibles au monde. L'enjeu majeur est que les états membres puissent orienter leur production vers les énergies renouvelables afin de répondre aux besoins en électricité de manière rapide et d'être moins dépendant des hydrocarbures.

3. En côte d'ivoire

La situation actuelle de l'accès à l'électricité en Côte d'Ivoire fait ressortir que seulement 2 915 688 ménages sur un total de 5 301 251 ménages bénéficient officiellement de l'électricité, soit un taux de desserte de 55 % en 2020, selon le rapport d'activités 2020 de l'ANARE-CI [15]. Selon, l'Institut National de la Statistique, environ 90 402 ménages utilisent pour l'éclairage, des panneaux solaires PV, soit un taux de 2 % [16]. Par ailleurs, en ce qui concerne l'accès aux énergies domestiques modernes pour la cuisson, le PANER révèle que seulement 9 % des ménages ont accès aux foyers améliorés contre 20 % pour le Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) uniquement dans les zones urbaines [17]. Il ressort de l'ensemble des constats relevés en matière d'énergie, que la part de la population utilisant le bois de chauffe et les techniques traditionnelles énergivores pour la cuisson, demeure encore importante en Côte d'Ivoire. Le défi reste toutefois énorme, afin de garantir l'accès à l'énergie à l'ensemble des populations ivoiriennes dans le même horizon et au-delà en 2030, année horizon de l'Agenda d'Action pour l'accès à l'énergie durable pour tous.

De ce fait, et sur la base du constat de l'écart entre le taux d'accès à l'électricité de 77 % en 2014 et le taux de desserte de l'électricité aux populations de 32 %, le gouvernement a adopté en Conseil des ministres en mai 2014, le « Programme Électricité Pour Tous (PEPT) » [18]. Ce programme vise à raccorder 200 000 ménages par an sur la période 2014-2020, associé aux 50 000 ménages raccordés par an par le système classique, de manière à doubler d'ici 2020 le nombre de raccordements aux réseaux. Pour de nombreux observateurs, comme Stéphane Madou, (L'Afrique des Idées, 2012) [19], il est urgent de mener des réformes structurelles dans différents secteurs d'activités en Afrique, notamment en Afrique de l'Ouest et plus particulièrement en Côte d'Ivoire. Dans le domaine de l'électricité, un constat s'impose : un habitant en Côte d'Ivoire consomme en moyenne **170 kWh** par an, tandis qu'aux Etats Unis, ce chiffre s'élève à **14 170 kWh** et en France à **6 890 kWh**.

II. Etats de lieux de la situation de l'électrification rurale en Afrique et en Côte d'Ivoire

1. Etat des lieux des politiques énergétiques

1.1. La mise en place des Politiques Energétiques

Toute politique énergétique est d'abord fondée sur les caractéristiques propres du pays qui la met en œuvre : dotation en ressources énergétiques, climat, niveau de vie, structure de l'économie, densité du territoire, taux de motorisation, taux d'électrification, etc. L'épuisement probable des énergies fossiles, la prise de conscience pour la sauvegarde de l'environnement, la nécessité de lutter contre le réchauffement climatique, et enfin la prise en compte du développement durable, conduisent de façon générale à adopter une politique de l'utilisation des énergies renouvelables (Catherine Tissot-Colle Jean Jouzel, 2013) [20].

1.2. La mise en place de politiques énergétiques CEDEAO-UEMOA

La politique d'efficacité énergétique de la CEDEAO a été adoptée par la 43^e session ordinaire de la Conférence des Chefs d'État et de Gouvernement de la CEDEAO, tenue à Abuja, au Nigéria les 17 et 18 juillet 2013. Le système énergétique de l'Afrique occidentale est confronté aux défis interdépendants de l'accès à l'énergie, de la sécurité énergétique et de la dégradation de l'environnement (notamment dû à la déforestation et au changement climatique). En effet, les raisons sont diverses : crises politiques, demande électrique en forte hausse, augmentation des prix du diesel et des carburants, coûts de la production et des tarifs élevés, sous-investissement, réformes du secteur trop lentes.

Le plan d'action sur l'efficacité énergétique de la CEDEAO s'appuie sur six initiatives clés, chacune ayant pour composantes : politique, renforcement de capacités, sensibilisation et financement. Au cours des dernières années, la région de la CEDEAO a traversé une crise énergétique qui entrave le développement économique et social et affecte particulièrement les populations à faible revenu. Bien que des difficultés persistent, la Politique d'Efficacité Énergétique de la CEDEAO (PEEC) s'est engagée dans un objectif, qui vise à mettre en place un solide cadre institutionnel, les bases des efforts pour changer et progresser vers une économie énergétiquement efficace. Certes, des efforts sont louables, mais on note qu'une majorité de la population d'Afrique de l'Ouest, aujourd'hui, n'a pas accès aux services énergétiques modernes essentiels.

En outre, les pays de la CEDEAO ont reconnu l'importance de l'accès aux services énergétiques, notamment le besoin de subvenir aux besoins énergétiques des ménages modestes, des zones urbaines et péri-urbaines, et des femmes.

1.2.1. L'élaboration du Livre Blanc CEDEAO/UEMOA

L'adoption, par les chefs d'État de la CEDEAO et de l'UEMOA, d'une stratégie pour améliorer l'accès aux services énergétiques [21] (Bamako, mai 2005) a conduit à l'élaboration du « Livre Blanc ». Le Livre Blanc est avant tout, l'affirmation de la volonté de quinze (15) États Membres d'Afrique de l'Ouest, de coordonner leurs efforts autour d'une politique commune ambitieuse. L'objectif en dix ans, est de multiplier par quatre l'accès aux services énergétiques modernes en zones rurales et périurbaines. En 2008, le taux moyen d'accès à un service électrique dans les pays d'Afrique subsaharienne est de 16 % des foyers au total, et moins de 5 % en zones rurales (IEPF : Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie, 2008) [22]. Depuis les années 1990, si le pourcentage a favorablement évolué, le nombre de personnes n'ayant pas accès à l'électricité a quant à lui augmenté, en raison de la croissance démographique. Ainsi, l'infrastructure électrique, n'atteint généralement que moins de 20% des localités, et ne permet donc pas de soutenir un développement économique et social durable des usages productifs (irrigation pour l'agriculture, réfrigération, force motrice, etc.) ni des services sociaux de base (dispensaires, ...) sur l'ensemble du territoire. L'énergie, dans un contexte de développement, nécessite que le rôle qu'elle joue dans l'amélioration des conditions de vie des populations pauvres soit pleinement compris. En effet, l'énergie impacte profondément le bien-être des individus, que ce soit à travers l'accès à l'eau, la productivité agricole, la santé, l'éducation, la création d'emploi ou la durabilité environnementale.

1.2.2. Les synergies de la PERC (Politique des Energies Renouvelables de la CEDEAO - UEMOA)

Parmi les 300 millions de citoyens de la CEDEAO, seuls 126 millions d'habitants ont aujourd'hui accès à l'électricité, 75 % d'entre eux vivent en ville. Par compte, 175 millions d'habitants n'ont pas accès à l'électricité et 77 % d'entre eux vivent en zones rurales [23]. Pourtant, les sources d'énergie renouvelables sont largement disponibles et les coûts de certaines solutions technologiques décentralisées d'alimentation électrique se rapprochent de ceux des réseaux classiques interconnectés, comme c'est le cas des minicentrales hydroélectriques, de la biomasse et de l'énergie éolienne. La PERC crée des synergies et complète la politique en matière d'efficacité énergétique de la CEDEAO [23]. Les principaux objectifs, consistent à mobiliser les options additionnelles d'énergies renouvelables, à moyenne ou grande échelle, qui pourraient à long terme réduire le recours aux sources d'énergies fossiles (charbon, gaz, ...), génératrices de CO₂ et de gaz à effet de serre avec un fort impact sur l'environnement.

1.3. La mise en place de la politique énergétique de la Côte d'Ivoire

La stratégie d'intervention dans le domaine de l'énergie repose sur plusieurs axes à savoir l'extension des réseaux électriques en zone périurbaine dans les grandes villes. Puis par l'électrification sociale en milieu rural par l'énergie conventionnelle et par système solaire photovoltaïque décentralisé. Aussi, elle repose sur la promotion des branchements subventionnés en zone rurale et périurbaine, la diffusion de foyers améliorés en milieux ruraux et périurbains.

Malgré l'ensoleillement important dont bénéficie la Côte d'Ivoire, les initiatives de production d'électricité par le solaire photovoltaïque restent encore embryonnaires dans les zones rurales et périurbaines.

67 % de la population rurale vit actuellement sans électricité. Malgré le programme ambitieux du Gouvernement d'électrifier, à partir de 2012, 200 localités rurales par an, par réseau interconnecté, certaines localités ne le seront pas du fait de leur éloignement au réseau électrique et donc du coût que cela pourrait engendrer. A travers le PND [24] 2012-2015, l'Etat, dans sa politique d'amélioration des conditions de vie des populations ivoiriennes, envisage d'autres options pour fournir de l'énergie électrique à moindre coût dans les localités isolées et éloignées du réseau électrique interconnecté, notamment l'électrification par système solaire photovoltaïque. A l'horizon 2030, à travers la mise en œuvre du programme PRONEX, la Côte d'Ivoire compte étendre et renforcer les réseaux de distribution dans 32 chefs-lieux de régions, 75 chefs-lieux de département, 239 Sous-préfectures et dans les villes et villages de la Côte d'Ivoire.

1.3.1. Cadre réglementaire

Le cadre institutionnel, légal et réglementaire de 1985 qui présentait quelques dysfonctionnements et qui était inadapté pour l'atteinte des objectifs fixés, dans le contexte actuel du secteur de l'électricité : accélération de l'électrification rurale, émergence des énergies de sources renouvelables et d'autres aspects liés à la sécurité d'approvisionnement, et à l'environnement n'étaient pas prises en compte par le législateur. A cela s'ajoutait le manque de précision des missions des différentes structures et l'augmentation des coûts de la régulation. Pour pallier ces insuffisances, l'Etat de Côte d'Ivoire a alors décidé de doter le secteur électrique d'un code de l'électricité régis par la loi n° 2014 – 132 du 24 mars 2014 [25].

1.3.2. Code de l'électricité 2014

Ce nouveau code de l'électricité libéralise les activités de transport, de distribution, d'importation et d'exportation, et de commercialisation de l'électricité, les faisant ainsi sortir du monopole de l'Etat. Cependant, l'Etat demeure très lié avec les principaux opérateurs et très présent dans la régulation de la concurrence, afin de maintenir l'équilibre entre l'offre et la demande et de stabiliser les tarifs. Tout opérateur qui souhaite intervenir dans le secteur de l'électricité sur le territoire ivoirien doit signer une convention avec l'Etat qui précise l'activité qu'il exercera et ses obligations. L'énergie s'inscrit au cœur des stratégies de développement de la Côte d'Ivoire. Les trois axes clés du développement durable (économie, social et environnement) sont concernés.

En référence au code de l'électricité (loi n° 2014-132 du 24 mars 2014, portant code de l'électricité) [25], il est mentionné que l'opérateur chargé de la gestion des ouvrages de distribution appartenant à l'Etat est tenu, d'exploiter et d'entretenir les ouvrages de distribution, de veiller à la disponibilité et à l'utilisation optimale de ces ouvrages de distribution, d'assurer la sécurité de l'exploitation de ces ouvrages de distribution ainsi que la fiabilité et l'efficacité desdits ouvrages. Pour conduire l'ensemble du processus, des plans directeurs ont été également conçus.

2. Etat des lieux des plans directeurs

2.1. La mise en œuvre des Plans Directeurs

La Côte d'Ivoire s'est engagée dans une vision globale, de faire du pays le leader du marché Ouest africain de l'énergie électrique [26], pour ce faire, des stratégies sont menées et des plans directeurs sont conçus, notamment la conception du plan de développement de ses infrastructures qui est en adéquation avec ses objectifs fixés de manière à mettre à la disposition du consommateur ivoirien une énergie électrique propre, fiable et abordable. A cet effet, quatre plans directeurs couvrant l'ensemble des segments de la production, du transport, de la distribution d'énergie et la supervision de conduite du système électrique ont été mis en place. Ces plans, dont la mise en œuvre est en cours, ont permis d'identifier tous les investissements du secteur de l'électricité, pour permettre à la Côte d'Ivoire de réussir sa transition énergétique à l'horizon 2030 (Ministère des Mines et de l'énergie en Côte d'Ivoire, 2018). Le tableau ci-dessous, présente les différents plans directeurs.

Tableau 1. Présentation des plans directeurs [Source : CI-ENERGIES, 2016]

PLANS DIRECTEURS	TYPE	ANNEE DE REALISATION
Plan directeur Production-Transport 2014-2030	Étude	2013
Plan directeur Distribution	Étude	2014
Plan directeur automatisme-télé-conduite	Étude	2015
Plan directeur électrification rurale	Étude	2015

2.2. Plan Directeur sur la Production-Transport 2014

a. Production de l'électricité

En référence à la loi n° 2014-132 du 24 mars 2014 portant code de l'électricité, la production est l'ensemble des opérations de conversion de toute source d'énergie, y compris les énergies de sources renouvelables, en énergie électrique. L'énergie électrique est une énergie secondaire produite à partir de différentes sources d'énergie primaire qui sont transformées dans différents lieux. En Côte d'Ivoire, la production totale d'électricité en 2020 qui s'établit à 11 210 GWh, dont 70 % issue du thermique et 30 % de l'hydraulique, enregistre une croissance de 5,6 %. Cette hausse découle principalement de la mise en service des premières unités du barrage hydroélectrique de Soubré (+1 479 GWh) selon la CIE [18] (CIE, 2020). En Côte d'Ivoire, l'objectif visé à travers le mix énergétique de production de l'électricité est de 42 % de part des énergies renouvelables en 2030, composé de 26% de grande et moyenne hydroélectricité et de 16 % des autres sources d'énergie renouvelables associées à la petite hydroélectricité. Trois sources d'énergie renouvelable ont été identifiées pour atteindre l'objectif des 16% de mix énergétique. Il s'agit, d'une part de l'exploitation des sites de petites hydroélectricités (moins

de 10 MW), d'autre part, de l'exploitation du potentiel de la biomasse et enfin du développement du potentiel solaire photovoltaïque du pays (CEREEC, 2014) [27].

b. Transport de l'électricité

L'électricité se transporte facilement et rapidement. Des lignes électriques livrent l'électricité depuis la centrale électrique jusqu'aux zones de consommation. La planification du réseau HTB commence par la détermination du réseau cible à l'horizon de l'étude. La création du réseau cible nécessite tout d'abord de répartir la charge entre les postes existants et futurs. En outre, les nouvelles unités de production doivent être connectées au réseau haute-tension. L'étude du Plan Directeur Production-Transport 2014-2030 identifie et planifie les investissements en matière de renforcement du parc de production et du réseau électrique Haute Tension, en vue de satisfaire, de manière fiable, la demande nationale croissante et les ambitions d'exportation de la Côte d'Ivoire. La puissance installée du parc de production passera de 2 229 MW en 2020 à 4 663 MW en 2030, soit un accroissement net total de 2 434 MW [28] (CI-ENERGIES, 2020).

2.3. Plan directeur de Distribution 2014

Les activités de distribution et de commercialisation peuvent être exercées par un ou plusieurs opérateurs à partir d'une convention conclue avec l'Etat, sous réserve des dispositions de l'article 8 de la présente loi. La convention est conclue pour un périmètre donné et pour une durée déterminée. Les conditions et modalités de conclusion de la convention ainsi que sa nature sont précisées par arrêté interministériel. Les ouvrages de distribution appartenant à l'Etat peuvent être concédés à un ou plusieurs opérateurs. Relevons que, selon l'Article 23, tout opérateur de distribution est tenu d'intégrer dans le périmètre déterminé par la convention conclue avec l'État, toute nouvelle installation de distribution qui lui est désignée par le Ministre chargé de l'énergie.

2.4. Plan directeur de l'Electrification Rurale PDER

Initié depuis 2013, PRONER (Programme National d'Electrification Rurale) a déjà permis d'électrifier 4 600 villages de plus de 500 habitants à la fin 2017, pour la Côte d'Ivoire qui a un taux de couverture de 80 %, avec une capacité de 2 229 MW. L'enjeu est de mettre à portée des populations de l'électricité, via le réseau national interconnecté. Le PRODINCI s'annonce comme l'un des plus grands projets jamais réalisé dans le secteur de l'énergie en Côte d'Ivoire. Il permettra d'améliorer considérablement l'accès à l'électricité et de faire passer le taux de couverture nationale de 80 % à 100 % comme l'ont indiqué les autorités. Il faut noter que d'un coût global de 818.6 millions de dollars US, soit 460 milliards de FCFA, les travaux du PRODINCI vont s'achever en juillet 2020. Le financement est assuré à hauteur de 95 % par Exim Bank China et 5 % par l'État. C'est donc, un projet de haute portée sociale et économique qui permet de développer des activités économiques dans toutes les régions couvertes, en facilitant l'autonomisation des femmes, l'amélioration des conditions de vie en zones rurales, la création d'emplois, etc. Ce choix stratégique, dira-t-il, a fait passer la Côte d'Ivoire d'une capacité installée de 1 931 MW en 2011 à 2 200 MW, avec l'ambition de la porter à 4 663 MW en 2030 [28].

3. Etat des lieux des programmes mis en place

3.1. La mise en œuvre des différents programmes à travers le programme PRONER

En juillet 2013, dans l'élan de rattraper son retard et d'être un hub énergétique pour les pays de la sous-région, le Gouvernement ivoirien adoptait le Programme National d'Electrification Rurale (PRONER). Il a pour objectif : l'accès équitable des populations à l'électricité, l'électrification de toutes les localités ayant au moins 500 habitants avant 2018 à raison de 500 localités par an. Ce programme a permis à 1 800 000 habitants d'avoir accès à l'électricité, portant ainsi le taux d'accès de l'électricité à 82 %, en 2017. Cela a permis la création d'emplois, la création de valeur ajoutée et le développement local contribuant à la lutte contre la pauvreté en milieu rurale. L'électrification des localités restantes se fera dans l'avenir dans la deuxième phase du PRONER à l'aide de nouveaux programmes d'accompagnement.

3.2. Programmes d'accompagnement pour la mise en place du PRONER

3.2.1. Programme National d'extension des réseaux de distribution : PRONEx

La Côte d'Ivoire compte aujourd'hui 6 781 localités électrifiées sur 8 518 localités. Environ 1 737 localités ne sont pas encore électrifiées et ne sont pas prises en compte dans le programme d'électrification PRONER. Ainsi, le Programme National d'Extension des réseaux de distribution PRONEx vient accompagner le programme national d'électrification rurale et a pour objectif d'électrifier les villes et villages qui ne sont pas pris en compte dans ces programmes. À cet effet, le PRONEx a pour ambition d'étendre le réseau électrique dans toutes les parties de la Côte d'Ivoire aux bénéfices des populations et aux soutiens des activités socio-économiques. Il consistera à réaliser l'extension des réseaux de distribution jusqu'à l'horizon 2030, de 33 Chefs-lieux de région, 75 chefs-lieux de département et le reste des localités.

3.2.2. Programme Electricité Pour Tous : PEPT

Dans le souci que toute sa population ait accès à l'électricité, le Programme d'Electricité pour Tous (PEPT), défini et adopté par le gouvernement, permet aux clients n'ayant pas les moyens de bénéficier d'un branchement et d'un abonnement contre le paiement initial de 1000 FCFA, et le restant échelonné pendant une période de 10 ans sur les factures d'électricité. Ce projet permettra d'atteindre plus de 200 000 nouveaux abonnés chaque année sur tout le territoire national et vise environ 3,5 millions de personnes.

Tableau 2. Programmes d'électrification rurale [Source : CI-ENERGIES, 2016]

PROGRAMMES D'ELECTRIFICATION RURALE	TYPE	ANNEE DE REALISATION
Programme National d'Electrification Rurale : PRONER	Projet	2013
Programme Electricité Pour Tous : PEPT	Programme	2014
Programme Nationale d'Extension des réseaux de distribution : PRONEx	Programme	2017
Projet d'Electrification Décentralisée : ERD	Projet	2017
Programme de Développement Des Énergies Renouvelables Et De L'Efficacité Énergétique : PRODERE	Programme	2018
ECLER IVOIRE (Programme FED d'amélioration de l'Efficacité Energétique [EE] dans les bâtiments publics & d'électrification rurale décentralisée par les énergies renouvelables)	Programme	2020

4. Etat des lieux du secteur électrique Africain et en particulier ivoirien

4.1. Etat des lieux du secteur électrique Africain

L'état actuel des capacités de production et de l'offre nécessite de plus en plus des efforts importants pour satisfaire la demande en électricité des populations africaines. La capacité installée de toute l'Afrique est de 114 GW pour un milliard d'habitants, et équivaut donc approximativement à celle de l'Allemagne qui compte 82 millions d'habitants [29]. Si l'on considère uniquement l'Afrique subsaharienne, la capacité installée n'est plus que de 74 GW pour 860 millions d'habitants, soit à peu près celle de l'Espagne avec ses 45 millions d'habitants. En effet, avec 10 % des réserves hydrauliques mondiales, économiquement exploitables, avec près de 10 % des réserves mondiales prouvées de pétrole, 8 % des réserves mondiales de gaz, et 6 % des réserves mondiales de charbon, le continent africain offre un gisement considérable de potentiels et de ressources énergétiques. Sans oublier le formidable potentiel solaire, ni les gisements géothermiques de l'est du continent, ou encore les gisements éoliens sur les zones littorales, ainsi que le gisement de la biomasse, avec 60 % des terres arables encore non cultivées dans le monde se situant en Afrique subsaharienne [30]. Autrement dit, la ressource est disponible et diversifiée, tant dans sa répartition géographique que dans sa nature, tandis que les ressources en énergies renouvelables offrent de réelles perspectives pour un développement électrique faiblement carboné. C'est un tableau très enviable, qui contraste fortement avec la situation de déficit électrique constatée sur une large partie du continent africain.

4.2. Etat des lieux du secteur électrique ivoirien

4.2.1. Au niveau de la production

La Côte d'Ivoire dispose d'un important potentiel hydroélectrique estimé à plus de 1 600 MW [17]. Pour CI-ENERGIES [28], la Côte d'Ivoire envisage de doubler sa capacité à 4 633 MW à l'horizon 2030. Cette politique, annoncée par les autorités, vise donc la mise en valeur des gisements naturels et l'utilisation des EnR pour produire davantage l'électricité.

La Côte d'Ivoire peut compter sur ses barrages notamment, le Barrage de Buyo, le Barrage de Kossou, le Barrage de Soubré, le Barrage d'Ayamé et le barrage de Taabo, mais surtout sur ces gisements naturels.

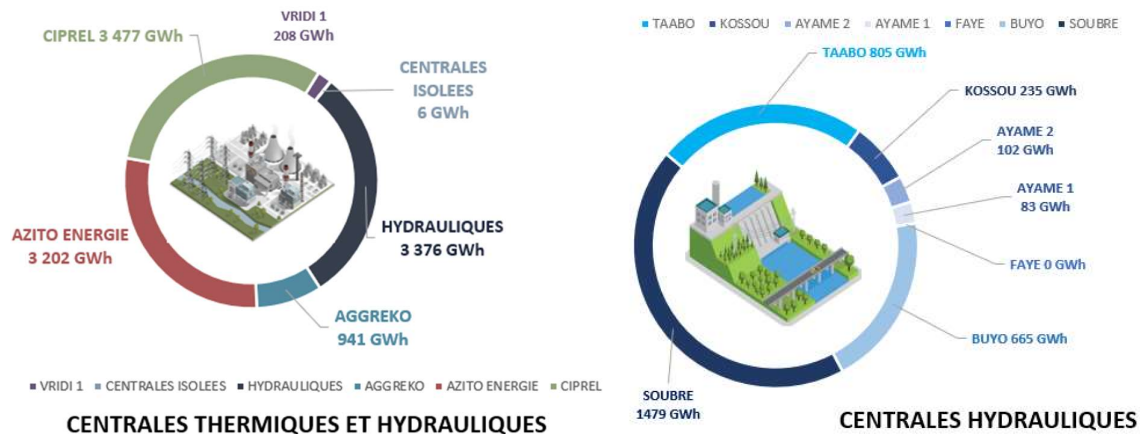


Figure 2. Energie produite par chaque centrale hydraulique et thermique [Source : CIE]

Au terme de l'année 2020, la puissance totale installée est de 2 214 MW, répartie entre 60 % du thermique soit 1 335 MW et 40 % de l'hydraulique soit 879 MW. La production brute d'énergie de la Côte d'Ivoire est de 11 210 GWhs. L'énergie thermique, produite à partir de combustibles fossiles, représente 70 % de la production nationale contre 30 % pour l'hydraulique. Cela représente environ 7 834 GWh d'énergie produite par le thermique et 3 376 GWh d'énergie produite par l'hydraulique. La consommation brute nationale, s'élève à 9 788 GWh.

Quant à l'exportation de l'énergie électrique, elle représente 11.9 % de la production nationale brute soit 1 333 GWh. Elle est en hausse de 6.9 % par rapport à l'année 2019.

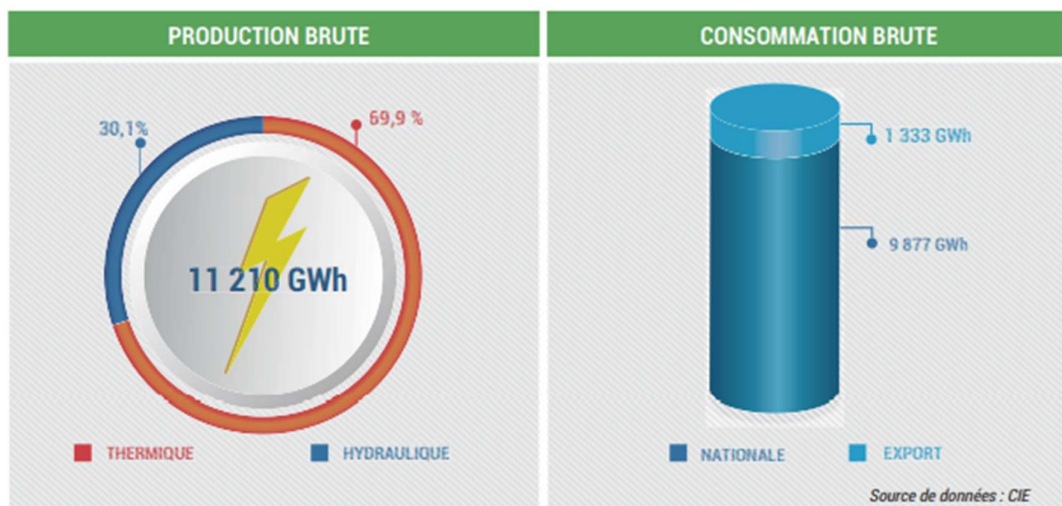


Figure 3. Répartition de la production et de la consommation brutes en 2020 [Source : CIE]

4.2.1. Au niveau du transport

Dans le but de rendre ses installations plus performantes, la Côte d'Ivoire les a renforcées, puis a privilégié l'extension de son réseau, que ce soit en haute, moyenne tension. En 2020, la Côte d'Ivoire s'est dotée d'un réseau de transport constitué de 7 103 km de lignes de réseau HTB, de trois lignes transfrontalières (Mali, Burkina-Faso, Ghana) et d'autres projets d'interconnexion.

En 2020, le nombre de postes sources s'établissaient à 65 (Nombre de postes 225kV : 27 ; nombre de postes 90kV : 38) et 175 transformateurs [(Nombre de transformateurs 225/90kV HTB/HTB : 32) ; (nombre de transformateurs HTB/HTA, 225kV/HTA et 90kV/HTA : 143)]. Avec un rendement de transport de 95 % [18].

4.2.2. Au niveau de la distribution

La Côte d'Ivoire, dans l'optique que toutes les populations aient accès à l'électricité, a renforcé ses lignes de distribution. En 2020, le réseau de distribution était composé de 23 795 km de longueur de ligne basse tension (BT), 26 163 km de longueur de ligne moyenne tension (HTA). Le rendement de distribution s'établissait à 87 % [18].

Le Programme Électricité pour Tous (PEPT), initié par l'État, permet de raccorder 300 000 branchements par an au réseau interconnecté. Cela permet de donner l'accès à un nombre important de localités nouvellement électrifiées et de favoriser également l'accès à une énergie de qualité dans les zones périurbaines.

Au titre de l'éclairage public, 700 442 foyers permettaient d'assurer la sécurité des grandes artères dans les zones urbaines et dans certains villages électrifiés.

4.2.3. Au niveau de la commercialisation

La CIE gère 2 903 633 abonnés au réseau électrique en basse tension (BT) et 6 055 abonnés au réseau en Haute tension (HTA). Soit un portefeuille total de 2 915 688 clients. Pour faciliter l'accès à ses services, 95 agences commerciales couvrent l'ensemble du territoire ivoirien.

Afin de garantir un approvisionnement de qualité en continu, un service de dépannage gratuit est disponible pour tous les usagers, pour ce faire, le centre de relation client, joignable au numéro 179 [18] permet de prendre en compte toutes les requêtes des clients 24h/24,7j/7.

4.2.4. Indicateur de performance

Grâce à d'importants programmes engagés par l'Etat, la Côte d'Ivoire compte aujourd'hui plus de 6 781 localités électrifiées sur un total de 8 518 localités [28]. Soit un taux de couverture (*Nombre de localités électrifiées/Nombre total de localités*) d'environ 80 %. En effet, en 2019, 919 localités ont été électrifiées contre une prévision de 917 localités, un niveau record dans l'histoire de la Côte d'Ivoire. Cette année-là, la Côte d'Ivoire a électrifié plus de localités que durant les périodes 2001-2010 (879 villages électrifiés) et 1994-2000 (652 localités électrifiées) CI-ENERGIES [28]. Au premier semestre de 2020, plus de 471 localités ont été électrifiées, soit un total de 1 330 localités entre 2019-2020. Environ, 1 737 localités ne sont pas encore électrifiées. Mais, ces localités, situées majoritairement dans les zones rurales dont la population ne dépasse pas 500 habitants et se trouvant à plus de 20 km du réseau, ne sont pas prises en compte dans le programme d'électrification rurale. Mais elles seront prises par les nouveaux programmes en cours d'élaboration, tels que le PROSER, PARIS, Banque mondiale 2, PRONEX, afin d'atteindre l'objectif de l'électrification totale de la Côte d'Ivoire à l'horizon 2030.

Le taux d'accès à l'électricité (*Population des localités électrifiées / Population totale*) suit une croissance exponentielle, et est selon ANARE [15] de 98 %. Même si la progression est bonne comme le confirment les autorités, elle reste toutefois confrontée à des difficultés de disponibilités des ressources allouées. Ces difficultés devraient être surmontées par la mobilisation davantage de ressources pour accélérer la mise en œuvre des programmes et l'étendre ensuite aux campements.

En 2020, plus de 10 millions d'habitants avaient accès à l'électricité. Les usagers ayant des revenus faibles, bénéficient d'un tarif social à travers le Programme Electricité Pour Tous (PEPT). La Côte d'Ivoire compte aujourd'hui 2,9 millions d'abonnés, inscrits dans les bases de données de la CIE, équivalent à 2,9 millions de ménages ayant l'électricité sur un total de 5,3 millions total de ménages (en raison de 5 personnes par ménage selon Institut National de Statistiques), soit un taux de desserte (*Nombre de ménage ayant l'électricité/Nombre total de ménages*) de 55 % [18].

Le réseau électrique interconnecté ivoirien devient de plus en plus performant, avec un Temps Moyen de Coupure (TMC) qui s'établit à 16h en 2020, contre 40h en 2014. Cela grâce aux différents plans d'actions d'amélioration de la qualité de produit engagés par la CIE et aux projets initiés par l'Etat.

4.2.5. Réalisation en cours

Dans le but d'améliorer les performances énergétiques de la Côte d'Ivoire, plusieurs projets de production d'électricité sont en cours de réalisation, à savoir les centrales hydroélectriques (centrales hydroélectriques de Singrobo de 44MW et de Gribopopoli de 112 MW), les centrales thermiques gaz (Azito IV : Turbine à gaz 179 MW- Turbine à vapeur 74 MW ; Ciprel 5 : Turbine à Gaz 255 MW- Turbine à vapeur 135 MW), les centrales de biomasse (Biovea de 46 MW) [28]. La politique du mix énergétique est donc en application et rejoint l'objectif que s'est fixée la Côte d'Ivoire de voir, en 2030, 42 % de sa production provenir d'énergies renouvelables.

4.2.6. Perspectives

À l'horizon 2030, la Côte d'Ivoire prévoit d'atteindre une capacité de production de 4 663 MW, avec 42 % d'énergies renouvelables. La Côte d'Ivoire prévoit électrifier toutes les localités restantes à l'horizon 2030, afin d'avoir un taux de couverture de 100 % et un accès à l'électricité pour tous. Elle voudrait également doubler sa capacité d'exportation vers les pays de la sous-région.

5. Les différents modes de l'électrification rurale

5.1. Le raccordement au réseau électrique par intensification de la construction et extension du réseau de transport et de distribution

Le raccordement au réseau électrique en Côte d'Ivoire se fait en trois (03) étapes. Il commence par la construction de centrales de production, puis se poursuit par la création de lignes de transport haute tension et de transformateurs HTB/HTA, et enfin se termine par la construction de lignes de distribution moyenne tension et de postes de transformation HTA/BT pour desservir les usagers (voir Figure 4).

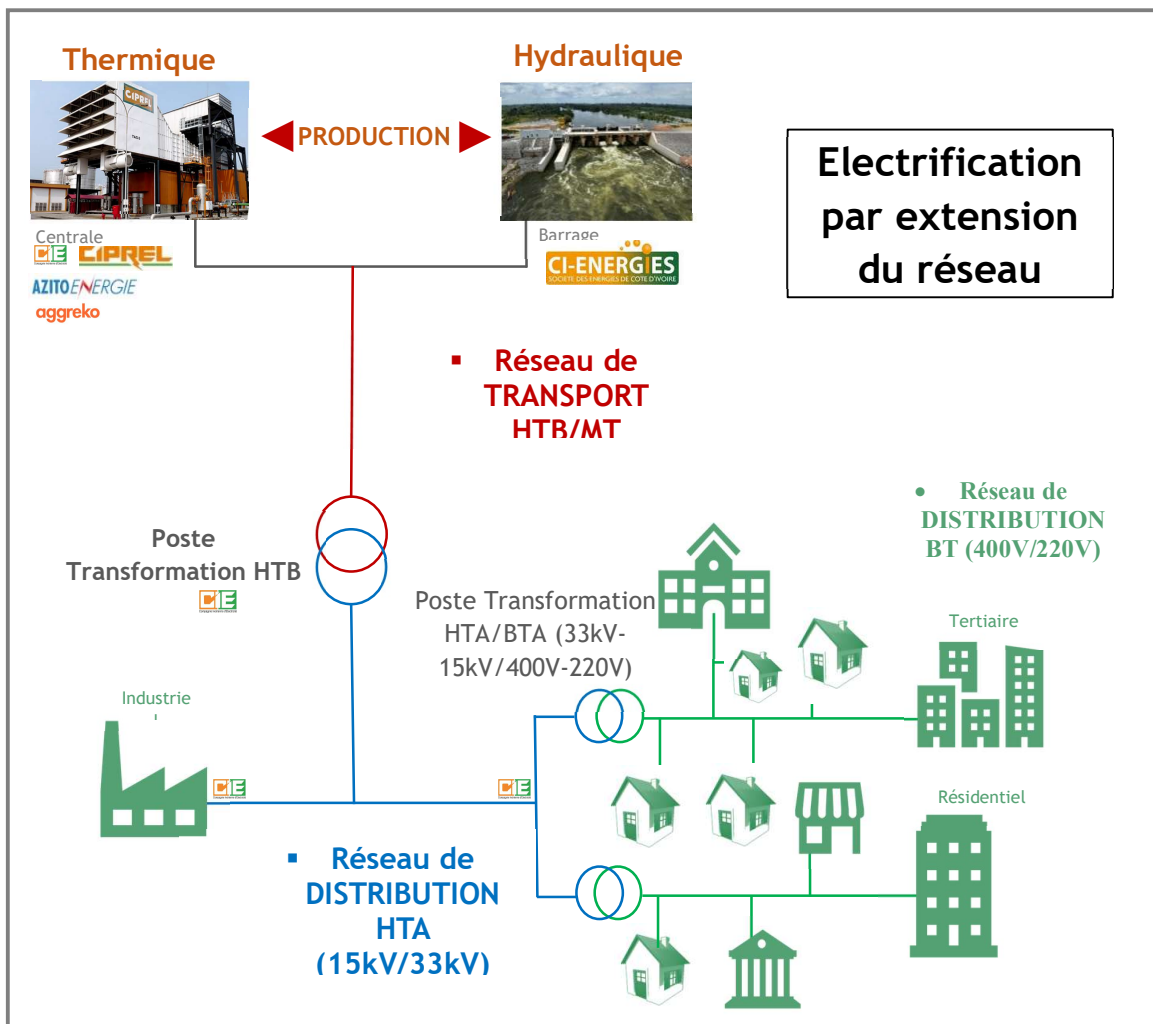


Figure 4: construction et l'intensification des extensions de réseaux HTA/BT

5.1.1. Le réseau de transport HTB/HTA

Les réseaux de transport sont de haute tension (**HTB/HTA** : de 50 kV à 400 kV) et ont pour but de transporter l'énergie des grands centres de production vers les régions consommatrices d'électricité. Les postes sources HTB/HTA sont parfois alimentés en antenne, mais le plus souvent, ils sont alimentés avec un jeu de barres recevant plusieurs arrivées (ou lignes) HTB.

Un ou plusieurs transformateurs HTB/HTA sont raccordés sur ces jeux de barres HTB simples ou multiples. En aval de ces transformateurs, des départs HTA partent un ou plusieurs jeux de barres HTA. Ainsi, les grandes puissances transportées imposent des lignes électriques de fortes capacités de transit, ainsi qu'une structure maillée (ou interconnectée). Les réseaux maillés garantissent une très bonne sécurité d'alimentation, car la perte de n'importe quel élément (ligne

électrique, transformateur ou groupe de production) n'entraîne aucune coupure d'électricité, si l'exploitant du réseau de transport respecte la règle dite du "N-1" (possibilité de perdre n'importe quel élément du réseau sans conséquences inacceptables pour les consommateurs).

Les réseaux de transport d'énergie électrique en Côte d'Ivoire sont de haute tension HTB (de l'ordre de 90 à 400 kV), et ont pour but d'assurer à l'échelle nationale ou régionale la fourniture d'électricité. L'énergie électrique y est injectée essentiellement par le réseau de transport via des transformateurs, mais également par des centrales électriques de moyennes puissances (inférieures à environ 100 MW).

5.1.2. Le réseau de distribution HTA/BT

Contrairement aux réseaux de transport, les réseaux de distribution présentent une grande diversité de solutions techniques à la fois selon les pays concernés, ainsi que selon la densité de population. Le tableau 3, ci-dessous donne une visibilité du réseau de distribution en moyenne tension et en basse tension des niveaux de tensions 220 V et 380 V.

Tableau 3: Réseau de distribution en moyenne tension (HT) et en basse tension (BT) des niveaux de tension de 220 V et 380 V [Sources : CI-ENERGIES et CIE].

Année	Réseau HTA (Km)	Réseau BT (Km)	Nombre de Postes				Nombre de localités électrifiées	Nombre de centrales isolées	Nombre de foyers éclairage publics
			HTA/BT	HTA/HTA	HTB/HTA	HTB/HTB			
2020	26 163	23 795	14 033	11	143	32	6 781	35	700 442
2018	24 026	21 651	8 303	8	118		4 160	44	483 915
2017	24 027	21 233	12 326	11	104		4 614	49	467 549
2016	23 516	20 746	11 353	49	33		4 537	49	454 195
2015	22 336	19 599	10 268	10	32		4 126	55	432 603
2014	21 718	18 737	9 801	10	32		3 274	62	414 069
2013	20 301	17 660	8 077	10	44		3 031	61	397 618
2012	20 026	17 197	7 808	10	44		2 875	66	388 425
2011	19 581	16 519	7 699	13	45		2 847	67	372 671
2010	19 377	16 133	7 760	14	43		2 832	68	364 252
2009	19 461	15 958	8 381	15	43		2 743	67	349 237
2008	18 715	15 560	8 092	58	42		2 686	67	346 130
2007	18 573	15 446	8 022	58	42		2 627	66	338 197
2006	18 304	15 162	7 848	57	42		2 595	61	333 444
2005	17 282	14 896	7 205	63	42		2 504	65	298 474
2004	17 282	14 896	7 205	58	42		2 351	61	298 474
2003	16 699	12 797	7 219	61	42		2 230	64	280 293
2002	16 012	12 097	6 952	58	42		2 157	67	253 659
2001	16 012	12 097	6 952	58	42		2 025	70	253 659
2000	15 493	11 482	6 682	56	42		1 945	73	242 331

Le réseau de distribution adopte en moyenne tension (HTA) les niveaux de tension de 15 000 V et 33 000 V, et en basse tension (BT) des niveaux de tension de 220 V et 380 V.

(ANARE, 2018). Les domaines de tension sont publiés conformément aux dispositions du Code de la loi n° 2014-132 du 24 mars 2014 portant code de l'électricité. Selon la valeur de la tension (valeur efficace dans le cas du courant alternatif), les installations électriques sont clairement définies.

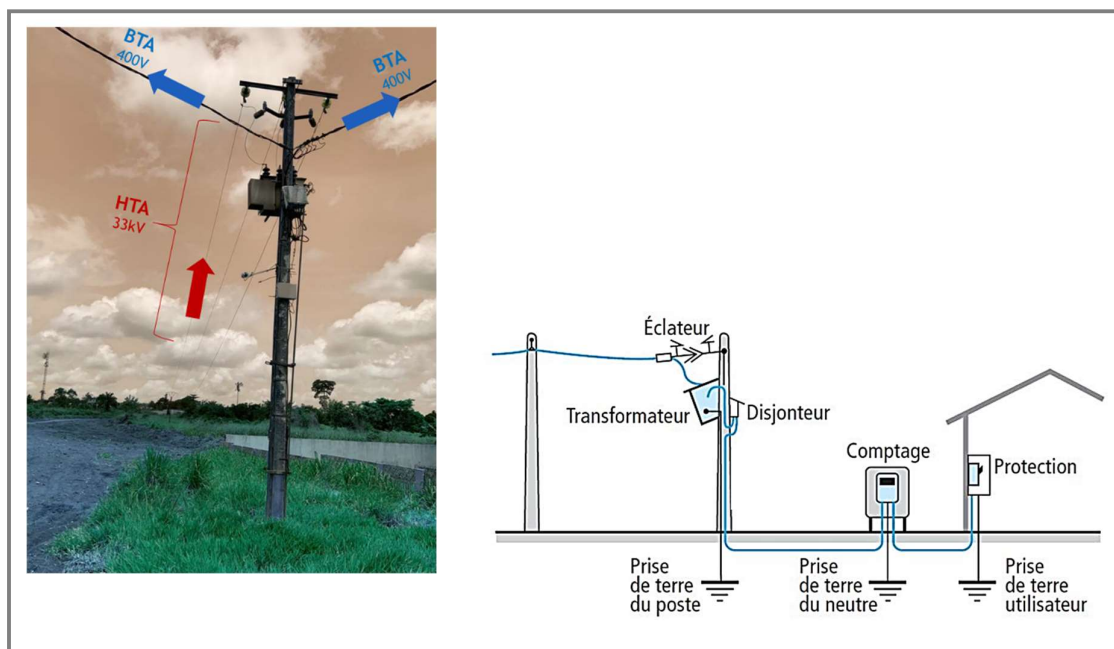


Figure 5: construction de réseau HTA/BT

Lorsque la puissance apparente demandée atteint 50kVA, les entreprises industrielles ou tertiaires sont alimentées en moyenne tension en 30kV (HTA) en zone rurale ou 15kV en zone urbaine. L'alimentation des installations électriques est faite via un poste de transformation HTA/BT, qui est disposé au plus près possible des zones de consommation.

Plusieurs solutions techniques peuvent être étudiées à l'initiative du demandeur, chacune apportant des niveaux de garantie et de qualité différents. Le raccordement peut être fait, soit par une dérivation sur un départ existant ou soit par la création d'un départ depuis le poste source.

Selon la puissance souscrite et le tarif qui y correspond, la livraison de l'énergie électrique peut se faire :

- *En Basse tension - BT (moins de 1000 V) ;*
- *En Moyenne Tension - HTA (plus de 1000 V).*

Le réseau HTA est constitué par l'ensemble des départs issus des postes-sources. Le nombre de départs par poste source varie de moins d'une dizaine à une cinquantaine. Les départs HTA alimentent les postes des clients raccordés en HTA et les postes HTA/BT dits « de distribution publique » servant à l'alimentation des clients connectés en basse tension. En règle générale et par construction, l'ossature d'un départ HTA est bouclée pour permettre de réalimenter rapidement la clientèle à la suite d'une coupure due à un incident. Le régime de protection des

réseaux HTA est celui de la mise à la terre du neutre en un seul point, au transformateur HTB/HTA du poste source, par l'intermédiaire d'une résistance. Cette disposition doit être progressivement remplacée par la technique du neutre compensé (impédance variable en continu en fonction des caractéristiques du réseau).

Tableau 4. Comparaison des postes sources HTB/HTA [31]

Schéma	Avantages	Inconvénients	Application principale
Simple jeu de barres	Simple et économique.	Risque de perte totale de l'installation en cas de défaut sur le jeu de barres. Coupure du jeu de barre obligatoire en cas de maintenance. Peu de flexibilité en exploitation.	Postes industriels, postes sources.
Simple jeu de barres sectionné	Simple et économique.	Identique au simple jeu de barre sur une moitié de poste.	Postes industriels, postes sources.
Double jeu de barre	Permet de garder une moitié de poste en fonctionnement en cas de défaillance sur le jeu de barre ou de maintenance.	Coût d'acquisition élevé.	Postes d'interconnexion, postes de sortie de centrale.
	Flexibilité, continuité de services en cas de défaut sur un jeu de barres ou d'intervention de maintenance. Possibilité d'utiliser le disjoncteur de couplage comme secours.		
Un disjoncteur et demi	Continuité de services (toutes les travées sont alimentées par les deux jeux de barre)	Risque de défaillance sur défaut plus élevé (il faut deux disjoncteurs pour couper une arrivée ou un départ).	Postes où la continuité de service est le critère prioritaire (peu courant en Europe, très utilisé en Amérique).
	Flexibilité en exploitation	Coût d'acquisition élevé.	
Poste en anneau (Ring)	Continuité de services	Risque de défaillance sur défaut plus élevé (il faut deux disjoncteurs pour couper une arrivée ou un départ).	Postes industriels, principalement Amérique.
	Coût d'acquisition plus faible que le schéma 1.5 disjoncteur.	Peu de flexibilité en exploitation.	

À l'observation du Tableau 4, on relève que le raccordement des postes de transformation constitue un autre problème à résoudre, car il existe différents types de schémas. Mais, très souvent, le choix du type est fixé par l'autorité en charge de la gestion de l'électrification. Par ailleurs, pour minimiser les coûts, tout en privilégiant la qualité de service, la structure des HTA est définie par la politique mise en place. Pour y parvenir, des actions d'envergure sont à mener, notamment la mise en place de la structure en « fuseau avec secours spécialisé issu d'un autre poste » pour le réseau de distribution de la ville d'Abidjan et dans les villes principales de l'intérieur du pays. Il faut également faire passer l'ensemble du réseau HTA d'Abidjan en souterrain, avec une section de câble unique CIS Alu240 mm², et engager une exploitation en 20 kV dans les zones à la périphérie d'Abidjan et en particulier autour des nouveaux postes.

5.1.3. Le réseau de distribution BT

Le réseau BT est composé de départs issus des postes de transformation HTA/BT. Quelques points de tronçonnement sont réalisés pour plus de flexibilité dans la conduite du réseau. Un poste rural, sur poteau ou en cabine simplifiée, peut alimenter un ou deux départs BT. Un poste urbain en cabine peut alimenter de « un à huit » départs BT. La longueur des départs BT est limitée par l'intensité et les chutes de tension admissibles : 100 à 200 mètres en souterrain, quelques centaines de mètres en aérien. Les lignes aériennes sont construites en faisceaux de conducteurs isolés sur poteaux ou sur façade. La structure du réseau BT est radiale, comme le

réseau HTA. Les liaisons de secours entre lignes BT sont réservées aux cas exceptionnels. Le mode de protection est du type « TT », avec neutre distribué en réseau, neutre et masses métalliques étant mis à la terre par des prises distinctes.

5.1.4. Le réseau Interconnecté

La production nette du système électrique interconnecté s'est établie à 11 210 GWh en 2020 contre un réalisé de 8 152 GWh en 2014, soit une hausse de 5,6 % [18]. La consommation brute nationale de 2020 s'élève à 9 877 GWh contre 7 319 GWh en 2014. La pointe maximale de consommation nationale enregistrée en 2020 est de 1 545 MW, atteinte le 12 mars 2020 à 22h00, contre 1 077 MW en 2013. La pointe de charge du réseau enregistre en 2014, une augmentation de 71 MW identique à celle de 2013 contre une moyenne d'accroissement de 50MW au cours des 5 dernières années. Le rendement global du système électrique ivoirien s'établit à 82,54 % en 2020 contre 78,6 % en 2014, une hausse de 4 % [CIE, 2020]. Cette augmentation est due essentiellement à l'amélioration du rendement de distribution. En effet, le rendement de distribution sur le territoire national a poursuivi sa croissance pour atteindre 87% contre 82.4 % en 2014. Cette forte progression est le résultat de la poursuite des actions de lutte contre la fraude, de la fiabilisation de la facturation et de la reprise de l'ensemble de nos activités dans la zone Centre Nord-Ouest (CNO) [CIE, 2020].

Le rendement du réseau électrique en décembre 2020 était de 82,54 % contre 71 % en 2011, soit une hausse de 11,54 points. Le tableau 5 présente un état des lieux du nombre de clients et du taux d'accès à l'électricité en Côte d'Ivoire en 2020.

Tableau 5. Nombre de clients et taux d'accessibilité [Source : CIE]

Rubriques	Valeurs	Commentaires
Nombre de clients	2 615 688	2 909 633 clients aux comptages BT y compris les prépaiements. 6055 clients aux comptages HTA
Taux d'accès à l'électricité	98%	Taux de couverture de 80% Taux de desserte de 55%

La gestion du système électrique ivoirien continue d'être marquée par la précarité de l'équilibre production-consommation, avec des ruptures fréquentes de cet équilibre à la pointe de charge, malgré la mise en service de nouvelles unités de production (AGGREKO Tranche 4 et 5 – 100MW en juillet 2013 ; CIPREL TAG 10 – 111 MW en janvier 2014).

5.2. Par électrification rurale décentralisée

Les besoins en services énergétiques pour le développement rural vont au-delà de l'éclairage, pourtant, les politiques de développement énergétique des pays en général, ne prennent très souvent pas en compte certaines réalités locales des populations [32]. Les réseaux en zone rurale sont essentiellement des lignes aériennes assez longues, assurant une distribution avec une faible puissance à des usagers très dispersés. La technique d'électrification prépondérante utilisée pour l'électrification rurale en Côte d'Ivoire est l'électrification rurale centralisée (raccordement au réseau national interconnecté). En effet, 71 % des ménages dans les zones urbaines ont accès à l'électricité contre 6 % des ménages en zones rurales [33].

L'accès à l'électricité connaît une disparité dans le pays. L'électrification rurale répond en effet à des besoins de développement économique, d'équité sociale, et d'aménagement du territoire. L'électrification rurale demande des investissements massifs dont la rentabilité n'est pas toujours garantie dans une économie en développement, telle qu'observée dans les pays africains [33]. Électrifier le monde rural, c'est axer la politique d'aménagement du territoire sur l'accessibilité des populations aux services de base.

L'accès aux services énergétiques de base de proximité par une électrification rurale décentralisée est une alternative très crédible. Les politiques d'électrification devront certainement intégrer ces options dans les initiatives de développement local des réseaux électriques. Le recours aux énergies de sources renouvelables augmente le champ des possibilités, par combinaison des sources de production (hybridation), en fonction des gisements disponibles et de la demande in situ (figure 6).

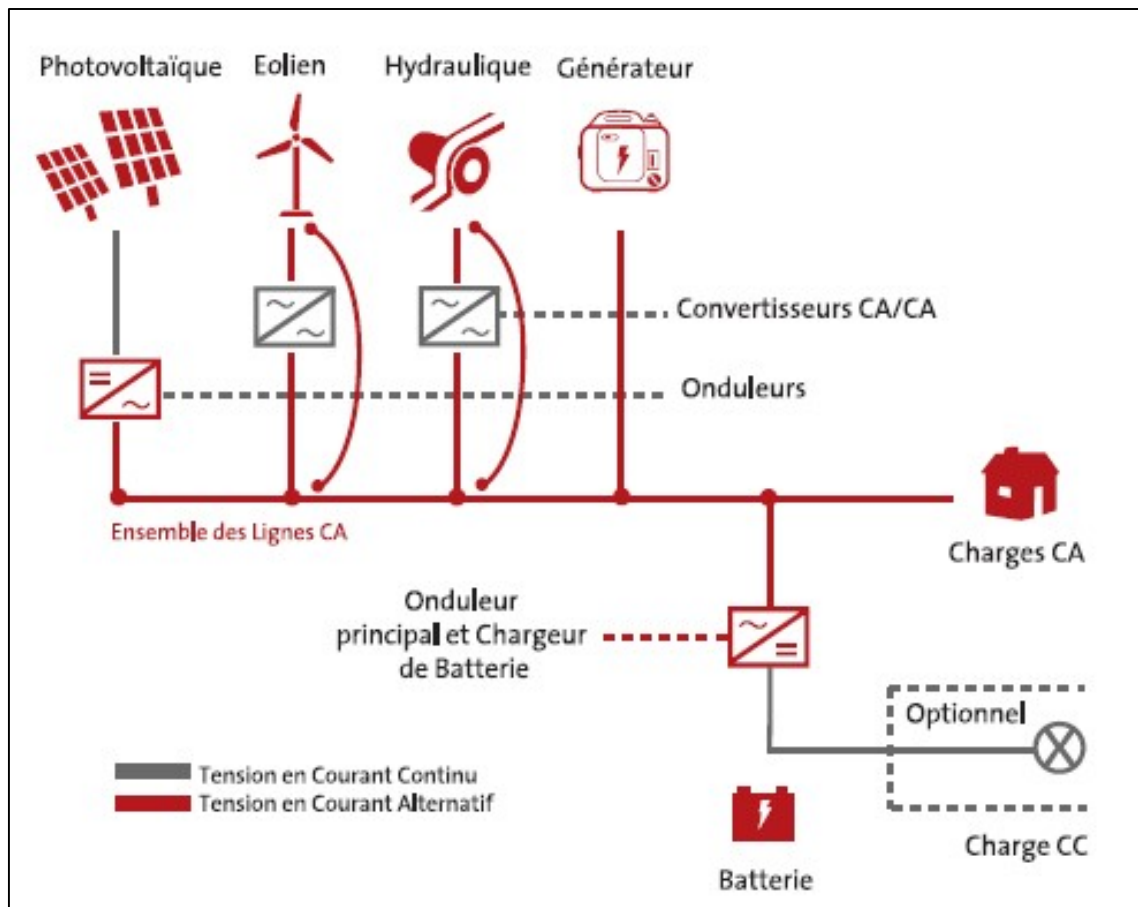


Figure 6: Raccordement par l'électrification rurale décentralisée via des ENR

6. Les faiblesses de l'électrification rurale en Côte d'ivoire

Le raccordement des villages au réseau national étant l'option privilégiée, le politique d'électrification rurale présente quelques faiblesses dont les plus significatives méritent d'être relevées :

- *Réseaux électriques de distribution dans les zones rurales sont peu maillés et/ou non renforcés, cela peut conduire à la réduction des capacités de service de ces réseaux ;*
- *Non prise en compte, dans les programmes d'électrification rurale des localités de moins de 500 habitants, qui sont situées à plus de 20 km du réseau national interconnecté ;*
- *Les énergies de sources renouvelables sont insuffisamment intégrées dans les options d'électrification ou de pré-électrification rurale ;*
- *Insuffisance de capacités opérationnelles des entreprises sous-traitantes pour la réalisation des travaux (expertise, ressources humaines qualifiées et disponibilité locale des équipements).*

7. Les freins éventuels à l'évolution rapide de l'électrification rurale

L'électrification étant coûteuse pour les sociétés publiques d'électricité en place dans la sous-région, plusieurs opérateurs étrangers privés développent des programmes en choisissant souvent de façon aléatoire les villages à l'aune des difficultés d'opérer dans ces zones rurales où l'information, les fonds et les compétences techniques sont limités. Cela se traduit souvent par l'impossibilité de mise en œuvre appropriée d'une planification énergétique rurale pertinente, à l'échelle nationale [34] (Munasinghe, 1993).

Le manque de transfert de technologie des équipements récents et l'insuffisance de personnel formé restent un frein à l'évolution rapide de l'électrification rurale par les énergies de sources renouvelables.

L'extension des lignes de transport et de distribution vers les petites localités n'est pas rentable.

La disponibilité des terres pour l'agriculture et pour le développement des réseaux électriques en Côte d'Ivoire reste également un enjeu majeur à moyen terme. L'économie du Pays étant majoritairement basée sur l'agriculture.

8. Les opportunités qu'offre l'électrification rurale

L'électrification rurale favorise davantage l'accès aux services énergétiques adaptés pour toutes les activités modernes. Et peut également générer des gains de temps significatifs pour les ménages. Pour ainsi, permettre aux populations de travailler plus longtemps, surtout en soirée, et faciliter un accès plus étendu aux marchés [35] (Bernard et Torero, 2011). Sans doute, cela

facilitera l'amélioration des conditions de vie des populations, la création d'emplois, sans oublier l'autonomisation des femmes, et surtout de celles vivantes en milieu rural.

L'épuisement des ressources énergétiques fossiles, accompagné des problèmes relatifs au respect des normes environnementales, incitent au développement des énergies renouvelables. Une source d'énergie est renouvelable, si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future [36]. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau et généralement de la biomasse humide ou sèche, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité. Ce qui n'est pas le cas pour les combustibles fossiles.

9. Les stratégies adoptées pour accélérer l'électrification rurale

9.1. La stratégie de mise en œuvre des programmes pour l'électrification rurale par extension du réseau interconnecté

Le plan directeur d'électrification rurale dans son élaboration propose deux solutions pour électrifier les zones restantes. La première stratégie est d'électrifier le reste des localités par l'extension du réseau tout en respectant un équilibre départemental. Pour ce faire, l'Etat sollicite des bailleurs de fonds afin de financer ces travaux. Les travaux d'électrification de 1 303 localités ont été financés par plusieurs bailleurs de fonds, à savoir Exim Bank of China, la Banque Africaine de Développement, la Banque Mondiale, l'Union Européenne et l'Agence Française de Développement, qui électrifieront respectivement 500 localités dans le centre et le nord, 252 localités à l'Ouest, 201 localités au Sud-Ouest, 350 localités dans le centre et sud de la Côte d'Ivoire.

9.2. La stratégie de mise en œuvre des programmes par l'électrification rurale décentralisée

La deuxième solution du Plan Directeur d'électrification rurale est d'électrifier les zones rurales par des réseaux décentralisés. L'alimentation en énergie électrique des villages en off-grid par mini-réseau hybride, solaire PV-Diesel avec stockage est la technologie retenue (réseau de distribution basse tension et éclairage public). Cette solution concernait en 2018, 49 localités grâce à des financements de l'UEMOA et de l'Union Européenne. L'UEMOA puis l'UE à travers ENERGOS 2, et le projet plan du Zanzan, comptent prendre en charge respectivement 12 ; 30 et 7 localités.

Les études du Plan Directeur d'Électrification Rural indiquent qu'« environ 550 localités ont des chutes de tension supérieures à 10% ». La solution proposée par le PDER, pour celles situées dans les zones de fortes concentrations, est la construction de 4 postes sources à partir d'énergies renouvelables, plus précisément, hydraulique et biomasse. Quant aux localités dispersées, l'option proposée est l'électrification décentralisée hybride Diesel-Solaire PV avec stockage.

9.3. La stratégie Off-Grid : un accès à l'électricité plus efficace

La stratégie des solutions off-grid, peut être utilisée comme solution d'attente et alternative à l'électrification rurale par extension du réseau et par mini-réseaux, pour améliorer et accélérer l'accès aux services énergétiques modernes des populations en milieu rural.

Les smartgrids, ou réseaux « intelligents », visent à intégrer de manière efficace les actions de l'ensemble des utilisateurs (producteurs et consommateurs) afin de garantir un approvisionnement électrique durable, sûr et à moindre coût. Cela, tout en réduisant ou délestant la consommation de certains équipements lorsqu'ils n'ont pas besoin d'être alimentés, ou en cas de fortes consommations nécessitant leur arrêt pour assurer l'alimentation des équipements essentiels. La mise en place de *smartgrids* a plusieurs objectifs. Tout d'abord, elle vise à diminuer l'impact du système électrique sur l'environnement. Ensuite, elle cherche à sensibiliser les usagers et à les rendre plus actifs par rapport à leur consommation d'électricité, tout en leur permettant de la contrôler efficacement. Le fonctionnement des smartgrids repose sur l'installation d'une interface informatique. Celle-ci communique avec l'ensemble du réseau, observe la consommation d'électricité et l'optimise par une fonction contrôle. Elle permet donc de gérer l'équilibre entre la production et le besoin pour éviter toute consommation excessive d'électricité.

10. Conclusion

Au terme de cette étude bibliographique sur l'électrification rurale, nous pouvons retenir que l'Afrique connaît actuellement une période de croissance économique et de transformation soutenue. Sa population augmente rapidement, ses économies se développent et se diversifient. Alors qu'elle regorge d'un énorme potentiel énergétique, qu'il soit à caractère fossile ou renouvelable, elle demeure le continent le moins électrifié.

Pour pallier cette insuffisance d'électricité, plusieurs stratégies et programmes visant à garantir un accès universel à l'électricité, sont mis en œuvre, mais présentes des limites :

- *L'électrification rurale par raccordement au réseau électrique ne permettent pas d'électrifier de manière rapide certaines localités en raison des coûts élevés d'investissement.*
- *Les programmes ne prennent pas en compte les localités éloignées situées à plus de 20 km du réseau interconnecté et ayant moins de 500 habitants.*

Pourtant, la Côte d'Ivoire dispose d'importantes ressources énergétiques renouvelables pouvant être exploitées pour la production de l'électricité.

Ainsi, des questions importantes se dégagent et des pistes de travail s'ouvrent sur le choix opéré dans la politique d'électrification, notons-en une : *Quelle place accordée aujourd'hui, à l'électrification rurale décentralisée via les énergies de sources renouvelables ?*

De toute nécessité, notre travail s'inscrit dans une stratégie d'électrification rurale décentralisée, en particulier à base d'énergies de sources renouvelables. De notre point de vue, la valeur ajoutée la plus pertinente dans la chaîne de valeur de l'électrification, n'est certainement pas de tirer une ligne moyenne tension pour raccorder une localité, mais plutôt de rapprocher les centres de production à proximité des lieux de consommations.

Dans cette étude, il s'agira pour nous de :

- *Identifier les besoins énergétiques en particulier en zone rurale. C'est une phase essentielle, car il convient de ne pas surdimensionner ni sous-dimensionner les mini-réseaux ;*
- *Identifier les ressources renouvelables potentielles de la Côte d'Ivoire, car il faut minimiser l'impact environnemental de leur exploitation et en faire un élément majeur des stratégies RSE¹ et de développement durable ;*
- *Faire un état de l'art des technologies disponibles et leurs avancements récents, car il faudrait identifier les technologies fiables et de meilleurs prix adaptées à l'environnement Ouest-Africain en général et en particulier à la Côte d'Ivoire ;*
- *Proposer un système énergétique adapté pouvant mobiliser les ressources identifiées pour satisfaire les besoins en énergie électrique d'un village.*

¹ Responsabilité Sociétale de l'Entreprise

Chapitre 2 : *Etat des lieux des technologies de production décentralisée d'électricité*

I. Etats des lieux des technologies de production décentralisée des énergies renouvelables

1. L'Énergie Solaire photovoltaïque

1.1. Principe de fonctionnement de l'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque résulte de la conversion des rayonnements solaires en énergie électrique par l'effet photovoltaïque, découvert par Antoine Becquerel en 1839. Ce phénomène physique propre aux matériaux semi-conducteurs, tels que le silicium, consiste à convertir l'énergie photonique en voltage. En effet, la lumière du soleil se compose de photons, qui vont être absorbés par le semi-conducteur dans un premier temps, puis cette énergie photonique va être transférée aux liaisons chimiques, ce qui donnera lieu à la création de charges électriques libres dans le semi-conducteur. Enfin, grâce au dopage du semi-conducteur, un champ magnétique interne est créé ce qui permettra de séparer et de collecter les charges électriques libres. Ces charges électriques libres, créées (combinaison électrons-trous), vont alors se mettre en mouvement et ce déplacement va produire un courant électrique continu.

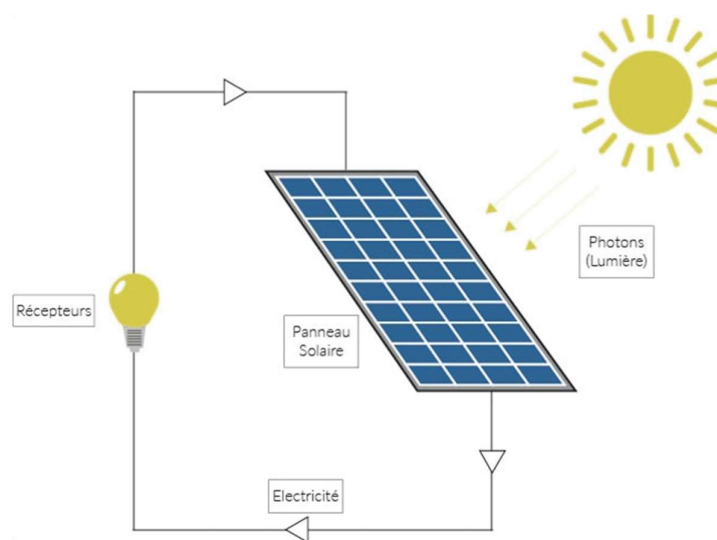


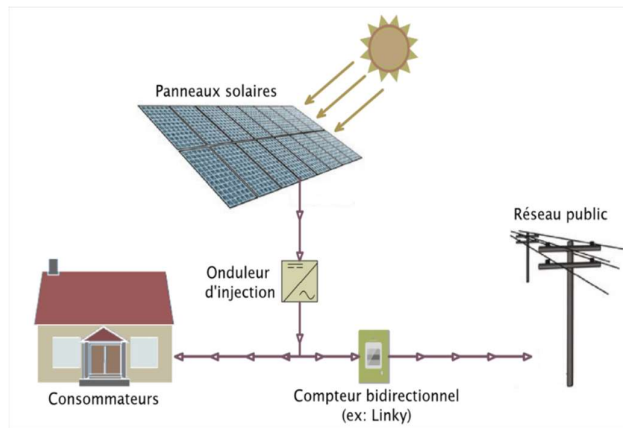
Figure 7. Principe de fonction d'un système solaire PV

1.2. Technologies de l'énergie solaire photovoltaïque

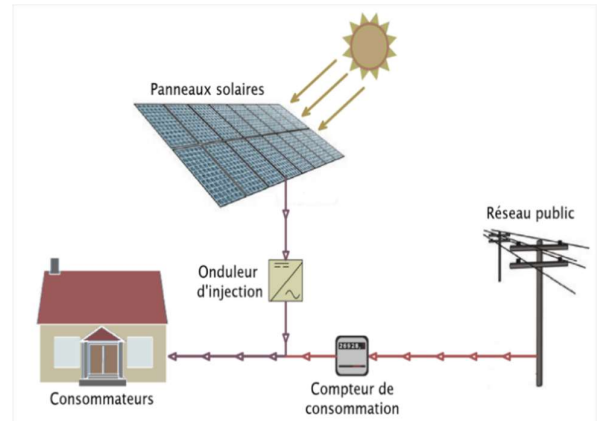
De multiples technologies de panneaux solaires existent et sont utilisées en fonction du système de production. Nous comptons quatre générations de panneaux solaires. La première génération concerne les monocristallins et les polycristallins. La deuxième concerne les couches minces donc les amorphes. La troisième concerne les panneaux faits à base d'alliage, tel que le CdTe. La quatrième concerne la nouvelle technologie appelée Building Incorporation Photovoltaics (BIPV). Ces panneaux sont connectés à différents systèmes de production. Nous distinguons deux types de systèmes à savoir les systèmes autonomes connectés au réseau (on-grid) et les systèmes autonomes non connectés au réseau (les systèmes autonomes avec batteries et les systèmes autonomes au fil du soleil).

Ces systèmes sont composés généralement de modules (panneaux) photovoltaïques, de composants électriques (câbles) et d'un ou plusieurs appareils électroniques (onduleurs). La figure ci-dessous, présente les éléments constitutifs du système photovoltaïque.

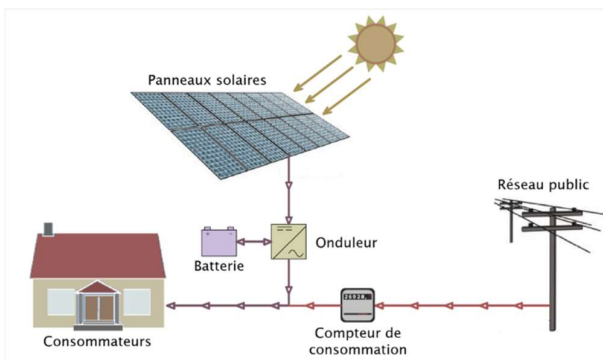
- Système autonome connecté au réseau



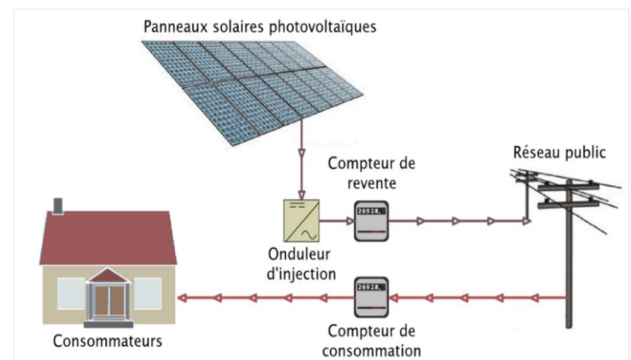
a) Autoconsommation et vente



b) Autoconsommation et connecté au réseau



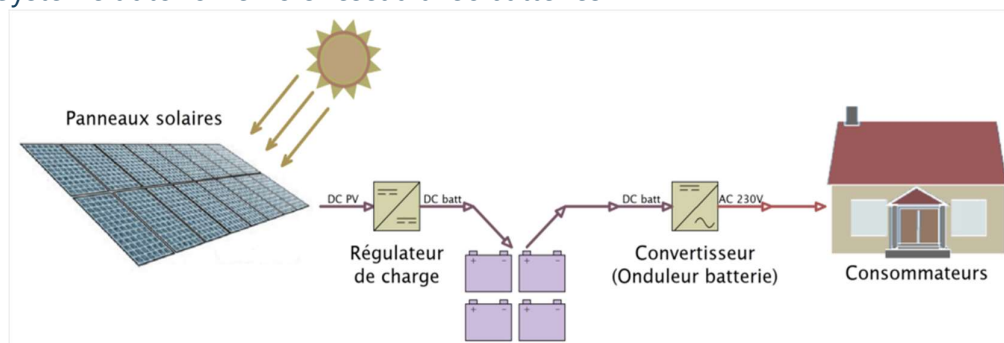
c) Autoconsommation avec stockage et connecté au réseau



d) Injection au réseau pour la vente

Figure 8: Système autonome connecté au réseau [37].

- Système autonome hors réseau avec batteries



Système isolé 100% solaire

Figure 9: Système Autonome avec batteries [37]

1.3. Avantages et inconvénients

L'énergie solaire est considérée à bien des titres comme la meilleure source d'énergie. Elle a certainement plus d'avantages que d'inconvénients. Elle est très économique. Le coût d'une installation solaire est rentabilisé en moins de 5 ans. Or, une installation solaire peut être utilisée en moyenne pendant 20 ans. Ce qui permettra d'avoir de l'électricité totalement gratuite pendant 15 ans. L'énergie solaire est propre à produire et sa consommation a un impact quasiment nul sur la planète. Elle présente également des coûts de fonctionnement relativement faibles. Une fois installés, les équipements solaires vont fonctionner sans déplacements ou frottements. Ces équipements s'usent très peu et leur durée de vie est très importante. En outre, ils nécessitent très peu d'entretien, à part un nettoyage des panneaux solaires. Ces systèmes sont avantageux pour les zones isolées. Ils permettent de subvenir aux besoins en électricité et en eau des populations, et permettent d'assurer la sécurité des acteurs du transport à travers l'éclairage public. Par ailleurs, la filière du recyclage se met en place et dans les années à venir, les équipements solaires pourront être recyclés à plus de 95 %.

Cependant, ces systèmes présentent des inconvénients. Leur plus grand inconvénient est le coût initial élevé (2 à 3 millions de FCFA pour une installation de 3 kW ; la centrale Senergy 2 au Sénégal de 25 MW a coûté environ 25 millions d'euros). Ensuite, viennent les composants. Les composants du système (batteries, onduleur...) n'ont pas une durée de vie très longue, donc il faudra les renouveler chaque 6 à 7 ans, en fonction de l'utilisation. Aussi, ces systèmes ont un faible rendement photovoltaïque. Le rapport entre la quantité d'énergie reçue et la quantité d'énergie électrique obtenue est faible (seulement 20 à 40 % de l'irradiation est convertie en énergie électrique). Ce rendement dépend de plusieurs facteurs à savoir la météo, l'angle d'inclinaison et le taux d'encrassement. Par exemple, dans les zones à ciel généralement nuageux, le rendement est parfois en baisse en raison de la faible irradiation. En outre, un mauvais choix de l'angle d'inclinaison du panneau réduit les performances du système solaire par une insuffisance de captation de rayonnement. De plus, un tout autre inconvénient est, que les heures de disponibilité de l'électricité (9 h -17 h) ne coïncident pas toujours avec les heures d'utilisation (18 h -08 h). Ce qui engendre des coûts supplémentaires de stockage pour couvrir les besoins.

1.4. Applications du solaire photovoltaïque

Les systèmes solaires photovoltaïques sont utilisés pour produire de l'électricité. Cette électricité peut être commerciale ou privée. Elle peut être utilisée à plusieurs fins. Pour l'éclairage domestique (ampoules), ou pour faire fonctionner les appareils tels que les lave-linges, les micro-ondes, les télévisions, les ventilateurs, les climatiseurs classiques comme solaire, les réfrigérateurs, etc..... Aussi, elle peut être utilisée pour l'éclairage public (les lampadaires solaires). Également, elle est utilisée pour faciliter l'accès en eau potable aux populations vivantes dans les zones reculées (utilisation du pompage solaire pour fournir de l'eau aux habitants, aux bétails et pour irriguer les plantations).

2. Energie solaire thermique à haute température CSP

Traditionnellement, les techniques employées permettent de convertir l'énergie solaire soit en chaleur (vapeur ou eau chaude), soit en électricité. Pour la transformation en chaleur, elle se fait soit à basse température soit à haute température. La production de chaleur à basse température est généralement utilisée pour des usages domestiques. Par contre, celle à haute température est utilisée pour la production d'électricité. Dans la suite, nous nous intéresserons aux technologies CSP à haute température.

2.1. Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique à haute température

Nous avons vu dans le paragraphe précédent, que l'énergie solaire peut être utilisée pour produire directement de l'électricité via des cellules photovoltaïques, pour un usage thermique direct. Elle peut également être utilisée pour produire de la chaleur puis de l'électricité à partir des systèmes thermiques à concentration. Ces derniers n'utilisent que l'irradiation directe. En conséquence, ils ne peuvent être installés que dans des zones fortement ensoleillées. Ainsi, un ensoleillement de 1 800 kWh/m²/an est le seuil minimum estimé nécessaire pour obtenir un rendement suffisant.

À cet effet, on appelle « centrale solaire thermodynamique ou centrale solaire à concentration » l'ensemble des techniques qui visent à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée (allant de 250°C à 2 000°C), puis celle-ci en énergie mécanique à travers un cycle thermodynamique, et en énergie électrique à travers une génératrice électrique. De manière plus simple, le principe est de collecter du flux solaire via des miroirs ou réflecteurs, fixe ou mobile, et de le concentrer sur un récepteur afin de chauffer un fluide caloporteur qui restituera cette chaleur en électricité.

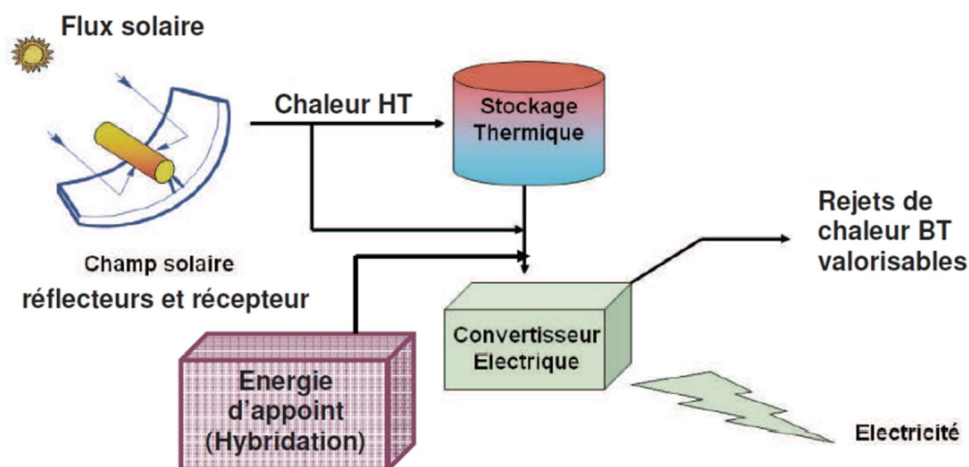


Figure 10. Principe de fonctionnement des CSP

2.2. Technologie solaire thermique à haute concentration : CSP

Si l'on considère les capteurs solaires à concentration, le rayonnement incident est focalisé sur une zone plus petite que celle de réception au moyen de collecteurs concentrateurs optiques. Les capteurs solaires à concentration existants sont décrits ci-dessus :

- **Collecteurs concentrateurs plans** : ce sont les collecteurs concentrateurs les plus simples, car ce sont des collecteurs plans-plats caractérisés par des plaques réfléchissantes reliées à la surface frontale du collecteur (voir figure 11.a) Le rayonnement solaire frappe les ailes réfléchissantes placées autour du panneau, et le collecteur peut utiliser le rayonnement solaire réfléchi ainsi que le rayonnement solaire du faisceau reçu par l'écran transparent.
- **Concentration cylindro-parabolique (CPC)** : sous chaque tube du collecteur, une feuille en matériau réfléchissant et de forme parabolique est installée. Cette feuille est nécessaire pour véhiculer le rayonnement réfléchi sur le tube. Par conséquent, l'adoption de collecteurs à vide CPC permet de tirer parti du rayonnement supplémentaire qui, inversement, serait perdu dans l'espace. À surface brute de collecteur identique, il est possible d'augmenter de la surface réceptrice en améliorant l'énergie produite. Une représentation schématique est présentée sur les figures 11.b et 11.c.
- **Collecteur parabolique (PTC : Parabolic Trough Collector)** : ces collecteurs se caractérisent par un concentrateur parabolique et un absorbeur tubulaire disposés sur toute la longueur du concentrateur et au foyer de la parabole. A travers ce système géométrique, le rayonnement solaire se réfléchit sur le tube récepteur, en le portant à haute température et en chauffant le fluide caloporteur qui circule à l'intérieur du tube. Le concentrateur est constitué de tôles polies correctement pliées où il est composé de miroirs concaves (Voir figure 11.f). La production d'énergie de ces appareils est remarquable. La plage de fonctionnement de la plaque varie entre 50 °C et 300 °C, mais elle peut aussi atteindre 400 °C. Pour cette raison, les fluides caloporteurs, tels que les mélanges à base d'eau, les huiles diathermiques ou les sels fondus (pour les applications à haute température), sont généralement utilisés.
- **Collecteur de champ héliostat** : le champ héliostat est composé de miroirs placés tout autour d'un récepteur central, appelé tour solaire (Voir figure 11.d). Les miroirs peuvent suivre la trajectoire du soleil grâce à un système de suivi. Les rayons de soleil sont concentrés en un point focal afin de chauffer le fluide caloporteur (De l'eau ou du sel fondu). Le système de transport de chaleur est caractérisé par un circuit fermé entre les systèmes de réception, de stockage et de conversion de puissance.
- **Collecteur de Fresnel linéaire** : ces systèmes sont caractérisés par des récepteurs et des réflecteurs linéaires (voir figure 11.e). Généralement, les segments de réflecteur sont alignés horizontalement, suivant le soleil de sorte que le récepteur peut être touché par les rayons du soleil sans avoir besoin de mouvements.
- **Collecteur parabolique** : ces systèmes se caractérisent par une géométrie capable de concentrer le rayonnement solaire vers un récepteur placé sur le point focal du collecteur. Ils ont une forme similaire à celle d'antennes satellites (voir figure 11.f).

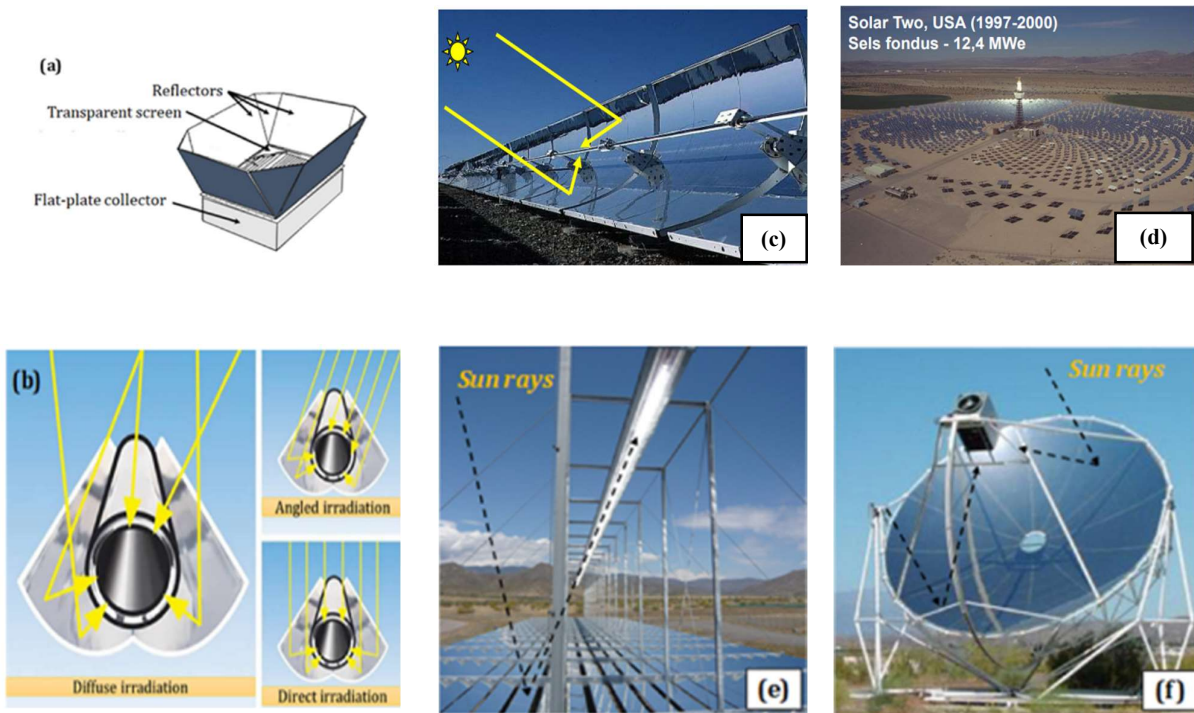


Figure 11. a) capteur plan plat ; b) capteur cylindro-parabolique ; c) capteur cylindro-parabolique ; d) Centrale à tour, e) capteur linéaire de Fresnel ; f) Capteur parabolique [38]

2.3. Avantages et inconvénients des systèmes solaires à concentration : CSP

Le tableau ci-dessous présente les avantages et inconvénients des différentes technologies à concentration solaire.

Tableau 6 : Avantages et inconvénients des différentes technologies du CSP

Technologies	Centrales cylindro-parabolique	Capteur de Fresnel	Centrale Parabolique	Centrale à tour
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> -Coût d'investissement moins élevé par rapport aux autres technologies -Connexion au réseau -Possibilité de stockage 	<ul style="list-style-type: none"> Coût des miroirs faible -coût d'investissement réduit -contraintes mécaniques réduites grâce à la disposition plane des miroirs -frais de maintenances réduites par rapport aux capteurs PT 	<ul style="list-style-type: none"> -Concentration (750) et température élevée -Rendement élevé plus de 30% -Adapté pour la production électrique décentralisée 	<ul style="list-style-type: none"> Concentration (200-1000) et température élevée jusqu'à 1000 degrés -Moins sensibles aux variations saisonnières -Possibilité de stockage -Connexion au réseau
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> -Faible concentration et donc faible température de fonctionnement (400°C) -Huile synthétique chère et nocive pour l'environnement en cas de fuite -Inflammabilité dangereuse des huiles -Très sensible aux variations saisonnières -Forte consommation d'eau (les SEGS californiennes 3.4 m³/MWh) 	<ul style="list-style-type: none"> -Performance optique des miroirs plus faible que celle des capteurs PT -Manques d'études d'écoulement diphasiques disponibles pour des tubes de grand diamètre Manque de maturité 	<ul style="list-style-type: none"> -Pas de stockage Coût d'investissement élevé -Improbable tenues des joints d'étanchéité des pistons aux conditions très dures (fortes température) -Surface de collecte faible 	<ul style="list-style-type: none"> - Surface au sol importante ; - Nécessité d'une source d'eau généralement dans les régions généralement en carence hydrique

2.4. Applications des systèmes solaires à concentration : CSP

Le tableau ci-dessous rappelle les principales applications des technologies à concentration solaire. Ces applications sont multiples et sont retrouvées dans plusieurs secteurs. Les CSP sont souvent utilisés pour des usages domestiques à petite échelle et aussi à grande échelle pour la production d'électricité ou la chaleur industrielle.

Tableau 7 : Applications, technologies et type de circulation des CSP

Applications	Type de technologies	Circulation
Chauffe-eau solaire	-Capteur plan plat -Collecteur à tubes sous vide -Collecteur parabolique composé	Naturelle et forcée
Chauffage et refroidissement des locaux	-Capteur plan plat -Collecteur à tubes sous vide -Collecteur cylindro parabolique	Forcée
Réfrigération solaire	- Collecteur plat -Collecteur à tubes sous vide -Collecteur cylindro-parabolique	Forcée
Chaleur industrielle	- Collecteur plan plat -Collecteur à tube sous vide -Collecteur cylindro-parabolique -Collecteur parabolique -Collecteur linéaire de Fresnel	Forcée
Dessalement solaire	-Capteur plan plat -Collecteur à tubes sous vide -Collecteur cylindro parabolique	Naturelle et Forcée
Solaire Thermique	-Collecteur parabolique -Collecteur champ héliostat -Collecteur parabolique composé -Collecteur parabolique -Collecteur linéaire de Fresnel	Forcée

Circulation forcée : le fluide caloporteur circulant dans un circuit est propulsé par une pompe dont la vitesse et la fréquence sont variable.

Circulation naturelle : le fluide caloporteur circulant dans un circuit, est due aux changements de densité causés par les différences de température.

3. Energie éolienne

3.1. Principe de fonctionnement de l'énergie éolienne

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, laquelle est ensuite le plus souvent transformée en énergie électrique, appelée énergie éolienne. Les éoliennes produisant de l'électricité sont appelées aérogénérateurs. Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne se décline comme suit : le vent fait tourner des pales qui font elles-mêmes tourner le générateur de l'éolienne. À son tour, le générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique de type éolienne. L'électricité éolienne est dirigée vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage d'électricité éolienne.

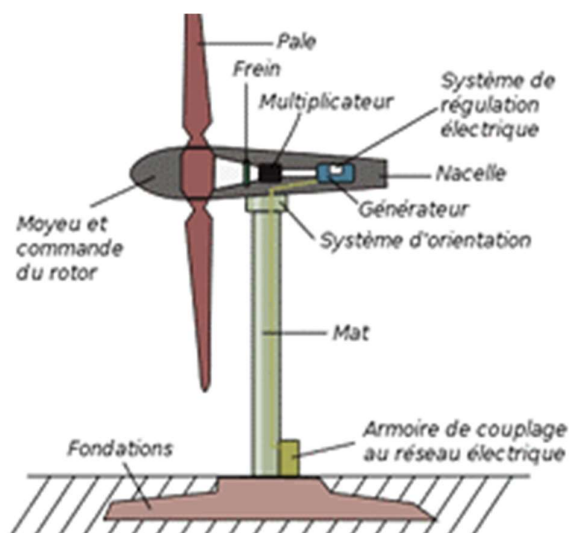


Figure 12. Principe de fonctionnement d'une éolienne

3.2. Technologies éoliennes

De nos jours, le vent est principalement utilisé pour la production d'électricité à l'aide d'éoliennes. Les éoliennes peuvent varier dans leur conception, mais elles sont basées sur deux orientations différentes à savoir : l'éolienne à axe Horizontal (HAWT) et l'éolienne à axe vertical (VAWT). De plus, la nouvelle technologie d'éolienne comprend la génération de cerfs-volants et la génération MARS [39-40]. Les turbines de Magenn et Air Rotor Systems (MARS) fonctionnent à des altitudes comprises entre 800–1000 m et 183–305 m, respectivement.

En effet, des évolutions majeures ont pris place au cours des dernières décennies sur le plan technologique, comme l'augmentation de la taille du rotor WT (Wind Turbine), la hauteur des tours, la fiabilité et l'efficacité des éoliennes, l'implantation des éoliennes avec un coût effectif.

a. Eolienne à axe horizontal

Pour les éoliennes à axe horizontal (HAWT), l'arbre du rotor principal et le générateur électrique sont situés au sommet d'une tour et doivent être orientés face au vent. Les petites éoliennes sont dirigées par une simple girouette, tandis que les grosses éoliennes utilisent généralement un capteur de vent couplé à un servomoteur [41].



a) Single bladed b) Two bladed c) Three bladed d) Offshore

HAWT

Figure 13. Eolienne horizontale à une pale ; deux pales et trois pales

b. Eolienne à axe vertical

Fondamentalement, dans une éolienne à axe vertical (VAWT), les composants principaux sont situés dans la base de la turbine de manière à permettre au générateur et à la boîte de vitesses d'être situés à proximité du sol pour faciliter l'entretien et les réparations.

L'arbre du rotor est généralement placé transversalement au vent, éliminant ainsi le besoin de mécanismes de détection et d'orientation du vent.



Savonius



Darrieus

Figure 14. Eolienne à axe vertical

c. Nouvelles technologies d'éolienne

De nouvelles technologies sont en cours de développement. Nous pouvons citer :

KITEGEN : Le Kitegen, est un kit de générateur éolien qui, grâce aux vents soufflant à plusieurs centaines de mètres d'altitude, fournirait des dizaines de mégawatts (MW). Le principe est simple et particulier : un manège avec un bras pivotant sur lequel pend un long câble qui se connecte au cerf-volant. La position de ces derniers est contrôlée électroniquement. L'ensemble, fait tourner le manège et entraîne une turbine. Pour que cela fonctionne, les dimensions doivent être généreuses : au moins cent mètres de diamètre pour la roue. Mais la puissance augmente très vite avec le diamètre : 0,5 MW pour 100 mètres, 5 MW pour 200 mètres, 500 MW pour 1 000 mètres.

M.A.R.S : Magenn Air Power Rotor System a été développé par une entreprise américaine. Le principe est de faire voler à 300 m d'altitude, un ballon captif gonflé à l'hélium, muni de quatre ou cinq grosses pales. Comme un rotor horizontal tournant avec le vent, Mars s'inspire de l'effet Magnus, qui dévie les balles de tennis, de golf ou de football quand elles tournent sur elles-mêmes. Cette rotation, induit de plus, une force de sustentation supplémentaire. Un générateur fixé sur l'axe permet de produire de l'électricité. D'après ses concepteurs, un vent de 1 m/s suffirait pour le faire fonctionner. La taille de l'engin pourrait être très variable. Un petit modèle de quelques mètres serait transportable et fournirait plusieurs kilowatts.

Lader mill : La structure volante est sustentée par des rangées de petits dirigeables, portant chacun un groupe de quatre pâles horizontales et une turbine (soit 100 kg). Chacun de ces éléments produirait 30 kW. Retenu par un câble, ce cerf-volant géant mesure plus de cent mètres de longueur et flotte grâce à ses séries de dirigeables. Chaque dirigeable mesure 5 mètres de diamètre pour 8 mètres de long. Il porte une éolienne de type Darrieus, mais horizontale.

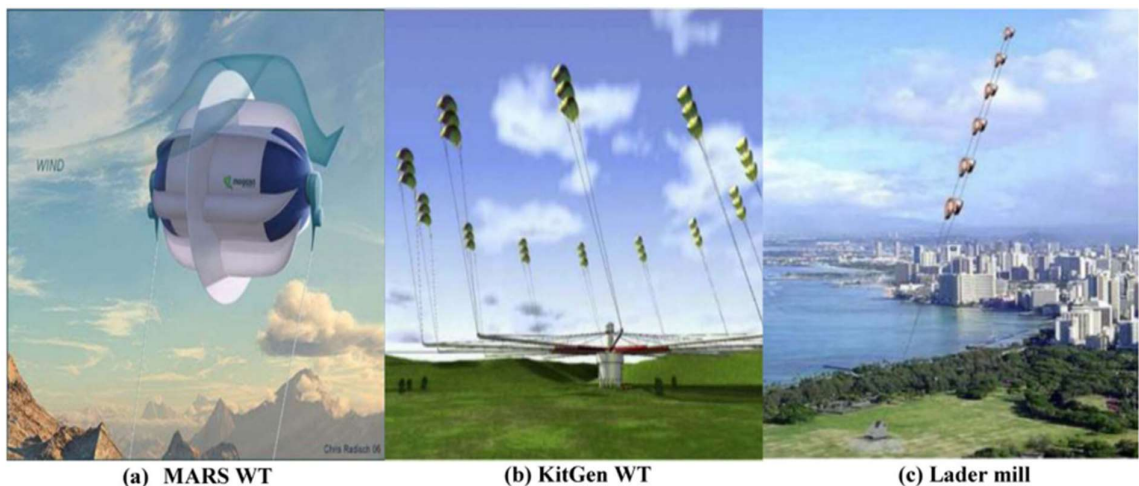


Figure 15. Les éoliennes futures à cerf-volant [41].

3.3. Avantages et inconvénients des éoliennes

Le tableau ci-dessous présente les avantages et inconvénients des technologies éoliennes utilisées pour la production de l'électricité.

Tableau 8: Avantages et inconvénients des éoliennes horizontales et verticales

	Eolienne à axe horizontal	Eolienne à axe vertical
Avantages et inconvénients	L'axe de rotation de l'éolienne reste horizontal, ou parallèle au Sol	L'axe de rotation reste vertical ou perpendiculaire au sol
	Il est capable de produire plus d'électricité à partir d'une quantité de vent donnée	Il produit jusqu'à 50 % d'électricité en plus sur une base annuelle par rapport aux turbines conventionnelles avec la même surface balayée
	Il convient aux grandes applications éoliennes	Il convient aux petits projets éoliens et aux applications résidentielles
	Comparativement plus lourd et ne convient pas aux vents turbulents	Plus léger et produit bien dans des conditions de vent tumultueuses
	Les turbines à axe horizontal sont uniquement alimentées avec le vent de direction spécifique	- Les turbines à axe vertical sont alimentées par le vent venant - de tous les 360 degrés, et même les éoliennes sont alimentées lorsque le vent souffle de haut en bas
	Ne convient pas pour générer de l'électricité à partir d'une vitesse de vent inférieure à 6 m/s et une vitesse de coupure généralement 25 m/s	Génère de l'électricité dans des vents aussi faibles que 2 m/s et continue de produire de l'électricité dans une vitesse du vent jusqu'à 65 m/s selon le modèle
	Ils ne peuvent pas résister aux conditions météorologiques extrêmes dues au gel, à la pluie verglaçante ou neige abondante plus vents violents en ex	- Résiste aux conditions météorologiques extrêmes telles que le gel, la glace, le sable, le sel, l'humidité et les températures très élevées - Conditions de vent supérieures à 60 m/s
	Les oiseaux sont blessés ou tués par les hélices car ce ne sont pas des objets solides donc les oiseaux volent dans les pales	Ne nuit pas à la faune car les oiseaux peuvent détecter un objet solide et peuvent être vus sur radar d'avion
	La plupart démarrent automatiquement	Couple de démarrage faible et peut nécessiter de l'énergie pour commencer à tourner
	Difficile à transporter et à installer	Réduction des coûts de construction et de transport

3.4. Applications des éoliennes

Au début, la puissance du vent (les éoliennes) était utilisée pour des applications telles que le pompage de l'eau, le broyage du grain et d'autres applications agricoles. Les éoliennes horizontales sont couramment utilisées dans le commerce de la production d'électricité à grande et à petite échelle. Alors que les éoliennes à axe vertical sont principalement utilisées pour les petites productions d'électricité généralement inférieure à 100 kW [39].

4. La biomasse

La biomasse est actuellement la seule source d'énergie renouvelable permettant de produire des carburants gazeux, liquides et solides à même de remplacer les combustibles d'origine fossile utilisés dans le domaine des transports.

4.1. Valorisation de la biomasse par combustion

Une centrale biomasse produit de l'électricité à partir de la vapeur d'eau qui se dégage lors de la combustion de matières végétales ou animales, effectuée dans une chambre de combustion. La combustion, des matières premières, chauffe l'eau présente dans une chaudière, dont il se dégage de la vapeur. Cette vapeur d'eau met alors en mouvement une turbine, reliée à un alternateur, qui produit du courant électrique. La vapeur obtenue lors du processus est ensuite recyclée. Elle est transformée en eau, grâce à un condenseur afin d'être récupérée et réutilisée dans la chaudière pour débiter un nouveau cycle de production.

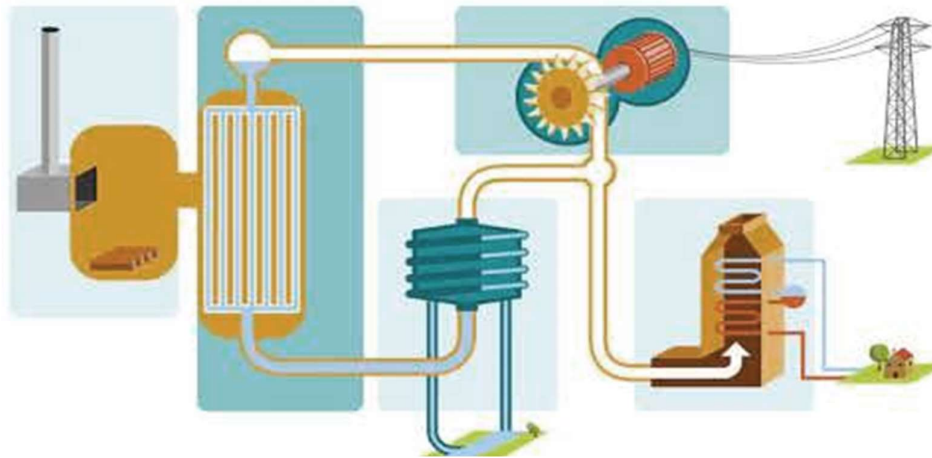


Figure 16. Principe de fonctionnement de la biomasse

4.2. Technologies de valorisation des biomasses

La biomasse est actuellement la seule source d'énergie durable et renouvelable, à même de fournir des combustibles à la fois solides, liquides et/ou gazeux. Cette biomasse peut être transformée puis utilisée de différentes manières pour la production d'énergie. Les voies de conversion énergétique de la biomasse peuvent se classer en trois grandes filières qui font appel à des procédés et des mécanismes réactionnels différents. En premier les filières biochimiques : les procédés sont faits en milieu humide au cours desquels la biomasse est convertie sous l'action d'organismes vivants unicellulaires. Ensuite les filières thermochimiques : les procédés au cours desquels, la biomasse est convertie sous l'action de la chaleur. Enfin, la filière extraction physique : les procédés au cours desquels la partie oléagineuse de la plante est extraite sous l'effet de la pression.

Les procédés et mécanismes de conversion sont multiples :

- **Cogénération et co-combustion**

La cogénération est la production séquentielle d'énergie thermique (vapeur) et d'électricité. Cela se fait principalement via des centrales de production d'électricité utilisant de la vapeur pour les systèmes de turbines.

- **La pyrolyse**

La pyrolyse est le processus primaire de conversion thermique des matières carbonées. Sous l'action de la chaleur, la biomasse est convertie en trois phases : une phase solide (charbon

végétal), une phase condensable composée de composés organiques (huiles de pyrolyse) et une phase gazeuse composée principalement de CO₂, CO, H₂ et CH₄.

- **La Carbonisation**

La Carbonisation (ou pyrolyse lente) : c'est une transformation chimique, du bois, qui est chauffé à l'abri de l'air avec des vitesses de chauffe lentes (quelques dizaines de °C/min) à une température classiquement proche de 500 °C.

- **Pyrolyse flash**

C'est la décomposition thermique de la matière carbonée sous vide ou sous atmosphère inerte (absence d'air ou de l'air fortement réduit). La pyrolyse flash génère majoritairement des composés à l'état vapeur qui après refroidissement se condensent, en une phase liquide. La biomasse, préalablement broyée et séchée, entre dans le réacteur de pyrolyse. Les vapeurs, contenant les gaz et les composés volatiles, sont récupérées et condensées. On obtient ainsi l'huile de pyrolyse, qui peut être stockée, brûlée ou convertie pour d'autres applications.

- **La gazéification**

La gazéification désigne la transformation thermo-chimique à haute température d'un combustible carboné solide tel que le bois ou le charbon, en présence d'un réactif gazeux oxydant en sous stœchiométrie tel que l'air, l'oxygène et/ou la vapeur. Le solide est converti en un mélange gazeux composé essentiellement de CO, H₂, CH₄, CO₂, H₂O et N₂ (si l'air est l'agent oxydant) dans des proportions qui dépendent du procédé.

- **La combustion**

La combustion : réaction exothermique de l'oxygène de l'air avec les hydrocarbures et le charbon issu de la dégradation thermique de la biomasse.

- **La méthanisation**

La bio méthanisation (ou digestion anaérobie) ou fermentation méthanique est le processus naturel biologique de conversion de la matière organique par des microorganismes en absence d'oxygène (air).

- **La fermentation alcoolique**

Au cours de la fermentation alcoolique, le glucose est converti en gaz carbonique et en éthanol.

- **L'hydrolyse**

Hydrolyse chimique (acide) : Les grains sont trempés dans une solution aqueuse contenant de l'acide sulfurique qui facilite la séparation des composants. Ceci permet de séparer l'amidon du reste de la plante.

Hydrolyse enzymatique : Dans ce cas l'amidon est hydrolysé en deux étapes par voie enzymatique. La première étape, réalisée à l'aide d'une α -amylase est appelée liquéfaction. La seconde étape est appelée saccharification et utilise une amyloglucosidase. Ceci aboutit à la formation d'un sirop de glucose.

4.3. Avantages et inconvénients de la biomasse

Sur le plan économique, la biomasse facilite le développement économique local et permet de diminuer la dépendance aux énergies fossiles. Sur le plan social, elle permet la création d'emplois à travers son processus de collecte, de transformation et de livraison. Sur le plan environnemental, l'utilisation de combustibles naturels et écologiques lui donne un caractère renouvelable car il permet de lutter contre les gaz à effet de serre. En effet, le CO₂ produit par la combustion des bioénergies est compensé par le CO₂ absorbé par les végétaux lors de leur croissance.

Pour produire de l'électricité grâce à de la biomasse, il est primordial d'être attentif à l'emploi des ressources naturelles. Cela est notamment valable pour le bois, issu des forêts, qui peut vite s'épuiser si son exploitation n'est pas contrôlée. La biomasse, comme toutes les autres sources d'énergie régénérative, fait parfois l'objet de critiques sévères. L'accusation selon laquelle de plus en plus de cultures énergétiques sont cultivées à la place de cultures vivrières sur les terres agricoles limitées est au premier plan.

D'une part, cela a un impact négatif sur l'écosystème naturel et sur la diversité qui s'est développée. En effet, une exploitation abusive peut conduire à la déforestation et à l'appauvrissement de la biodiversité. D'autres part, les prix des denrées alimentaires augmenteront si le blé et le maïs sont principalement utilisés pour produire du carburant. Dans certaines régions, la production d'agro carburants représente un peu moins de 20 % des terres arables. La combustion de la biomasse n'est pas un processus entièrement propre.

4.4. Applications du potentiel énergétique de la biomasse

Pour la consommation d'énergie domestique, le bois de chauffage est le combustible le plus important pour la cuisine et le chauffage des locaux dans les ménages à faibles revenus, tant dans les zones urbaines que rurales.

Les résidus de culture et déjections animales sont également utilisés pour la cuisine et le chauffage des locaux.

Pour la production des biocarburants, cinq formes différentes de biocarburants sont en usage aujourd'hui [42]. Ce sont le bioéthanol, le biodiesel, le biogaz, le bio méthanol et le bio hydrogène. Seuls les trois premiers sont produits en Afrique [42].

La combustion de biomasse peut être utilisée pour produire soit directement de la chaleur, soit pour produire de la force mécanique et/ou électrique via des foyers qui alimentent une chaudière.

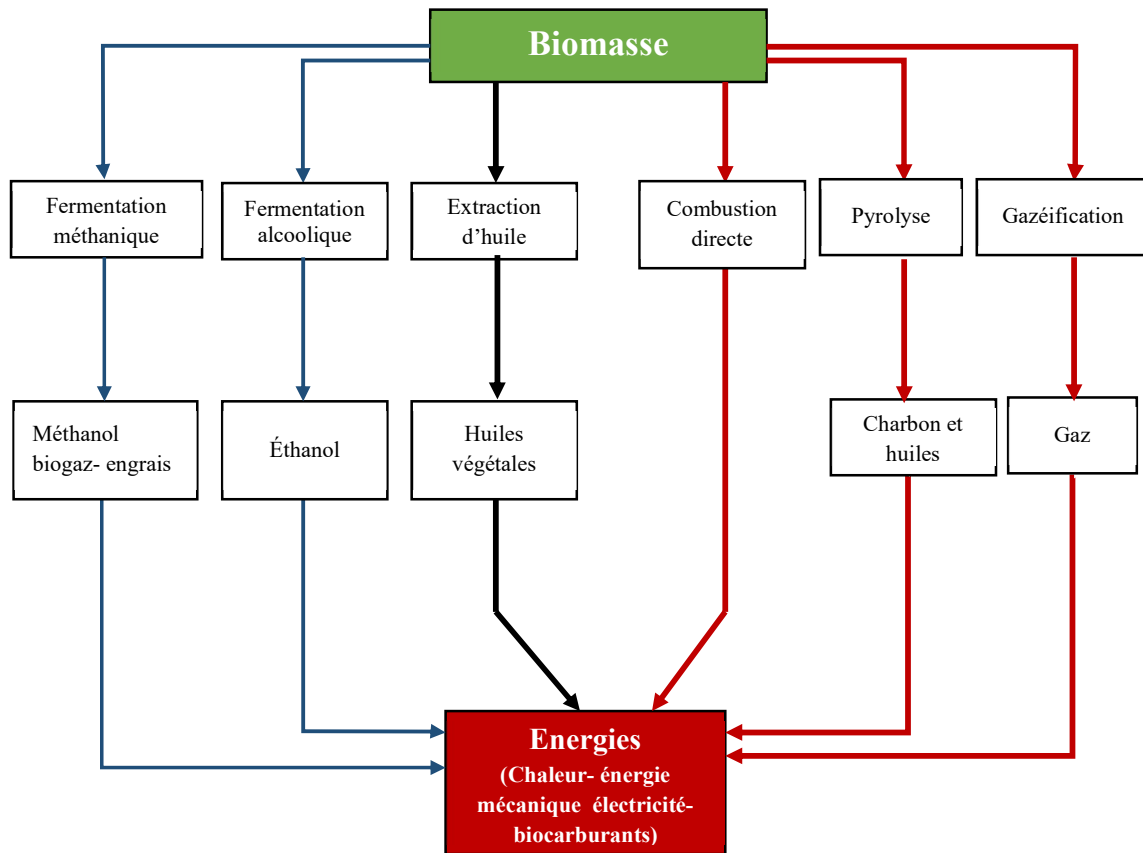


Figure 17. Processus et applications de la biomasse

5. L'énergie hydraulique

5.1. Principe de fonctionnement de l'énergie hydraulique

L'hydraulique constitue la plus ancienne des énergies qui utilise la force de l'eau pour créer de l'électricité. On le nomme l'hydroélectricité, l'énergie fournie par le mouvement de l'eau. Il peut s'agir de cours d'eau, de chutes, de courants marins, de vagues ou de marées. L'énergie hydraulique, est considérée comme la troisième source de production d'électricité dans le monde. Certains pays comme la Norvège ou l'Islande tirent même presque toute leur électricité des centrales hydroélectriques [43].

5.2. Technologies de l'énergie hydraulique

Il existe trois types de technologies hydroélectriques pour produire de l'électricité à savoir l'hydroélectricité, la marémotrice et l'hydrolienne. Ces technologies sont choisies et installées en fonction de leur situation géographique, du type de cours d'eau, de la hauteur de la chute, de la nature du barrage et de sa situation par rapport à l'usine de production électrique.

5.2.1. Hydroélectricité

5.2.1.1. Principe de fonctionnement de l'hydroélectricité

Techniquement, l'énergie hydroélectrique fonctionne sur le même principe que l'éolien. L'eau emprunte une conduite, puis son mouvement entraîne la rotation d'une roue ou d'une turbine, laquelle combinée avec un générateur, produit un courant continu. Un système hydraulique, en hydromécanique, est un assemblage de composants fonctionnant de manière unitaire et souvent en interaction afin d'utiliser un fluide sous pression pour effectuer un travail mécanique. Un tel système peut aussi être appelé installation hydraulique. Son principal élément est une centrale hydraulique.

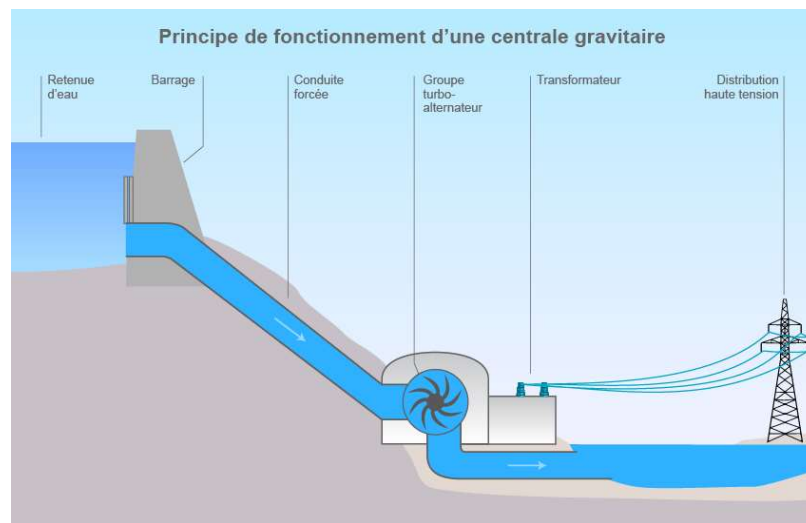


Figure 18. Principe de fonctionnement de l'hydroélectricité

5.2.1.2. Avantages et inconvénients de l'hydroélectricité

Tout d'abord, l'hydro-électricité est une énergie non-polluante, car elle ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne produit pas de déchets toxiques. Ensuite, c'est une énergie renouvelable, car elle offre des réserves qui se reforment en permanence. Enfin, c'est une énergie économique, car son coût de production est parmi les plus bas des moyens actuels. Les lacs de barrage peuvent devenir des recueils pour les oiseaux migrateurs et les poissons ainsi que des lieux de reproduction.

La construction d'un barrage hydro-électrique peut provoquer de graves inconvénients comme des déplacements de populations très importants. Par exemple, la construction du barrage des Trois Gorges en Chine a déplacé près de 2 millions de personnes, détruit des milliers d'hectares de terres agricoles, des villages entiers et des sites archéologiques. Un barrage peut conduire à la disparition d'espèces animales et végétales, à un envasement en aval et peut aussi perturber le débit naturel de la rivière ou du fleuve. Il peut en plus affecter les nappes phréatiques et le passage des sédiments. Des inondations en amont ainsi qu'un appauvrissement des écoulements en aval et une modification des qualités des eaux, souvent polluées, peuvent être prévisibles. Tous ces éléments provoquent des conséquences irréversibles sur l'écosystème.

L'énergie hydraulique peut être une source de production instable du fait des aléas de climat auxquels elle est soumise. Le tarissement des cours d'eau est l'une des raisons principales.

5.2.2. L'énergie marémotrice

L'énergie marémotrice est une énergie renouvelable, produite en captant l'énergie des marées. Elle exploite les mouvements de masses d'eau liés à l'attraction due aux interactions gravitationnelles entre la Terre et les autres astres (principalement la Lune et le Soleil). Il se traduit par des variations périodiques, du niveau de la mer, associées à des courants. L'énergie dite marémotrice constitue donc une récupération de l'énergie cinétique de rotation de la Terre. L'énergie correspondante peut être captée sous deux formes. Soit, en énergie potentielle : en exploitant les variations du niveau de la mer (technique utilisée dans l'usine marémotrice de la Rance). Soit, en énergie cinétique : en exploitant les courants de marée (les courants de marées captés par des turbines ou des hydroliennes).

5.2.2.1. Principe de fonctionnement d'une installation marémotrice

Une usine marémotrice fonctionne de la façon suivante : à marée montante, l'eau passe à travers une vanne principale puis, quand la marée commence à descendre, la vanne principale se ferme, mais une autre vanne, où se trouve la turbine s'ouvre et l'eau en retournant vers la mer fait tourner la pale de la turbine, ceci produit de l'énergie électrique grâce à un alternateur.

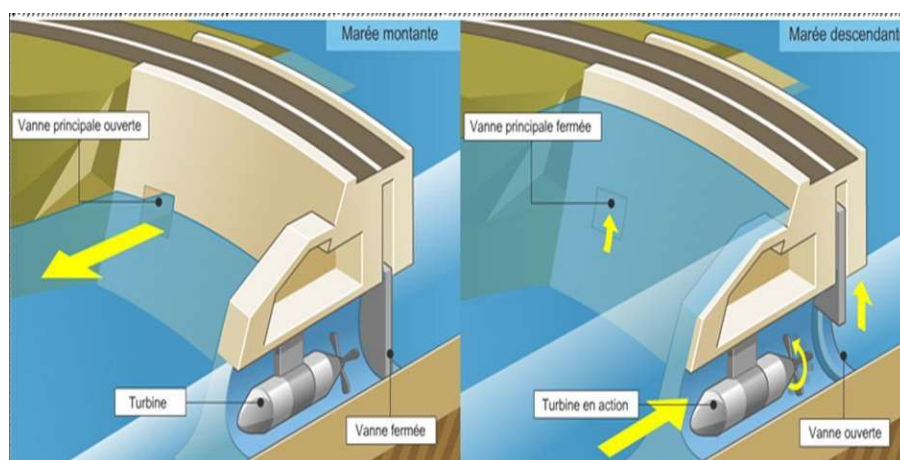


Figure 19. Principe de fonctionnement de la marémotrice

5.2.2.2. Avantages et inconvénients de la marémotrice

Les usines marémotrices ont, comme toutes les sources d'énergie, des avantages et des inconvénients. D'abord, cette énergie est renouvelable et variable, mais prévisible des années à l'avance. Les barrages estuariens peuvent constituer une protection contre les raz-de-marée et servir à des activités humaines (sport, loisirs dans le bassin). Les coûts d'exploitation sont faibles et la longévité des usines est longue.

Mais il y a un risque de dépôt dans le bassin ainsi qu'un engorgement à long terme dû au barrage qui nécessite un nettoyage régulier, souvent coûteux. Un impact sur la migration des poissons

ainsi qu'une modification de la faune au niveau de l'estuaire peut aussi être provoqué. De plus, l'investissement est très important.

5.2.3. Hydrolienne

5.2.3.1. Principe de fonctionnement de l'hydrolienne

Une hydrolienne est une turbine sous-marine (ou subaquatique, ou posée sur l'eau et à demi immergé) qui utilise l'énergie cinétique des courants marins ou de cours d'eau, comme une éolienne utiliserait l'énergie cinétique de l'air. En effet, la turbine de l'hydrolienne doit transformer l'énergie hydraulique en énergie mécanique, qui est alors transformée en énergie électrique par un alternateur, puis cette énergie électrique est acheminée jusqu'à la terre par des câbles.

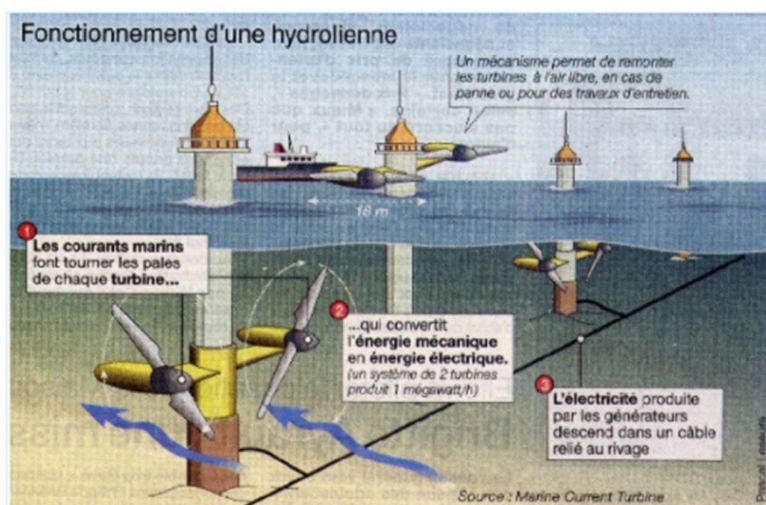


Figure 20. Principe de fonctionnement de l'hydro éolienne

5.2.3.2. Avantages et inconvénients de l'hydrolienne

Les hydroliennes dû à la masse volumique de l'eau 800 fois supérieure à celle de l'air sont d'une taille nettement inférieure aux éoliennes pour une même puissance. Les courants marins sont prévisibles, on peut donc estimer avec précision la production d'électricité. Les potentiels des courants marins sont très importants. L'hydrolienne utilise une énergie renouvelable (le courant marin), elle ne pollue donc pas. Des modèles d'hydroliennes semi-immergées peuvent être adaptés aux rivières, sans avoir les impacts écologiques des turbines classiques dont les pêcheurs craignent qu'elles n'aient des impacts sous-estimés sur les poissons. Ces hydroliennes produisent moins d'électricité que les turbines classiques, mais pourraient être beaucoup plus légères, et demander bien moins d'investissement.

Mais il y a de gros inconvénients avec ces installations. Pour éviter le développement des algues et organisme encroûtant sur l'hydrolienne, il faut utiliser un antifouling. Cet antifouling doit être refait régulièrement, ce qui induit un coût d'entretien important (intervention en mer, ...). L'opposition des pêcheurs au chalut, auxquels elles barrent l'accès aux zones où elles sont installées. Des poissons ou mammifères marins peuvent heurter les hélices. Mais celles-ci

peuvent tourner lentement, cela dépend du modèle d'hydrolienne). Elles coûtent très cher à l'entretien et à l'installation. A cause du sable qui érode les pâles des hélices, l'entretien doit être fréquent mais d'accès est difficile car les hydroliennes sont sous l'eau. Pour cette raison, certaines hydroliennes ont une structure émergente de l'eau, qui peut être gênante pour la navigation. Des systèmes à ballast pourraient permettre de faire monter ou descendre les unités de production.

6. Les systèmes hybrides

6.1. Principe de fonctionnement des systèmes hybrides

Un système de production hybride est un système combinant deux sources d'énergie (ou davantage) utilisées conjointement, incluant souvent (mais pas nécessairement) une unité de stockage, et raccordé à un réseau de distribution local. Les études, des différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables sont réalisées sur la base de divers modèles en fonction de l'objectif recherché. Ces modèles ont en commun l'utilisation de données météorologiques comme variable d'entrée. Ces données doivent refléter l'apport d'énergie effectivement reçue, ce qui impose que les données le plus souvent disponibles soient converties en données utilisables (irradiation solaire sur des plans inclinés à partir de données sur des plans horizontaux, vitesse de vent à la hauteur du moyeu à partir de données mesurées à 3 ou 10 m). L'intérêt d'un système hybride réside dans le fait que l'utilisation simultanée de plusieurs sources d'énergie permet de mieux répondre à une demande continue d'énergie de la part de l'utilisateur ou du réseau électrique. En effet, la grande variabilité des sources renouvelables oblige d'une part à surdimensionner les générateurs éoliens ou photovoltaïques et surtout à introduire dans le système de production un stockage d'énergie ou tout au moins un tampon énergétique qui permettra de combler les déphasages temporels et d'amplitude entre la production et la consommation. Les diverses sources de productions de l'énergie sont de plus en plus exploitées, mais des actions sont menées à juste titre pour une meilleure réglementation des systèmes en Côte d'Ivoire. Des perspectives s'ouvrent sur ces questions pour une résolution des aspects techniques et matériels.

- Système hybride PV-EOLIENNE-BATTERIES

Les systèmes hybrides éolien/diesel se distinguent des systèmes hybrides photovoltaïques, car les éoliennes sont capables de produire du courant alternatif identique à celui produit par le générateur diesel.

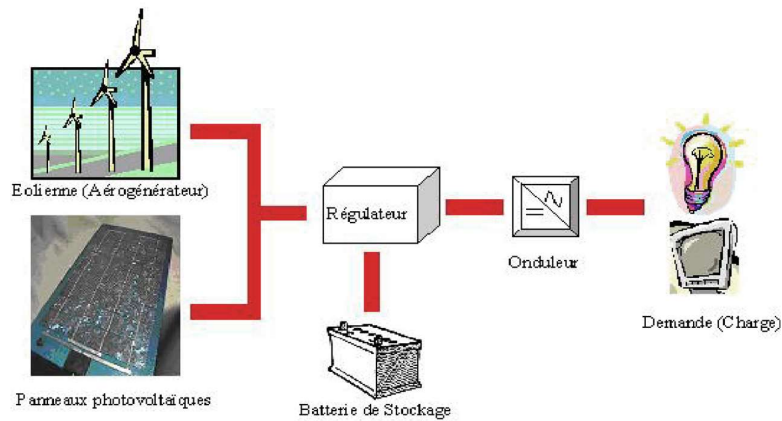


Figure 21. Principe de fonctionnement d'un système hybride PV/EOLIENNE/BATTERIES

- Système hybride PV-DIESEL-BATTERIES

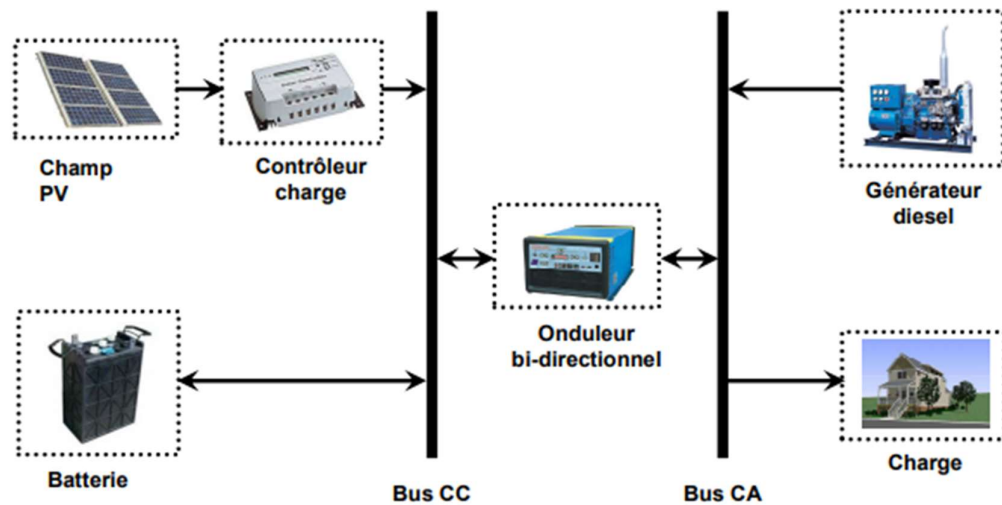


Figure 22. Principe de fonctionnement d'un système hybride PV/DIESEL/BATTERIES

- Capteur solaire Hybrides PV

Un capteur photovoltaïque thermique (PV-T) est un capteur solaire hybride permettant de convertir une partie de l'énergie solaire captée en électricité et de valoriser l'autre, habituellement perdue, en chaleur. Le concept consiste à superposer les deux fonctions énergétiques électrique et thermique. Dans ce type de composant hybride, les cellules PV fonctionnent comme absorbeur thermique et sont refroidies grâce à la circulation d'un fluide caloporteur en face arrière. Plusieurs configurations de capteurs existent et varient principalement selon la nature du fluide utilisé (eau, air ou bi-fluide) et selon le type d'absorbeur (plan, concentrateur...).

- Capteur hybride PV/T à eau :

Le module photovoltaïque, qui a pour rôle, la conversion des rayons solaires en une énergie électrique et se compose de trois couches : la première est une couche de verre, dont la face avant est exposée au rayonnement, la seconde couche qui contient les cellules photovoltaïques et la troisième couche représente la face arrière du module, réalisé en Tedlar. Une plaque en acier galvanisé qui a pour rôle d'absorber la chaleur, une tuyauterie sous forme de radiateur ou de serpentin, soudé à la plaque absorbante garantissant un bon contact thermique entre les deux éléments, et où circule un fluide caloporteur qui a pour rôle d'évacuer la chaleur emmagasinée par la plaque absorbante. Enfin, pour minimiser les pertes calorifiques du système, il faut isoler ses parois par une ou plusieurs couches d'isolation [44].

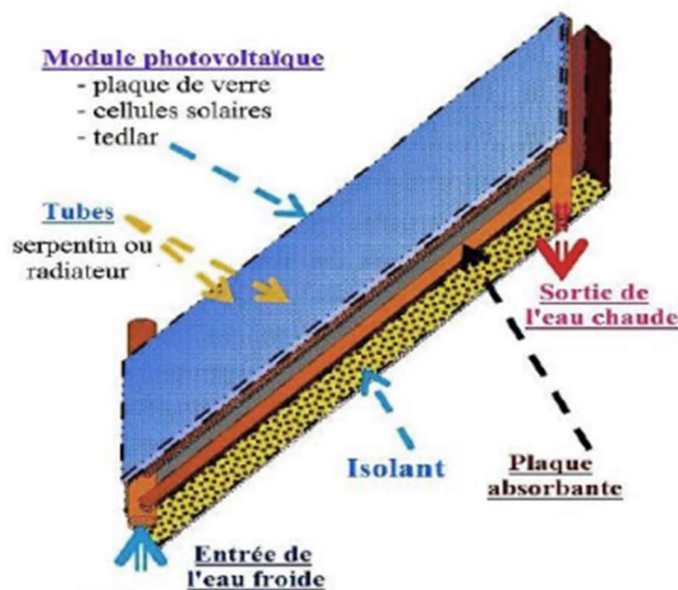


Figure 23. Principe de fonctionnement d'un système hybride PV/T à eau

- Capteur hybride PV/T à air

Le système hybride photovoltaïque/thermique à air regroupe un module photovoltaïque, qui produit de l'électricité, à un capteur thermique, disposé derrière ce panneau. La chaleur résiduelle qui vient du capteur photovoltaïque, se transfère par conduction et convection à l'intérieur du canal du capteur thermique, si bien, qu'une ventilation du capteur photovoltaïque permet d'améliorer sa productivité électrique. L'utilisation de ces capteurs hybrides ne se limite pas à l'usage comme chauffage, mais ils peuvent être utilisés comme moyens de ventilation. Il faut noter aussi, la grande adaptabilité de ces systèmes aux différentes configurations dans les bâtiments [45].

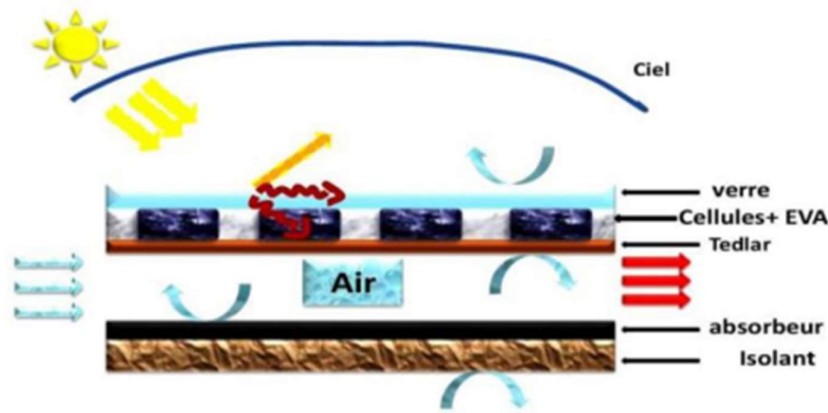


Figure 24. Principe de fonctionnement d'un système hybride PV/T à air

- Capteur solaire hybride de concentration.

Les systèmes à concentration photovoltaïque (CPV) peuvent opérer aux températures plus élevées que ceux des capteurs plans. Le rassemblement de la chaleur rejeté par le système CPV, mène à un système CPV/Thermique (CPV/T), fournissant tant l'électricité que la chaleur aux températures moyennes. L'utilisation de CPV/T en combinaison avec des réflecteurs, a un potentiel significatif, pour augmenter la production d'énergie d'une surface de cellule solaire donnée. Actuellement, la recherche va développer le capteur solaire CPV/T pour générer plus d'électricité aussi bien que la production de la chaleur. Peu de chercheurs ont travaillé dans cette direction, permettant aux systèmes hybrides polyvalents de combler la demande croissante d'énergie tant électrique que thermique, en protégeant l'environnement [46].

6.2. Applications des systèmes hybrides

Des systèmes hybrides PV/éolienne/diesel : Ces systèmes alimentent des maisons et des refuges (Elhadidy, 2002 ; Steinhüser et al, 2004) [52-53] ou des villages (Pinto et Araújo, 2004) [54]. Ils sont également utilisés pour les applications de pompage d'eau, pour l'irrigation des champs agricoles. Au Sénégal, un système hybride a été installé dans le village isolé de Sine Moussa Abdou, dans la région de Thiès, pour alimenter en électricité ces 900 habitants. Le système est composé d'un champ photovoltaïque de 5,2 kWc, complété par une turbine éolienne de 5 kW, d'un parc de batterie de 120 kWh et d'un groupe électrogène diesel de 8,5 kVA. Le groupe diesel est employé uniquement comme source d'appoint, les jours où les productions solaires et éoliennes ne permettent pas un rechargement suffisant des batteries en vue de couvrir la pointe de consommation en soirée.

Les systèmes PV/Batteries/Diesel sont également utilisés pour produire de l'électricité particulièrement pour des sites isolés à usages domestiques ou pour l'électrification rurale décentralisée. Ce système constitue une alternative de plus en plus intéressante et croissante face aux solutions standards telles que les groupes électrogènes purs ou les systèmes PV purs.

Le plus grand système PV-Batterie-Diesel en mini-réseaux se trouve au Mali. L'Agence malienne pour le développement de l'énergie domestique et l'électrification rurale (AMADER) a été particulièrement active dans la mise au point de ces mini-réseaux hybrides.

Elle a notamment réalisé 21 projets de centrales hybrides photovoltaïques Diesel pour une capacité totale de 2,1 MW. Le pays africain le plus actif dans le déploiement de la technologie hybride est le Sénégal. L'entreprise Isofoton a installé neuf centrales hybrides dans des régions isolées et dans les îles du delta de Saloum, afin d'assurer un approvisionnement en électricité à 5 000 ménages et à plusieurs activités productives. De même, L'Agence tanzanienne pour l'électrification rurale (REA) perçoit la technologie hybride comme l'une des solutions qui lui permettra d'offrir un service électrique fiable et abordable aux régions isolées. Plusieurs pays tels que la Mauritanie, le Rwanda, l'Ouganda, le Kenya, le Burkina Faso ont pu se doter de plusieurs centrales hybrides. Récemment, en 2019, le Togo s'est doté d'une minicentrale photovoltaïque de 50 MW pour l'électrification rurale. Elle a été inaugurée à Blitta à 267 km au nord de Lomé.

En 2021, au Bénin, la construction d'une minicentrale électrique à Djabata, en phase terminale, porte sur l'installation d'une puissance de 1.3 MWc et la construction de 30 km de réseau pour alimenter 10 000 ménages en électricité dans les localités de Djolini, Gorobani, Effèoutè, Djabata, Wari-Marou et Worja.

Aussi, ce système propose un meilleur rendement, parce que les sources fonctionnent avec une puissance plus proche de leur puissance nominale. De plus, il n'y a pas une conversion de l'énergie produite par le générateur diesel. Cela entraîne une diminution du nombre des convertisseurs électroniques, ce qui réduit le câblage nécessaire et l'investissement initial pour la construction du système hybride.

6.3. Avantages et inconvénients des systèmes hybrides

Anapakidis et al. examinent quatre combinaisons de systèmes hybrides (PV-Diesel, PV-Wind, Wind-Diesel et Wind-Fuel cell) pour différents sites de la Grèce. Ils montrent que ces systèmes peuvent être autonomes [47-49], ou interconnectés avec le système électrique du pays [50-51]. Aussi, Chaurey et Kandpal ont examiné et analysé la littérature PV relative aux applications rurales décentralisées dans les catégories telles que les aspects technico-économiques et les expériences des électrifications et démonstration technologique. Ces systèmes présentent une exploitation sans interruption, donnent une possibilité de préserver le surplus d'énergie produit, garantissent la sécurité d'approvisionnement quelles que soient les conditions météorologiques. Le surdimensionnement des éléments dont l'objectif est d'assurer une alimentation continue, se traduira par un investissement initial élevé (et donc limiter le développement de ces systèmes) et une augmentation du prix de kilowattheure produit.

7. Energie géothermique

7.1. Principe de fonctionnement de la géothermie

La géothermie utilise le flux de chaleur issu du centre de la terre. Presque partout, sur terre, la température, est environ 30 °C, plus élevée à un kilomètre de profondeur qu'en surface. La géothermie présente un énorme potentiel. Elle n'est cependant pas réellement renouvelable, puisqu'elle utilise de la chaleur géothermique emmagasinée en profondeur au fil du temps. Les régions (principalement volcaniques) qui abritent des réservoirs à haute température ou des formations rocheuses chaudes et sèches peuvent être mises à profit pour produire de l'électricité.

Mais la plupart des régions du monde peuvent exploiter les sources géothermiques pour le chauffage, en utilisant des pompes à chaleur si nécessaire. La technologie de forage peut s'inspirer de celles de l'industrie pétrolière. Une centrale géothermique produit de l'électricité grâce à la chaleur de la terre qui transforme l'eau contenue dans les nappes souterraines en vapeur et permet de faire tourner une turbine et un alternateur. En effet, l'eau de pluie ou de mer s'infiltre dans les fractures de la croûte terrestre pour constituer un réservoir dans le sous-sol, appelé nappe phréatique (aquifère), à haute température, de 150 à 350 °C. Ainsi, grâce à un forage dans le sous-sol, l'eau chaude est pompée jusqu'à la surface. Pendant sa remontée, elle perd de sa pression et se transforme en vapeur. La pression de cette vapeur fait tourner une turbine, qui fait à son tour, fonctionné un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif.

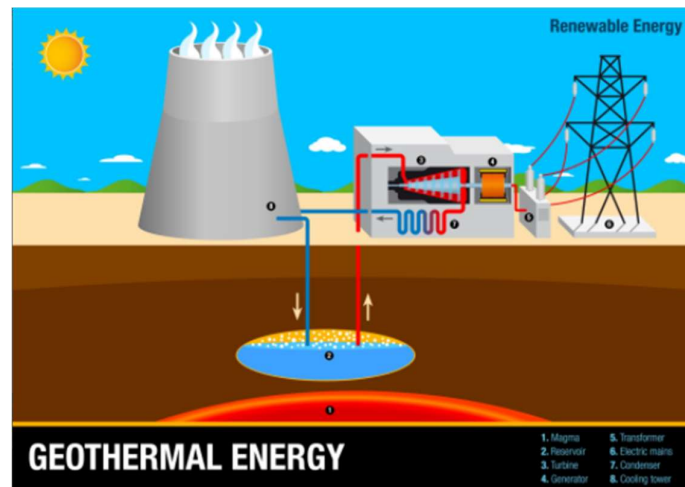


Figure 25. Principe de fonctionnement de l'énergie géothermique

7.2. Technologie de valorisation de l'énergie géothermique

d. Les centrales ORC (Cycle organique de Rankine)

Lorsque la température du fluide géothermique est moins importante (c'est-à-dire entre 90 °C et 150 °C), on utilise des centrales utilisant un fluide intermédiaire. Dans une centrale ORC, le fluide géothermique est maintenu sous pression puis est amené dans un échangeur de chaleur où il cède son énergie à un fluide organique (par exemple l'isobutane) qui peut se vaporiser à faible pression et température. La vapeur produite est ensuite turbinée, condensée et revient à l'état

liquide. Puis, elle est pompée et retourne à l'échangeur de chaleur pour effectuer un nouveau cycle en circuit fermé. La turbine est couplée à un alternateur pour produire de l'électricité. Le fluide géothermal refroidi après son passage dans l'échangeur de chaleur et est réinjecté dans le sous-sol dans le puits d'origine par un second forage.

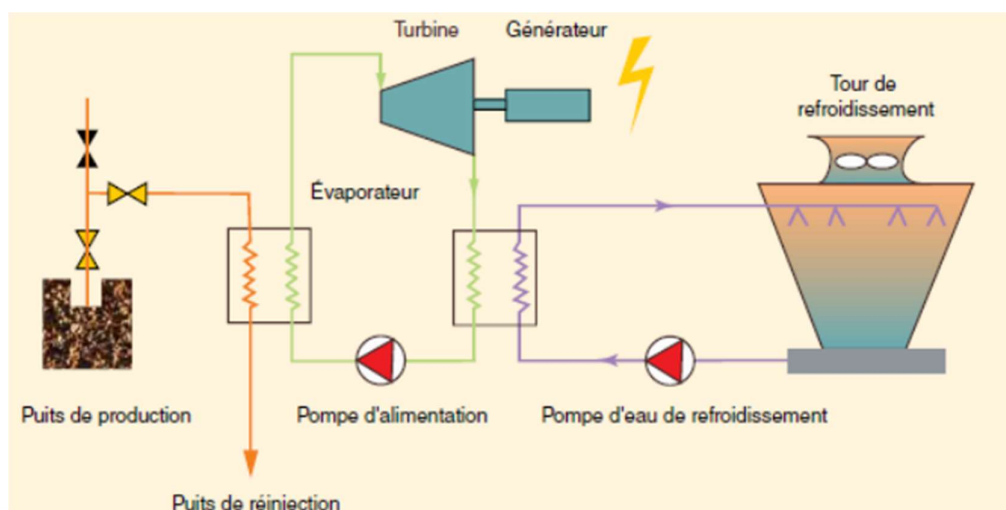


Figure 26. Schéma de principe d'une centrale à fluide binaire [Source : ESMAP, modifié de Dickson and Fanelli 2004]

e. Les centrales « flash »

La chaleur terrestre n'est pas exploitable partout de la même façon. Dans les zones volcaniques, la chaleur du centre de la terre remonte et réchauffe de gigantesques poches d'eau. Ce fluide sous pression et chargé en minéraux est extrait par forage. Lors de sa remontée dans le puits, il perd de la pression et arrive à la surface sous forme d'un mélange d'eau et de vapeur. L'eau et la vapeur sont séparées dans un séparateur-sécheur. La vapeur est ensuite envoyée directement dans une turbine couplée à un alternateur qui produit ainsi de l'électricité. À la sortie de la turbine, la vapeur détendue est condensée et réinjectée avec l'eau séparée dans le réservoir géothermique. La puissance électrique moyenne de ces centrales géothermiques varie de 15 à 50 MW.

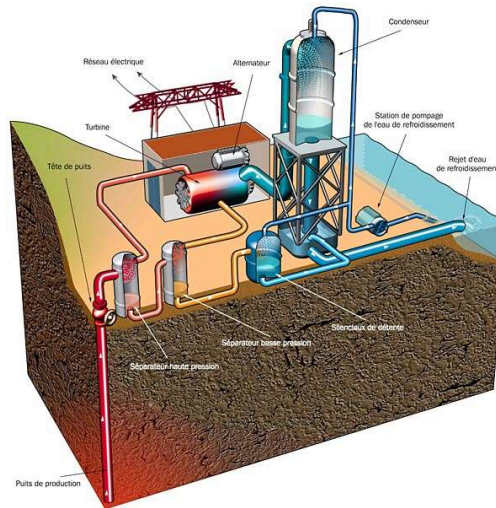


Figure 27. Schéma de principe d'une centrale flash

En fonction de la disponibilité des ressources hydrothermales exploitables, un grand nombre de technologies et de configurations de centrales électriques ont été étudiées [55-58]. En général, les chercheurs conviennent que, quatre (4) puissantes configurations ont été développées pour les centrales géothermiques : sèche vapeur, simple flash, double flash, binaire.

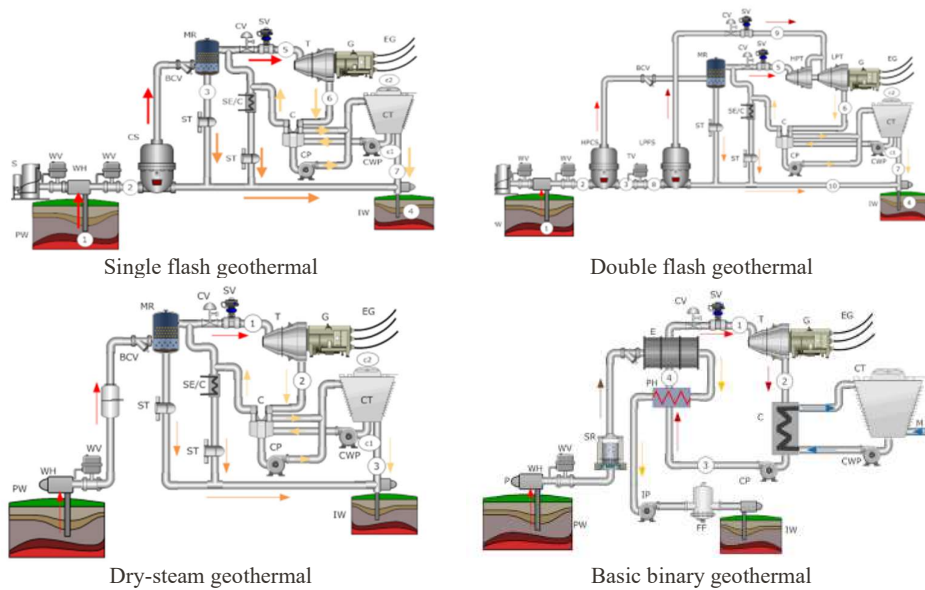


Figure 28. Système de conversion de l'énergie géothermique

7.3. Applications de l'énergie géothermique

Les configurations d'utilisations géothermiques concernent généralement les applications en cascade utilisant la saumure d'abord pour produire de l'électricité, puis pour le chauffage fin [59]. À cet égard, les sources de chaleur géothermiques à des températures supérieures à 150 °C permettent de combiner la production de chaleur et d'électricité. Ainsi, la température de condensation, généralement supérieure à 60 °C, convient pour le chauffage urbain ou d'autres applications de chauffage direct. Les applications non-électriques utilisent l'énergie thermique

directement du géo-fluide pour compléter une vaste gamme d'applications, qui nécessitent une plage de température entre 10 °C et 150 °C environ [59]. Aussi appelées utilisations directes, ces applications dépassent à la fois la limite économique des températures de production d'énergie géothermique et la mauvaise performance thermodynamique des combustibles fossiles utilisés pour chauffage entraînant une meilleure utilisation des ressources d'énergie géothermique. Lund et Boyd [60] évaluent l'énergie thermique globale utilisée et identifient neuf catégories d'utilisation : pompes à chaleur géothermiques, chauffage des locaux, chauffage des serres, chauffage d'étang d'aquaculture, utilisations industrielles, baignade et natation, refroidissement et fonte des neiges, et autres.

7.4. Avantages et inconvénients de l'énergie géothermique

C'est un mode de production de chaleur économe en vue d'alimenter des centrales électriques à vapeur. Les zones volcaniques produisent plus de chaleur. La géothermie n'est pas influencée par la météo du lieu de production, contrairement à l'énergie solaire par exemple. La production de chaleur génère peu de gaz à effet de serre. Toutefois, il existe quelques préoccupations environnementales relatives à ces centrales en général, par exemple, la pollution de l'eau, le bruit et la pollution visuelle, l'utilisation de l'eau et des sols.

II. Etat des lieux des ressources énergétiques renouvelables disponible en Côte d'Ivoire

Les sources d'énergie à caractère renouvelable disponible en Côte d'Ivoire sont le solaire, la biomasse, l'hydraulique et l'éolienne. Nous présentons leur répartition géographique ainsi que leur potentiel de valorisation sur tout le territoire avec les technologies identifiées précédemment en vue de la production de l'électricité pour l'électrification des zones rurales.

1. L'hydraulique

1.1. Répartition géographique et potentiel de la ressource Hydraulique

La Côte d'Ivoire dispose de ressources hydrauliques significatives, réparties, à travers quatre bassins-versants principaux à savoir la Comoé, le Sassandra, le Bandama, le Cavally et plusieurs affluents qui s'y déversent. Six barrages ont été mis en service entre 1959 et 1984 et représentent une puissance installée cumulée de 604 MW. Ces barrages ont produit 1 352 GWh d'énergie en 2015, soit 16 % de l'énergie totale produite. La centrale hydroélectrique de Soubré de 275 MW a été mise en service en 2017. Dix-sept (17) autres projets de grandes centrales hydrauliques et douze (12) projets de mini centrales hydrauliques ont été identifiés. Des études de faisabilité sont en cours, notamment sur les sites situés en aval de Soubré : Gribo Popoli (112 MW), Boutoubré (150 MW) et Louga (126 + 120 MW). Le potentiel hydroélectrique de la Côte d'Ivoire est de 2500 MW-12 000 GWh en Grosse Hydraulique et 78 MW-300 GWh en petite hydraulique.



Figure 29. Cartographie du Potentiel hydraulique de la Côte d'Ivoire (Source : CI-Energies)

1.2. Technologie utilisée pour la ressource hydraulique en Côte d'Ivoire

Différentes technologies telles que l'hydroélectricité – la marée motrice - l'hydrolienne peuvent être utilisées pour produire de l'électricité. Mais la technologie utilisée en Côte d'Ivoire pour la production d'électricité, est celle de l'hydroélectricité.



Figure 30. Centrale hydroélectrique de Soubré (Source : CI-Energies)

2. Le solaire

2.1. Répartition géographique et potentiel de la ressource solaire

Les conditions d'ensoleillement sont très bonnes en Côte d'Ivoire. Les irradiations journalières répertoriées sont comprises entre 2 et 5 kWh/m²/jour comme le montre la figure 31. Le potentiel énergétique solaire est estimé à plus de 1 900 kWh/m²/an. Ce potentiel solaire est donc exploitable dans tout le pays, bien qu'il soit meilleur dans sa moitié nord et surtout dans la zone Nord-ouest.

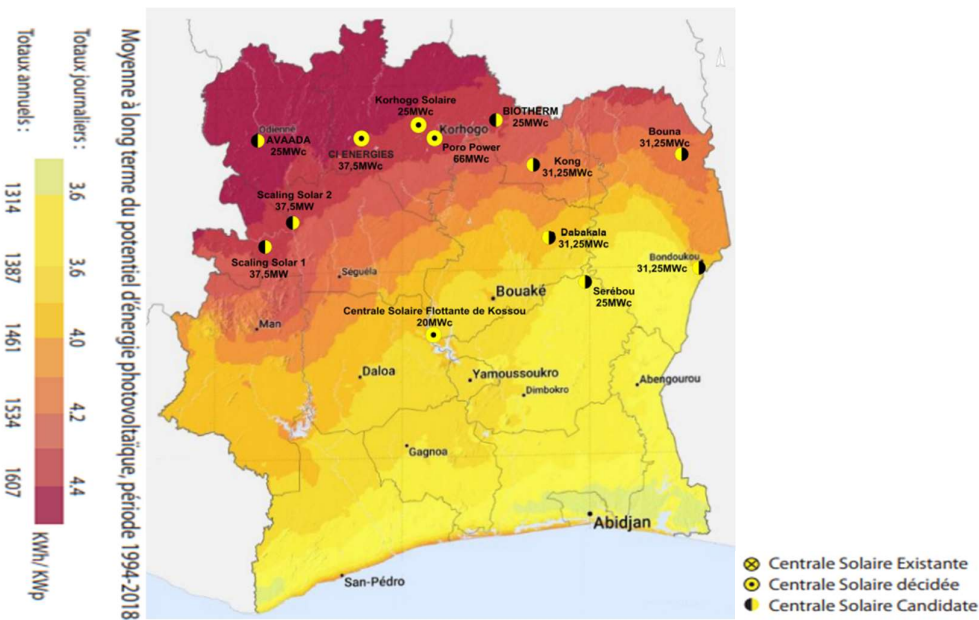


Figure 31. Cartographie du Potentiel solaire de la Côte d'Ivoire (Source : CI-Energies)

2.2. Technologie utilisée pour la valorisation de l'énergie solaire en Côte d'Ivoire

Les technologies de production d'énergie solaire sont caractérisées par une forte baisse des coûts depuis 5 ans. Les projets d'énergie solaire sont en conséquence de plus en plus compétitifs. Cette ressource peut être utilisée pour produire du courant à partir de deux technologies à savoir les systèmes à concentration CSP ou les systèmes photovoltaïques. Cette dernière est celle en phase d'application en Côte d'Ivoire. Elle est observée à travers l'installation de premières minicentrales hybrides dans plusieurs zones du pays comme le représente la figure 32.

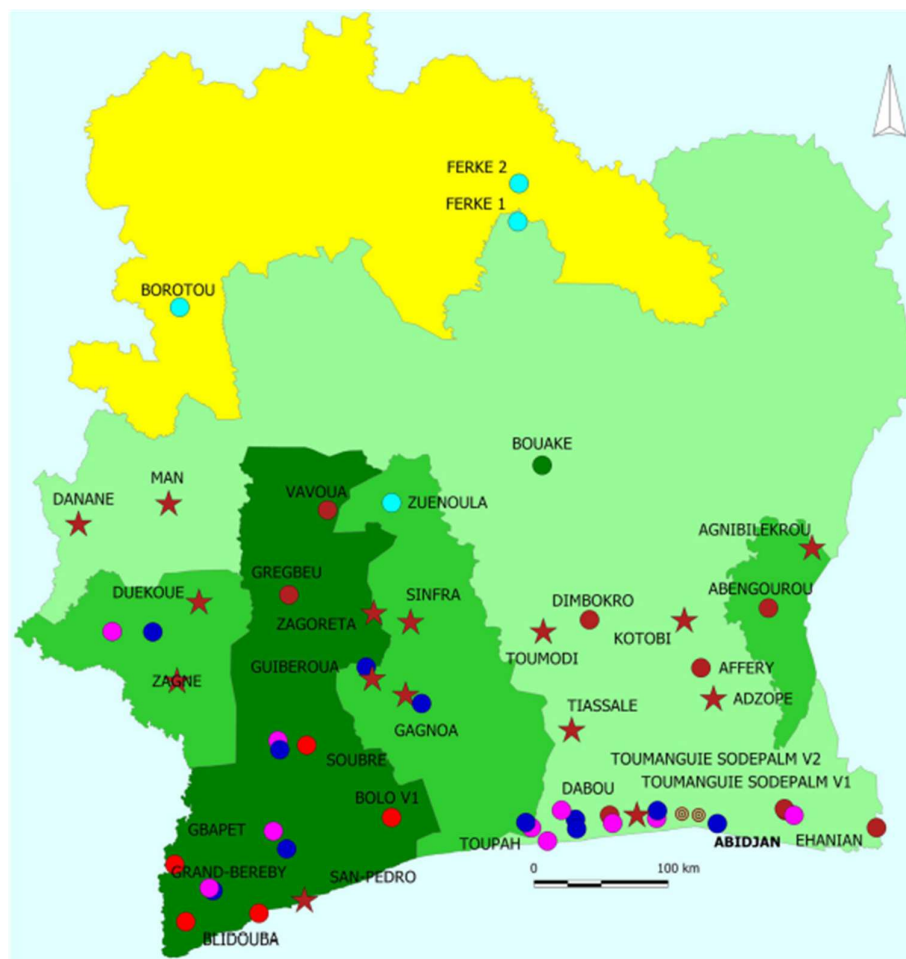


Figure 32. Minicentrale hybride de Dybikro (Source : CI-Energies)

3. La biomasse

3.1. Répartition géographique et potentiel de la biomasse

L'activité économique de la Côte d'Ivoire orientée vers l'exportation et la transformation de produits agricoles génère une grande quantité de résidus qui constituent la biomasse. Sur la base des estimations de quantités et de critères de disponibilité de la biomasse on peut estimer que, le potentiel de Biomasse Energie est de 16,7 millions de Tonnes par an, Cacao : 13 millions, Huile de Palme 2,5 millions, Caoutchouc : 1 millions, Coton 0,2 million. La puissance électrique totale est estimée à 1 645 MWe avec un rendement moyen de 25% (Source : CI-Energies).



Légende reprise












Production de cacao-café		Autres cultures individuelles	
	Pas de production		Huile
	Production basse		Noix de cajoux
	Production moyenne		Sucre
	Production haute	Transformation du bois	
Hévéa et industrie du caoutchouc			Scierie
	Plantation hévéa		Seconde transformation
	Production caoutchouc		

Figure 33. Cartographie du Potentiel de la biomasse en Côte d'Ivoire (Source : CI-Energie)

3.2. Technologie utilisée pour la valorisation de la biomasse Côte d'Ivoire

Plusieurs technologies existent comme nous l'avons indiqué dans le chapitre précédent mais l'exploitation moderne de cette ressource n'est qu'à l'étape de projet même si des conventions ont été signées avec plusieurs agro-industries (Biokala, ...).

4. L'éolien

4.1. Répartition géographique et potentiel de la ressource éolienne

La Côte d'Ivoire ne bénéficie pas d'un atlas éolien mais à travers la SODEXAM, nous relevons des valeurs moyennes de vitesse de vent autour de 4 à 5 m/s sur l'ensemble du territoire pour une hauteur manométrique de 50 m. Cette ressource pourrait être exploitée avec des générateurs éoliens de petite à moyenne puissance.

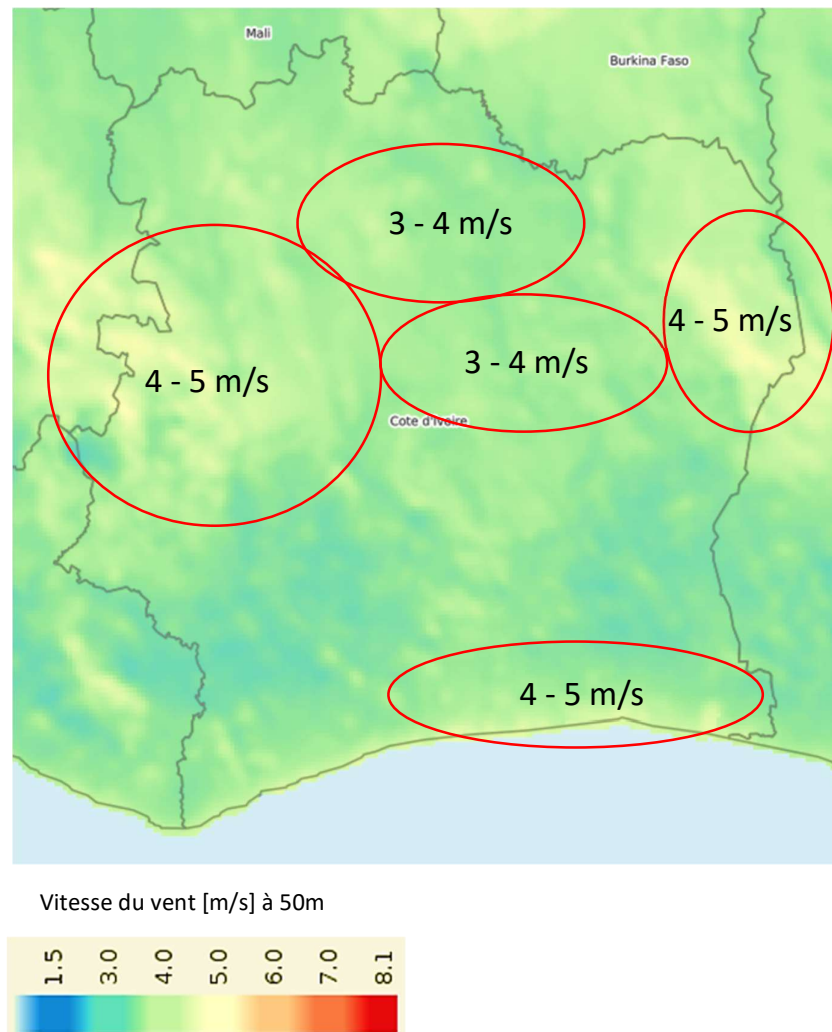


Figure 34 Cartographie du Potentiel éolien de la Côte d'Ivoire (Source : ECREE)

III. Evaluation des technologies de production décentralisée adaptées à l'environnement Ouest-Africain et en particulier à l'environnement ivoirien

De nombreuses technologies de valorisation de l'énergie renouvelable sont envisageables, certaines sont pertinentes dans le contexte ivoirien, d'autres pourraient faire l'objet d'études de potentialité. Les paragraphes suivants présentent ces différentes technologies disponibles avec leur potentiel d'application en Côte d'Ivoire.

Tableau 9. Technologies disponibles avec leur potentiel d'application en Côte d'Ivoire (source : CI-Energies)

Ressources	Technologies	Potentiel
Solaire	La technologie de production solaire photovoltaïque La technologie de production solaire thermodynamique	Le potentiel énergétique solaire est estimé à plus de 1 900 kWh/m ² /an
Hydraulique	Hydroélectricité Hydrolienne Marémotrice	Le potentiel hydroélectrique de la Côte d'Ivoire est de 2500 MW-12 000 GWh en Grosse Hydraulique et de 78 MW-300 GWh en petite hydraulique.
Biomasse	Combustion Gazéification Carbonisation Torréfaction Méthanisation	Le potentiel de Biomasse Energie est de 16,7 millions de Tonnes par an
Eolienne (Axe horizontal et Axe vertical)	Technologies équipées d'un générateur asynchrone Technologies équipées d'un générateur synchrone	Potentiel à définir (projet d'atlas des vents : SODEXAM)

1. Technologies solaires adaptées à l'environnement Ouest-Africain

Les pays d'Afrique de l'Ouest situés au niveau de l'équateur, où le PV a la capacité de répondre de manière significative à la demande en électricité, notamment par le biais d'applications hors réseau. Ceci permettrait de fournir de l'énergie durable à l'ensemble de la population. En outre, le PV est en mesure de satisfaire la demande en électricité tout en réduisant la dépendance à l'égard des importations de combustibles fossiles, et en garantissant le développement économique et social au moyen de systèmes PV à usages multiples, adaptés aux besoins locaux.

Le coût d'investissement de la technologie PV est proche d'un million d'euros/MW [23].

L'un des principaux problèmes technologiques auxquels doit faire face le photovoltaïque est la réduction du coût de ces systèmes. Cette réduction des coûts doit s'appliquer à tous les éléments des systèmes PV ainsi qu'à l'ensemble de la chaîne de valeur économique, des matières premières jusqu'au système fini. [61]

Les CSP avec une capacité de stockage sont adaptés à la région de la CEDEAO qui connaît de plus en plus de pics de consommation en fin de soirée. Leur coût devrait diminuer au fil du temps pour atteindre des niveaux comparables à ceux des petites centrales hydroélectriques. Le coût d'investissement avoisine 4 millions d'euros/MW.

2. Technologies de valorisation de biomasse adaptées à l'environnement Ouest-Africain

L'objectif général du cadre stratégique est de fixer des actions prioritaires pour donner la possibilité aux citoyens de la région de la CEDEAO de produire et d'utiliser une bioénergie moderne de manière durable, grâce à la création d'un environnement favorable. Le cadre stratégique régional sur la bioénergie vise à favoriser et à promouvoir les investissements nationaux et étrangers destinés à résoudre la pauvreté énergétique qui prévaut dans la région parmi les populations périurbaines ou rurales, sans pour autant nuire à la sécurité alimentaire et à l'environnement. La mise en œuvre du cadre stratégique doit tenir compte de la production locale de composants/dispositifs et de combustibles capables de stimuler le développement socio-économique à travers la création de valeur ajoutée et d'emplois.

En outre, les technologies de valorisation de biomasse adaptées à l'environnement Ouest-Africain sont celles comprenant des procédés chimiques telles que la combustion, la gazéification, la fermentation, car elles permettent de fournir de l'électricité, du bioéthanol et du biocarburant vu les ressources agricoles diversifiées dont elle dispose.

La taille des centrales devrait augmenter avec le temps grâce à la modernisation de l'agriculture et à la disponibilité des ressources (résidus agro-industriels, etc...), entraînant une réduction considérable des coûts d'investissement et d'exploitation.

3. Technologies hydrauliques adaptées à l'environnement Ouest Africain

L'hydroélectricité, constitue un outil approprié pour relever les défis liés à la sécurité énergétique, l'accès à l'énergie et l'atténuation du changement climatique dans la région de la CEDEAO, de manière simultanée et durable. Quelle que soit sa taille, l'hydroélectricité peut contribuer de manière significative de satisfaire les besoins en électricité des zones urbaines et périurbaines, mais aussi ceux des zones rurales isolées. Sa production peut être injectée dans les réseaux principaux ou dans les systèmes hors réseau pour approvisionner un ou plusieurs villages, y compris pour les utilisations productives dans les zones isolées. Il est souvent difficile d'évaluer le coût d'une petite centrale hydroélectrique, le coût des travaux de génie civil dépendant directement du lieu d'implantation choisi. [61]

Au cours des décennies précédentes, les sociétés d'électricité de la CEDEAO se sont principalement intéressées à la grande hydroélectricité, plutôt qu'à la petite ou à la moyenne. Par conséquent, les capacités dans ces secteurs ont évolué de manière inégale. Le portefeuille des projets prioritaires de système d'échanges d'énergie en Afrique de L'Ouest (l'EEEOA) met l'accent exclusivement sur l'énergie hydroélectrique plus grande et plus compétitive.

4. Technologies éoliennes adaptées à l'environnement Ouest Africain

La faible pénétration de la technologie éolienne en Côte d'Ivoire génère des coûts de mise en œuvre élevés plus que les pays occidentaux. Aussi, la faible disponibilité de la ressource (puissance et constance du vent) réduit l'intérêt des grandes éoliennes (puissance > plusieurs MW). Par contre, pour les petites puissances (de 1 kW à 5 kW), cette technologie pourrait être aisément utilisée en Côte d'Ivoire et plus généralement en Afrique de l'Ouest.

5. Conclusion

Cette étude bibliographique, nous a permis d'identifier les ressources à caractère renouvelable disponible en Afrique de l'Ouest et en particulier en Côte d'Ivoire. Les ressources disponibles sont le solaire, la biomasse, l'éolien et l'hydroélectricité (hydrolienne et petite hydraulique).

À l'aune de la disponibilité des ressources énergétiques et des modes de consommation, les technologies les plus appropriées à mettre en œuvre pour couvrir les besoins en intégrant des critères de faisabilité et de coût, dans le cas de notre étude, seront essentiellement les suivantes :

- **Le solaire photovoltaïque** : ce sont des technologies matures, à faible coût avec une tendance baissière, bien maîtrisées dans le contexte ivoirien avec un fort taux de pénétration et une durée de mise en œuvre de moins de 12 mois ;
- **Les systèmes éoliens** : les petites et moyennes éoliennes (entre 1 et 5 kW) peuvent compenser l'absence de production solaire non stockée ;
- **Les systèmes hydrauliques ou hydroliennes** : la petite hydraulique et/ou hydroliennes (de moins de 50 kW) présentent l'avantage d'une ressource continue et disponible dans

le contexte ivoirien, mais supposent une proximité des cours d'eau avec les lieux de consommation ;

- ***Les systèmes valorisant la biomasse** : l'implantation de ces systèmes suppose une logistique importante de collecte de la ressource et de la production.*

Chapitre 3 : *Identification et modélisation des besoins en électricité et des ressources disponibles dans un village rural en Côte d'Ivoire*

Introduction

En matière d'électrification, les taux de connexion des zones rurales sont restés très bas car les compagnies privées y accordent moins d'intérêts. L'extension du réseau a conduit à se concentrer sur les communautés proches du réseau ou sur les grandes zones urbaines, excluant une grande partie de la population vivante dans des zones rurales inaccessibles. Le bois de feu est donc la principale ressource énergétique utilisée par les populations locales. Ensuite, vient l'hydrocarbure consommé en faible quantité. Toutefois, la valorisation des ressources renouvelables locales ainsi que les solutions techniques mix (centralisées et décentralisées) font l'objet aujourd'hui de recommandation des grandes agences de développement telles que la banque mondiale et l'AIE.

En effet, les besoins énergétiques paraissent de plus en plus immenses, en particulier dans les pays d'Afrique de l'Ouest, là où les prélèvements des ressources forestières deviennent saturés et les prix des hydrocarbures importés augmentent. Ces besoins sont d'autant plus importants, que les niveaux de consommation sont les plus faibles au monde (le taux d'électrification rurale est inférieur à 5% à l'échelle de l'UEMOA), et sont donc amenés à se développer.

Il est donc primordial pour nous, de caractériser la demande afin de pouvoir garantir l'accès aux services énergétiques. Cependant, l'accès aux données fiables et précises de ces besoins, est généralement difficile pour dimensionner les mini-réseaux de manière efficace. Wijaya & Tezuka, en 2013 ont constaté que le plus grand obstacle à une étude précise de la consommation d'électricité des ménages et à la formulation de politiques efficaces était le manque de données sur l'utilisation de l'électricité [62].

Il est nécessaire pour nous, de proposer, dans un premier temps, un modèle qui permettra de modéliser de manière fiable les besoins. Puis d'effectuer une simulation des besoins énergétiques pour un village. Et pour finir, de proposer une méthode qui nous permettra de caractériser la demande pour un village situé en zone rurale.

Pour cela, nous mènerons une enquête sur terrain dans un village, afin d'identifier de manière précise les équipements utilisés ainsi que leurs consommations en fonction de leurs usages. Puis nous effectuerons une simulation, qui nous permettra d'obtenir des courbes de charge, des pics de charge ainsi que le profil de charge de l'ensemble des usages des ménages par catégorie de consommation du village.

I. Identification et modélisation des besoins énergétiques et des ressources disponibles d'un village

1. Identification des besoins en électricité d'un village en milieu rural

1.1. Critère du choix de sélection d'un village

Pour caractériser avec pertinence les besoins des ménages, une liste de critères principaux a été retenue. Il s'agit notamment de :

- ✓ La situation géographique
- ✓ La population (lien avec la volumétrie pour les différents usages)
 - Nombre de ménages ou le nombre de classes d'enseignement ;
 - Nombre de ménages ayant une d'activité professionnelle nécessitant de l'électricité ;
 - Nombre de ménages avec impact sur les usages collectifs (pompes à eau, moulin, ...)
- ✓ La culture locale (faits culturels) pour comprendre les modes de vie qui détermine la typologie des consommations, les temps d'utilisation des équipements ainsi que les tranches horaires associées.
- ✓ Les activités économiques (lien pour cerner des usages tertiaires)
 - Comprendre le revenu moyen/habitant ou ménage
- ✓ Les infrastructures (lien pour cerner certains usages)
- ✓ Les caractéristiques climatiques (lien pour gisement solaire, éolien, biomasse, ...)

1.2. Identification des besoins en électricité du village

L'électrification rurale désigne le processus de mise à disposition de l'énergie électrique aux populations rurales. Les besoins en électricité du monde rural demeurent importants et peuvent être scindés en trois grands groupes d'utilisateurs. Il s'agit des utilisateurs domestiques, des utilisateurs collectifs et de commerces et la micro-industrie. Les différents groupes expriment les besoins énergétiques suivants.

- a. Les besoins énergétiques des ménages correspondent à :
 - L'éclairage est le principal besoin énergétique. Cependant l'utilisation de moyens traditionnels tels que les lampes à pétrole, les bougies ou les lampes torches, continue d'être privilégiée par les populations rurales ;
 - L'utilisation d'appareils électriques tels que l'audiovisuel (représente également une demande très forte du monde rural. En effet, il permet un lien avec le monde extérieur limitant quelque peu l'exode rural) ;

- Les équipements pour la cuisson et la conservation des aliments par le froid, répondent aux besoins nécessaires au monde rural en vue d'améliorer les conditions de vie.
- b. Les besoins collectifs sont associés aux usages communautaires tels que :
- L'éclairage public ;
 - L'éclairage des écoles ;
 - L'éclairage des bâtiments administratifs ;
 - L'adduction d'eau potable et l'assainissement ;
 - L'électrification des centres de santé (soins de nuit, conservation des médicaments, appareils électroménagers, plateaux techniques...).
- c. Les besoins associés aux activités économiques et micro-industrielles du village, génératrices de revenus et de développement de proximité. Il s'agit notamment de :
- Magasins et boutiques ;
 - Artisanat ;
 - Pompage de l'eau pour l'irrigation des champs ;
 - Transformation des produits agricoles (broyage, décorticage, séchage...);
 - Développement d'activités marchandes rentables.

1.3. Répartition des usages par tranches horaires du village

a. Equipement par usages

En vue de mieux caractériser les usages, il a été nécessaire de segmenter les besoins en trois catégories (domestique, collectif, tertiaire) et de définir les appareils utilisés. Le tableau ci-dessous nous présente un aperçu de cette répartition.

Tableau 10. Appareils susceptibles d'être utilisés pour chaque usage

Consommation usage domestiques (Appareils utilisés D_i)	
D1	Lampes
D2	Radio, chaîne hifi
D3	Télévision, lecteur vidéo
D4	Ventilateur
D5	Climatiseurs
D6	Téléphone
D7	Ordinateurs
Consommation usage collectifs (Appareils utilisés C_j)	
C1	Lampes
C2	Pompe hydraulique
C3	Groupe électrogène
C4	Réfrigérateur médical
C5	Appareils électroménagers
C6	Plateaux techniques pour les hôpitaux
Consommation usage tertiaire (Appareils utilisés T_k)	
T1	Lampes
T2	Télévision
T3	Appareils électroménagers
T4	Pompe hydraulique pour l'irrigation des champs
T5	Moulins
T6	Tout appareil utilisé pour mener des activités marchandes rentables

b. Usage par tranches horaires

Nous avons également recensé les équipements, leur puissance, les durées d'utilisation et leur taux d'utilisation en vue de caractériser les besoins réels.

Il est également nécessaire de définir les tranches horaires associées comme indiqués ci-dessous.

De 00h à 5h (nuit)

Consommation usage domestique (D_i) = fonction des appareils utilisés pendant cette période. Il s'agit de : D1, D2, D3, D4...Dn ; pour des puissances P_i (P1, P2, P3, P4...Pn) ; nombre d'heure d'utilisation Y_i (Y1, Y2, Y3, Y4...Yn)

Consommation usage collectif (C_i) = fonction des appareils utilisés pendant cette période. Il s'agit de : C1, C2, C3, C4...Cn ; pour des puissances P_i (P1, P2, P3, P4...Pn) ; nombre d'heure d'utilisation Y_i (Y1, Y2, Y3, Y4...Yn)

Consommation usage tertiaire (T_i) = fonction des appareils utilisés pendant cette période. Il s'agit de : $T_1, T_2, T_3, T_4 \dots T_n$; pour des puissances P_i ($P_1, P_2, P_3, P_4 \dots P_n$) ; nombre d'heure d'utilisation Y_i ($Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 \dots Y_n$)

L'enquête a permis de mieux caractériser les occupations des ménages entre 00h et 05h.

De 05h à 17h (jour)

Consommation usage domestique (D_i) = fonction des appareils utilisés pendant cette période. Il s'agit de : $D_1, D_2, D_3, D_4 \dots D_n$; pour des puissances P_i ($P_1, P_2, P_3, P_4 \dots P_n$) ; nombre d'heure d'utilisation Y_i ($Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 \dots Y_n$)

Consommation usage collectif (C_i) = fonction des appareils utilisés pendant cette période. Il s'agit de : $C_1, C_2, C_3, C_4 \dots C_n$; pour des puissances P_i ($P_1, P_2, P_3, P_4 \dots P_n$) ; nombre d'heure d'utilisation Y_i ($Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 \dots Y_n$)

Consommation usage tertiaire (T_i) = fonction des appareils utilisés pendant cette période. Il s'agit de : $T_1, T_2, T_3, T_4 \dots T_n$; pour des puissances P_i ($P_1, P_2, P_3, P_4 \dots P_n$) ; nombre d'heure d'utilisation Y_i ($Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 \dots Y_n$)

L'enquête a permis de mieux caractériser les occupations des ménages entre 5h et 17h. C'est dans cette tranche horaire que l'énergie appelée est la plus faible de la journée.

De 17h à 23h (soirée: pointe)

Consommation usage domestique (D_i) = fonction des appareils utilisés pendant cette période. Il s'agit de : $D_1, D_2, D_3, D_4 \dots D_n$; pour des puissances P_i ($P_1, P_2, P_3, P_4 \dots P_n$) ; nombre d'heure d'utilisation Y_i ($Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 \dots Y_n$)

Consommation usage collectif (C_i) = fonction des appareils utilisés pendant cette période. Il s'agit de : $C_1, C_2, C_3, C_4 \dots C_n$; pour des puissances P_i ($P_1, P_2, P_3, P_4 \dots P_n$) ; nombre d'heure d'utilisation Y_i ($Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 \dots Y_n$)

Consommation usage tertiaire (T_i) = fonction des appareils utilisés pendant cette période. Il s'agit de : $T_1, T_2, T_3, T_4 \dots T_n$; pour des puissances P_i ($P_1, P_2, P_3, P_4 \dots P_n$) ; nombre d'heure d'utilisation Y_i ($Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 \dots Y_n$)

L'enquête a permis de mieux caractériser les occupations des ménages entre 17h et 23h. C'est dans cette tranche horaire que l'énergie appelée est la plus élevée de la journée.

Un listing des différents appareils utilisés par catégorie a été élaboré. Le tableau 11, nous en présente un exemplaire.

Tableau 11. Répartition des consommations (source : Toure 2019)

Consommation usage domestique				
Equipements	X1	X2	X3	Xn
Puissance	P1	P2	P3	Pn
00h-05h	D1	D2	D3	Dn
05h-17h	D1	D2	D3	Dn
17h-23h	D1	D2	D3	Dn
Nb heures/j	Y1	Y2	Y3	Yn
Consommation usage collectif				
Equipements	X1	X2	X3	Xn
Puissance	P1	P2	P3	Pn
00h-05h	C1	C2	C3	Cn
05h-17h	C1	C2	C3	Cn
17h-23h	C1	C2	C3	Cn
Nb heures/j	Y1	Y2	Y3	Yn
Consommation usage Tertiaire				
Equipements	X1	X2	X3	Xn
Puissance	P1	P2	P3	Pn
00h-05h	T1	T2	T3	Tn
05h-17h	T1	T2	T3	Tn
17h-23h	T1	T2	T3	Tn
Nb heures/j	Y1	Y2	Y3	Yn

2. Evaluation des besoins en électricité d'un village par enquête

2.1. Présentation du village d'Elokato

Eloka (Akoualo en ethnies Ébrié) est un petit village, situé au bord du littoral ivoirien, à quelque 40 kilomètres de la capitale économique Abidjan, dans la Région des Lagunes. Cette bourgade, chef-lieu de commune et peuplé par les Ebriés (groupe Akan), est constituée de deux entités à savoir Eloka-té et Eloka-to. Elle fait partie de la sous-préfecture de Bingerville. Les conditions de réussite de notre projet consistaient à identifier un village volontaire, comme site expérimental, non loin du centre des affaires Abidjan et du centre des métiers de l'électricité de Bingerville de la CIE (Compagnie Ivoirienne d'Electricité). Ce site devrait permettre l'installation d'un plan de comptage pour l'évaluation des besoins et répondre aux critères suivants :

- Accès facile au village
- Proximité du village d'Abidjan (agglomération moderne)
- Adhésion des populations au projet d'énergies renouvelables
- Disponibilité des ressources énergétiques (vent, cours d'eau, biomasse, faible gisement solaire comparativement au reste du Pays)



Figure 35. Situation géographique du village d'Elokato

Dans le but de déterminer les besoins journaliers du village d'Elokato, nous menons une enquête de terrain organisée le samedi 18 Mai 2019, à cet effet une vingtaine d'étudiants en BTS 1ère année de Froid Industriel et Energies renouvelables ont été mobilisée.



Figure 36. Photo de famille des enquêteurs

2.2. Méthodologie de l'enquête

Il s'est agi tout d'abord de s'entretenir avec les populations dans le but de comprendre leurs habitudes de consommation d'énergie électrique puis de faire l'inventaire des différents équipements utilisant l'électricité.



Figure 37. Entretiens avec la population

Ainsi nous avons procédé à :

- a) L'élaboration de formulaires d'entretien (Google form) ;
- b) La répartition des groupes par zones ;
- c) La collecte des informations et le traitement des données.

a. Elaboration de formulaires d'entretiens d'enquête du village d'Elokato

Deux (02) types de formulaires ont été élaborés à travers l'outil Google Form. Cet outil adapté pour les enquêtes par questionnaire a permis de créer :

- *Un premier modèle de formulaire pour la collecte des usages collectifs ;*
- *Un second modèle de formulaire pour la collecte des usages individuels.*

Pour les usages collectifs, il était question dans un premier temps, de faire un recensement de toutes activités utilisées pour un tel usage. Puis dans un deuxième temps, de recueillir les données (puissance et temps d'utilisation) des équipements utilisés pour l'éclairage public, le dispensaire, l'école primaire.

En ce qui concerne les usages individuels, les questions prédéfinies étaient axées sur la taille du ménage, les équipements et la consommation d'électricité. Le questionnaire traitant le volet de la consommation d'électricité, contenait des questions concernant les populations par ménages, le nombre et le types d'équipement installés (lampes, splits, climatiseurs, réfrigérateurs...), le temps de fonctionnement des équipements, l'heure d'utilisation et les jours de la semaine où l'appareil est utilisé ; par exemple avez-vous compteur électrique ? êtes-vous au nombre de combien dans votre ménage ? Votre ménage a-t-il une télévision ?" suivi de "À quelle heure le téléviseur est-il utilisé ?" et "Quels jours le téléviseur est-il utilisé ? êtes-vous intéressés par une solution photovoltaïque ?

Un exemplaire des questionnaires pour la collecte des données à usages collectifs et individuels est donc illustré en annexe (Annexe 1 : tableau 1).

b. La répartition des groupes par zones à Elokato

Dix (10) groupes ont été constitués et repartis selon le découpage ci-dessous en tenant compte des rues et sous quartiers du village d'Elokato.



Figure 38. Répartition des équipes par zone à ELOKATO

L'idée pour avoir des résultats concernant "les besoins des ménages : usages individuels" était principalement de passer de ménages en ménages pour questionner les locataires sur leurs

habitudes, les équipements qu'ils possèdent et la durée de fonctionnement journalière de ces équipements.

Pour ce qui est du formulaire des besoins à usage collectif, il fallait juste compter le nombre d'équipements mis à la disposition de la totalité de la population d'Elokato.

Ainsi donc nous avons formé des binômes que nous avons reparti dans les différentes zones tracées.



Figure 39. Dernières consignes aux équipes avant de commencer l'enquête

c. Echantillonnage : rencontre avec les ménages du village d'Elokato

Le village compte 108 ménages, parmi lesquels 96 disposent de compteurs d'électricité. Notre enquête a porté au total sur 72 ménages soit 67% des ménages et 77% des ménages disposant d'un compteur d'énergie électrique.



Figure 40. Séance avec les populations

2.3. Résultats de l'enquête effectuée dans le village d'Elokato

2.3.1. Usages individuels

Les résultats sont reportés dans le tableau ci-dessous. La puissance installée de l'ensemble des équipements à usage individuel est de 89 kW. La consommation journalière d'énergie électrique en tenant compte du temps de fonctionnement est de 345 kWh/jour.

Tableau 12. Récapitulatifs des équipements à usage individuel du village d'Elokato

Equipements	Quantité	Equipement/ménage	Observations /sur le nbre d'équipements par ménage ?	Puissance nominale (KW)	Puissance totale (KW)	Période d'utilisation (h/jour)	Période d'utilisation (h/mois) 30 jours	Consommation totale (kWh/mois)
Lampes incandescence 25 W	66	1		0,025	1,65	5	160	264
Lampes incandescence 50W	53	0,8		0,05	2,65	8	238	632
Lampes incandescence 60 W	73	1,1		0,06	4,38	6	177	776
Lampes incandescence 70 W	2	0,1		0,07	0,14	6	180	25
Lampes incandescence 75 W	1	0,1		0,075	0,075	4	120	9
Réglette Néon 0,6 m (18 Watt)	19	0,3		0,018	0,342	5	146	50
Réglette Néon 1,2 m (36 Watt)	65	1		0,036	2,34	5	147	343
Lampe FC	189	2,7			4,723	4	126	595
Lampe LED	79	1,1			2,589	4	130	336
Réfrigérateur	13	0,2			3,9	9	282	1098
Congélateur	10	0,2			2,5	7	217	542
Audio visuel/télévision utilisé	52	0,8			9,9	3	90	891
Radio et autres	16	0,3			4,178	5	150	627
Fer à repasser	1	0,1		2,4	2,4	1	24	58
Microonde	6	0,1		3,4	20,4	0	0	2
Smartphone	82	1,2			0,025111667	24	720	18
Split	10	0,2			13,2	3	96	1267
Climatiseur Window	3	0,1			4,5	5	150	675
Ventilateur	130	1,9			9,551	8	225	2152
TOTAL					89	113	3378	10359
Nombre de ménages visités	72	360						

Pour mieux identifier les besoins électriques, nous avons reparti les équipements recensés selon trois (03) catégories, à savoir :

- L'éclairage ;
- L'électroménager ;
- La climatisation et le confort.

Le tableau ci-dessous présente les puissances électriques et consommations journalières des différents équipements selon leur catégorie. Nous remarquons que, pour la catégorie :

- Eclairage : cette catégorie est majoritairement composée de lampes. La puissance installée des lampes à usages individuels est de 18,9 kW. La consommation journalière pour l'éclairage est de 99,7 kWh/jr ;

- Electroménager : cette catégorie comprend les appareils électroménagers et les smartphones. La puissance de l'ensemble des appareils électroménagers est de 43,3 kW. La consommation journalière des appareils électroménagers est estimée à 106 kWh/jr ;
- Climatisation et le confort : cette catégorie se compose des splits, ventilateurs et climatiseurs. La puissance installée de ces équipements dans le village d'Elokato est de 27,3 kW. La consommation journalière de cette catégorie avoisine les 138,9 kWh/jr.

Tableau 13. Puissance électrique et consommation journalière des équipements

	Puissance installée (kW)	Conso (kWh)
Eclairage		
Puissance ampoules incandescence 25 W	1,7	8,5
Puissance ampoules incandescence 50W	2,7	21,6
Puissance ampoules incandescence 60 W	4,4	26,4
Puissance ampoules incandescence 70 W	0,1	0,6
Puissance ampoules incandescence 75 W	0,1	0,4
Réglette Néon 0,6 m (18 Watt)	0,3	1,5
Réglette Néon 1,2 m (36 Watt)	2,3	11,5
Lampe FC	4,7	18,8
Lampe LED	2,6	10,4
Sous total éclairage	18,9	99,7
Electroménager et autres		
Réfrigérateur	3,9	35,1
Congélateur	2,5	17,5
Audiovisuel/télévision utilisé	9,9	29,7
Radio et autres	4,2	21
Fer à repasser	2,4	2,4
Microonde	20,4	0,0
Smartphone	0,03	0,72
Sous total électroménager et autres	43,3	106,4
Climatisation et confort		
Split	13,2	39,6
Climatiseur Windows	4,5	22,5
Ventilateur	9,6	76,8
Sous total Climatisation et confort	27,3	138,9
TOTAL	89,5	345

Les usages individuels, recensés et catégorisés nous montrent que l'éclairage, l'électroménager et la climatisation respectivement représente 29, 31 et 40% de la consommation journalière. Une répartition est présentée à la figure ci-dessous.

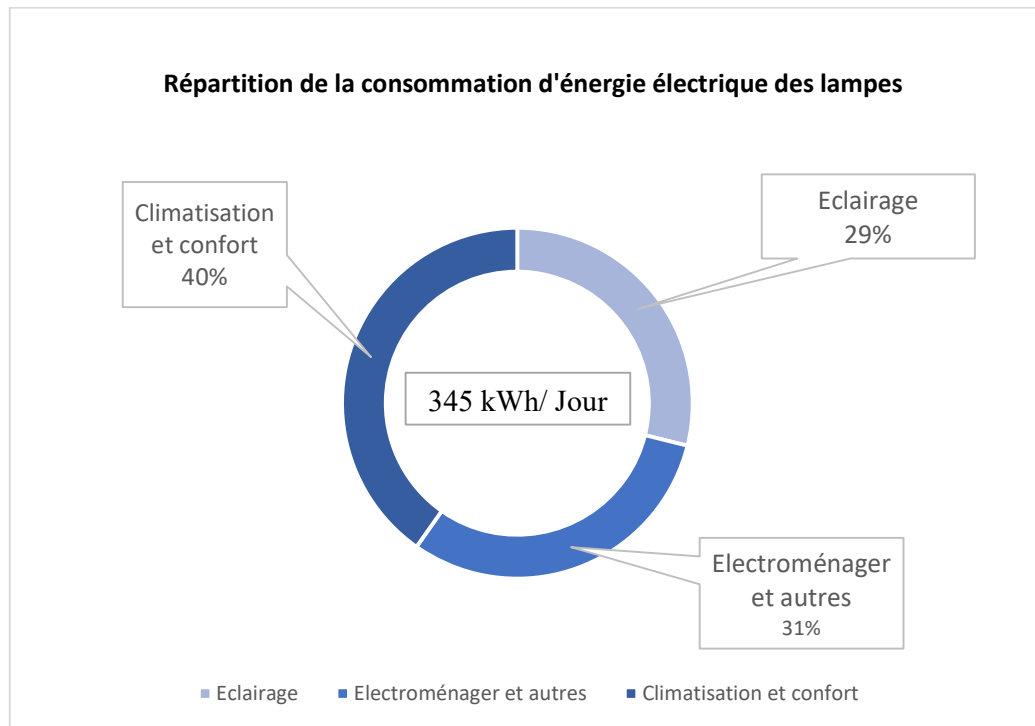


Figure 41. Répartition de la consommation d'électricité des équipements des ménages

A la suite de cela, une analyse plus détaillée de la répartition de la consommation des différents équipements pour chaque catégorie (Eclairage, Electroménager, Climatisation et confort) est faite.

a. Eclairage

La consommation d'électricité due à l'éclairage représente 29 % de la consommation journalière d'énergie électrique soit 100 kWh. La figure ci-dessous, présente une répartition de la consommation d'électricité des lampes qui servent à l'éclairage dans le village d'Elokato. Nous constatons que les lampes à incandescence représentent 58% de la consommation d'énergie électrique due à l'éclairage soit 17% de la consommation générale du village. Les lampes fluo compactes, tubes fluorescents et les LEDs ont des parts respectives de 19, 13, 10%.

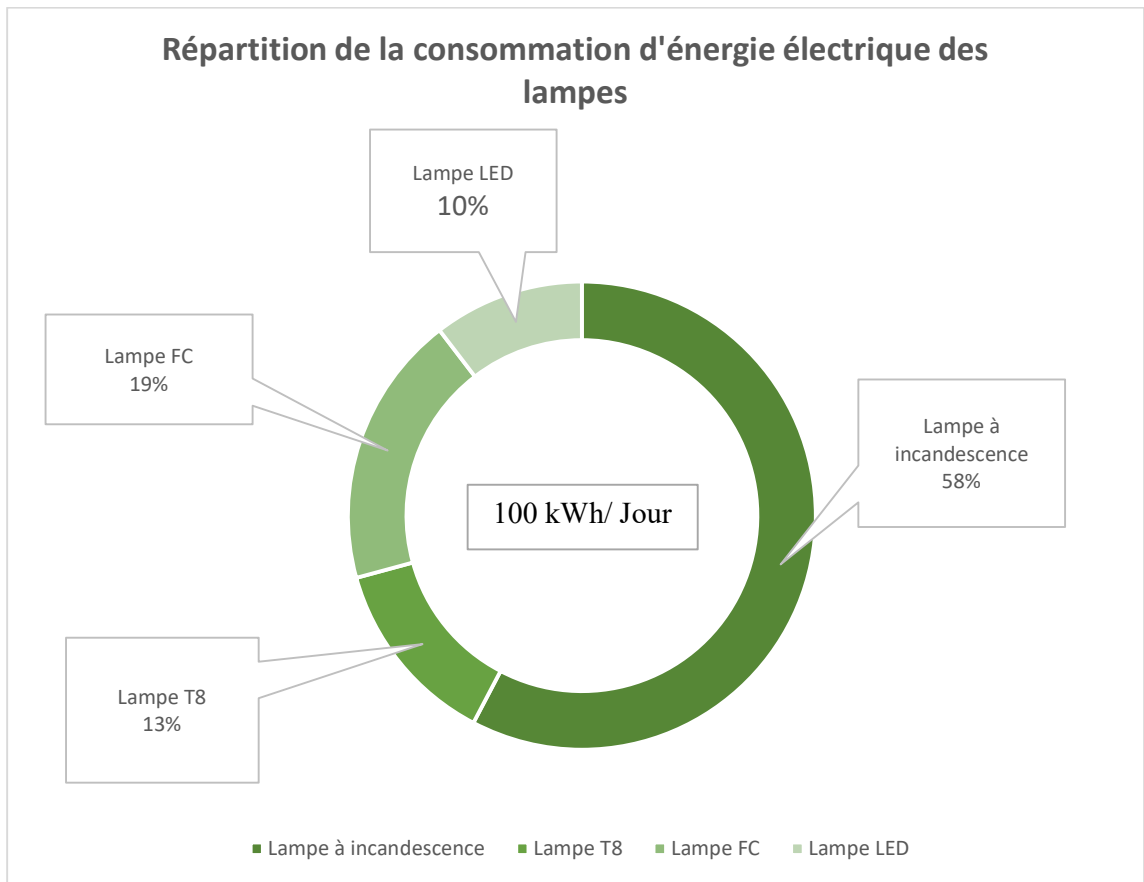


Figure 42. Répartition de la consommation d'électricité des lampes

Par ailleurs, les lampes à incandescence de 25 W, 50 W et 60 W représente respectivement 9,22 et 26 % de la consommation journalière de l'ensemble des lampes utilisées. Aussi, les lampes T8 (tube fluorescent) de 18 et 36 W, représentent également 1 et 12% de la consommation journalière de l'ensemble de l'éclairage.

Une répartition de la consommation électrique de tous les équipements servant à l'éclairage est présentée dans le diagramme ci-dessous.

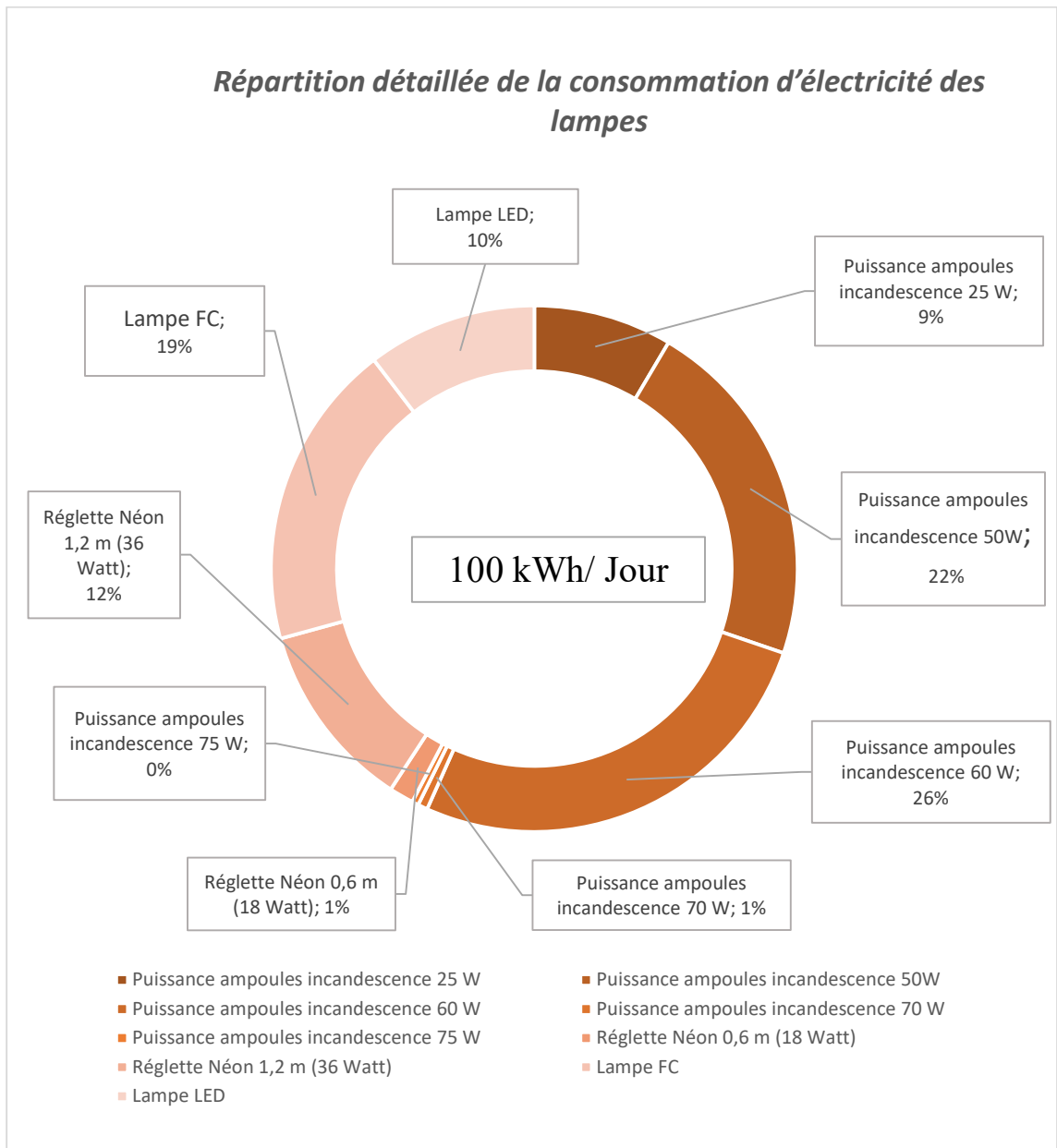


Figure 43. Répartition détaillée de la consommation d'électricité des lampes

b. Electroménagers et climatisation

Le graphique ci-dessous, nous montre que cette catégorie est fortement dominée par les réfrigérateurs et l'audiovisuel à hauteur d'un pourcentage respectif de 33 et 28%. Puis viennent, en seconde position les radios et congélateurs qui représente 20 et 16%. Le fer à repasser et la charge des smartphones ne représentent que 3% de cette catégorie. La répartition globale est résumée par le graphique ci-dessous.

Par ailleurs, nous avons constaté des équipements de mauvaises classes énergétique lors de la visite pour les postes téléviseurs et radios de même que les splits et Climatiseurs.

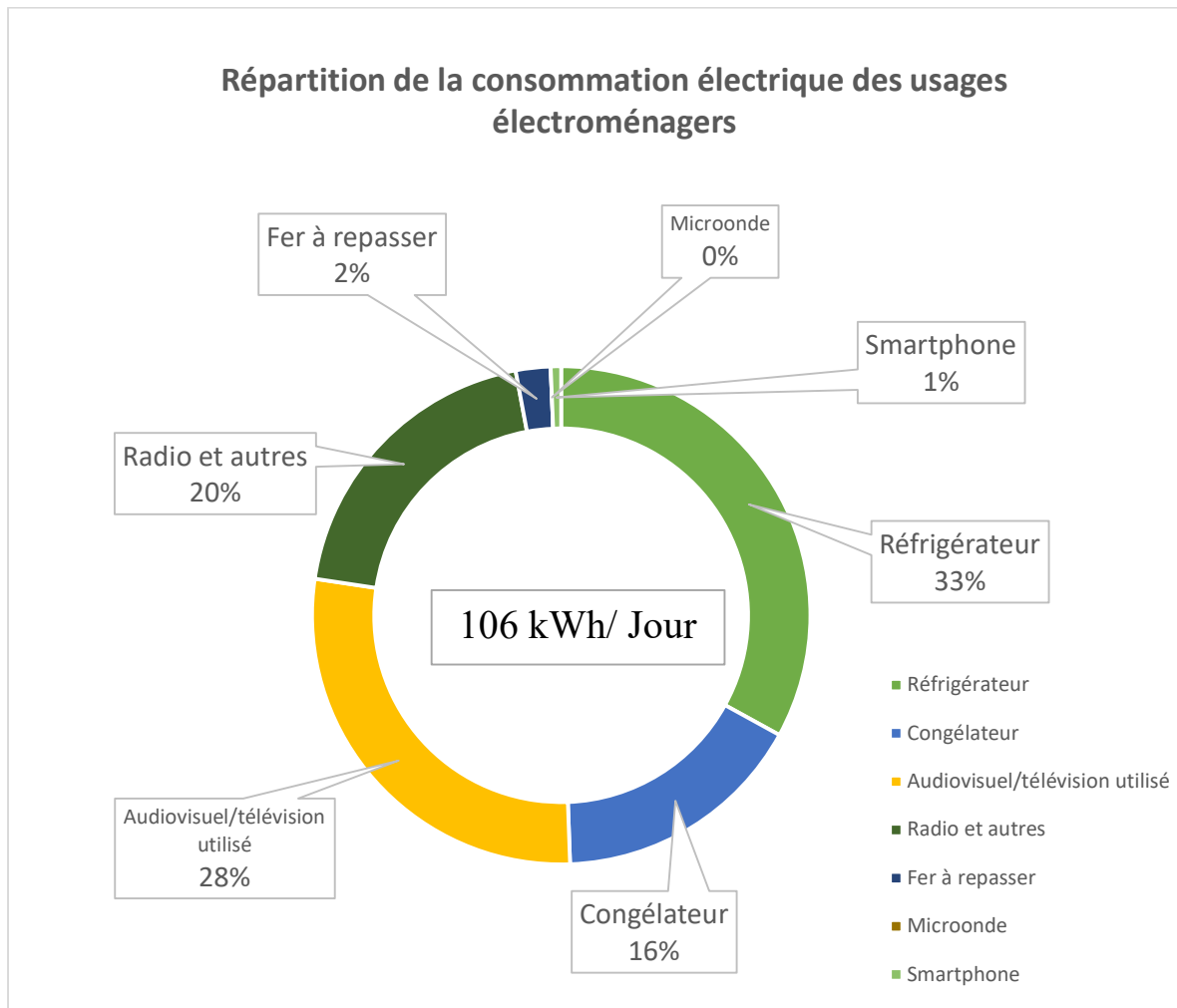


Figure 44. Répartition de la consommation électrique des usages électroménagers

c. Climatisation et confort

La consommation des usages de climatisation et de confort représente 40 % de la consommation journalière du village d'Elokato, soit 139 kWh/jr. Ces usages sont repartis entre l'utilisation des climatiseur Windows, des splits et des ventilateurs. Ces usages représentent respectivement 16, 29 et 55 % de la répartition électrique de cette catégorie. Nous constatons que cette catégorie est dominée les ventilateurs suivis des splits et enfin la catégorie des climatiseurs Windows.

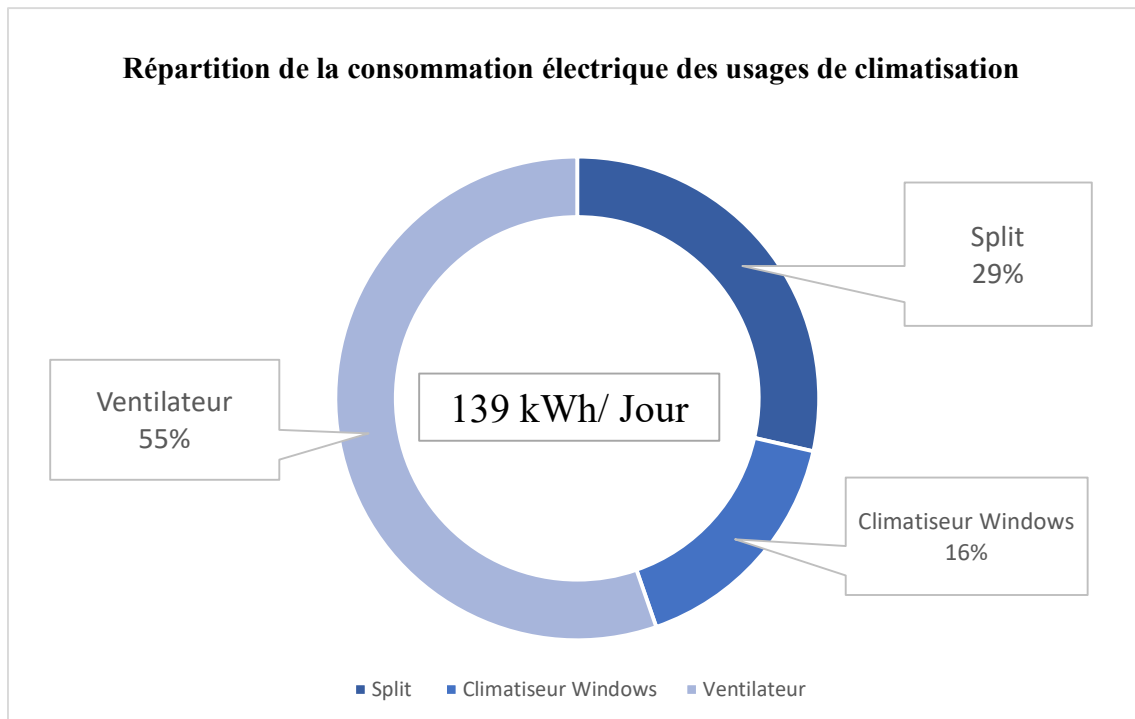


Figure 45. Répartition de la consommation électrique des usages de climatisation

2.3.2. Usages collectifs

Le poste usages collectifs est composé exclusivement de l'éclairage public. Au total 84 points lumineux de type LED de puissance unitaire de 150 watts assurent l'éclairage public du village. La puissance installée pour l'éclairage public équivaut à 12,6 kW. La consommation d'énergie journalière est donc de 151 kWh pour une utilisation de 12 h. Le tableau ci-dessous en présente un résumé.

Tableau 14. Puissance électrique de l'éclairage public

Puissance électrique de l'éclairage public			
Nombre de lampadaires	Puissance unitaire	Puissance totale (kW)	Temps de fonctionnement
84	0,15	12,6	12

Par conséquent, la consommation totale électrique de l'usage d'éclairage dans le village d'Elokato est de 250,7 kWh/jr. Par ailleurs, l'éclairage public représente environ 60 % de la consommation d'électricité. Et l'éclairage intérieur représente environ 40 % de la consommation générale du village.

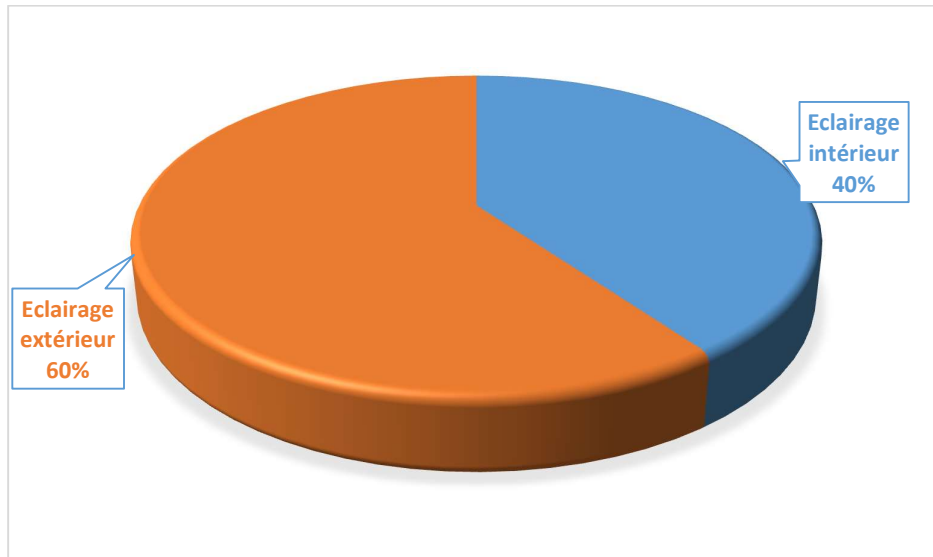


Figure 46. Répartition générale de la consommation de l'éclairage

En conclusion, **la consommation électrique du village d'Elokato est portée 496 kWh/jr.** Les usages d'éclairage, de climatisation et d'électroménagers représenteraient finalement 51, 28 et 21 % de la consommation journalière respectivement. Cela est illustré ci-dessous par le graphique.

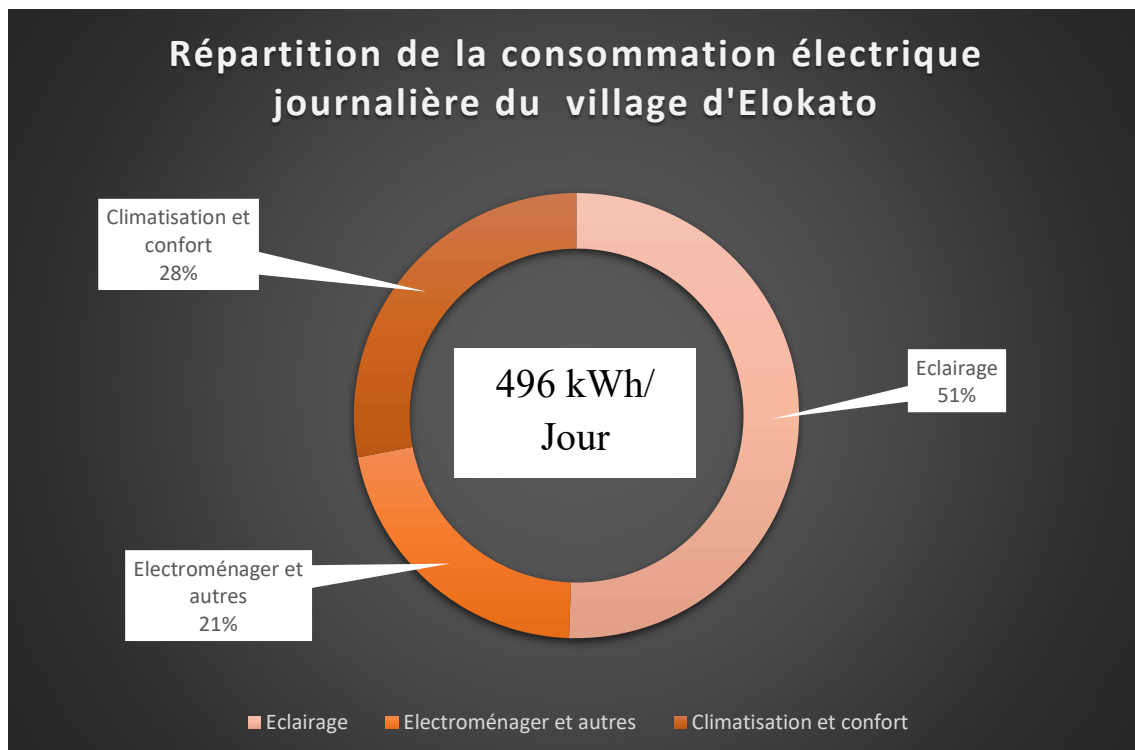


Figure 47. Répartition générale de la consommation de l'éclairage

2.4. Conclusion

Au terme de cette enquête, nous avons pu identifier les équipements et les besoins en énergie électrique d'un village (cas d'Elokato). La puissance installée de l'ensemble des équipements individuels est de **89 kW**. La consommation journalière du village est de **496 kWh/jr**.

L'usage énergétique le plus significatif est l'éclairage, il représente 51% de la consommation du village, soit 250,7 kWh/jr, avec 60 % de cette consommation due à de l'éclairage public. L'usage des équipements électroménagers représente 21 % de la consommation journalière du village soit environ 106,5 kWh/jr. Cette catégorie est dominée par les réfrigérateurs, les appareils audiovisuels ainsi que les radios (audiovisuel). L'usage pour la climatisation représente 28 % de la consommation journalière du village, Soit 138,9 kWh/jr. Elle est largement dominée par l'utilisation des ventilateurs (55%).

Dans l'optique d'améliorer la performance énergétique des équipements et de réduire leur consommation, nos recommandations sont les suivantes :

- *Le remplacement des lampes de mauvaises performances énergétiques par des lampes LED, de meilleures performances : Cette action permettrait de réduire de 50 % la consommation d'énergie de l'éclairage intérieur soit environ 13 % de la consommation générale d'énergie électrique du village.
Une économie d'énergie de 57 kWh pourrait être réalisée.*
- *Le remplacement des équipements électroménagers énergivores par des équipements de meilleures classes énergétiques : Cette action implique une sensibilisation des ménages sur les étiquettes énergies.*

3. Courbes de charge des consommations du village d'Elokato

L'objectif de cette partie est d'évaluer les courbes de charge théorique issue des données d'enquêtes de terrain (relevés et entretiens).

3.1. Classification des courbes de charge des consommations par catégories à partir des enquêtes à Elokato

Nous avons proposé une catégorisation des ménages domestiques de la population du village d'Elokato à trois (3) niveaux :

- **Une catégorie dite de faible consommation**
- **Une catégorie dite de moyenne consommation**
- **Une catégorie dite de forte consommation**

○ **Catégorie dite de faible consommation**

Le ménage de « faible consommation » se caractérise par des hypothèses suivantes : ce ménage dispose de type d'équipement : **audio, lampes, téléphone portable**. Le ménage se réveille à 5h et écoute la radio de 06 h à 07 h. À partir de 07 h, il vaque à ses occupations dans le village jusqu'à 12 h. Il rentre à la maison de 12 h à 14 h, où il écoute les informations à la radio. Il retourne à ses activités, d'où il revient le soir à la maison à 17 h. De 17 h à 18 h, il écoute sa radio et allume une lampe. De 18 h à 19 h, il commence à être plus sombre, il allume deux (2) lampes et continue d'écouter sa radio. De 19 h à 20 h, il allume toutes ses lampes et écoute toujours sa radio. De 20 h à 22 h, il continue d'écouter sa radio avec ses trois (3) lampes allumées. Le ménage va se coucher à 22 h et va charger son téléphone jusqu'au matin à 5 h. La charge nécessite 1 h et toutes les autres heures après le rechargement (en mode veille) entraînent des consommations d'énergie à 10 %. Le tableau 15, fait état des lieux des équipements en moyenne par ménage selon leur consommation.

Tableau 15 : Type d'équipements du ménage à faible consommation [Source : TOURE, 2020]

Equipements	Puissance (w)	Quantité
Lampes	25	3
Radio	10	1
Chargeur téléphone	5	2

Par la suite, nous répartissons la consommation des équipements d'un ménage suivant les tranches horaires allant de 0 h à 23 h. La consommation totale des équipements, nous permettra d'évaluer la charge journalière du ménage dit à faible consommation. Le tableau 16, nous présente un résumé des consommations journalières des équipements des ménages de faible consommation.

Pour chaque équipement X_i , notons $X_i (P_{X_i}, T_{X_i}, N_{X_i})$ où :

- P_{X_i} : la puissance d'un équipement X_i
- T_{X_i} : la durée de fonctionnement (en heures) par jour de l'équipement X_i
- N_{X_i} : le nombre d'équipements X_i
- $Cons_{f_i}$: Consommation d'un équipement X_i du ménage de faible consommation
- $Cons_f$: la consommation journalière du ménage de faible consommation

La consommation totale journalière de tous les équipements du ménage de faible consommation est donnée par la formule suivante :

$$Cons_f = \sum_{i=1}^n Cons_{f_i} = \sum_{i=1}^n N_{X_i} * P_{X_i} * T_{X_i} \quad (01)$$

Tableau 16 : Répartition des consommations des équipements par tranche horaire [Source : TOURE, 2020]

Heures	Audio (radio)	Lampes	Chargeur portable	Total
Puissance	10	40	10	45
Conso (kWh/ménage)	0,54	1,125	0,025	1,69
Nb heures/j	7	5	5	

Ci-après le graphique de la courbe de charge du ménage de faible consommation.

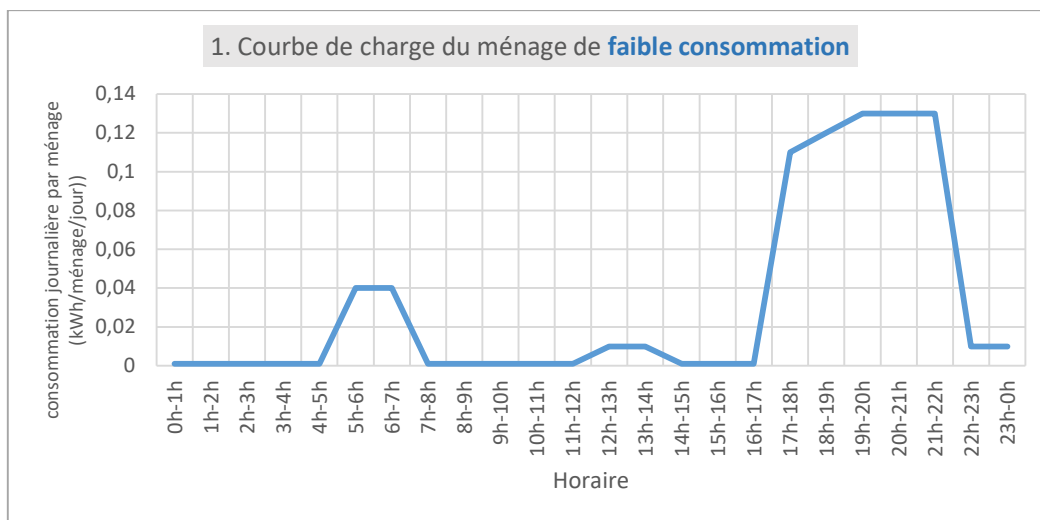


Figure 48. Courbe de charge du ménage de faible consommation [Source : TOURE, 2020]

Nous constatons que de :

- 00h à 05h : La consommation est de 0,001 kWh/ménage/jour
- 06h à 08h : La consommation est de 0,04 kWh/ménage/jour
- 08h à 12h et de 14h à 17h : La consommation est quasiment nulle
- 12h à 14h : La consommation est 0,01 kWh/ménage/jour
- 18h à 22h : La consommation est en moyenne de 0,13 kWh/ménage/jour

La figure 48, nous montre qu'il existe trois (3) pics de charge à savoir entre 06 h et 07h, puis entre 12 h et 14 h et enfin entre 18 h et 22 h.

○ **Catégorie dite de moyenne consommation**

Le ménage de « moyenne consommation » se caractérise par plusieurs hypothèses. Il dispose d'équipements : **Audio, lampes, téléphone portable, téléviseur, ventilateur**. Entre 00 h et 5h, le ménage dort sous le ventilateur et les chargeurs de téléphone sont branchés. Le ménage se réveille à 5 h, allume trois (3) lampes et écoute la radio de 05 h à 07 h. À partir de 07 h, il vaque à ses occupations dans le village jusqu'à 12 h. Il rentre à la maison de 12 h à 14 h, où il regarde la télévision. Il retourne à ses activités, d'où il revient le soir à la maison à 17 h. De 17 h à 18h, il écoute sa radio et allume deux (2) lampes. De 18 h à 19 h, il commence à être plus sombre, il allume trois (3) lampes et continue d'écouter sa radio et regarde la télévision. De 19 h à 20 h, il allume quatre (4) lampes, regarde la télévision et écoute toujours sa radio. De 20 h à 23 h, il a toujours ses cinq (5) lampes allumées et regarde la télévision. Le ménage va se coucher à 23 h et va charger son téléphone jusqu'au matin à 5 h. La charge nécessite 1 h et toutes les autres heures après le rechargement entraînent des consommations d'énergie à 10 %. Le tableau 17, fait état des lieux des équipements en moyenne par ménage selon leur consommation.

Tableau 17 : Type d'équipements du ménage à moyenne consommation [Source : TOURE, 2020]

Equipements	Puissance(W)	Quantité
Lampes	60	5
Audio	30	1
Télé	70	1
Ventilateur	60	1
Chargeur téléphone	10	3

Par la suite, nous répartissons les usages du ménage selon les tranches horaires allant de 00 h à 24 h. L'ensemble des besoins horaires permet d'évaluer la charge journalière du ménage. Le tableau 18, nous présente un résumé des consommations journalières des équipements du ménages de moyenne consommation.

Pour chaque équipement X_i , notons X_i ($P_{X_i}, T_{X_i} N_{X_i}$) où :

- P_{X_i} : la puissance d'un équipement X_i
- T_{X_i} : la durée de fonctionnement (en heures) par jour de l'équipement X_i

- N_{X_i} : le nombre d'équipements X_i
- $Cons_{M_i}$: Consommation d'un équipement X_i du ménage de moyenne consommation
- $Cons_M$: la consommation journalière du ménage de moyenne consommation

La consommation totale journalière de tous les équipements du ménage de moyenne consommation est donnée par la formule suivante :

$$Cons_M = \sum_{i=1}^n Cons_{M_i} = \sum_{i=1}^n N_{X_i} * P_{X_i} * T_{X_i} \quad (02)$$

Tableau 18: Répartition des usages par tranche horaire pendant toute la journée [Source : TOURE, 2020]

Heures	Audio (k7)	Lampes	Télé	Chargeur téléphone	Ventilateur
Puissance (W)	30	90	70	30	60
Conso/jr (kWh/jr)	0,54	0,522	0,49	0,048	0,54
Nb heures/j	5	8	7	7	10

Ci-dessous la figure de la courbe de charge du ménage de moyenne consommation.

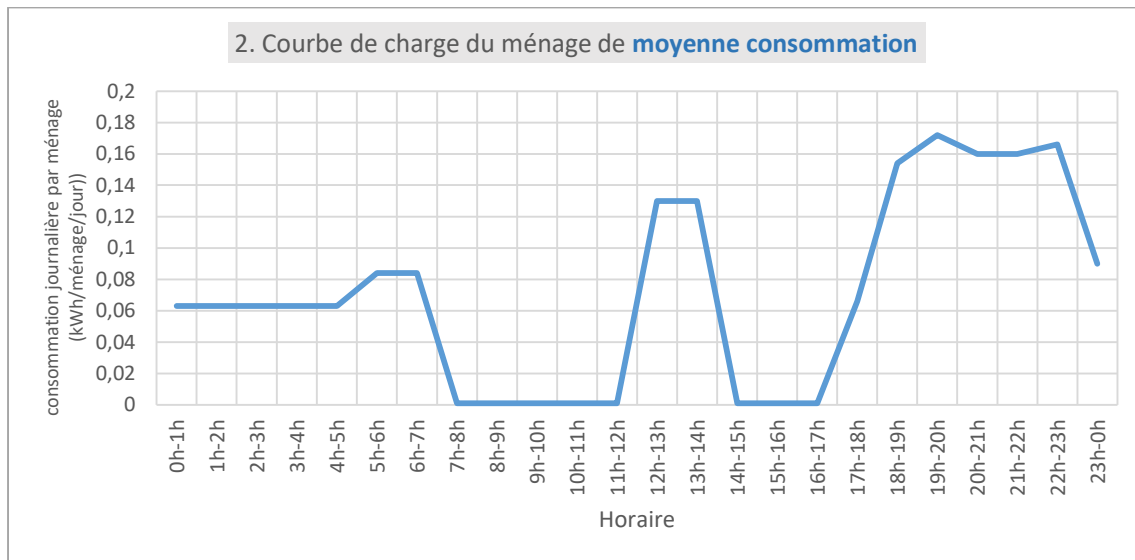


Figure 49. Courbe de charge du ménage de moyenne consommation [Source : TOURE, 2020]

Nous constatons que de :

- 00h à 05h : La consommation est de 0,063 kWh/ménage/jour
- 05h à 06h : La consommation est de 0,084 kWh/ménage/jour
- 07h à 12h et de 14h à 17h : La consommation est quasiment nulle
- 12h à 14h : La consommation est 0,013 kWh/ménage/jour
- 18h à 23h : La consommation est en moyenne de 0,16 kWh/ménage/jour

La figure 49 montre qu'il existe trois (3) pics de charge à savoir entre 01 h et 07 h, puis entre 12 h et 14 h et enfin entre 18 h et 00 h.

○ **Catégorie dite de forte consommation**

Le ménage de « consommation élevée » se caractérise par plusieurs hypothèses. Il dispose des types d'équipements : **Audio, lampes, téléphone portable, téléviseur, ventilateur, fer à repasser, ordinateur, chaîne hi-fi, réfrigérateur, climatiseur**. Entre 00 h et 05 h, le ménage dort sous le ventilateur, le climatiseur et les chargeurs de téléphone et le réfrigérateur restent branchés. Les lampes, la radio, la télé, le fer à repasser, l'ordinateur et la chaîne hi-fi sont éteintes. Le ménage se réveille à 05 h, allume quatre (4) lampes et écoute la radio de 05 h à 07 h. Pendant ce même moment, le réfrigérateur est branché. À partir de 07 h, il vaque à ses occupations dans le village jusqu'à 12 h. Il rentre à la maison de 12 h à 14 h, où il regarde la télévision sous le ventilateur. Le réfrigérateur est toujours branché, Il retourne à ses activités, d'où il revient le soir à la maison à 17 h, avec le réfrigérateur toujours branché. De 16 h à 17 h, le ménage écoute la musique avec la chaîne hi-fi, le réfrigérateur reste également branché. De 17 h à 18 h, il écoute sa radio et allume quatre (4) lampes, le réfrigérateur continue d'être alimenté en électricité est branché. De 18 h à 19 h, il commence à être plus sombre, il allume cinq (5) lampes et continue d'écouter sa radio, le réfrigérateur est branché. De 19 h à 20 h, il allume six (6) lampes, regarde la télévision et écoute toujours sa radio. Le réfrigérateur est branché. De 20 h à 22 h, il a toutes ses huit (8) lampes allumées, écoute la radio et regarde la télévision. Le réfrigérateur est toujours branché. De 22 h à 23 h, la radio est éteinte, toutes les lampes, le climatiseur, l'ordinateur, la télévision et le réfrigérateur sont allumés. Le ménage va se coucher à 23 h et va charger son téléphone jusqu'au matin à 5 h. Il allume le climatiseur. La charge des téléphones nécessite 1 h et toutes les autres heures après le rechargement entraînent des consommations d'énergie à 10 %. Le réfrigérateur reste toujours branché. Le tableau 19, indice les équipements à forte consommation.

Tableau 19: Type d'équipements du ménage à forte consommation [Source : TOURE, 2020]

Equipements	Puissance(W)	Quantité
Lampes	75	8
Audio	50	1
Télé	100	1
Ventilateur	60	1
Chargeur téléphone	20	3
Fer à repasser	1000	1
Climatiseur	1200	1
Réfrigérateur	300	1
Chaîne hi-fi	50	1
Ordinateur	60	1

Par la suite, nous répartissons les usages du ménage selon les tranches horaires allant de 00 h à 24 h. L'ensemble des besoins horaires permet d'évaluer la charge journalière du ménage. Le tableau 20, présente les consommations journalières des équipements du ménage de forte consommation.

Pour chaque équipement X_i , notons X_i ($P_{X_i}, T_{X_i}, N_{X_i}$) où :

- P_{X_i} : la puissance d'un équipement X_i
- T_{X_i} : la durée de fonctionnement (en heures) par jour de l'équipement X_i
- N_{X_i} : le nombre d'équipements X_i
- $Cons_{F_i}$: Consommation d'un équipement X_i
- $Cons_F$: la consommation journalière du ménage de forte consommation

La consommation journalière de tous les équipements du ménage de forte consommation est donnée par la formule suivante :

$$Cons_F = \sum_{i=1}^n Cons_{F_i} = \sum_{i=1}^n N_{X_i} * P_{X_i} * T_{X_i} \quad (03)$$

Tableau 20 : Répartition des usages par tranche horaire pendant toute la journée [Source : TOURE, 2020]

Heures	Audio (k7)	Lampes	TV	Chargeur téléphone	Fer à repasser	PC	Climatiseur	Chaîne hi-fi	Ventilateur	Réfrigérateur
Puissance(W)	50	160	100	60	1000	60	1200	50	60	300
Conso	0,35	0,94	0,6	0,09	1	0,12	8,4	0,05	0,42	7,2
Nb heures/j	7	8	6	6	1	2	7	1	7	24

Ci-après la figure ci-dessous, qui présente l'évolution de la charge du ménage de **forte consommation**

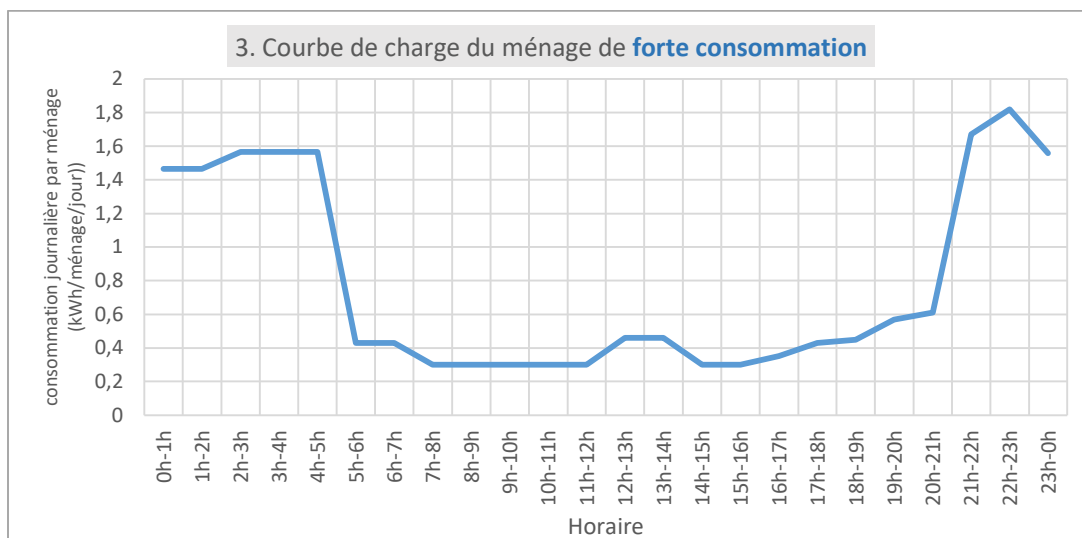


Figure 50. Courbe de charge du ménage de forte consommation [Source : TOURE, 2020]

Nous constatons que de :

- 00h à 01h : La consommation est de 1,466 kWh/ménage/jour
- 01h à 05h : La consommation est de 1,566 kWh/ménage/jour
- 05h à 07h : La consommation est de 0,43 kWh/ménage/jour
- 08h à 12h et de 14h à 16h : La consommation est de 0,3 kWh/ménage/jour nul
- 12h à 14h : La consommation est 0,46 kWh/ménage/jour
- 18h à 22h : La consommation croit de 0,3 à 1,82 kWh/ménage/jour

La figure 50, nous montre qu'il existe trois (3) pics de charge à savoir entre 00 h et 05 h, puis entre 12 h et 14 h et enfin entre 18 h et 22 h.

Profil de charge de l'ensemble des ménages du village d'Elokato par tranche horaire

Le tableau 21 présente les consommations journalières de l'ensemble des ménages du village d'Elokato. Le tableau obtenu prend en compte toutes les catégories de consommation (Faible-Moyenne-Forte). La consommation journalière par ménage entre 00 h et 05 h est de 6,95 kWh/ménage/jour. Et de 1,158 kWh/ménage/jour entre 05 h et 17 h. Enfin de 6,618 kWh/ménage/jour entre 17 h et 23 h.

Pour chaque équipement X_i , notons $X_i (P_{X_i}, T_{X_i}N_{X_i})$ où :

- P_{X_i} : la puissance d'un équipement X_i
- T_{X_i} : la durée de fonctionnement (en heures) par jour de l'équipement X_i
- N_{X_i} : le nombre d'équipements X_i
- $Cons_T$: La consommation journalière par ménage du village d'Elokato

La consommation journalière par ménage du village d'Elokato par tranche horaire est donnée par la formule suivante :

$$Cons_T = Cons_f + Cons_M + Cons_F \quad (04)$$

Avec

- $Cons_f$: la consommation journalière du ménage de faible consommation
- $Cons_M$: la consommation journalière du ménage de moyenne consommation
- $Cons_F$: la consommation journalière du ménage de forte consommation

Tableau 21 : Répartition des usages par tranche horaire pendant toute la journée du village d'Elokato [Source : TOURE, 2020]

Consommation journalière du village d'Elokato				
Tranches horaires	Catégorie dite de faible consommation (kWh/ménage/)	Catégorie dite de moyenne consommation (kWh/ménage)	Catégorie dite de forte consommation (kWh/ménage)	Consommation journalière par ménage (kWh/ménage/jour)
0h--5h	0,005	0,315	6,63	6,95
5h-17h	0,1	0,428	0,63	1,158
17h-00h	0,64	0,968	5,01	6,618

Nous avons établi le profil de charge journalier par ménage du village d'Elokato.

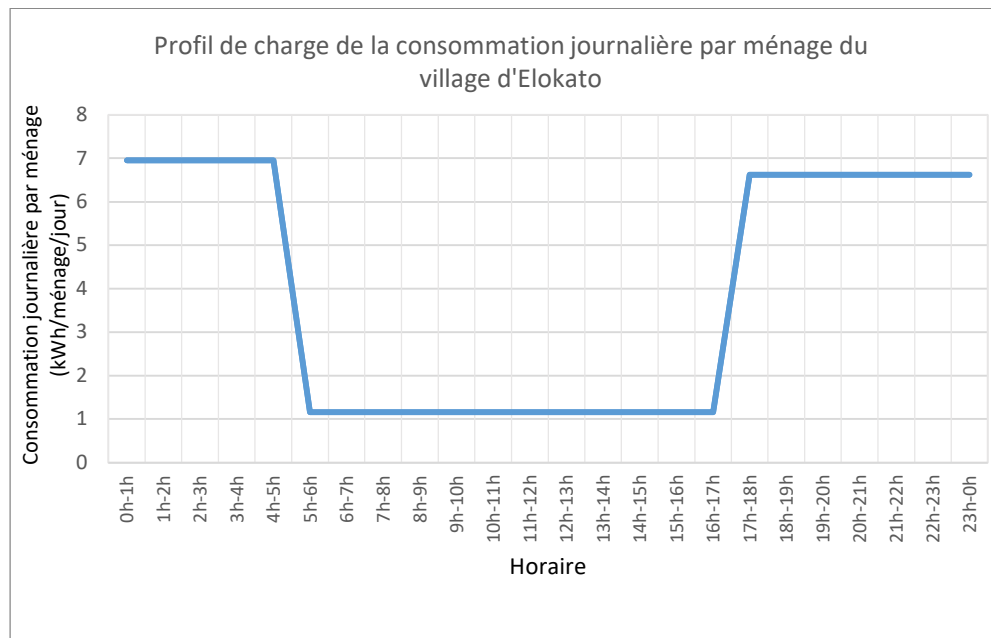


Figure 51. Profil de charge du village d'Elokato : modélisation de la pointe horaire sur une subdivision des tranches horaires de la journée.

Nous constatons que le profil de charge obtenu pour le village d'Elokato, montre que pour les tranches horaires de :

- 00h à 05h : La consommation journalière moyenne des ménages est de 6,95 kWh/ménage/jour
- 05h à 17h : La consommation journalière moyenne des ménages est de 1,1 kWh/ménage/jour
- 18h à 00h : La consommation journalière moyenne des ménages est de 6,6 kWh/ménage/jour

La figure 51, nous montre qu'il existe deux (02) pics de charge dont un le matin et le second en soirée. Le premier pic est observé entre 00h et 05h, puis le second entre 18h et 00h.

Les populations ont tendance à aller au champ pendant la journée et mener des activités de loisirs propres à leurs habitudes pendant la soirée et cela dure jusqu'au petit matin.

Par conséquent, nous avons déduit la consommation journalière de l'ensemble des ménages du village d'Elokato.

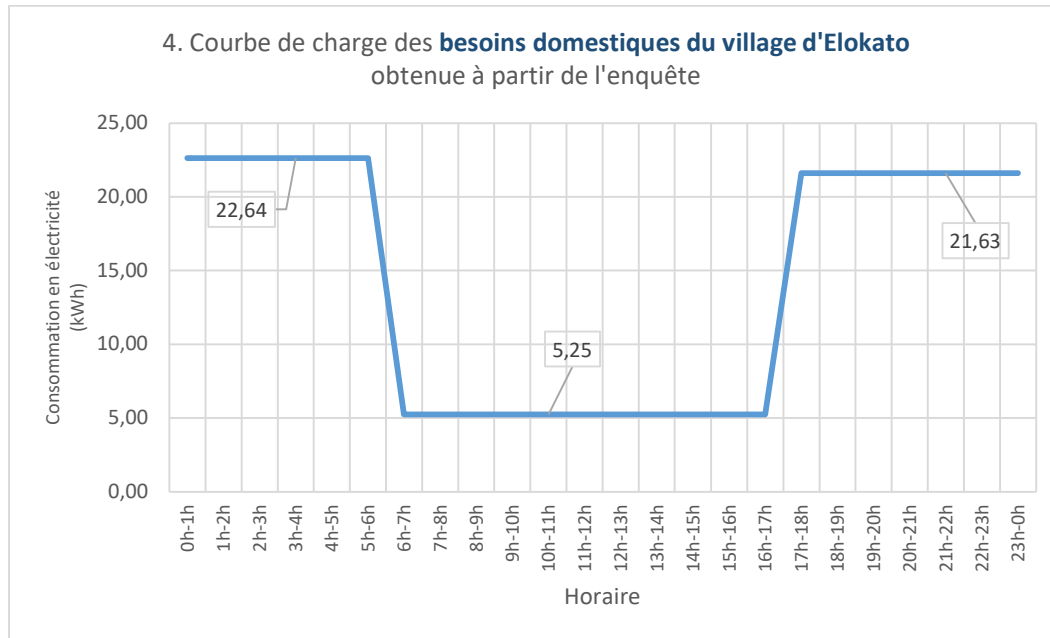


Figure 52. Profil de charge du village d'Elokato : modélisation de la pointe horaire sur une subdivision des tranches horaires de la journée.

La figure 52, nous montre que pour les tranches horaires de :

- 00h à 05h : la consommation journalière moyenne domestique de l'ensemble des ménages est de 22,64 kWh/jour
- 05 à 17h : la consommation journalière moyenne domestique de l'ensemble des ménages est de 5,25 kWh/jour
- 18 h à 23h : la consommation journalière moyenne domestique de l'ensemble des ménages est de 21,63 kWh/jour

3.2. Courbes de charge de la consommation des besoins domestiques du village d'Elokato

○ Usages communautaires

Les espaces communautaires du village d'Elokato sont :

- Les infrastructures sanitaires (poste de santé) pour les petits soins dans le village
- Les infrastructures d'éducation (école) pour la formation des élèves.
- Les lieux de culte (église, mosquée, temple etc.)
- Le pompage (pour faciliter l'accès à l'eau dans le village)
- Une salle polyvalente pour les activités tels que les réceptions, les projections...
- Un bâtiment administratif (une sous-préfecture)
- Les rues de la ville : L'éclairage public (lampadaires) pour éclairer les rues du village

○ Répartition des équipements

- L'éclairage public (lampadaires) pour éclairer les rues du village

Les lampadaires sont utilisés une fois la nuit tombée jusqu'au petit matin, généralement entre 18 h et 06 h pour éclairer les rues du village.

- Les infrastructures sanitaires (poste de santé) pour les petits soins dans le village

Les appareils électriques utilisés dans les centres de santé sont : les lampes d'éclairage et d'urgence, les ventilateurs, les radiotéléphones, les réfrigérateurs et le chauffe-eau. Ces équipements sont utilisés pour les soins de santé dans le village. Les lampes d'éclairage sont utilisées dans les bureaux et services pendant toute la journée et en soirée. Les lampes d'urgences sont utilisées pour les consultations de 08 h à 18 h. Le réfrigérateur médical est utilisé pour le stockage à froid des produits pharmaceutiques pendant 24 h. Les radiotéléphones sont utilisés entre 06 h et 08 h du matin pour écouter les infos.

- Les infrastructures d'éducation (école) pour la formation des élèves.

Les équipements électriques utilisés dans les centres d'éducation sont : les lampes d'éclairage, les ordinateurs, les imprimantes, les ventilateurs et les télévisions. Les lampes sont utilisées pour éclairer les salles de classe et bureaux de 08 h-12 h puis de 14 h à 17 h. Les ordinateurs, les imprimantes, les ventilateurs et les télévisions sont utilisés par le service administratif de l'école pendant les heures de service (08 h à 17 h).

- Les lieux de culte (église, mosquée, temple etc.)

Les équipements utilisés dans les lieux de culte sont les lampes d'éclairage, les ventilateurs et les amplificateurs. Ces équipements sont utilisés en moyenne 06 h de temps par jour.

- Une salle polyvalente pour les activités tels que les réceptions, les projections...

Les équipements utilisés dans la salle polyvalente sont : les lampes d'éclairage, les amplificateurs, les ordinateurs, les télévisions et les ventilateurs. Ces équipements sont utilisés pour les réceptions qui ont lieu de 09 h à 18 h.

- Un bâtiment administratif (une sous-préfecture)

Les besoins en électricité du bâtiment de la sous-préfecture sont : les lampes d'éclairage, les ordinateurs, les imprimantes, les climatiseurs, les ventilateurs, les télévisions et les radiotéléphones. Ces équipements sont utilisés pendant les heures de service c'est-à-dire entre 08 h et 17 h.

Le tableau, en annexe 6, présente un résumé des équipements utilisés par usage.

○ **Courbe de charge**

Pour déterminer la courbe de charge des besoins (en électricité) communautaires, nous répartissons les usages des besoins communautaires, selon les tranches horaires, allant de 00 h à 24 h. L'ensemble des besoins horaires permet d'évaluer la charge journalière. Le tableau 22, présente les consommations journalières des équipements à usage communautaire du village.

Pour chaque équipement X_i , notons $X_i (P_{X_i}, T_{X_i}, N_{X_i})$ où :

- P_{X_i} : la puissance d'un équipement X_i ;
- T_{X_i} : la durée de fonctionnement (en heures) par jour de l'équipement X_i ;
- N_{X_i} : le nombre d'équipements X_i ;
- $Cons_{X_i}$: la consommation (en kWh) de l'équipement X_i

La consommation journalière de l'équipement X_i est :

$$Cons_{X_i} = \sum_{i=1}^n N_{X_i} * P_{X_i} * T_{X_i} \quad (05)$$

Pour chaque usage communautaire U_j , la consommation est donnée par la formule suivante :

$$Cons_{U_j} = \sum_{i=1}^n Cons_{X_i} = \sum_{i=1}^n N_{X_i} * P_{X_i} * T_{X_i} \quad (06)$$

Par conséquent, la consommation totale des besoins en électricité communautaires $Cons_{BC}$ est :

$$Cons_{BC} = \sum_{j=1}^m Cons_{U_j} \quad (07)$$

Tableau 22 : Répartition par tranche horaire des équipements à usages communautaires pendant toute la journée du village d'Elokato [Source : TOURE, 2020]

Heures	Lampad- aire	Audio (k7)	Lampes d'éclairage et d'urgence	TV	Chargeur téléphone	PC	Imprim ante	Climati seur	Ampli	Ventilateur	Réfrigérateur
Puissance (W)	150	50	150	380	60	70	53	1500	70	70	300
Conso (kWh)	151,2	1,04	12,17	0,3 8	11,4	4, 08	0,074	48	5	1,4	7,2
Nb heures/j	12	2	8	8	2	8	4	8	6	8	24

Nous établissons donc le profil de charge journalier des besoins communautaires en électricité du village d'Elokato.

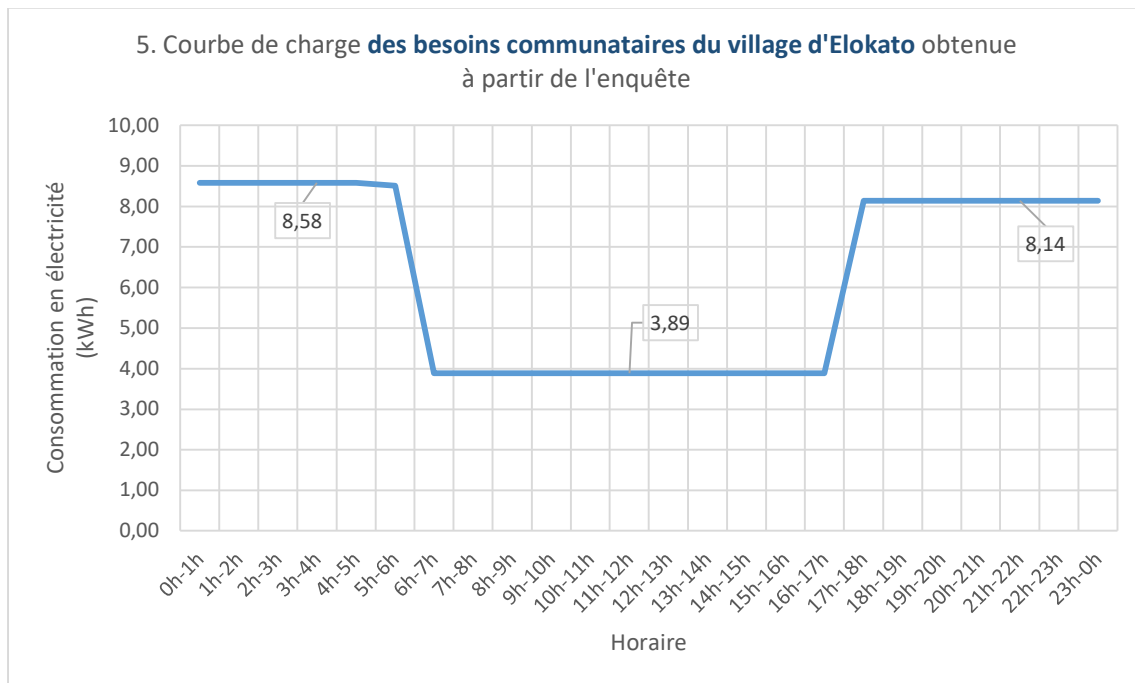


Figure 53. Profil de charge de la consommation des besoins communautaires du village d'Elokato

La figure ci-dessus, nous montre que pour les tranches horaires de :

- 00h-05h : la consommation moyenne journalière est 8,58 kWh/jour ;
- 05h à 17h : la consommation moyenne journalière est de 3,89 kWh/jour ;
- 17h à 00h : la consommation moyenne journalière est de 8,14 kWh/jour.

Aussi, nous observons deux pics de charge. Le premier entre 00h et 05h et le second entre 18h et 00h.

○ **Profil de charge de consommation du village d'Elokato**

Le profil de charge de consommation du village d'Elokato obtenue, résulte de la somme des consommations domestiques et communautaires du village d'Elokato suivant les tranches horaires. Elle est donnée par la formule suivante :

$$Cons_{village\ Elokato} = Cons_{BD} + Cons_{BC} \quad (08)$$

Où :

$Cons_{village\ Elokato}$: la consommation journalière du village d'Elokato (kWh/jour)

$Cons_{BD}$: la consommation journalière des besoins domestiques

$Cons_{BC}$: La consommation journalière des besoins communautaires

Tableau 23 : Répartition par tranche horaire des équipements à usages communautaires pendant toute la journée du village d'Elokato [Source : TOURE, 2020]

Consommation journalière du village d'Elokato			
Tranches horaires	Consommation journalière moyenne des besoins domestique (kWh/jour)	Consommation journalière moyenne des besoins communautaires (kWh/jour)	Consommation journalière moyenne du village d'Elokato (kWh/jour)
00h--5h	22,64	8,58	31,23
05h-17h	5,25	3,89	9,14
17h-00h	21,63	8,14	29,76

Nous avons établi, la courbe de charge de la consommation journalière du village d'Elokato

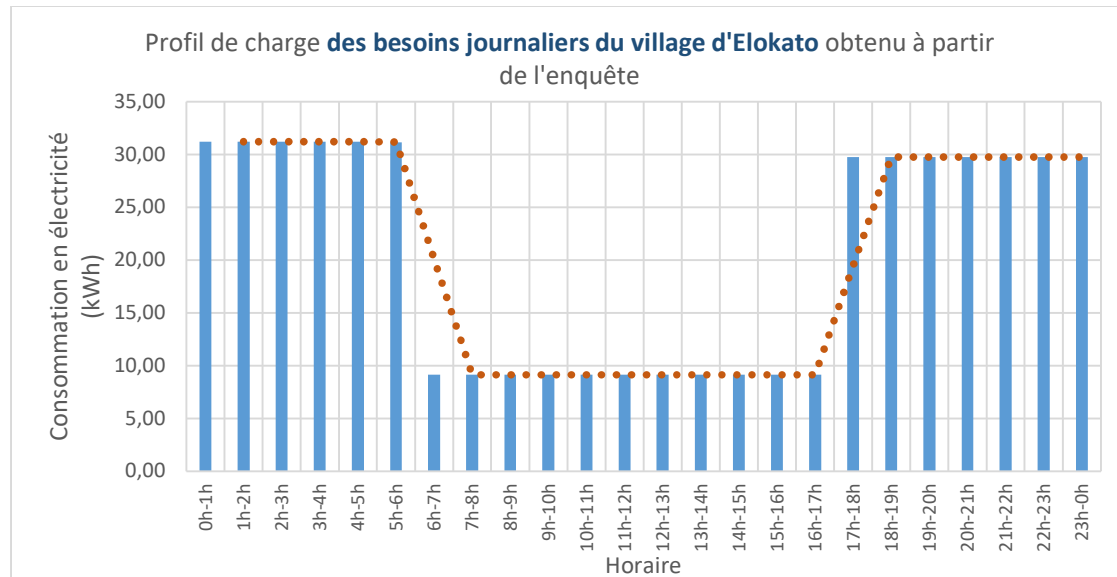


Figure 54. Profil de charge de la consommation journalière moyenne du village d'Elokato obtenue à partir des enquêtes

La figure 54, nous montre que pour les tranches horaires de :

- 00h à 5h : la consommation journalière moyenne est de 31,23 kWh/jour
- 05h à 17h : la consommation journalière moyenne est de 9,14 kWh/jour
- 17h à 00h : la consommation journalière moyenne est de 29,76 kWh/jour

Ce qui donne **une consommation moyenne journalière d'environ 496kWh/jour.**

La courbe de charge journalière, nous montre qu'il existe deux (02) pics de charge pour le village d'Elokato. Le premier est observé entre 00 h et 05 h et le deuxième entre 18 h et 00 h.

4. Modélisation des besoins en électricité d'un village en milieu rural

4.1. Modélisation de la demande : profil journalier

Choix du type de modèle de la demande

Il existe différents modèles qui peuvent être utilisés pour représenter la demande d'énergie.

- *Modèles basés sur des séries chronologiques de consommation ;*
- *Modèles statistiques et économétriques (données économiques, démographiques, corrélation avec des variables macro-économiques) ;*
- *Modèles basés sur l'identification des équipements consommateurs, de leur puissance, de leur temps d'utilisation sur l'ensemble d'un village*
- *Modèles à partir des consommations d'électricité des utilisateurs finaux.*

Tous ces modèles impliquent un historique de données macro-économiques fiables (sur plusieurs périodes, par exemple plusieurs décennies).

Dans le cadre de notre étude, nous utilisons le modèle qui prend en compte les consommations d'électricité des utilisateurs, finaux (enquêtes de terrain et/ou relevés des facturations de consommation des clients par la CIE).

Nous modélisons la pointe pour maîtriser la demande maximale. Pour cerner la pointe, il convient de tenir compte du fait que tous les équipements sont utilisés simultanément.

Pour la dynamique au niveau de chaque usage,

- *Utiliser le taux de croissance de la demande de la catégorie domestique (modéré) sociale comme proxy de la variable de demande d'énergie.*
- *Utiliser le taux de croissance de la catégorie professionnelle (à déflater d'un coefficient) comme proxy pour usage tertiaire*
- *Utiliser le taux de croissance de la demande de la catégorie éclairage public (modéré) sociale comme proxy de la variable de demande d'énergie pour usage collectif éclairage public ou à voir si utiliser la variable (vitesse d'urbanisation).*

Les observations de terrain ont montré que les besoins en électricité ne sont pas homogènes et nécessitent donc une analyse fine pour mieux caractériser la demande. Ces différents aspects permettent de choisir les solutions techniques adaptées à mettre en œuvre. Les besoins exprimés par les populations, et les dépenses énergétiques actuelles, seront amenés à évoluer avec l'arrivée de l'électricité. C'est un fait qui est constaté dans la majeure partie des zones rurales qui ont été électrifiées. Cook (2011) ; Ozturk, (2010) ; Wolde Rufael, (2006) ont montré que la croissance économique a été identifiée comme étant corrélée à la croissance de la consommation d'énergie, pour les pays développés comme pour les pays en développement

[63-65]. Au Brésil, le comportement à long terme de 23 000 propriétés rurales a été analysé par Pereira, Freitas et da Silva (2010) et ils ont constaté qu'il y avait une forte augmentation de la consommation globale d'énergie parmi les propriétés électrifiées en quatre ans [66].

Des tendances similaires (la croissance démographique des populations situées en zone rurale est corrélée à la modélisation des besoins) ont été trouvées par d'autres auteurs. Lorsqu'ils ont étudié sur sept ans, la demande totale d'électricité du système de seize (16) sites dans la province de Jujuy, en Argentine [67] (Diaz et al. (2010)).

Il est donc nécessaire de modéliser les besoins énergétiques actuels et des villages environnants déjà électrifiés.

Cette modélisation nous permettra de découvrir un horizon d'évolution des comportements énergétiques des ménages. Elle permettra également de prendre connaissance de la pénétration des nouveaux appareils électriques désirés dans les foyers et d'anticiper les souhaits des ménages qui n'ont pas encore bénéficié de l'accès à l'électricité.

4.2. Modélisation des besoins domestiques

Les besoins domestiques sont les besoins exprimés par les ménages du village. Le niveau de revenu du ménage impacte son niveau de consommation électrique. En effet, un ménage pauvre aura moins d'équipements qu'un ménage riche. De ce fait, il y aura une hétérogénéité dans le niveau de puissance souscrite par les ménages. Ainsi, nous allons d'abord segmenter les ménages en sous-catégories homogènes. Par la suite, nous allons calculer les besoins par sous-catégorie avant de parvenir par addition à la demande domestique du village. Le tableau 24, présente les équipements des ménages selon les différentes catégories des besoins domestiques. Puis le tableau 25, nous présentes une segmentation des usages domestiques.

Tableau 24 : Equipements des ménages selon les différentes catégories des besoins domestiques
Source : TOURE, 2020

Catégories des besoins domestiques	Equipements
Eclairage	Lampes
Audio	Radio, Chaîne Hi-fi
Visuel	Télévision couleur, Lecteur vidéo
Froid	Réfrigérateur, Climatiseur
Ventilation	Ventilateur
Communication	Téléphone portable
Blanchisserie	Fer à repasser
Informatique	Ordinateur

Tableau 25 : Segmentation des usages domestiques (Source : TOURE, 2020)

Segmentation des usages	
Segment 1	L'éclairage, l'audio (radio) et la communication (la téléphonie mobile).
Segment 2	L'éclairage, l'audio-visuel et la communication.
Segment 3	Les besoins d'éclairage, d'audio-visuel, de communication et de ventilation.
Segment 4	L'éclairage, l'audio, le visuel (Télévision et Lecteur vidéo), la communication, la ventilation, le repassage, le froid (climatisation et réfrigération), l'informatique.

Nous modélisons maintenant les besoins en électricité, en précisant les différents paramètres liés aux différents équipements des ménages.

Soient :

- p_i la proportion en (%) des ménages du segment i dans le village.
- $i \in \{1; 2; 3; 4\}$
- N Le nombre total de ménages dans le village
- N_i , le nombre de ménages du segment. On a ($N_i = p_i * N$)
- On précise que le ménage du segment $i + 1$ est plus équipé que celui ménage du segment i .
- B_i la demande en électricité d'un ménage issu du segment i
- B_{Si}^F la demande finale (en Wh) en énergie de tous les ménages du segment i

Pour chaque équipement X, nous adoptons la notation, X ($P_{Xi}, T_{Xi}, \tau_{Xi}, NJ_{Xi}$) tel que :

- P_{Xi} la puissance (en W) de l'équipement X du segment i
- T_{Xi} , sa durée d'utilisation (en heures) par jour par le ménage du segment i
- τ_{Xi} le taux de diffusion de l'équipement X dans le segment i
- NJ_{Xi} le nombre de jours d'utilisation de l'équipement X par année par le ménage du segment i

On a ainsi :

- La Lampe ($P_{Li}, T_{Li}, \tau_{Li}, NJ_{Li}$)
- La radio ($P_{Ri}, T_{Ri}, \tau_{Ri}, NJ_{Ri}$)
- La chaîne Hi-fi ($P_{Chi}, T_{Chi}, \tau_{Chi}, NJ_{Chi}$)
- La télévision ($P_{Tvi}, T_{Tvi}, \tau_{Tvi}, NJ_{Tvi}$)
- Le Lecteur vidéo ($P_{Lvi}, T_{Lvi}, \tau_{Lvi}, NJ_{Lvi}$)
- Le ventilateur ($P_{Veni}, T_{Veni}, \tau_{Veni}, NJ_{Ven}$)
- Le réfrigérateur ($P_{Refi}, T_{Refi}, \tau_{Refi}, NJ_{Refi}$)
- Le climatiseur ($P_{Cli}, T_{Cli}, \tau_{Cli}, NJ_{Cli}$)
- Le téléphone portable ($P_{Tpi}, T_{Tpi}, \tau_{Tpi}, NJ_{Tpi}$)
- L'ordinateur portable ($P_{Opi}, T_{Opi}, \tau_{Opi}, NJ_{Opi}$)
- Le fer à repasser ($P_{Feri}, T_{Feri}, \tau_{Feri}, NJ_{Feri}$)

Dans ce qui va suivre, nous allons modéliser les besoins des différents segments de ménages.

○ **Modélisation des besoins en électricité du segment 1**

Le segment 1 renferme la catégorie des ménages les moins nantis du village. Les besoins exprimés sont principalement : **l'éclairage, l'audio (radio) et la communication (la téléphonie mobile).**

$$B_{S1}^F = (P_{L1} * T_{L1} * \tau_{L1} * NJ_{L1} + P_{R1} * T_{R1} * \tau_{R1} * NJ_{R1} + P_{TP1} * T_{TP1} * \tau_{TP1} * NJ_{TP1}) * p_1 * N \quad (09)$$

○ **Modélisation des besoins en électricité du segment 2**

Les besoins exprimés dans cette catégorie sont principalement : **l'éclairage, l'audio-visuel et la communication.**

$$B_{S2}^F = (P_{L2} * T_{L2} * \tau_{L2} * NJ_{L2} + P_{R2} * T_{R2} * \tau_{R2} * NJ_{R2} + P_{TV2} * T_{TV2} * \tau_{TV2} * NJ_{TV2} + P_{LV2} * T_{LV2} * \tau_{LV2} * NJ_{LV2} + P_{TP2} * T_{TP2} * \tau_{TP2} * NJ_{TP2}) * p_2 * N \quad (10)$$

○ **Modélisation des besoins en électricité du segment 3**

Le segment 3 quant à lui renferme la catégorie des ménages qui expriment **les besoins d'éclairage, d'audio-visuel, de communication et de ventilation.**

$$B_{S3}^F = (P_{L3} * T_{L3} * \tau_{L3} * NJ_{L3} + P_{R3} * T_{R3} * \tau_{R3} * NJ_{R3} + P_{TV3} * T_{TV3} * \tau_{TV3} * NJ_{TV3} + P_{LV3} * T_{LV3} * \tau_{LV3} * NJ_{LV3} + P_{VEN3} * T_{VEN3} * \tau_{VEN3} * NJ_{VEN3} + P_{CH3} * T_{CH3} * \tau_{CH3} * NJ_{CH3} + P_{TP3} * T_{TP3} * \tau_{TP3} * NJ_{TP3}) * p_3 * N \quad (11)$$

Modélisation des besoins en électricité du segment 4

Le segment 4 quant à lui renferme la catégorie des ménages ayant un niveau de puissance plus élevé que celui des ménages du segment 3. Les sous-catégories de besoins exprimés sont principalement : l'éclairage, l'audio, le visuel (Télévision et Lecteur vidéo), la communication, la ventilation, le repassage, le froid (climatisation et réfrigération), l'informatique.

$$B_{S4}^F = (P_{L4} * T_{L4} * \tau_{L4} * NJ_{L4} + P_{R4} * T_{R4} * \tau_{R4} * NJ_{R4} + P_{TV4} * T_{TV4} * \tau_{TV4} * NJ_{TV4} + P_{LV4} * T_{LV4} * \tau_{LV4} * NJ_{LV4} + P_{VEN4} * T_{VEN4} * \tau_{VEN4} * NJ_{VEN4} + P_{CH4} * T_{CH4} * \tau_{CH4} * NJ_{CH4} + P_{TP4} * T_{TP4} * \tau_{TP4} * NJ_{TP4} + P_{FER4} * T_{FER4} * \tau_{FER4} * NJ_{FER4} + P_{CLIA4} * T_{CLIA4} * \tau_{CLIA4} * NJ_{CLIA4} + P_{OP4} * T_{OP4} * \tau_{OP4} * NJ_{OP4} + P_{REF4} * T_{REF4} * \tau_{REF4} * NJ_{REF4}) * p_4 * N \quad (12)$$

○ **Modélisation de la demande domestique finale en électricité.**

Soit B_{DOMES}^F la demande domestique finale du village.

$$B_{DOMES}^F = \sum_{i=1}^4 B_{Si}^F \quad (13)$$

Avec B_{Si}^F étant la demande finale en électricité de tous les ménages du segment i

Après avoir modélisé les besoins domestiques en électricité du ménage, nous allons nous intéresser à la modélisation des autres besoins, à savoir les besoins communautaires et les besoins des activités génératrices de revenu.

4.3. Modélisation des besoins communautaires du village

Les besoins communautaires sont les besoins exprimés par les espaces communautaires du village. Un espace communautaire a une fonction principale de service public à l'ensemble de la population ou à un sous-groupe de cette population. Les espaces communautaires sont :

- L'éclairage public (lampadaires) pour éclairer les rues du village
- Les infrastructures sanitaires (poste de santé) pour les petits soins dans le village
- Les infrastructures d'éducation (école) pour la formation des élèves.
- Les lieux de culte (église, mosquée, temple etc.)
- Le pompage (pour faciliter l'accès à l'eau dans le village)
- Une salle polyvalente pour les activités tels que les réceptions, les projections...
- Un bâtiment administratif (une sous-préfecture)

Nous allons par la suite modéliser les différents usages communautaires.

Pour chaque équipement X, notons X (P_X, T_X, N_X, NJ_X) où :

- P_X la puissance d'un équipement X
- T_X , la durée de fonctionnement (en heures) par jour de l'équipement X
- N_X le nombre d'équipements X
- NJ_X le nombre de jours de fonctionnement de l'équipement X par année

○ Modélisation des besoins en électricité de l'éclairage public

Soit B_{EP}^F (Wh) le besoin final en électricité de l'éclairage public.

$$B_{EP}^F = N_{LAMPA} * P_{LAMPA} * T_{LAMPA} * NJ_{LAMPA} \quad (14)$$

Où : Lampadaire ($P_{LAMPA}, T_{LAMPA}, N_{LAMPA}, NJ_{LAMPA}$)

○ Modélisation des besoins en électricité de l'infrastructure de santé

Le centre de santé est composé de :

- Lampes d'urgences ($P_{LAMUR}, T_{LAMUR}, N_{LAMUR}, NJ_{LAMUR}$)
- Lampes d'éclairage ($P_{LAMP}, T_{LAMP}, N_{LAMP}, NJ_{LAMP}$)
- Ventilateur ($P_{VEN}, T_{VEN}, N_{VEN}, NJ_{VEN}$)
- Radio-téléphone ($P_{RAT}, T_{RAT}, N_{RAT}, NJ_{RAT}$)
- Réfrigérateur ($P_{REF}, T_{REF}, N_{REF}, NJ_{REF}$)
- Chauffe-eau ($P_{CHE}, T_{CHE}, N_{CHE}, NJ_{CHE}$)

Soit B_{SAN}^F le besoin final (en Wh) en électricité de l'infrastructure de santé.

$$B_{SAN}^F = (N_{LAMUR} * P_{LAMUR} * T_{LAMUR} * NJ_{LAMUR} + N_{LAMP} * P_{LAMP} * T_{LAMP} * NJ_{LAMP} + N_{VEN} * P_{VEN} * T_{VEN} * NJ_{VEN} + N_{RAT} * P_{RAT} * T_{RAT} * NJ_{RAT} + N_{REF} * P_{REF} * T_{REF} * NJ_{REF} + N_{CHE} * P_{CHE} * T_{CHE} * NJ_{CHE}) \quad (15)$$

Modélisation des besoins en électricité de l'infrastructure d'éducation (école)

L'école est composée de :

- Lampes d'éclairage ($P_{LAMP}, T_{LAMP}, N_{LAMP}, NJ_{LAMP}$)
- Télévision ($P_{TV}, T_{TV}, N_{TV}, NJ_{TV}$)
- Ventilateur ($P_{VEN}, T_{VEN}, N_{VEN}, NJ_{VEN}$)
- Ordinateur ($P_{OR}, T_{OR}, N_{OR}, NJ_{OR}$)
- Imprimante ($P_{IMP}, T_{IMP}, N_{IMP}, NJ_{IMP}$)

Soit B_{ECO}^F le besoin final (en Wh) en électricité de l'école.

$$B_{ECO}^F = (N_{LAMP} * P_{LAMP} * T_{LAMP} * NJ_{LAMP} + N_{VEN} * P_{VEN} * T_{VEN} * NJ_{TV} + N_{TV} * P_{TV} * T_{TV} * NJ_{TV} + N_{OR} * P_{OR} * T_{OR} * NJ_{OR} + N_{CHE} * P_{IMP} * T_{IMP} * NJ_{IMP}) \quad (16)$$

○ Modélisation des besoins en électricité des Lieux de culte

L'établissement religieux est composé entre autres d'équipements suivants :

- Lampes d'éclairage ($P_{LAMP}, T_{LAMP}, N_{LAMP}, NJ_{LAMP}$)
- Ventilateur ($P_{VEN}, T_{VEN}, N_{VEN}, NJ_{VEN}$)
- Ampli ($P_{AMP}, T_{AMP}, N_{AMP}, NJ_{AMP}$)

Soit B_{CULTE}^F le besoin final (en Wh) en électricité des lieux de culte et soit C le nombre de lieux de cultes.

$$B_{CULTE}^F = \sum_{j=1}^{i=C} (N_{LAMP_j} * P_{LAMP_j} * T_{LAMP_j} * NJ_{LAMP_j} + N_{VEN_j} * P_{VEN_j} * T_{VEN_j} * NJ_{VEN_j} + N_{AMP_j} * P_{AMP_j} * T_{AMP_j} * NJ_{AMP_j}) \quad (17)$$

○ Modélisation des besoins en électricité de la salle polyvalente (salle d'activités du village pour l'organisation des manifestations)

La salle d'activités récréatives (salle polyvalente) est composée entre autres d'équipements suivants :

- Lampes d'éclairage ($P_{LAMP}, T_{LAMP}, N_{LAMP}, NJ_{LAMP}$)
- Ventilateur ($P_{VEN}, T_{VEN}, N_{VEN}, NJ_{VEN}$)
- Ampli ($P_{AMP}, T_{AMP}, N_{AMP}, NJ_{AMP}$)
- Télévision ($P_{TV}, T_{TV}, N_{TV}, NJ_{TV}$)
- Ordinateur ($P_{OR}, T_{OR}, N_{OR}, NJ_{OR}$)

Soit B_{SALLE}^F le besoin final (en Wh) en électricité de cette salle.

$$B_{SALLE}^F = (N_{AMP} * P_{AMP} * T_{AMP} * NJ_{LAMP} + N_{LAMP} * P_{LAMP} * T_{LAMP} * NJ_{LAMP} + N_{VEN} * P_{VEN} * T_{VEN} * NJ_{VEN} + N_{TV} * P_{TV} * T_{TV} * NJ_{TV} + N_{OR} * P_{OR} * T_{OR} * NJ_{OR}) \quad (18)$$

○ Modélisation des besoins en électricité du pompage.

Soit B_{POMP}^F le besoin final (en Wh) en électricité du pompage.

$$B_{POMP}^F = N_{POMP} * P_{POMP} * T_{POMP} * NJ_{POMP} \quad (19)$$

Où :

- P_{POMP} la puissance (en W) de la pompe
- T_{POMP} , la durée de fonctionnement (en heures) par jour de la pompe
- N_{POMP} est le nombre de pompe
- NJ_{POMP} le nombre de jours de fonctionnement de la pompe par année

○ **Modélisation des besoins en électricité de la sous-préfecture**

La sous-préfecture est composée de :

- Lampes d'éclairage ($P_{LAMP}, T_{LAMP}, N_{LAMP}, NJ_{LAMP}$)
- Ventilateur ($P_{VEN}, T_{VEN}, N_{VEN}, NJ_{VEN}$)
- Climatiseur ($P_{CLIM}, T_{CLIM}, N_{CLIM}, NJ_{CLIM}$)
- Ordinateur ($P_{OR}, T_{OR}, N_{OR}, NJ_{OR}$)
- Imprimante ($P_{IMP}, T_{IMP}, N_{IMP}, NJ_{IMP}$)
- Télévision ($P_{TV}, T_{TV}, N_{TV}, NJ_{TV}$)
- Radio-téléphone ($P_{RAT}, T_{RAT}, N_{RAT}, NJ_{RAT}$)

Soit B_{SP}^F le besoin final (en Wh) en électricité de la sous-préfecture.

$$B_{SP}^F = (N_{CLIM} * P_{CLIM} * T_{CLIM} * NJ_{CLIM} + N_{LAMP} * P_{LAMP} * T_{LAMP} * NJ_{LAMP} + N_{VEN} * P_{VEN} * T_{VEN} * NJ_{VEN} + N_{RAT} * P_{RAT} * T_{RAT} * NJ_{RAT} + N_{IMP} * P_{IMP} * T_{IMP} * NJ_{IMP} + N_{TV} * P_{TV} * T_{TV} * NJ_{TV} + N_{OR} * P_{OR} * T_{OR} * NJ_{OR}) \quad (20)$$

Finalement, les besoins (B_{COMMU}^F) communautaires (en Wh) en électricité s'établissent à :

$$B_{COMMU}^F = B_{POMP}^F + B_{SP}^F + B_{SALLE}^F + B_{CULTE}^F + B_{ECO}^F + B_{SAN}^F + B_{EP}^F \quad (21)$$

Après avoir modélisé les besoins communautaires, nous allons passer à la modélisation des besoins liés aux activités génératrices de revenu. Il faut noter que les besoins communautaires tiennent compte de la spécificité culturelle du village. Par exemple, la variable religion a été matérialisée dans le modèle par les besoins des lieux de culte.

4.4. Modélisation des besoins liés aux activités génératrices de revenus du village.

Pour des activités génératrices de revenus, l'électricité utilisée est considérée comme un moyen important de corréliser avec succès l'électrification et le développement de proximité [63] [68](Cook, 2011 ; Mulder & Tembe, 2008). Une condition préalable majeure à la croissance économique à long terme est l'accès à une électricité fiable et abordable, cela permet la création et la modernisation d'activités génératrices de revenus [69] (Shyu, 2014). Il s'agit en l'occurrence des activités, tels que la menuiserie, les moulins, les salons de coiffure, rencontrées dans les villages ruraux (augmentation des heures d'ouverture des magasins...). L'accès à

l'électricité peut également conduire à la création de nouvelles entreprises (atelier mécanique, atelier de soudure, cybercafés, bars à boissons, équipements électriques, bornes de recharge de batteries...). Les besoins en électricité des activités génératrices du village sont ceux issus de toutes les activités productives et commerciales qui permettent aux habitants de percevoir des revenus. Ces activités sont :

- Les activités productives regroupant :
 - ✓ Les ateliers (couture, manipulation d'outils, vulcanisateurs...);
 - ✓ Les moulins (moulin à céréale, moulin à manioc...).
- Les activités commerciales regroupant :
 - ✓ Les boutique ;
 - ✓ Les quincailleries ;
 - ✓ Les antennes relais de communication ;
 - ✓ Les maquis-Restaurants ;
 - ✓ Les hôtels ;
 - ✓ Les salons de beauté ;
 - ✓ Les salons de coiffure ;
 - ✓ Etc...

Nous modélisons tout d'abord les besoins des activités productives et par la suite ceux des activités commerciales. Par la suite, nous faisons la somme de ces deux types de besoins pour trouver les besoins communautaires.

4.4.1. Modélisation des besoins en électricité des activités productives

Modélisation des besoins en électricité des salons de couture

Le salon de couture est composé de :

- Lampes d'éclairage ($P_{LAMP}, T_{LAMP}, N_{LAMP}, NJ_{LAMP}$)
- Ventilateur ($P_{VEN}, T_{VEN}, N_{VEN}, NJ_{VEN}$)
- Machine ($P_{MACH}, T_{MACH}, N_{MACH}, NJ_{MACH}$)

Soit B_{SALON}^F le besoin final (en Wh) en électricité des salons de coiffure et soit CO , le nombre de salon de coiffure.

$$B_{SALON}^F = \sum_{i=1}^{i=CO} (N_{LAMP_j} * P_{LAMP_j} * T_{LAMP_j} * NJ_{LAMP_j} + N_{VEN_j} * P_{VEN_j} * T_{VEN_j} * NJ_{VEN_j} + N_{MACH_j} * P_{MACH_j} * T_{MACH_j} * NJ_{MACH_j}) \quad (22)$$

Ces ateliers sont composés de :

- Perceuse ($P_{PERC}, T_{PERC}, N_{PERC}, NJ_{PERC}$)
- Scie ($P_{SCIE}, T_{SCIE}, N_{SCIE}, NJ_{SCIE}$)
- Lampes d'éclairages spécial ($P_{LAMPS}, T_{LAMPS}, N_{LAMPS}, NJ_{LAMPS}$)
- Ponceuse ($P_{PONC}, T_{PONC}, N_{PONC}, NJ_{PONC}$)

Soit B_{MA-O}^F le besoin final (en Wh) en électricité des ateliers de manipulation d'outils et soit M , le nombre d'ateliers de manipulation d'outils.

$$B_{MA-OUT}^F = \sum_{i=1}^{i=M} (N_{LAMP_j} * P_{LAMP_j} * T_{LAMP_j} * NJ_{LAMP_j} + N_{PERC_j} * P_{PERC_j} * T_{PERC_j} * NJ_{PERC_j} + N_{SCIE_j} * P_{SCIE_j} * T_{SCIE_j} * NJ_{SCIE_j} + N_{PONC_j} * P_{PONC_j} * T_{PONC_j} * NJ_{PONC_j}) \quad (23)$$

Modélisation des besoins en électricité des ateliers de vulcanisateurs

Ces ateliers sont composés de :

- Lampes d'éclairage (P_{LAMP} , T_{LAMP} , N_{LAMP} , NJ_{LAMP})
- Compresseurs (P_{COMPR} , T_{COMPR} , N_{COMPR} , NJ_{COMPR})

Soit B_{VULGA}^F le besoin final (en Wh) en électricité des ateliers de vulcanisateurs et soit V , le nombre d'ateliers de vulcanisateurs.

$$B_{VULGA}^F = \sum_{i=1}^{i=V} (N_{LAMP_j} * P_{LAMP_j} * T_{LAMP_j} * NJ_{LAMP_j} + N_{COMPR_j} * P_{COMPR_j} * T_{COMPR_j} * NJ_{COMPR_j}) \quad (24)$$

Finalement les besoins (B_{APR}^F) (en Wh) des activités productives sont :

$$B_{APR}^F = B_{VULGA}^F + B_{MA-OUT}^F + B_{SALON}^F \quad (25)$$

Modélisation des besoins en électricité des moulins à manioc

Ce moulin est composé de :

- Moteur (P_{MOU-M} , $T_{MOU-MAN}$, $N_{MOU-MAN}$, $NJ_{MOU-MAN}$)

Soit $B_{MOU-MAN}^F$ le besoin final (en Wh) en électricité des moulins à manioc et MM, le nombre de moulins à manioc.

$$B_{MOU-MAN}^F = \sum_{j=1}^{j=MM} (N_{MOU-MAN_j} * P_{MOU-MAN_j} * T_{MOU-MAN_j} * NJ_{MOU-MAN_j}) \quad (26)$$

Modélisation des besoins en électricité des moulins à céréales

Ce moulin est composé de :

- Moteur ($P_{MOU-CERE}$, $T_{MOU-CERE}$, $N_{MOU-CERE}$, $NJ_{MOU-CERE}$)

Soit $B_{MOU-CERE}^F$ le besoin final (en Wh) en électricité des moulins à manioc et CE, le nombre de moulins à céréales.

$$B_{MOU-CERE}^F = \sum_{i=1}^{i=CE} (N_{MOU-CERE_j} * P_{MOU-CERE_j} * T_{MOU-CERE_j} * NJ_{MOU-CERE_j}) \quad (27)$$

4.4.2. Modélisation des besoins en électricité des activités commerciales

Modélisation des besoins en électricité des boutiques

La boutique est composée de :

- Lampes d'éclairage ($P_{LAMP}, T_{LAMP}, N_{LAMP}, NJ_{LAMP}$)
- Ventilateur ($P_{VEN}, T_{VEN}, N_{VEN}, NJ_{VEN}$)
- Réfrigérateur ($P_{REF}, T_{REF}, N_{REF}, NJ_{REF}$)
- Radios ($P_{RAD}, T_{RAD}, N_{RAD}, NJ_{RAD}$)
- Télévision ($P_{TV}, T_{TV}, N_{TV}, NJ_{TV}$)

Soit B_{BOUT}^F le besoin final (en Wh) en électricité des boutiques et soit B , le nombre de boutiques.

$$B_{BOUT}^F = \sum_{i=1}^{i=B} (N_{LAMP_j} * P_{LAMP_j} * T_{LAMP_j} * NJ_{LAMP_j} + N_{VEN_j} * P_{VEN_j} * T_{VEN_j} * NJ_{VEN_j} + N_{REF_j} * P_{REF_j} * T_{REF_j} * NJ_{REF_j} + N_{RAD_j} * P_{RAD_j} * T_{RAD_j} * NJ_{RAD_j} + N_{TV_j} * P_{TV_j} * T_{TV_j} * NJ_{TV_j}) \quad (28)$$

Modélisation des besoins en électricité des quincailleries :

La quincaillerie est composée de :

- Lampes d'éclairage ($P_{LAMP}, T_{LAMP}, N_{LAMP}, NJ_{LAMP}$)
- Ventilateur ($P_{VEN}, T_{VEN}, N_{VEN}, NJ_{VEN}$)
- Radios ($P_{RAD}, T_{RAD}, N_{RAD}, NJ_{RAD}$)
- Télévision ($P_{TV}, T_{TV}, N_{TV}, NJ_{TV}$)

Soit B_{QUIN}^F le besoin final (en Wh) en électricité des quincailleries et soit Q , le nombre de quincailleries.

$$B_{QUIN}^F = \sum_{i=1}^{i=Q} (N_{LAMP_j} * P_{LAMP_j} * T_{LAMP_j} * NJ_{LAMP_j} + N_{VEN_j} * P_{VEN_j} * T_{VEN_j} * NJ_{VEN_j} + N_{RAD_j} * P_{RAD_j} * T_{RAD_j} * NJ_{RAD_j} + N_{TV_j} * P_{TV_j} * T_{TV_j} * NJ_{TV_j}) \quad (29)$$

Modélisation des besoins en électricité des antennes-relais de communication :

Les antennes-relais de communication sont composées de :

- Lampes d'éclairage ($P_{LAMP}, T_{LAMP}, N_{LAMP}, NJ_{LAMP}$)
- Baie ($P_{BAIE}, T_{BAIE}, N_{BAIE}, NJ_{BAIE}$)
- Climatiser ($P_{CLIM}, T_{CLIM}, N_{CLIM}, NJ_{CLIM}$)
- Back-up ($P_{BACK}, T_{BACK}, N_{BACK}, NJ_{BACK}$)

Soit B_{ANTEN}^F le besoin final (en Wh) en électricité des antennes et soit A , le nombre d'antennes-relais de communication.

$$B_{ANTEN}^F = \sum_{i=1}^{i=A} (N_{LAMP_j} * P_{LAMP_j} * T_{LAMP_j} * NJ_{LAMP_j} + N_{BAIE_j} * P_{BAIE_j} * T_{BAIE_j} * NJ_{BAIE_j} + N_{CLIM_j} * P_{CLIM_j} * T_{CLIM_j} * NJ_{CLIM_j} + N_{BACK_j} * P_{BACK_j} * T_{BACK_j} * NJ_{BACK_j}) \quad (30)$$

Modélisation des besoins en électricité des maquis-restaurants :

Les maquis-restaurants sont composés de :

- Lampes d'éclairage ($P_{LAMP}, T_{LAMP}, N_{LAMP}, NJ_{LAMP}$)
- Climatiseur ($P_{CLIM}, T_{CLIM}, N_{CLIM}, NJ_{CLIM}$)
- Radios ($P_{RAD}, T_{RAD}, N_{RAD}, NJ_{RAD}$)
- Ventilateur ($P_{VEN}, T_{VEN}, N_{VEN}, NJ_{VEN}$)
- Ampli ($P_{AMP}, T_{AMP}, N_{AMP}, NJ_{AMP}$)
- Réfrigérateur ($P_{REF}, T_{REF}, N_{REF}, NJ_{REF}$)
- Télévision ($P_{TV}, T_{TV}, N_{TV}, NJ_{TV}$)
- Ordinateur ($P_{OR}, T_{OR}, N_{OR}, NJ_{OR}$)

Soit $B_{MAQ-REST}^F$ le besoin final (en Wh) en électricité des maquis restaurants et MAR , le nombre de maquis restaurants dans le village.

$$B_{MAQ-REST}^F = \sum_{i=1}^{i=MAR} (N_{LAMP_j} * P_{LAMP_j} * T_{LAMP_j} * NJ_{LAMP_j} + N_{CLIM_j} * P_{CLIM_j} * T_{CLIM_j} * NJ_{CLIM_j} + N_{VEN_j} * P_{VEN_j} * T_{VEN_j} * NJ_{VEN_j} + N_{AMP_j} * P_{AMP_j} * T_{AMP_j} * NJ_{AMP_j} + N_{REF_j} * P_{REF_j} * T_{REF_j} * NJ_{REF_j} + N_{TV_j} * P_{TV_j} * T_{TV_j} * NJ_{TV_j} + N_{OR_j} * P_{OR_j} * T_{OR_j} * NJ_{OR_j} + N_{RAD_j} * P_{RAD_j} * T_{RAD_j} * NJ_{RAD_j}) \quad (31)$$

Modélisation des besoins en électricité des hôtels :

Les hôtels sont composés de :

- Lampes d'éclairage ($P_{LAMP}, T_{LAMP}, N_{LAMP}, NJ_{LAMP}$)
- Climatiseur ($P_{CLIM}, T_{CLIM}, N_{CLIM}, NJ_{CLIM}$)
- Radios ($P_{RAD}, T_{RAD}, N_{RAD}, NJ_{RAD}$)
- Ventilateur ($P_{VEN}, T_{VEN}, N_{VEN}, NJ_{VEN}$)
- Ampli ($P_{AMP}, T_{AMP}, N_{AMP}, NJ_{AMP}$)
- Réfrigérateur ($P_{REF}, T_{REF}, N_{REF}, NJ_{REF}$)
- Télévision ($P_{TV}, T_{TV}, N_{TV}, NJ_{TV}$)
- Ordinateur ($P_{OR}, T_{OR}, N_{OR}, NJ_{OR}$)
- Fer à repasser ($P_{FER}, T_{FER}, N_{FER}, NJ_{FER}$)
- Chauffe-eau ($P_{CHE}, T_{CHE}, N_{CHE}, NJ_{CHE}$)

Soit B_{HOTELS}^F le besoin final (en Wh) en électricité des hôtels et H , le nombre d'hôtels dans le village.

$$B_{HOTELS}^F = \sum_{i=1}^{i=H} (N_{LAMP_j} * P_{LAMP_j} * T_{LAMP_j} * NJ_{LAMP_j} + N_{CLIM_j} * P_{CLIM_j} * T_{CLIM_j} * NJ_{CLIM_j} + N_{VEN_j} * P_{VEN_j} * T_{VEN_j} * NJ_{VEN_j} + N_{AMP_j} * P_{AMP_j} * T_{AMP_j} * NJ_{AMP_j} + N_{REF_j} * P_{REF_j} * T_{REF_j} * NJ_{REF_j} + N_{TV_j} * P_{TV_j} * T_{TV_j} * NJ_{TV_j} + N_{OR_j} * P_{OR_j} * T_{OR_j} * NJ_{OR_j} + N_{CHE_j} * P_{CHE_j} * T_{CHE_j} * NJ_{CHE_j} + N_{RAD_j} * P_{RAD_j} * T_{RAD_j} * NJ_{RAD_j}) \quad (32)$$

Modélisation des besoins en électricité des salons de coiffure :

Les salons de coiffure sont composés de :

- Lampes d'éclairage ($P_{LAMP}, T_{LAMP}, N_{LAMP}, NJ_{LAMP}$)
- Radios ($P_{RAD}, T_{RAD}, N_{RAD}, NJ_{RAD}$)
- Ventilateur ($P_{VEN}, T_{VEN}, N_{VEN}, NJ_{VEN}$)
- Télévision ($P_{TV}, T_{TV}, N_{TV}, NJ_{TV}$)

Soit $B_{SALCOIF}^F$ le besoin final (en Wh) en électricité des salons de coiffure et SC , le nombre de salons de coiffure dans le village.

$$B_{SALCOIF}^F = \sum_{i=1}^{i=SC} (N_{LAMP_j} * P_{LAMP_j} * T_{LAMP_j} * NJ_{LAMP_j} + N_{VEN_j} * P_{VEN_j} * T_{VEN_j} * NJ_{VEN_j} + N_{TV_j} * P_{TV_j} * T_{TV_j} * NJ_{TV_j} + N_{RAD_j} * P_{RAD_j} * T_{RAD_j} * NJ_{RAD_j}) \quad (33)$$

Modélisation des besoins en électricité des salons de Beauté :

Les salons de beauté sont composés de :

- Lampes d'éclairage ($P_{LAMP}, T_{LAMP}, N_{LAMP}, NJ_{LAMP}$)
- Radios ($P_{RAD}, T_{RAD}, N_{RAD}, NJ_{RAD}$)
- Ventilateur ($P_{VEN}, T_{VEN}, N_{VEN}, NJ_{VEN}$)
- Ampli ($P_{AMP}, T_{AMP}, N_{AMP}, NJ_{AMP}$)
- Télévision ($P_{TV}, T_{TV}, N_{TV}, NJ_{TV}$)
- Chauffe-eau ($P_{CHE}, T_{CHE}, N_{CHE}, NJ_{CHE}$)
- Sèche-cheveux ($P_{SECHE}, T_{SECHE}, N_{SECHE}, NJ_{SECHE}$)

Soit $B_{SALBEAU}^F$ le besoin final (en Wh) en électricité des salons de beauté et SB , le nombre de Salons de beauté dans le village.

$$B_{SALBEAU}^F = \sum_{i=1}^{i=SB} (N_{LAMP_j} * P_{LAMP_j} * T_{LAMP_j} * NJ_{LAMP_j} + N_{VEN_j} * P_{VEN_j} * T_{VEN_j} * NJ_{VEN_j} + N_{AMP_j} * P_{AMP_j} * T_{AMP_j} * NJ_{AMP_j} + N_{TV_j} * P_{TV_j} * T_{TV_j} * NJ_{TV_j} + N_{RAD_j} * P_{RAD_j} * T_{RAD_j} * NJ_{RAD_j} + N_{CHE_j} * P_{CHE_j} * T_{CHE_j} * NJ_{CHE_j} + N_{SECHE_j} * P_{SECHE_j} * T_{SECHE_j} * NJ_{SECHE_j}) \quad (34)$$

Finalement les besoins B_{ACOM}^F en (Wh) des activités commerciales en électricité sont :

$$B_{ACOM}^F = B_{SALBEAU}^F + B_{SALCOIF}^F + B_{HOTELS}^F + B_{MAQ-RESTO}^F + B_{ANTEN}^F + B_{QUIN}^F + B_{BOUT}^F \quad (35)$$

Par conséquent, les besoins B_{AGR}^F (en Wh) des activités génératrices de revenus s'établissent à :

$$B_{AGR}^F = B_{ACOM}^F + B_{APR}^F \quad (36)$$

4.5. Modélisation des besoins totale domestique d'un village en milieu rural

La consommation journalière par ménage du village par tranche horaire est donnée par la sommation des consommations des différents usages.

La consommation journalière totale du village d'Elokato est :

$$Cons_{totale} = B_{AGR}^F + B_{COMMU}^F + B_{DOMES}^F \quad (37)$$

Avec :

- B_{AGR}^F : les besoins (en Wh) liés aux activités génératrices de revenus
- B_{COMMU}^F : les besoins communautaires (en Wh) en électricité
- B_{DOMES}^F : la demande domestique finale du village
- $Cons_T$: La consommation journalière totale du village d'Elokato

En définitive, la courbe de charge pour un village choisi en milieu rural aurait un profil de charge similaire à la figure ci-dessous, mais une amplitude de consommation variante.

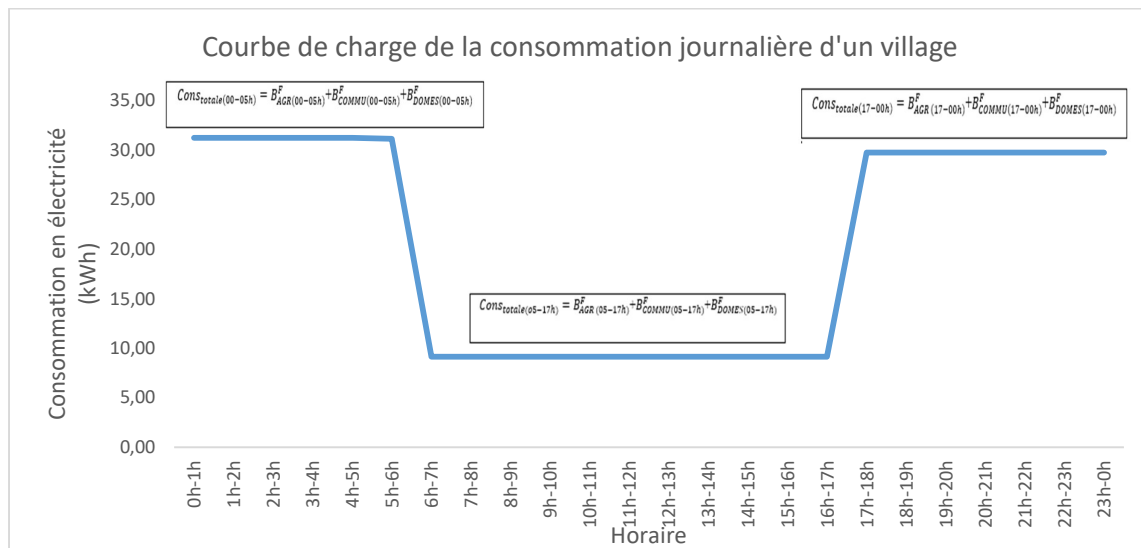


Figure 55. Courbe de charge de la consommation journalière d'un village situé en zone rurale. Elle est obtenue en additionnant les consommations des différents usages par tranches horaires. La formule suivante permet de déterminer les consommations journalières par tranches horaires :

$$Cons_{totale}(y1-y2h) = B_{AGR}(y1-y2h) + B_{COMMU}(y1-y2h) + B_{DOMES}(y1-y2h) \quad (38)$$

Avec :

- $B_{AGR}(y1-y2h)$: les besoins (en Wh) liés aux activités génératrices de revenus entre y1-y2
- $B_{COMMU}(y1-y2)$: les besoins communautaires (en Wh) en électricité entre y1-y2
- $B_{DOMES}(y1-y2)$: la demande domestique finale du village entre y1-y2
- $Cons_{total}(y1-y2)$: La consommation journalière du village d'Elokato entre y1-y2

Où « y1-y2h » est la tranche horaire : 00-05h ou 05-17h ou encore 17-00h.

5. Identification et modélisation des ressources énergétiques renouvelables disponibles

Cette partie concerne le recensement des énergies nouvelles et renouvelables disponibles dans le village. Il s'agit par ailleurs, d'analyser le gisement d'énergie récupérable pour la satisfaction des besoins en électricité du village. Il existe plusieurs sources d'énergie renouvelables mais, nous nous intéressons au potentiel énergétique des ressources suivantes : solaire, éolienne, biomasse et hydroélectrique (petite hydraulique et hydrolienne).

5.1. Modélisation de l'énergie solaire disponible dans le village

Il s'agit de procéder à un dimensionnement des composants d'une mini-centrale solaire photovoltaïque. La base de ce dimensionnement est la consommation annuelle du village. Nous modélisons les différentes composantes du système photovoltaïque (PV, onduleur, Batteries). La figure ci-dessous présente le schéma de principe d'un système PV autonome avec stockage.

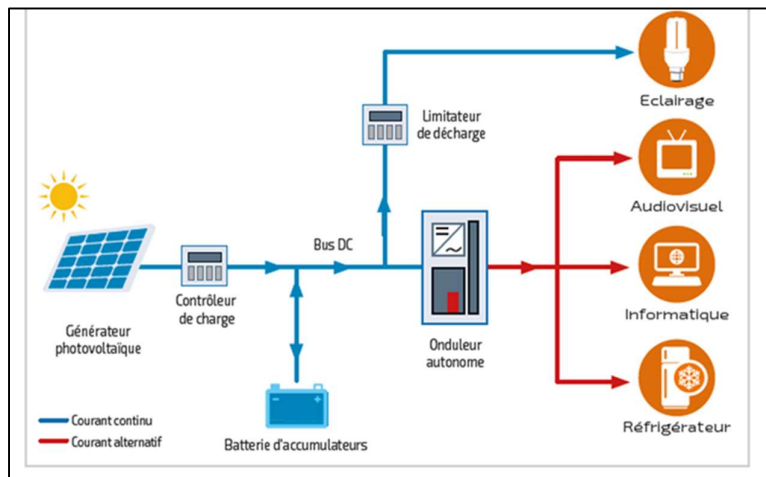


Figure 56. Principe d'un système PV

5.1.1. Modélisation du champ photovoltaïque

$$I_{\text{prod_sol}} = I_{\text{sol}} * \eta_{\text{batterie}} * \eta_{\text{ond}} * \eta_{\text{reg}} * f_t * T_p \quad (39)$$

$$P_{\text{PV_nom}} = E_{\text{jour}} / I_{\text{prod_sol}}$$

(Arrondissement à un chiffre entier supérieur pour le calcul de $P_{\text{PV_nom}}$) (40)

$$Nb_{\text{série}} = \text{Tension}_{\text{DC}} / \text{Tension}_{\text{panneau}} \quad (41)$$

$$Nb_{\text{parrallèle}} = P_{\text{PV_nom}} / (P_{\text{panneau}} * Nb_{\text{série}}) \quad (42)$$

Avec :

- I_{prod_sol} , l'irradiation productive en kWh/m²/jour
- I_{sol} , l'insolation (rayonnement journalier)
- $\eta_{batterie}$, le rendement des batteries
- E_{jour} , l'énergie consommée par jour (Wh)
- $Tension_{DC}$, la tension déterminée grâce à quelques produits disponibles sur le marché
- $Tension_{panneau}$, la tension d'un panneau
- η_{ond} , le rendement de l'onduleur
- η_{reg} , le rendement du régulateur
- f_t , le taux de pertes sur les câbles (transport)
- T_p , le facteur de réduction d'efficacité
- $Nb_{série}$, le nombre de panneaux en série
- $Nb_{parralèle}$, le nombre de panneaux en parallèle
- $P_{PV_{nom}}$, La puissance installée (Wc)

5.1.2. Modélisation de l'onduleur

$$P_{ond_max} = P_p / (\eta_{ond} * f_t) \quad (43)$$

Avec :

- P_p , la puissance de pointe (W)
- η_{ond} , le rendement de l'onduleur
- f_t , le taux de pertes sur les câbles (transport)

5.1.3. Modélisation des batteries

$$C_{batteries} = (E_{batteries} * t_{auton}) / (d * 1000) \quad (44)$$

$$I_{flux_max} = (C_{batteries} * 1000) / (tension_{DC})$$

(Arrondissement à un chiffre entier supérieur pour le calcul de I_{flux_max}) (45)

$$Nb_{série} = Tension_{DC} / Tension_{batterie} \quad (46)$$

S'agissant du nombre de batteries en parallèle ($Nb_{parralèle}$) . Il est déterminé de telle manière que si la capacité de la batterie (Ampères-heures) est plus grande que celle des batteries fournies sur le marché, il sera nécessaire d'installer les batteries en parallèle en 2 ou 3 lignes

Avec :

- $C_{\text{batteries}}$, la capacité des batteries (kWh)
- $E_{\text{batteries}}$, l'énergie des batteries (Wh)
- d , la décharge maximale des batteries

5.2. Modélisation de l'énergie biomasse disponible dans le village

La biomasse désigne l'ensemble de la matière organique biodégradable. Cette matière organique ayant une capacité de transformation en énergie. Par ailleurs, la matière organique est composée aussi bien des matières d'origine végétale et d'origine animale. Il existe trois procédés de valorisation de la biomasse à savoir la voie sèche, la voie humide et la production de biocarburants. Nous nous intéressons ici à la gazéification par voie sèche.

Il faut tenir compte de l'étendue du village et du nombre d'exploitations pour pouvoir organiser et faciliter la collecte des divers déchets agricoles. Nous présentons par la suite les composantes d'une unité de production de biogaz.

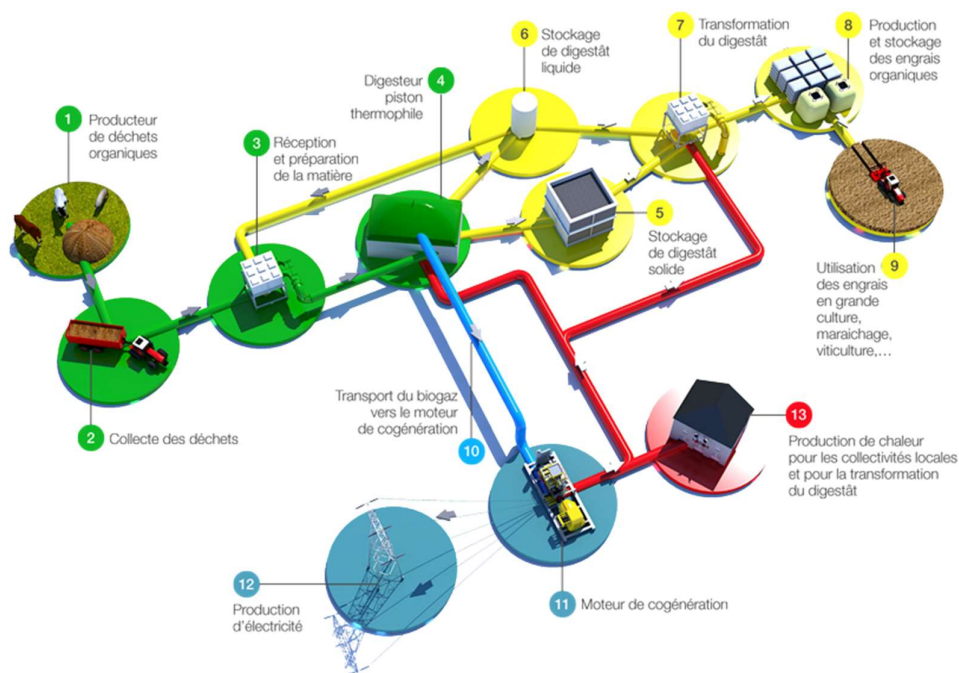


Figure 57. Différentes parties d'une unité de production de biogaz

5.2.1. Modélisation du pouvoir méthanogène de la biomasse animale dans le village

○ Cas des bovins, caprins et porcins

Soit $P_{BOVINS+CAPRINS+PORCI}$, la puissance électrique (en W) productible à partir des déchets de bovins, de caprins et de porcins. On a :

$$P_{BOVINS+CAPRINS+PORCI} = (Quan_{BOVINS} * Déj_{BOVINS} * t_{BO\ métha} + Quan_{CAPRINS} * Déj_{CAPRINS} * t_{CAPR\ métha} + Quan_{PORCINS} * Déj_{PORCINS} * t_{PORC\ métha}) * t_{Méth\ élec} \quad (47)$$

Avec :

- $Quan_{BOVINS}$, le nombre de têtes de bovins dans le village
- $Déj_{BOVINS}$, $Déj_{CAPRINS}$, $Déj_{PORCINS}$, respectivement les quantités de déjections de bovins, caprins et porcins (tonne de matière organique /tête/jours)
- $t_{BO\ métha}$, le taux de conversion de la déjection de bovins en gaz méthane (tonne de m³de biogaz/tonne de matière organique)
- $Quan_{CAPRINS}$, le nombre de têtes de caprins dans le village
- $t_{CAPR\ métha}$, le taux de conversion de la déjection de caprins en gaz méthane (tonne de m³de biogaz/tonne de matière organique) :
- $Quan_{PORCINS}$, le nombre de têtes de porcins dans le village
- $t_{PORC\ métha}$, le taux de conversion de la déjection de pores en gaz méthane (tonne de m³de biogaz/tonne de matière organique)
- $t_{Méth\ élec}$, le taux de conversion du biogaz en électricité (en W/m³ de biogaz)

○ Cas des volailles (poulets, canards et pintades)

Soit P_{VOL} , la puissance électrique (en W) productible à partir des déjections de volailles. On a :

$$P_{VOL} = (Quan_{PIN} * Déj_{PIN} * t_{PIN\ métha} * + Quan_{CANARD} * Déj_{CANARD} * t_{CANARD\ métha} + Quan_{POUL} * Déj_{POUL} * t_{POUL\ métha}) * (t_{Méth\ élec}) \quad (48)$$

Avec :

- $Quan_{PIN}$, $Quan_{POUL}$, $Quan_{CANARD}$, sont respectivement les nombres de pintades, poulets et canards du le village
- $Déj_{PIN}$, $Déj_{CANARD}$, $Déj_{POUL}$, respectivement les quantités de déjections de pintades, canards et poulets (tonne de matière organique /tête/jours)
- $t_{PIN\ métha}$, $t_{POUL\ métha}$, $t_{CANARD\ métha}$ sont respectivement les taux de conversion des déjections de pintades, de poulets et de canards en gaz méthane (tonne de m³de biogaz/tonne de matière organique)
- $t_{Méth\ élec}$, le taux de conversion du biogaz en électricité (en W/m³ de biogaz)

5.2.2. Modélisation du pouvoir méthanogène de la biomasse végétale (céréales)

Soit $P_{CEREALES}$, la puissance électrique (en W) productible à partir des résidus de riz, sorgho, maïs et mil. On a :

$$P_{CEREALES} = (\eta_{RIZ} * S_{RIZ} * t_{RIZ_MS\grave{e}che} * t_{RIZ_m\acute{e}tha} * t_{M\acute{e}tha\acute{e}lec} + Quan_{SORGHO} * D\acute{e}j_{SORGHO} * t_{SO_m\acute{e}tha} * t_{M\acute{e}tha\acute{e}lec} + Quan_{MA\acute{I}S} * D\acute{e}j_{MA\acute{I}S} * t_{MA\acute{I}S_m\acute{e}tha} * t_{M\acute{e}tha\acute{e}lec} + Quan_{MIL} * D\acute{e}j_{MIL} * t_{MIL_m\acute{e}tha} * t_{M\acute{e}tha\acute{e}lec}) \quad (49)$$

Avec :

- $\eta_{RIZ}, \eta_{SORGHO}, \eta_{MA\acute{I}S}, \eta_{MIL}$, respectivement les rendements à l’hectare du riz, du sorgho, du maïs et du mil (tonne/hectare)
- $S_{RIZ}, S_{SORGHO}, S_{MA\acute{I}S}, S_{MIL}$, respectivement les superficies à l’hectare du riz, du sorgho, du maïs et du mil (tonne/hectare)
- $t_{RIZ_MS\grave{e}che}, t_{SORGHO_MS\grave{e}che}, t_{MA\acute{I}S_MS\grave{e}che}, t_{MIL_MS\grave{e}che}$, respectivement les taux de conversion de riz, sorgho, maïs et mil en matière sèche en (tonne de matière sèche/tonne)
- $t_{RIZ_M\acute{e}tha}, t_{SORGHO_M\acute{e}tha}, t_{MA\acute{I}S_M\acute{e}tha}, t_{MIL_M\acute{e}tha}$, respectivement les taux de conversion de matière sèche de riz, de sorgho, de maïs et de mil en biogaz (m³ de biogaz/tonne de matière sèche)
- $t_{M\acute{e}tha_elec}$, le taux de conversion du biogaz en électricité (W/ m³ de biogaz)

5.3. Modélisation de l’énergie éolienne disponible dans le village

Il s’agit dans ce cas, de dimensionner les composants d’une mini-centrale éolienne. Nous modélisons les différentes composantes du système éolien (turbine, rotor). Sur la figure suivante, nous présentons, les composantes d’une éolienne.

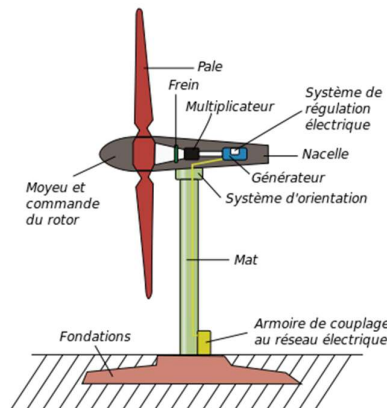


Figure 58. Présentation des composantes d'une éolienne

5.3.1. Modélisation du champ éolien

Soit P_{VENT} , étant la puissance éolienne (en W) récupérable

$$P_{VENT} = [(\pi * D^2 / 4) * (1/2) * (C_p * \rho_L) * V^3] \quad (50)$$

Avec :

- π , étant égal à 3,14
- C_p , étant le coefficient de performance de la turbine éolienne
- ρ_L , étant la masse volumique de l'air égale à 1,225 kg/m³.
- V^3 , étant la vitesse moyenne journalière du vent sur le site
- D , étant le diamètre de pôle

Nous pouvons alors évaluer D (diamètre de la pôle).

$$D = \sqrt{[(P_{VENT})]/[(\pi * C_p * \rho_L * V^3)]} \quad (51)$$

6. Conclusion

Dans ce chapitre, il s'agissait pour nous d'effectuer une identification des équipements et une modélisation des besoins en énergie électrique.

Au terme de notre enquête, nous avons pu identifier les besoins énergétiques d'un village (cas d'Elokato). Ces besoins proviennent majoritairement de l'éclairage.

La modélisation des besoins, nous a permis de fournir un modèle de consommation typique aux villages situés en zone rurale en fonction des activités recensées et des modes de vie.

Une simulation des besoins a été faite à partir de ce modèle (cas d'Elokato). Elle, nous a permis de déterminer les courbes et pics de charges ainsi que le profil de charge. Les courbes et profils de charges obtenus, montrent que pour les villages situés en zone rurale, deux pics de consommations sont observés. Le premier entre 00 h et 05 h du matin et le deuxième entre 17h et 23 h. Ces pics sont dus au fait que les populations habitant dans ces zones ont tendance le matin à se préparer pour vaquer à leurs occupations et dans la soirée à mener des activités de loisirs. Par ailleurs entre 05 h et 17 h, les niveaux de consommation sont bas, du fait que les villageois sont quasiment tous au champ.

En vue de comparer et de valider le modèle de calcul des consommations à partir des données de l'enquête, dans la suite de notre travail, nous mettons en place un plan de mesurage élaboré pour l'évaluation des consommations du village.

Chapitre 4 : *Mesurage des consommations en électricité dans différents villages ivoirien et comparaison des résultats de simulation*

I. Mesurage des consommations électriques sur différents villages ivoiriens

1. Introduction

Les profils de charge basés sur les enquêtes (entretiens) ne fournissent pas une estimation des consommations précise. Hartvigsson, Ehnberg, Ahlgren et Molander (2015) ont trouvé des écarts de profils de charge entre des mesures réelles et des mesures obtenues à partir d'entretiens. Ces erreurs avaient un impact significatif pour les opérateurs et développeurs de mini-réseaux [70]. Toutefois, l'accès à des estimations précises des profils de charge est important pour une mise en œuvre optimale et réussit des projets de mini-réseaux [71](Sarangi et al., 2014). En effet, si la capacité de production est surdimensionnée ou sous-dimensionnée, les mini-réseaux risquent de souffrir de mauvaises performances économiques ainsi qu'une dégradation des performances techniques.

Un modèle de charge résidentielle pour l'Afrique du Sud rurale a été développé par Cross & Gaunt, en 2003 [72]. Ils ont identifié que le plus grand problème dans la création de modèle précis était le manque de données. Dans un rapport de la Banque Mondiale, une conclusion similaire a été tirée. Il a été conclu que l'accès à des données de profil de charge de haute qualité est nécessaire si des investissements technologiques appropriés doivent être réalisés dans les mini-réseaux [73] (Terrado, Cabraal et Mukherjee, 2008).

Également, Cross & Gaunt, (2003) ; Nfah, Ngundam, Vandenberg, & Schmid (2008) [72] [74] ont montré que l'accès à des données de hautes résolutions et fiables sur la consommation d'électricité dans les pays en développement, est rare. En raison de la rareté des données, plusieurs études se sont appuyées sur des sources de données ou des méthodes alternatives. Sen et Bhattacharyya (2014) [75] ont constaté que la plupart des études ne tenaient pas compte des profils de charge mesurés lors de la réalisation d'évaluations technologiques de mini-réseaux basés sur des sources d'énergie renouvelables. Au lieu de cela, ils ont utilisé des profils de charge horaires synthétisés basés sur les données collectées. Boait, Advani et Gammon (2015) [76] ont analysé les profils de demande quotidienne pour l'électrification hors réseau dans les pays en développement, en utilisant une méthode similaire. Le résultat de l'utilisation des données sur la puissance nominale des appareils et les données d'utilisation est que les profils de demande ont une résolution horaire. Cela signifie qu'ils peuvent omettre l'impact des changements rapides, tels que les pics de demande résultant de la mise en marche et de l'arrêt des appareils.

Par conséquent, il est de toute nécessité dans le cadre de notre étude de procéder à une collecte de données précises et de haute qualité, afin de proposer un modèle robuste de consommation d'énergie électrique, qui permet d'accélérer l'électrification en mode décentralisée avec les EnR. À cet effet, un plan de mesurage de la consommation en énergie électrique a été mis en place sur plusieurs villages ivoiriens.

Dans ce chapitre, il s'agira de recueillir des données fiables de la consommation d'électricité des villages à l'aide des logiciels, puis d'étudier la viabilité technico-économique, sur la base de différents scénarios de micro-réseaux électriques avec des sources de productions d'énergies

renouvelables, autonomes et alimentées par le réseau interconnecté. Le logiciel Energy Sentinel est utilisé pour fournir les profils horaires après avoir recueilli des données mesurées.

2. Présentation des logiciels

2.1. Appareil installé pour la collecte des données : Logiciel ENERGY SENTINEL (Energy Team, Italie)

Energy sentinel est le logiciel propriétaire de l'équipementier de solution de système de comptage intelligent Italien Energy Team. Le système de comptage est un microcontrôleur appelé X-METER qui permet de faire l'acquisition des données via des capteurs et des sondes. Ces données sont stockées sur un serveur de données distant connecté à internet (cloud) et consultable par un accès sécurisé.

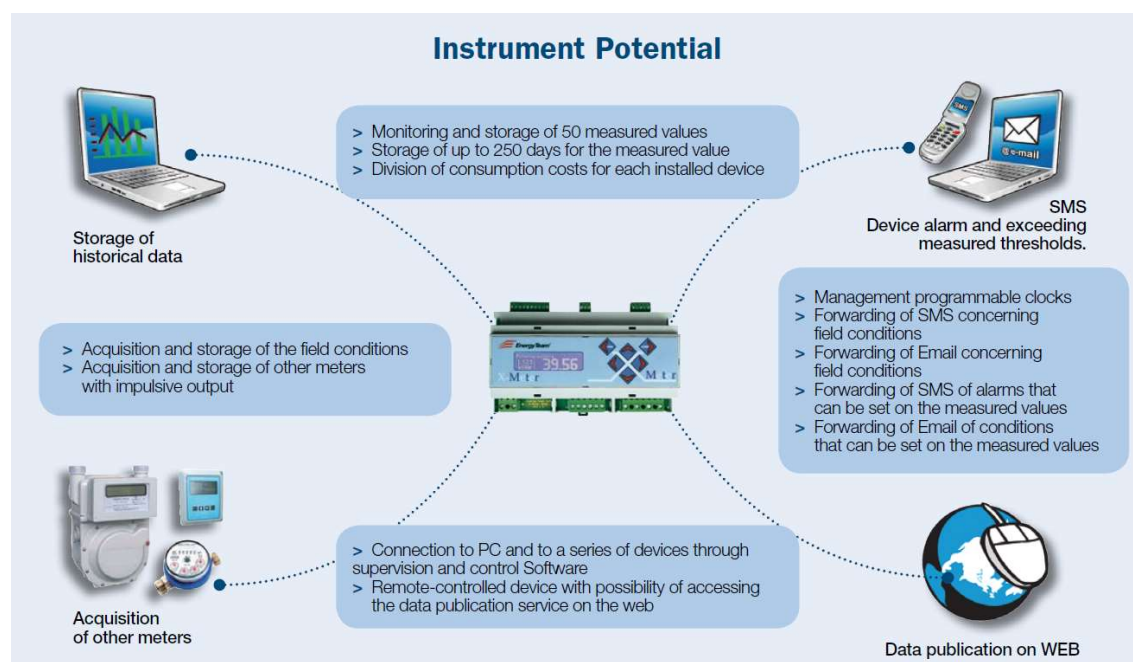


Figure 59. Les potentiels du X-METER

2.2. Logiciel statistique de traitement et analyse de données XLSTAT

XLSTAT est un logiciel de gestion statistique qui s'intègre et s'appuie sur Microsoft Excel pour la saisie des données et la publication des résultats. Les calculs sont entièrement réalisés dans des programmes et algorithmes autonomes. L'usage d'Excel comme interface rend l'application très conviviale, intuitive et robuste. La qualité, la précision et la pertinence des calculs sont identiques à celles des logiciels scientifiques de renom. XLSTAT est compatible avec toutes les versions d'Excel depuis la version 97 sous les environnements Windows et Mac. Les versions 2018 intègrent beaucoup de fonctionnalités utiles tels que le langage R et les machines Learning, qui lui confèrent une grande robustesse de calcul. Les nombreuses fonctionnalités offertes par XLSTAT font d'Excel un excellent outil d'analyse statistique et de modélisation, permettant de couvrir l'ensemble des besoins de traitement de données. Dans cette étude nous utiliserons essentiellement l'interface de statistique descriptive pour la significativité des données.

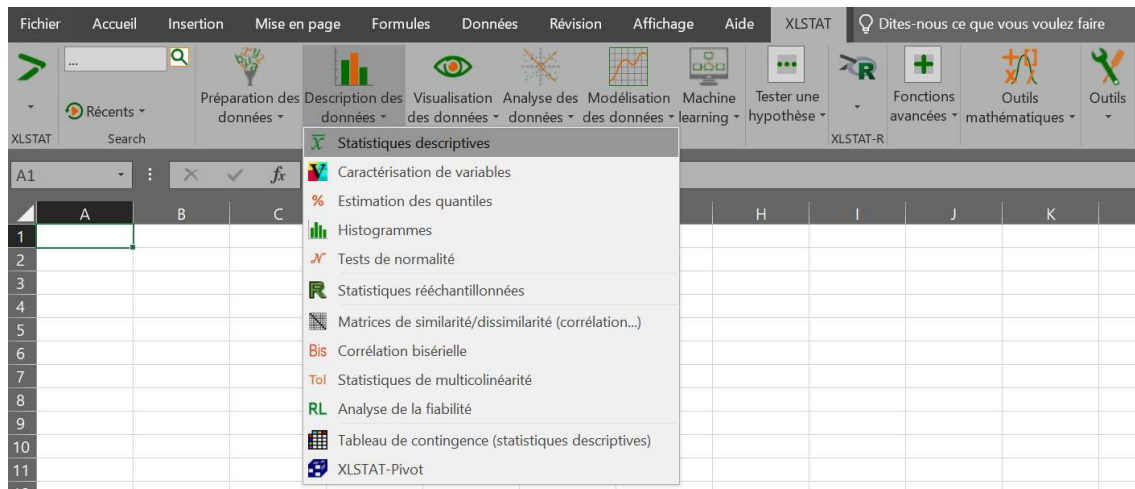


Figure 60. Logiciel XLSTAT

2.3. Logiciel Cartographique de traitement et analyse de données QGIS

Le système d'information géographique est un système numérique qui intègre de façon numérique l'information sur l'emplacement d'une entité et l'information sur la nature de cette entité.

Le SIG a pour but de créer, de partager et d'utiliser des produits d'information cartographique permettant d'ajouter de la valeur à un travail, à une science, à une étude et à une organisation. Il facilite la création et la gestion des informations géographiques nécessaires à la prise de décision.

Pour cette thèse nous avons utilisé le logiciel (SIG, ArcGIS 10.6)qui est un logiciel complet en SIG facilitant la réalisation des objectifs de notre travail.

L'usage d'Argis a consisté à plusieurs manipulations cartographiques que sont :

- *L'outil de géo-traitement (Découper, Fusionner, combiner et créer une zone tampon ;*
- *L'outil calculateur de champ et de géométrie ;*
- *Du récapitulatif qui permet d'effectuer des calculs dans les tables Shapefile ;*
- *La jointure des tables des fichiers shapefile et Excel ;*
- *La représentation des données.*

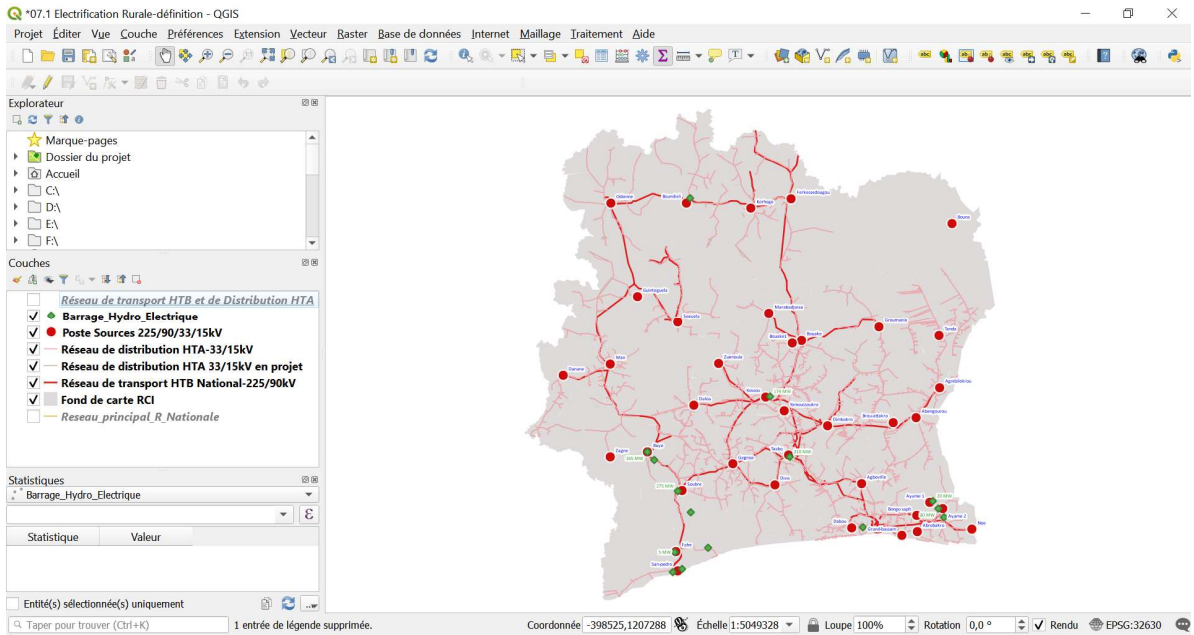


Figure 61. Logiciel de cartographie QGIS

3. Installation du système de mesurages dans un village Ivoirien

Dans le cadre de cette étude, pour la collecte des données en temps réel de la consommation électrique des ménages, un dispositif de comptage a été mis en place et connecté au transformateur de puissance qui alimente en électricité le village. Ces données sont stockées sur un serveur de données distant connecté à internet (cloud) et consultable par un accès sécurisé.



Figure 62 : Système de comptage - Transformateur de puissance et microcontrôleur X-METER

4. Collectes des données par mesurages dans quatre villages

4.1. Lieux des collectes de données

Dans la première phase de notre étude, il s'agira pour nous de procéder à la collecte des données. Pour cela nous choisissons des villages raccordés au réseau électrique national afin d'avoir des données comparatives. Les différents villages choisis sont : Elokato (Bingerville) ; Attiékoï (Alépé) ; Ouffoué-diékro (Yamoussoukro) ; Dokaha (Korhogo).

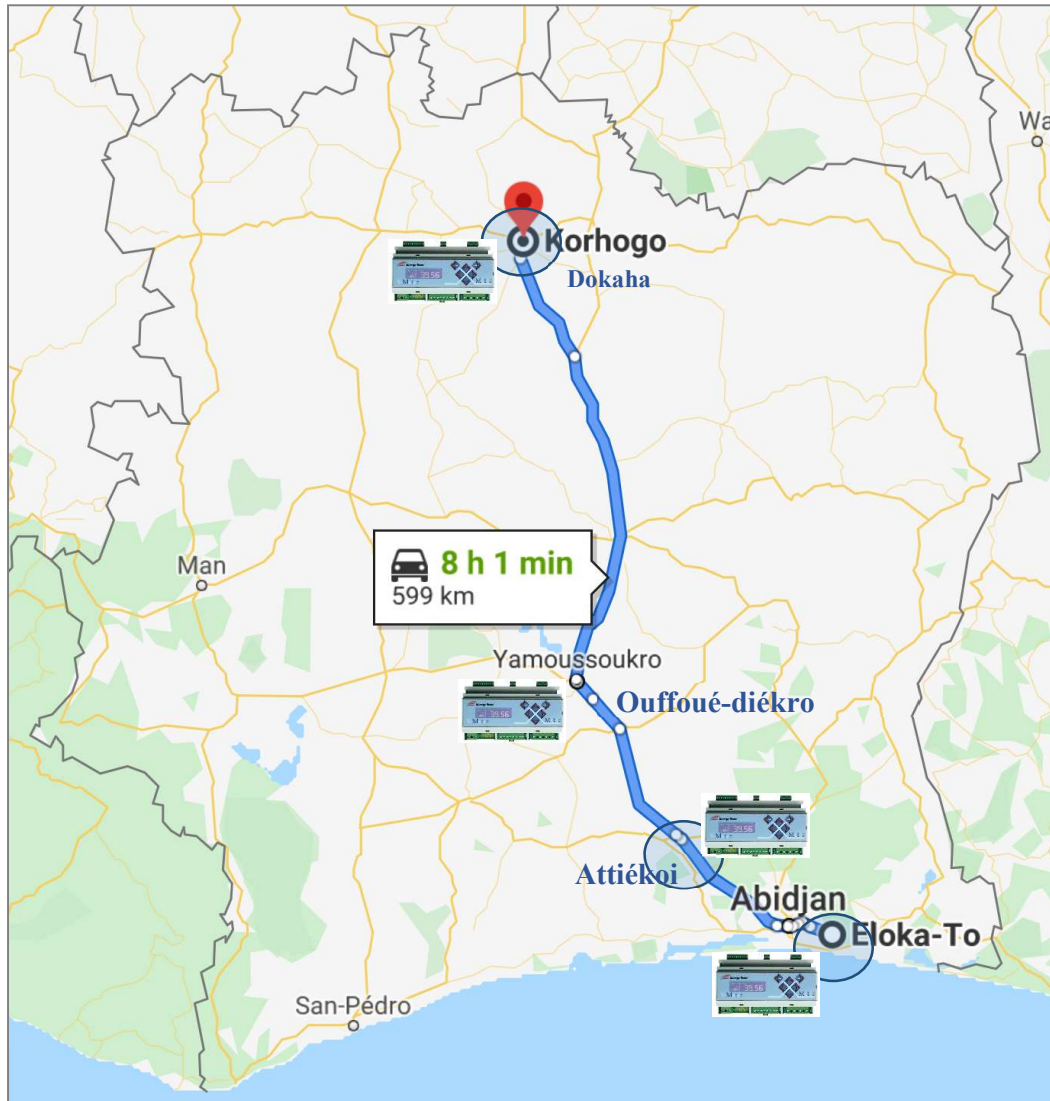


Figure 63 : : Lieux de collecte des données des quatre villages (plan de mesurage)

4.2. Le besoin en énergie électrique à couvrir

L'identification et l'analyse de la demande demeurent les étapes les plus importantes lors de la conception et le dimensionnement d'un micro-réseau, elle va déterminer l'envergure du système de production à construire.

Les différents villages sont raccordés au réseau électrique national. Pour avoir des valeurs réelles des consommations, un système de mesurages est installé au niveau du transformateur de puissance, de type H61-15kV/400V/100kVA de puissance apparente, qui alimente le village. Un dispositif de comptage, de type X-METER de Energy team², installé depuis 2018 sur le site, a permis de faire les relevés à distance de 50 grandeurs électriques (Courant, tension, puissance, énergie, ...) quantitativement et qualitativement. Les consommations des villages ont été enregistrées sur un ordinateur par pas temporel (1min, 10min, 15min, 30min, 60min) durant plus d'une année. Ces données ont été stockées dans la base de logiciel Energy Sentinel.

5. Traitements et Analyses des données

Le traitement des données se fait à partir d'Energy Sentinel. Il génère les profils de charge à pas horaire pour chaque village ainsi que les pics de charge de chaque village.

Le XMETER est un Analyseur de réseaux électriques et enregistreurs de données. Il permet l'analyse de la puissance active, réactive, apparente, le facteur de puissance, le courant, la tension soit au total 50 grandeurs électriques. Les mesures s'effectuent grâce à des pinces de mesure du courant et de tension. Il a rapport de transmission de 100/5. L'appareil a plusieurs interfaces ou protocoles de communication (ETPRO, modbus, IP, GSM) et grâce au logiciel de gestion vous pourrez effectuer le transfert de données enregistrées vers un PC ou un smartphone.

Capture d'écran du logiciel ENERGY SENTINEL

The screenshot shows the Energy Sentinel software interface. On the left, there is a sidebar with a tree view of measurement categories. The main area displays a table of data for 'ELOKATO' measurements. The table has columns for Date, TxIQ [%], ELOKATO - Cosphi ELOKATO, ELOKATO - P reactive ELOKATO [VAh], ELOKATO - P active ELOKATO [Wh], ELOKATO - Irradiation [Wh], ELOKATO - Température [°C], ELOKATO - Three-phases apparent ELOKATO [VAh], and EP ELOKATO - P active EP ELOKATO [Wh]. The table shows summary statistics (minimum, maximum, average) and a detailed hourly log for the period from 01/09/2018 00:00 to 12:00.

Date	TxIQ [%]	ELOKATO - Cosphi ELOKATO	ELOKATO - P reactive ELOKATO [VAh]	ELOKATO - P active ELOKATO [Wh]	ELOKATO - Irradiation [Wh]	ELOKATO - Température [°C]	ELOKATO - Three-phases apparent ELOKATO [VAh]	EP ELOKATO - P active EP ELOKATO [Wh]
Valeur minimale	-102.3	-1.000	-434.5	7.492 k	0.000	20.97	8.180 k	-0.011
Vale maximum	116.7	1.000	9.236 k	89.13 k	865.7	35.80	99.70 k	14.26 k
Valeur moyenne	30.19	0.971	4.041 k	29.55 k	142.9	26.46	30.21 k	6.722 k
Total / Integral	-	-	13.39 M [VAh]	97.82 M [Wh]	474.0 k [Wh]	-	100.0 M [VAh]	22.24 M [Wh]
01/09/2018 00:00	43.99	0.988	6.873 k	43.15 k	0.000	23.69	44.00 k	6.636 k
01/09/2018 01:00	41.92	0.988	6.425 k	41.15 k	0.000	23.99	41.92 k	6.979 k
01/09/2018 02:00	41.23	0.987	6.541 k	40.44 k	0.000	23.93	41.23 k	7.099 k
01/09/2018 03:00	39.99	0.987	6.323 k	39.24 k	0.000	23.97	39.99 k	7.068 k
01/09/2018 04:00	39.99	0.987	6.372 k	39.12 k	0.000	23.99	39.99 k	7.077 k
01/09/2018 05:00	39.23	0.986	6.449 k	38.45 k	0.000	23.76	39.23 k	6.290 k
01/09/2018 06:00	28.24	0.972	6.591 k	27.37 k	9.796	23.76	28.24 k	0.000
01/09/2018 07:00	22.64	0.957	6.485 k	21.51 k	50.13	24.63	22.64 k	0.000
01/09/2018 08:00	19.00	0.943	6.442 k	18.29 k	153.3	25.96	19.00 k	0.000
01/09/2018 09:00	17.21	0.927	6.386 k	15.76 k	230.7	26.71	17.20 k	0.000
01/09/2018 10:00	16.34	0.913	6.616 k	14.77 k	236.2	26.58	16.34 k	0.000
01/09/2018 11:00	15.92	0.915	6.343 k	14.37 k	272.7	27.45	15.91 k	0.000
01/09/2018 12:00	15.57	0.911	6.319 k	13.98 k	263.0	27.62	15.57 k	0.001

² Entreprise Italienne de gestion de l'énergie

5.1. Profil de charges à pas horaire (journalier, mensuel, annuel) village d'ELOKATO

La consommation moyenne journalière enregistrée sur une année est de **662,08 kWh/jour** pour une charge alternative (AC). Les données recueillies et stockées pendant une année dans le logiciel Energy Sentinel, nous ont, permis d'établir le profil de charge à pas horaire pour le village d'Elokato.

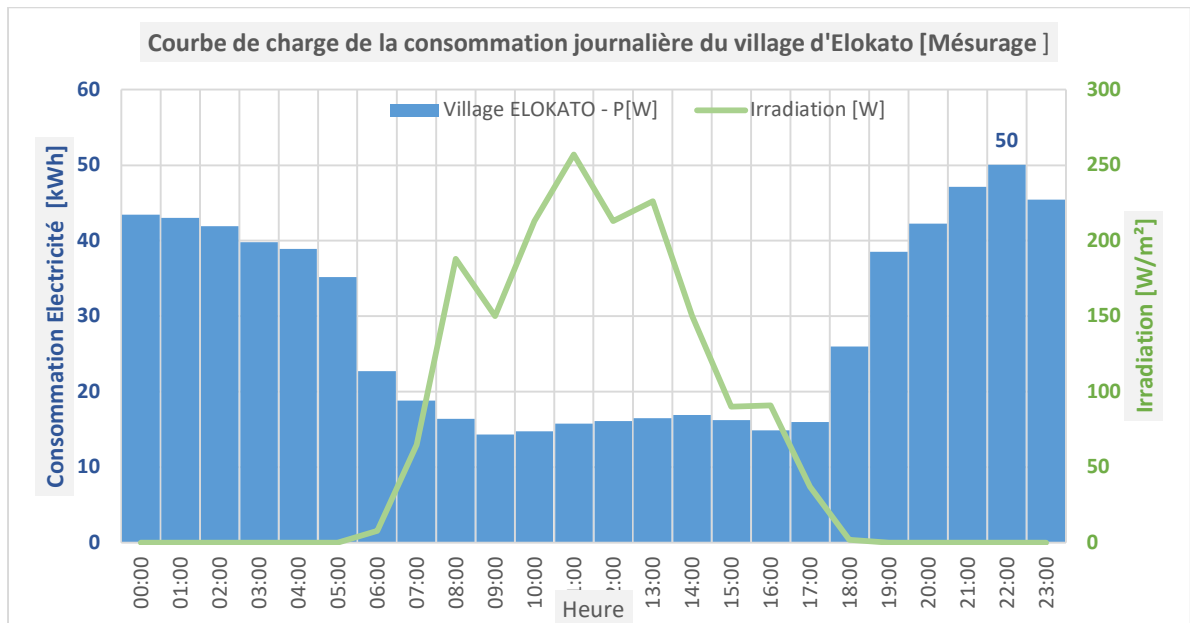


Figure 64. Consommation d'électricité - Profil journalier à pas horaire (Source : Energy sentinel)

Nous observons que les charges journalières suivent une distribution concentrée majoritairement plus la nuit que le jour : une première tranche de 18 h à 23 h et une deuxième tranche de 00 h à 06 h du matin. La charge de pointe est observée entre 20 h et 22 h.

Comme le montre la courbe, la pointe annuelle de puissance est observée dans le mois de décembre.

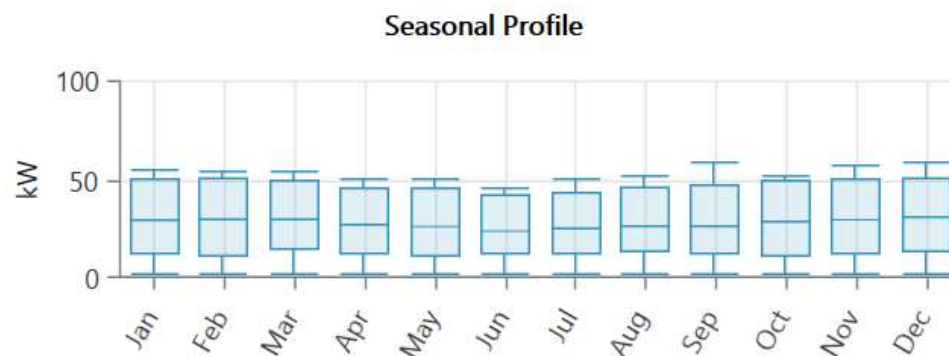


Figure 65.
Consommation d'électricité - Profil mensuel

Les besoins en électricité sont les plus élevés au cours du premier et dernier trimestre de l'année, qui correspondent respectivement à la période de forte chaleur et à la période des fêtes de fin d'année (génération, culturelle, ...)

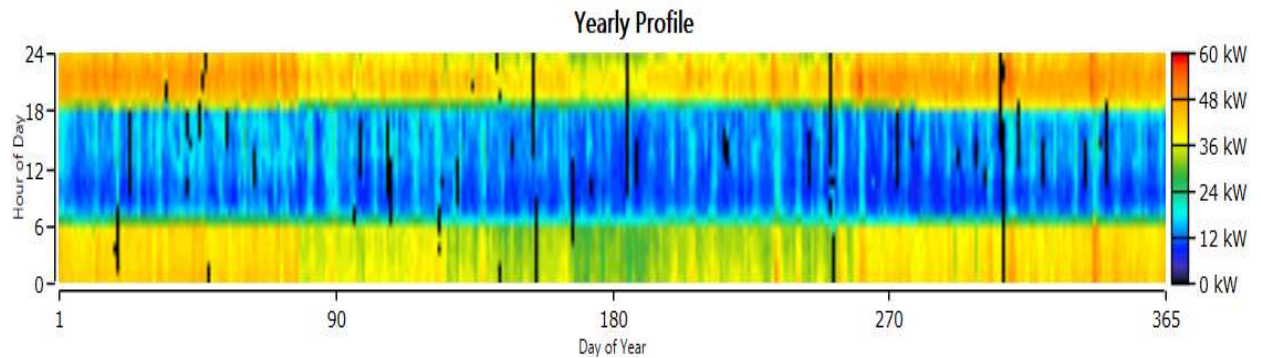


Figure 66. Consommation d'électricité - Profil Annuel

5.1.1. Impacts des consommations de l'éclairage public sur le profil de charges à pas horaire du **village d'ELOKATO (Bingerville)**

Nous avons procédé à une analyse de la courbe de charge du village d'Elokato afin de voir l'impact de l'éclairage public sur la consommation journalière du village. Elle est présentée à la figure ci-dessous.

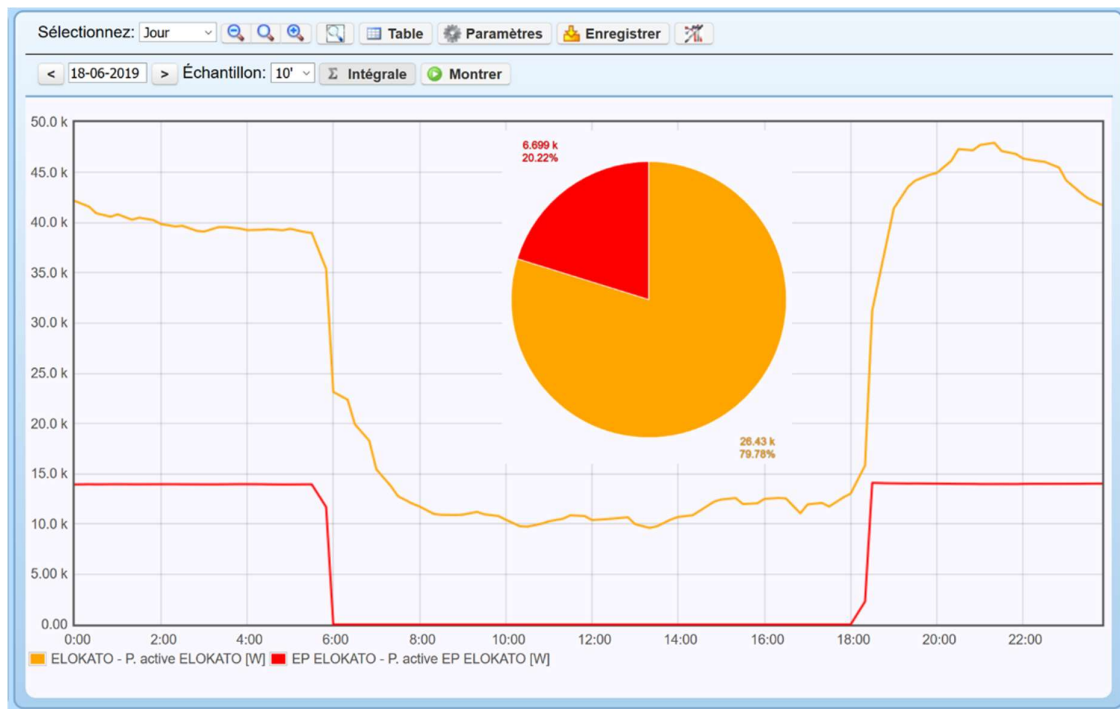


Figure 67 : Profil de charge journalier des consommations du village d'Elokato et de l'éclairage public (Sources : TOURE, 2020, Energy Sentinel [77])

L'analyse de la figure 67 nous montre, qu'entre :

- *00-06h, la puissance appelée est de 14kW ;*
- *06-18h, la puissance appelée est de nulle 0kW ;*
- *18h-00h, la puissance appelée est de 14kW.*

Nous observons également, que la puissance appelée par l'éclairage public représente que **20,22%** de la consommation journalière totale du village.

Par ailleurs, le profil de charge obtenue en faisant la différence entre les deux courbes reste invariant avec peu d'impact sur l'allure (voir figure 68).

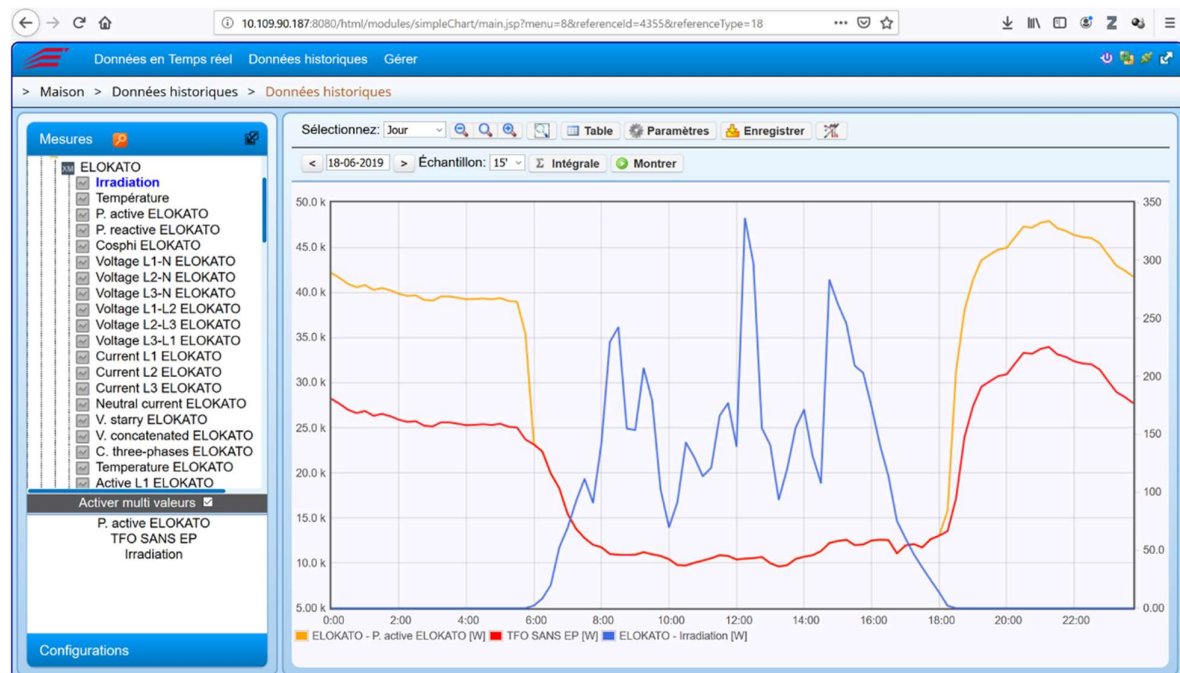


Figure 68 : Profil de charge journalier des consommations du village d'ELOKATO avec et sans éclairage public (Sources : TOURE, 2020, Energy Sentinel [77])

De même, pour avoir la consommation journalière d'un ménage, nous avons installé un comptage X-METER chez le chef du village afin d'obtenir un profil horaire pour un ménage. Le profil obtenu est similaire et conforme au profil global du village. Les pics de charge sont observés entre 00-05h puis entre 18 h et 23 h. La figure 69, nous présente une comparaison des courbes de charges de consommation du village (Village Elokato/Chef du village/ Eclairage public).

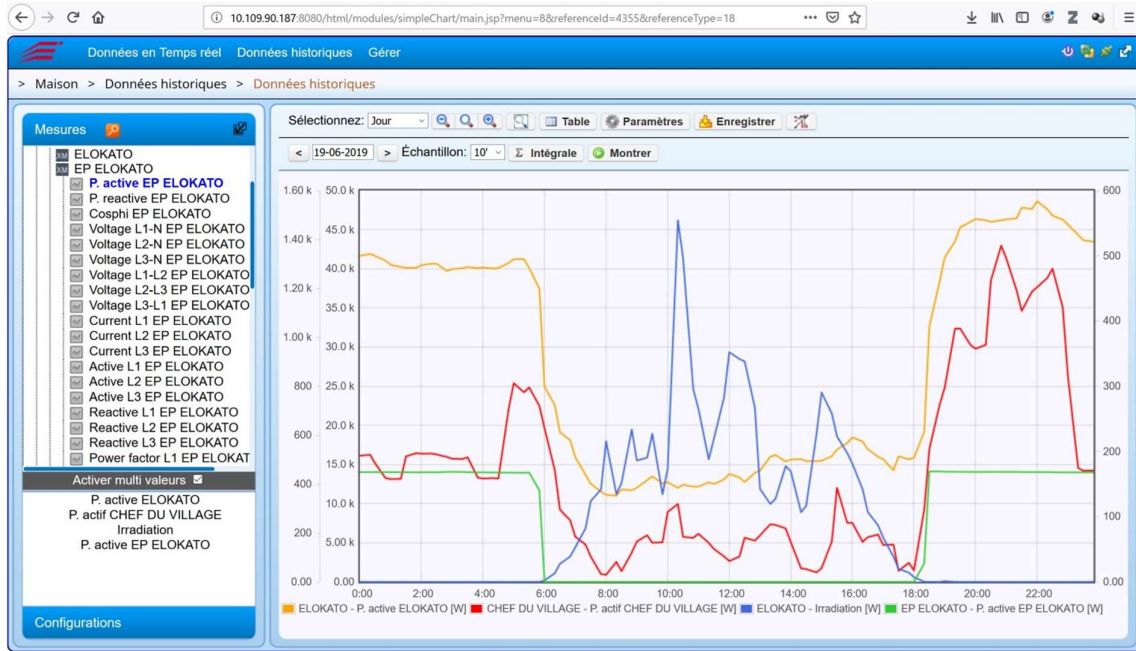


Figure 69 : Courbes de charge des consommations journalières du village d'Elokato, de l'éclairage public et de la résidence du Chef de village (Sources : TOURE, 2020, Energy Sentinel [77])

5.2. Les profils de charge à pas horaire obtenus à partir d'Energy Sentinel **village d'ATTIEKOI (Alépé)**

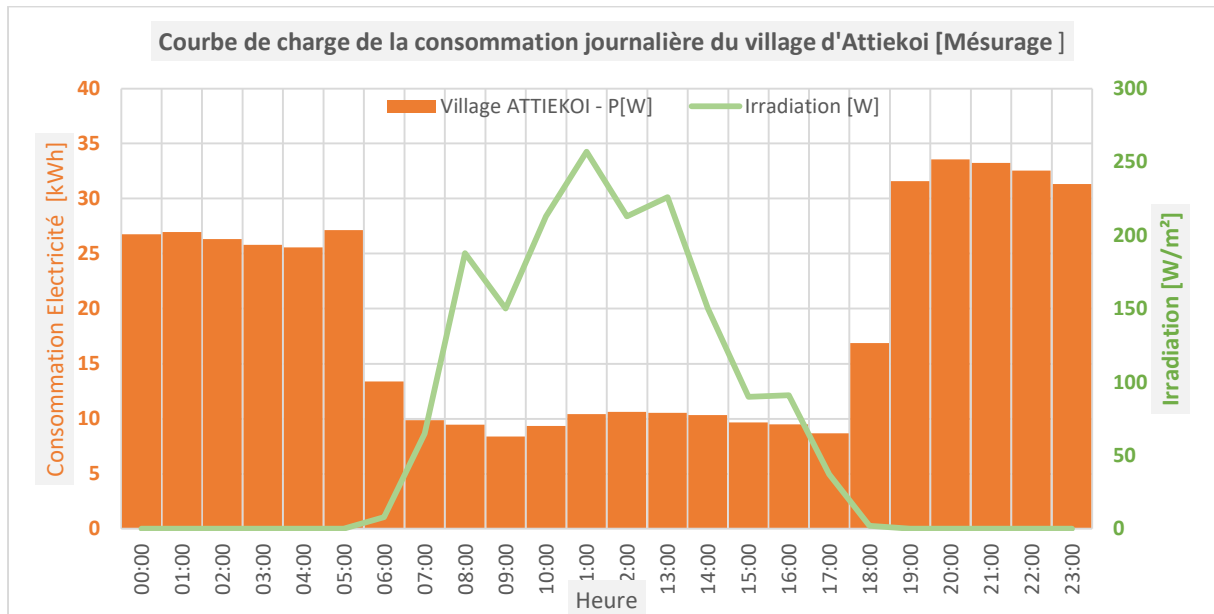


Figure 70 : Profil de charge journalier des consommations du village d'ATTIEKOI (Sources : TOURE, 2020, Energy Sentinel [77])

La figure 70, nous montre que pour les tranches horaires de :

- **00 à 05h** : la consommation moyenne journalière est de **25 kWh** ;
- **05 à 17h** : la consommation moyenne journalière est de **10 kWh** ;
- **17 à 00h** : la consommation moyenne journalière est de **30 kWh**.

Deux pics de charges de consommation sont observés. Le premier pic est observé entre 00 h et 05 h et le deuxième entre 19 h et 23 h.

Nous observons que le profil de charge du village d'ATTIEKOI est similaire à celui d'Elokato avec une puissance active différente.

5.3. Les profils de charge à pas horaire obtenus à partir d'Energy Sentinel **village d'OUFFOUE DIEKRO (Yamoussoukro)**

La figure 71, présente le profil de charge du village d'Ouffoué-diékro. Le profil observé est similaire aux deux villages précédents. Il présente deux pics de consommation. La première entre 00 h et 06 h avec une puissance active de 41 kW. Puis, la deuxième entre 18 h et 23 h avec une puissance de 46 kW.

Ensuite, nous avons déduit la courbe de charge de consommation du village d'Ouffoué-diékro. Elle est présentée à la figure 71. Nous observons que les données sont distribuées en trois tranches horaires :

- **00 à 05h** : la consommation moyenne journalière est de **27 kWh** ;
- **05 à 17h** : la consommation moyenne journalière est de **09 kWh** ;
- **17 à 00h** : la consommation moyenne journalière est de **30 kWh**.

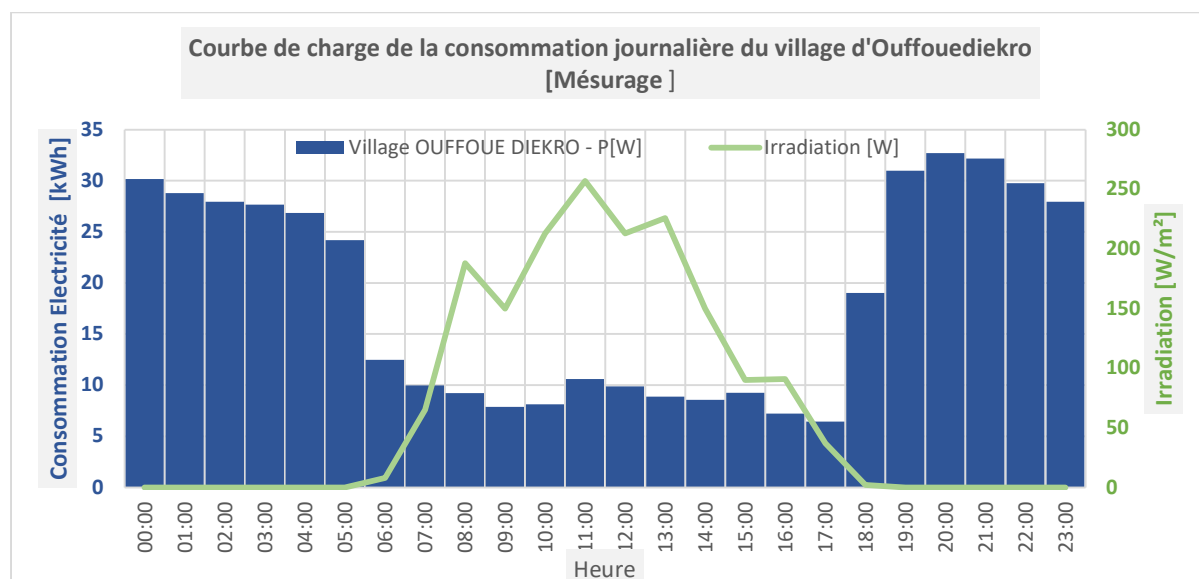


Figure 71 : Profil de charge de la consommation journalière du village d'Ouffoué-diékro (Sources : TOURE, 2020, Energy Sentinel [77])

5.4. Les profils de charge à pas horaire obtenus à partir d'Energy Sentinel village de DOKAHA (Korhogo)

La figure ci-dessous, présente le profil de charge de la consommation journalière du village d'Elokato ainsi que l'irradiation solaire du village.

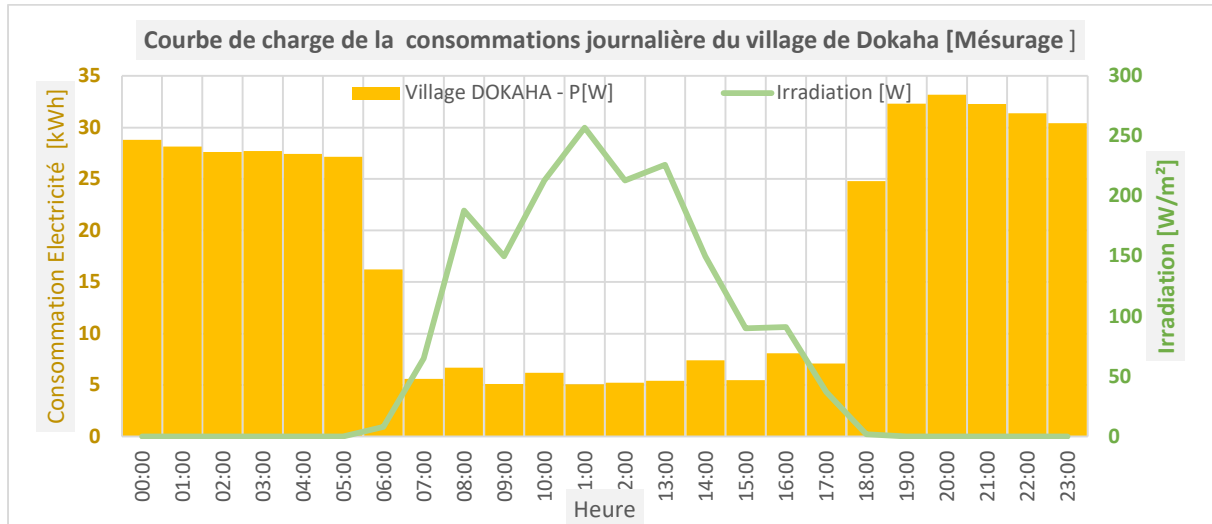


Figure 72 : Profil de charge de la consommation journalière du village de Dokaha (Sources : TOURE, 2020, Energy Sentinel [77])

La figure 72, nous montre que pour les tranches horaires de :

- **00 à 05h** : la consommation moyenne journalière est de **27 kWh** ;
- **05 à 17h** : la consommation moyenne journalière est de **06 kWh** ;
- **17 à 00h** : la consommation moyenne journalière est de **33 kWh**.

La figure 72, nous montre aussi, qu'il y a deux pics de charge. Les pics de charge sont observés entre 00 h et 05h puis entre 18 h et 23 h.

5.5. Récapitulatif des Profils de charge de l'ensemble des ménages des villages d'Elokato, Attiékoï, Ouffoué-diékro, Dokaha obtenus à partir des données de mesurage

La figure 73, montre que les profils de charge de consommation obtenus dans les villages d'Elokato, Attiékoï, Ouffoué-diékro, Dohaka sont invariants avec des amplitudes de consommations qui varient selon les différentes localisations géographiques des villages. Aussi, les courbes présentent deux pics de charge observés entre 00 h et 06 h puis entre 18 h et 23 h. La courbe en vert représente l'irradiation solaire du village d'Elokato et montre un ensoleillement entre 06 h et 18 h pouvant être exploité pour la production d'électricité. En revanche entre 18 h et 06 h du matin, nous n'avons pas d'irradiation solaire, ce qui inclut que,

pour le système solaire qui est envisagé, il conviendra d’y intégrer un dispositif de stockage de l’énergie (chimique ou mécanique).

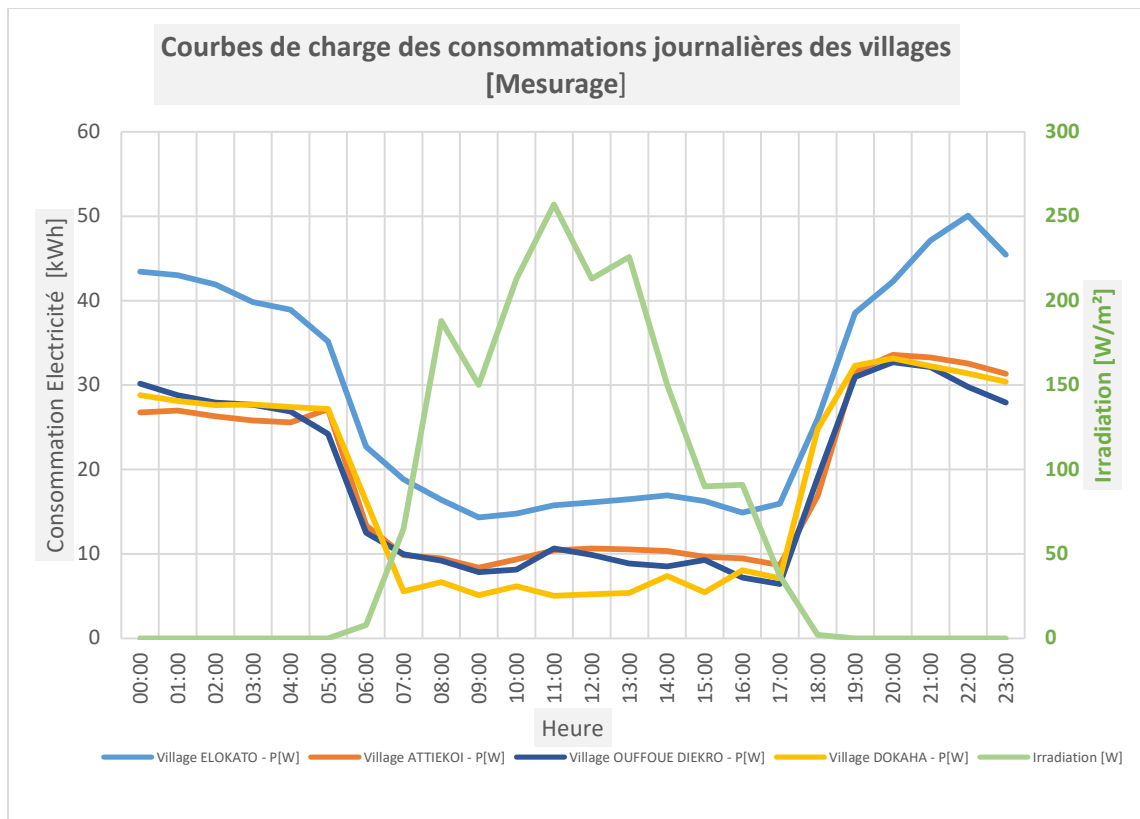


Figure 73. Courbes de charge du village d’Elokato : modélisation de la pointe horaire sur une subdivision des tranches horaires de la journée.

De même, la figure 73, nous montre que les profils de charge obtenus dans les quatre villages sont invariants. Ils diffèrent par leurs amplitudes. Ces différences sont dues aux faits que chaque village a des habitudes, mœurs et coutumes spécifiques.

6. Comparaison des profils de charge obtenus à partir des données de l’enquête et des données mesurées

Après avoir appliqué les deux méthodologies (enquête et mesurage), nous avons obtenu deux profils de charge à pas horaires pour un village (cas d’Elokato) :

- Profil de charge de l’ensemble des ménages du village d’Elokato obtenu à partir des résultats d’enquête sur le terrain

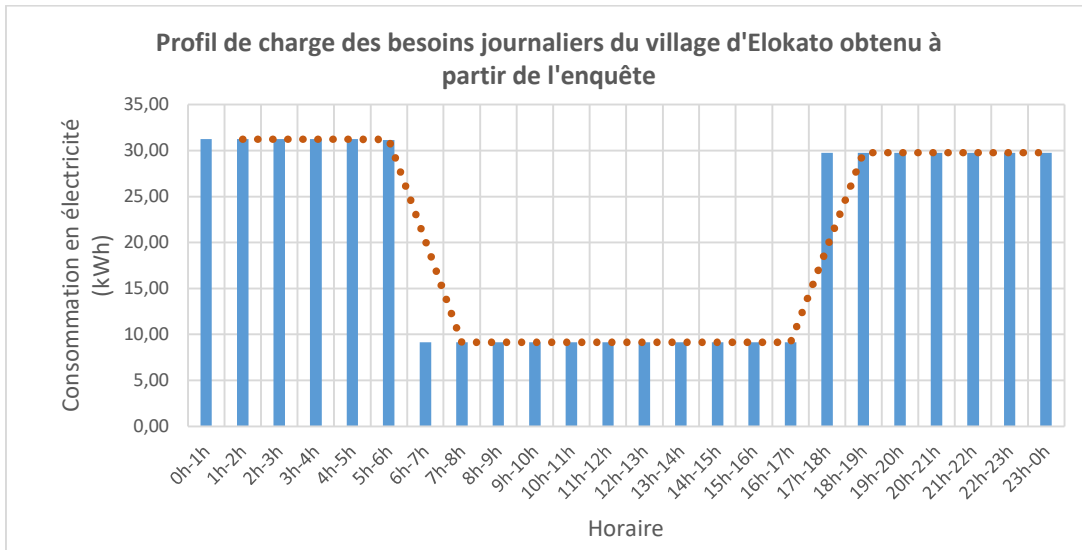


Figure 74 : Profil de charge de la consommation journalière moyenne du village d'Elokato obtenue à partir des enquêtes

- Profil de charge du village d'Elokato obtenu à partir du mesurage de l'X-METER



Figure 75 : Profil de charge journalier des consommations du village d'ELOKATO (Sources : TOURE, 2020, Energy Sentinel [77])

Nous pouvons noter une première différence au niveau de la consommation d'énergie journalière du village. **La Consommation journalière de l'ensemble des ménages, obtenue à partir des enquêtes est de 496 kWh/jour tandis que celle obtenue par mesurage est de 662 kWh/jour, soit un écart d'erreur de 25 %.**

Nous pouvons également noter que les profils ont une allure similaire. L'écart entre les deux profils est dû généralement aux données recueillies lors de l'enquête. Ces données ne sont pas précises car elles ne sont pas fidèlement retransmises par les consommateurs, leur exactitude est remise en cause. De plus, les branchements anarchiques sur le réseau interconnecté dans le village peuvent être une cause de cet écart car ces valeurs ne seront pas recensées.

La deuxième méthode, obtenue à partir des données mesurées, est la plus précise et pourrait être utilisée pour l'évaluation des consommations d'un village non électrifié à partir d'un plan de mesurage réalisé sur un village électrifié à proximité (proxy).

La première méthode (basée sur une enquête et une modélisation) est moins précise mais pourrait être utilisée pour une première estimation des consommations avec un taux d'erreur entre 20 % et 30 %. Ces estimations pourraient être ajustées avec les proxys (villages électrifiés à proximité). Par ailleurs, cette méthode pourrait être utilisée pour des études de sensibilité des usages : par exemple, l'effet d'une modification de l'éclairage collectif ou individuel, ou d'une amélioration des performances énergétiques des équipements, peut être aisément évalué.

Comparaison avec d'autres profils obtenus

Une étude similaire a été réalisée par Jane Namaganda-Kiyimba, en 2021 afin d'améliorer le processus d'estimation de la charge dans la conception des systèmes d'électrification. Cette étude a proposé une approche de modélisation de charge améliorée pour déterminer les profils de charge d'un village connue sous le nom de Tororo situé en Ouganda.

Premièrement, cette modélisation a été réalisée sur la base d'une enquête menée par le Bureau ougandais des statistiques et le ministère de l'Énergie et des Énergies minérales en 2021. Ces données recueillies ont été regroupées par catégorie de consommation en fonction de leur usage. Avec Matlab ils ont pu modéliser le profil de charge suivant :

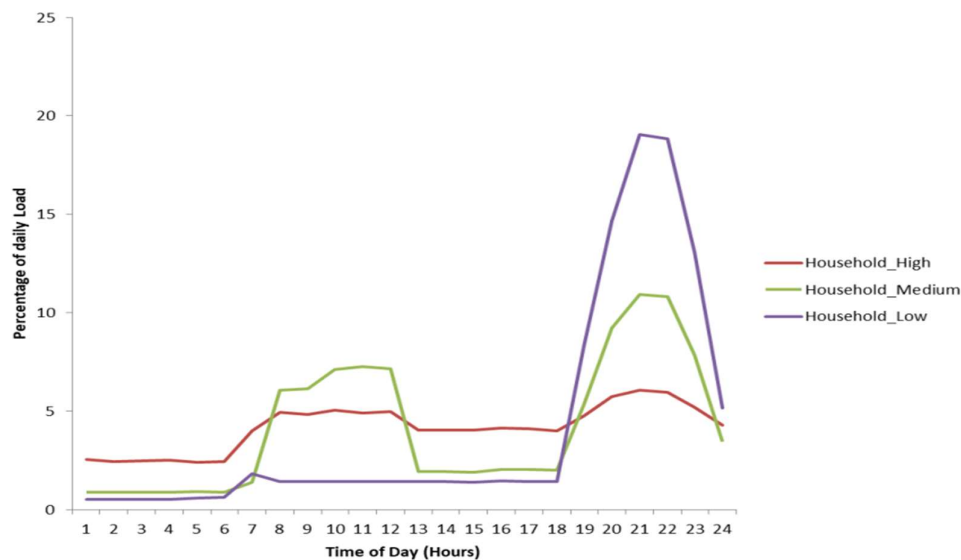


Figure 76 : profil de charge par catégorie de ménage du village Tororo en Ouganda [11]

Deuxièmement, une modélisation a été réalisée sur la base de mesure prise avec des appareils installés au niveau de trois transformateurs à Tororo. Les clients ont été regroupés par catégorie selon leurs appareils. Le profil de charge a été généré à partir de MATLAB et est illustré dans la figure ci-dessous :

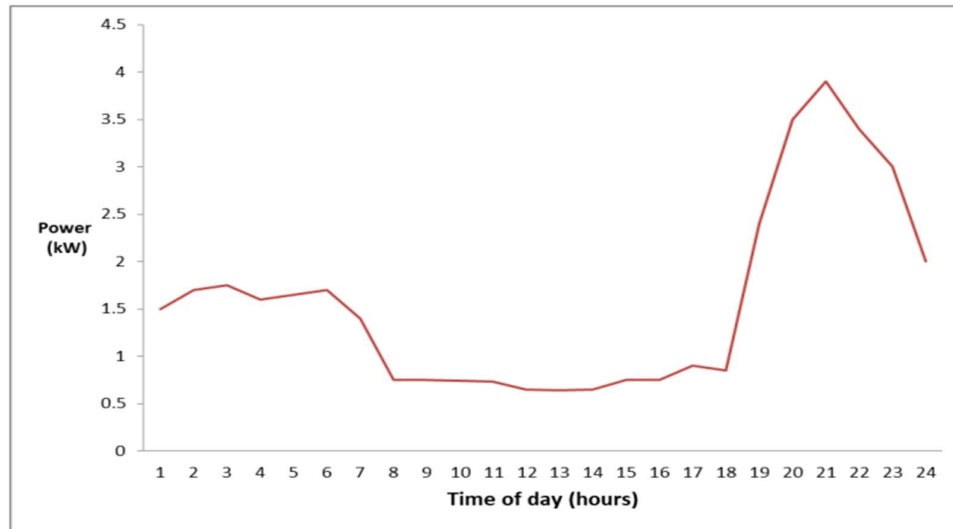


Figure 77 : Estimation du profil de charge du village de Tororo en Ouganda obtenue par mesurage [11]

Nous notons que les profils sont similaires à l'exception du pic du matin. Bien qu'il puisse exister de légères différences dans les caractéristiques spécifiques des ménages et des appareils domestiques utilisés.

Ces résultats montrent que les données d'un proxy village peuvent être utilisées pour estimer avec une erreur minimale la charge dans un village non électrifié. Dans le but d'identifier la demande à l'échelle nationale, nous pensons qu'il est judicieux d'élaborer une cartographie des consommations en énergie électrique des localités proxy de référence.

II.Elaboration de la cartographie de base des consommations moyenne par jour par ménage pour les localités à électrifier

1. Objectifs et méthodes d'élaboration

a. Objectifs

Nous avons élaboré cette cartographie dans le but de :

- Avoir une vision spatiale des données et /ou résultats
- Permettre une compréhension récapitulative des données ou résultats
- Illustrer les hypothèses de recherche pour faciliter la prise de décision
- Obtenir des cartes de références, pour les grandeurs électriques et leurs ordres
- Faciliter le dimensionnement de certains systèmes énergétiques
- Evaluer l'optimisation des systèmes énergétiques

b. Processus d'élaboration des cartes et système de coordonnées

Plusieurs actions conduisent à la réalisation des cartes dans cette étude avec l'aide du logiciel QGIS. Ce sont :

- Repérer ou délimiter l'espace géographique (objet d'étude ou zone d'étude)
N.B : L'espace géographique correspond aux polygones représentant l'entité géographique Agence Compagnie Ivoirienne d'Electricité qui correspond à plusieurs départements, communes, sous-préfectures, villages, électrifiés de la Côte d'Ivoire ;
- Définir le système de coordonnées géographiques ou de projection ;
- Joindre les données à représenter au fichier shapefile de l'espace géographique ;
- Choisir la symbologie en fonction des données à représenter (point -ligne-polygone) dans la carte, catégoriser ou représenter (Symbologie) une entité unique en fonction d'un champ de la table attributaire ;
- Faire l'étiquetage des zones ;
- Passer en mode mise en page pour ajouter la légende, le Nord Géographique, le Quadrillage, le Titre de la carte et l'Echelle.

2. Collecte des données

2.1. Base de données clientèles CIE

La collecte des données de consommations d'électricité est relevée de manière bimestrielle au niveau des compteurs électriques pour chaque ménage. Ces résultats sont enregistrés au niveau de chaque agence CIE (Agence : ensemble de ménages d'une ou plusieurs localités) et

constituent une base de données fiables. Dans le but de déterminer les consommations spécifiques des localités non électrifiées situées en zones rurales, la compagnie ivoirienne d'électricité a bien voulu mettre à notre disposition sa base de données des profils bimestriels/annuels des ménages (clients - année 2018) de plus de 700 000 milles ménages répartis sur tout le territoire national. Nous avons extrait dans un premier temps les données de consommation du portefeuille client par tarif de puissance souscrite. Puis, dans un second temps, nous avons extrait le nombre de clients par type de tarif de puissance souscrite. Cela nous a donc permis d'avoir les consommations spécifiques par Agence CIE par type de tarif/Puissance souscrite.

2.2. Bases de données statistique INS

La collecte des données relatives aux populations par localités administratives se fait par l'Institut National de la Statistique. Le dernier recensement général de la population et de l'habitat (RGPH) disponible au moment où nous faisons notre étude était en 2018. L'INS a bien voulu mettre à notre disposition les données du recensement général de la population (RGPH 2018) afin que nous puissions avoir des données fiables et exactes du nombre d'habitants par localité vivant dans les différentes localités situées en zone rurale.

2.3. Géolocalisation des localités électrifiées/non électrifié : QGIS

Nous avons procédé à la géolocalisation des localités électrifiées et non électrifiée vu que nous disposons des coordonnées des différentes localités.

3. Traitement des données

3.1. Mise en cohérence du découpage CIE et du découpage administratif des localités

Il arrive parfois que les informations attributaires des entités de la carte à représenter ne soient pas organisées comme nous le souhaitons ; par exemple, les données de population, et celles de consommation spécifique sont organisées par sous-préfecture et non par Agence alors que nous avons besoin d'une organisation par Agence.

Le logiciel XLSTAT, nous permet de déduire des résumés de fonctions statistiques variées (moyenne, écart-type, ANCOVA...).

Relation en table (La jointure des Tables)

L'utilisation des données de cette étude en vue de créer une information géographique demande une jointure des tables qui permet d'associer des données sur l'emplacement d'une entité et des données sur la nature de cette entité. Les deux tables suivantes peuvent être jointes par les valeurs, du champ commun Sous-préfecture qui se trouve dans les deux tables. C'est deux champs sont appelés des Champs clés. Toutefois le nom identique des deux champs n'est pas une condition essentielle (obligatoire) de la jointure.

Shape *	OBJECTID	REGION	DEPART	SOUS_PREF	DIRECTION
Polygone	1	BAGOUE	TENGRELA	Papara	DRN
Polygone	2	BAGOUE	TENGRELA	Débété	DRN
Polygone	3	BAGOUE	TENGRELA	Tengrela	DRN
Polygone	4	BAGOUE	TENGRELA	Kanakono	DRN
Polygone	5	FOLON	MINIGNAN	Kimbirila-Nord	DRN
Polygone	6	TCHOLOGO	OUANGOLODOUGO	Toumoukoro	DRN
Polygone	7	PORO	M'BENGUE	Bougou	DRN
Polygone	8	FOLON	KANIASSO	Mahandiana-Sokourani	DRN
Polygone	9	FOLON	MINIGNAN	Tienko	DRN
Polygone	10	TCHOLOGO	OUANGOLODOUGO	Diawala	DRN
Polygone	11	TCHOLOGO	OUANGOLODOUGO	Niellé	DRN

B	C	D	E	F
DISTRICT	REGION	DEPARTEMENT	S/P ou COMMUNE	DAPARTEMENT 2
DISTRICT AUTONOME D'ABIDJAN	REGION DES LAGUNES - ABIDJAN	ABIDJAN	ABOBO (ABIDJAN)	ABOBO (ABIDJAN)
DISTRICT AUTONOME D'ABIDJAN	REGION DES LAGUNES - ABIDJAN	ABIDJAN	AJAME (ABIDJAN)	AJAME (ABIDJAN)
DISTRICT AUTONOME D'ABIDJAN	REGION DES LAGUNES - ABIDJAN	ABIDJAN	ATTECOUBE (ABIDJAN)	ATTECOUBE (ABIDJAN)
DISTRICT AUTONOME D'ABIDJAN	REGION DES LAGUNES - ABIDJAN	ABIDJAN	COCODY (ABIDJAN)	COCODY (ABIDJAN)
DISTRICT AUTONOME D'ABIDJAN	REGION DES LAGUNES - ABIDJAN	ABIDJAN	KOUMASSI (ABIDJAN)	KOUMASSI (ABIDJAN)
DISTRICT AUTONOME D'ABIDJAN	REGION DES LAGUNES - ABIDJAN	ABIDJAN	MARCOBY (ABIDJAN)	MARCOBY (ABIDJAN)
DISTRICT AUTONOME D'ABIDJAN	REGION DES LAGUNES - ABIDJAN	ABIDJAN	PLATEAU (ABIDJAN)	PLATEAU (ABIDJAN)
DISTRICT AUTONOME D'ABIDJAN	REGION DES LAGUNES - ABIDJAN	ABIDJAN	PORT BOUET (ABIDJAN)	PORT BOUET (ABIDJAN)
DISTRICT AUTONOME D'ABIDJAN	REGION DES LAGUNES - ABIDJAN	ABIDJAN	TREICHVILLE (ABIDJAN)	TREICHVILLE (ABIDJAN)
DISTRICT AUTONOME D'ABIDJAN	REGION DES LAGUNES - ABIDJAN	ABIDJAN	YOPONGON (ABIDJAN)	YOPONGON (ABIDJAN)
DISTRICT AUTONOME D'ABIDJAN	REGION DES LAGUNES - ABIDJAN	ABIDJAN	ANYAMA (ABIDJAN)	ANYAMA (ABIDJAN)
DISTRICT AUTONOME D'ABIDJAN	REGION DES LAGUNES - ABIDJAN	ABIDJAN	BINGERVILLE (ABIDJAN)	BINGERVILLE (ABIDJAN)
DISTRICT AUTONOME D'ABIDJAN	REGION DES LAGUNES - ABIDJAN	ABIDJAN	BROFODOUME (ABIDJAN)	BROFODOUME (ABIDJAN)
DISTRICT AUTONOME D'ABIDJAN	REGION DES LAGUNES - ABIDJAN	ABIDJAN	SONGON (ABIDJAN)	SONGON (ABIDJAN)
DISTRICT AUTONOME YAMOUSSOUKRO	REGION YAMOUSSOUKRO	ATTIEGOUAKRO	ATTIEGOUAKRO (ATTIEGOUAKRO)	ATTIEGOUAKRO (ATTIEGOUAKRO)
DISTRICT AUTONOME YAMOUSSOUKRO	REGION YAMOUSSOUKRO	ATTIEGOUAKRO	LOLOGO (ATTIEGOUAKRO)	LOLOGO (ATTIEGOUAKRO)
DISTRICT AUTONOME YAMOUSSOUKRO	REGION YAMOUSSOUKRO	YAMOUSSOUKRO	YAMOUSSOUKRO (YAMOUSSOUKRO)	YAMOUSSOUKRO (YAMOUSSOUKRO)
DISTRICT AUTONOME YAMOUSSOUKRO	REGION YAMOUSSOUKRO	YAMOUSSOUKRO	KOSSOU (YAMOUSSOUKRO)	KOSSOU (YAMOUSSOUKRO)
DISTRICT DU BAS-SASSANDRA	REGION SAN PEDRO	SAN PEDRO	DOBA (SAN PEDRO)	DOBA (SAN PEDRO)
DISTRICT DU BAS-SASSANDRA	REGION SAN PEDRO	SAN PEDRO	DOCBO (SAN PEDRO)	DOCBO (SAN PEDRO)
DISTRICT DU BAS-SASSANDRA	REGION SAN PEDRO	SAN PEDRO	GABIAGBI (SAN PEDRO)	GABIAGBI (SAN PEDRO)
DISTRICT DU BAS-SASSANDRA	REGION SAN PEDRO	SAN PEDRO	GRAND BEREBY (SAN PEDRO)	GRAND BEREBY (SAN PEDRO)

La jointure a permis d'ajouter plusieurs données attributaires aux données géographiques en vue d'une bonne représentation cartographique.

FID	Shape *	REGION	DEPART	SOUS_PREF	POP TO GEN	DR CIE	AGENCE CIE	OBJECTID	Agence C 1	code	kWh Année	Nbre ABONN	cons
126	Polygone				0			0			0	0	
506	Polygone	DISTRICT AU	ABIDJAN	Abidjan	4395243		ABIDJAN	0			1655008464	630812	
119	Polygone	BAGOUE	KOUITO	Blessané	15187		TENGRELA	0	436		7560747	4445	

A la suite de la jointure des tables, qui contiennent toutes les données nécessaires à nos analyses et vérifications d'hypothèses, nous allons passer à la représentation cartographique des données statistiques.

4. Analyse des données

4.1. Analyse statistique des données de consommation journalière par ménage (localité)

Profil de la demande : consommation moyenne

Sur un échantillon de plus 700 000 ménages à l'intérieur du pays (zones rurales) nous avons observé une tendance centrale de consommation journalière qui était de 2,922 kWh/jour.

Analyse : Statistiques descriptives

L'analyse statistique descriptive, nous montre que pour les intervalles (kWh/ménage/Jour) de :

- [0,1 à 6 kWh/ménage/Jour] : La densité est comprise entre 0,5 et 0,175
- [6 à 12 kWh/ménage/Jour] : La densité est inférieure 0,05

Sur l'échantillon choisi après extraction des valeurs extrêmes, nous observons que 75% des valeurs moyennes journalières sont comprises [0,1 et 4 kWh/ménage/Jour].

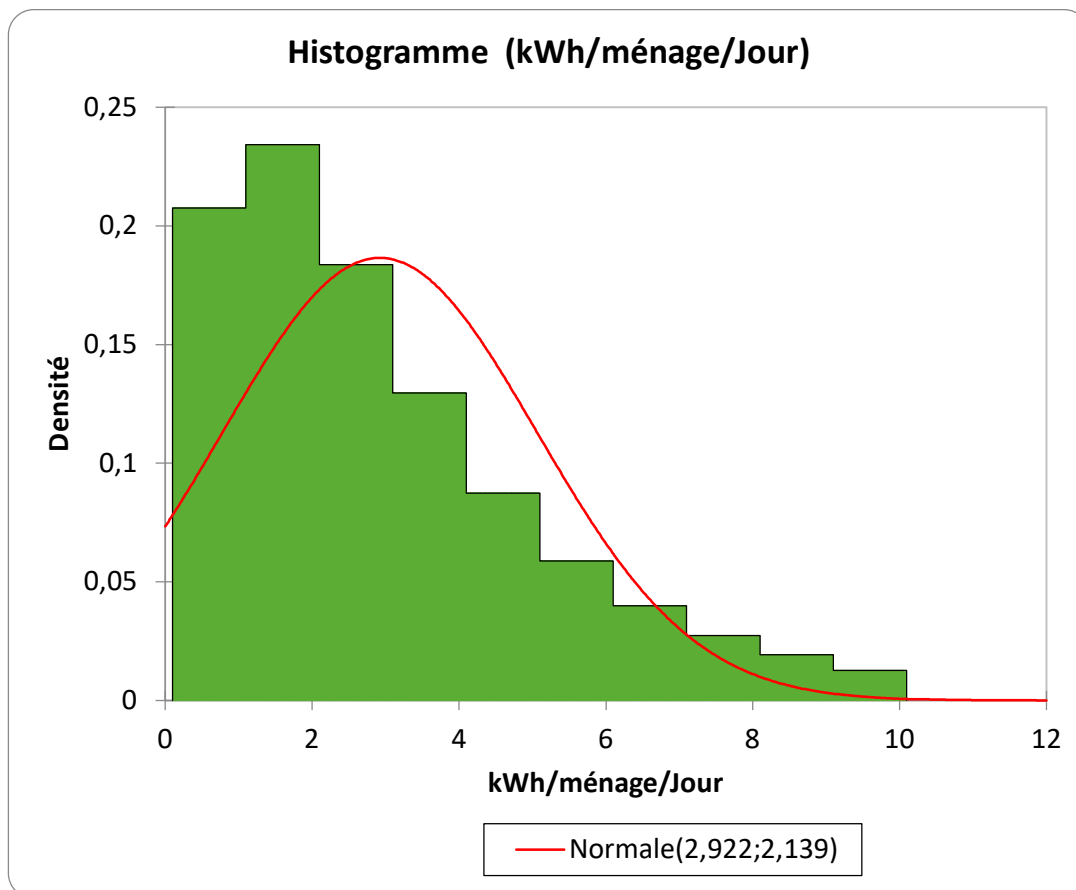


Figure 78 : Histogramme des Statistique descriptives par intervalle de consommation

La figure ci-dessous, nous présente l'analyse statistique descriptive par intervalles (kWh/ménage/Jour) pour les ménages par type de tarif (voir figure 79). Les valeurs moyennes de consommation sont les suivantes :

- *Tarif domestique général : la valeur moyenne est de 4,022 kWh/ménage/Jour ;*
- *Tarif domestique général 5 A : la valeur moyenne est de 3,573 kWh/ménage/Jour ;*
- *Tarif domestique social : la valeur moyenne est de 1,688 kWh/ménage/Jour ;*
- *Tarif professionnel : la valeur moyenne est de 3,460 kWh/ménage/Jour.*

Statistique	Domestique General	Domestique General 5A	Domestique Social	Professionnel
Nb. d'observations	104 202	334 635	295 471	59 620
Minimum	0,101	0,100	0,100	0,100
Maximum	9,997	9,997	9,989	9,997
1er Quartile	1,951	2,030	0,833	1,395
Médiane	3,646	3,285	1,434	2,885
3ème Quartile	5,797	4,770	2,230	5,063
Moyenne	4,022	3,573	1,688	3,460
Variance (n)	6,321	4,224	1,515	6,330
Ecart-type (n)	2,514	2,055	1,231	2,516

Pour chaque type de tarif nous avons utilisé le même type d'analyse statistique pour identifier la tendance centrale (voir figure 79).

Nous avons procédé même pour toutes les localités électrifiées. Ces localités ont été prises comme localités de proximités de référence pour prédire les consommations journalières des villages à électrifier sur l'ensemble du territoire.

N.B : Statistiques descriptives pour les intervalles (kWh/ménage/Jour) : Pour chaque type de tarif nous avons utilisé le même type d'analyse statistique pour identifier la tendance centrale.

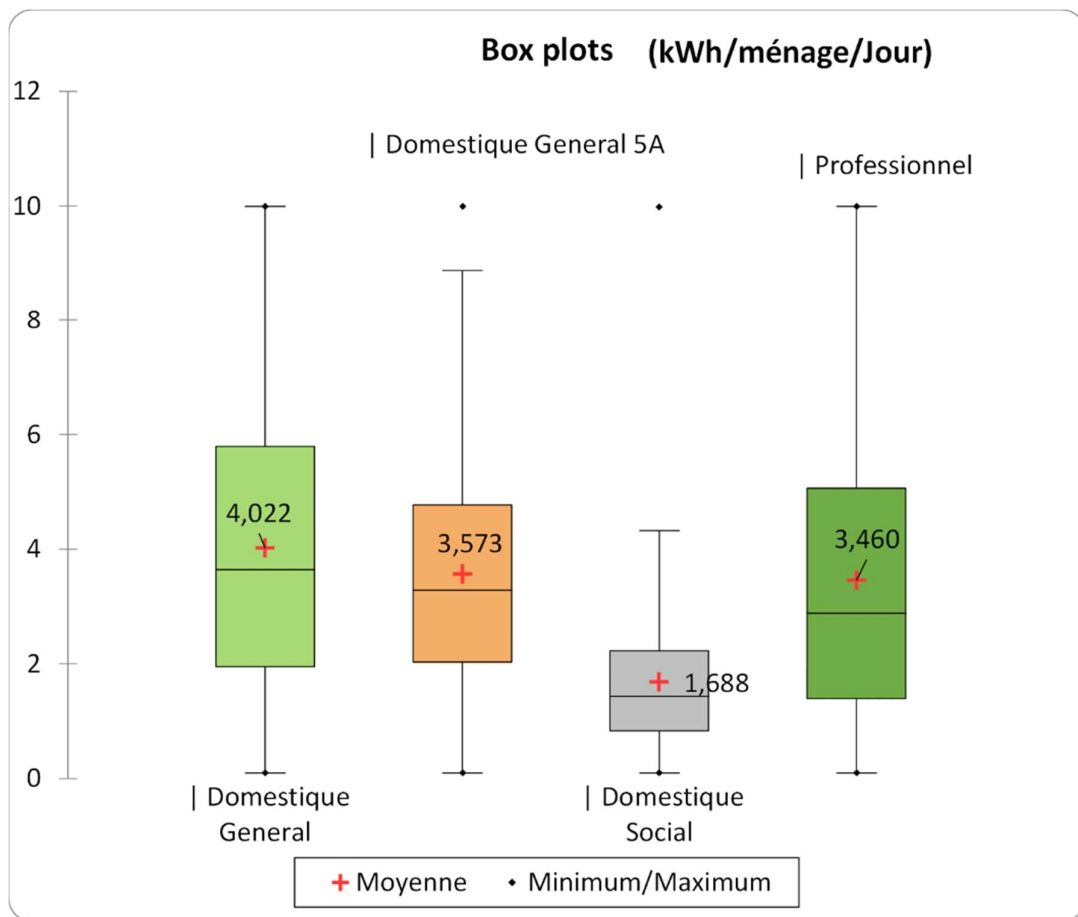


Figure 79 : Histogramme des Statistiques descriptives, consommation kWh/ménage/jour pour chaque type de tarif

Nous avons procédé de même pour toutes les localités électrifiées. Ces localités ont été prises comme localités de proximités de référence pour prédire les consommations journalières des villages à électrifier sur l'ensemble du territoire.

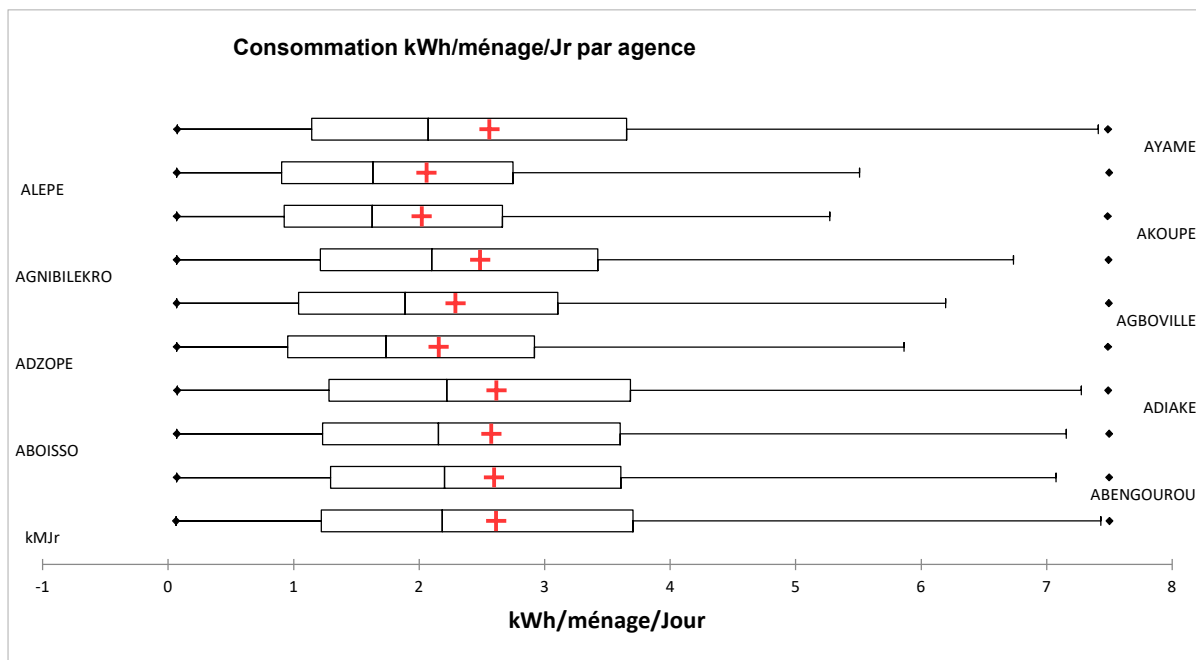


Figure 80 : Histogramme des Statistiques descriptives par intervalle de consommation pour chaque type de tarif

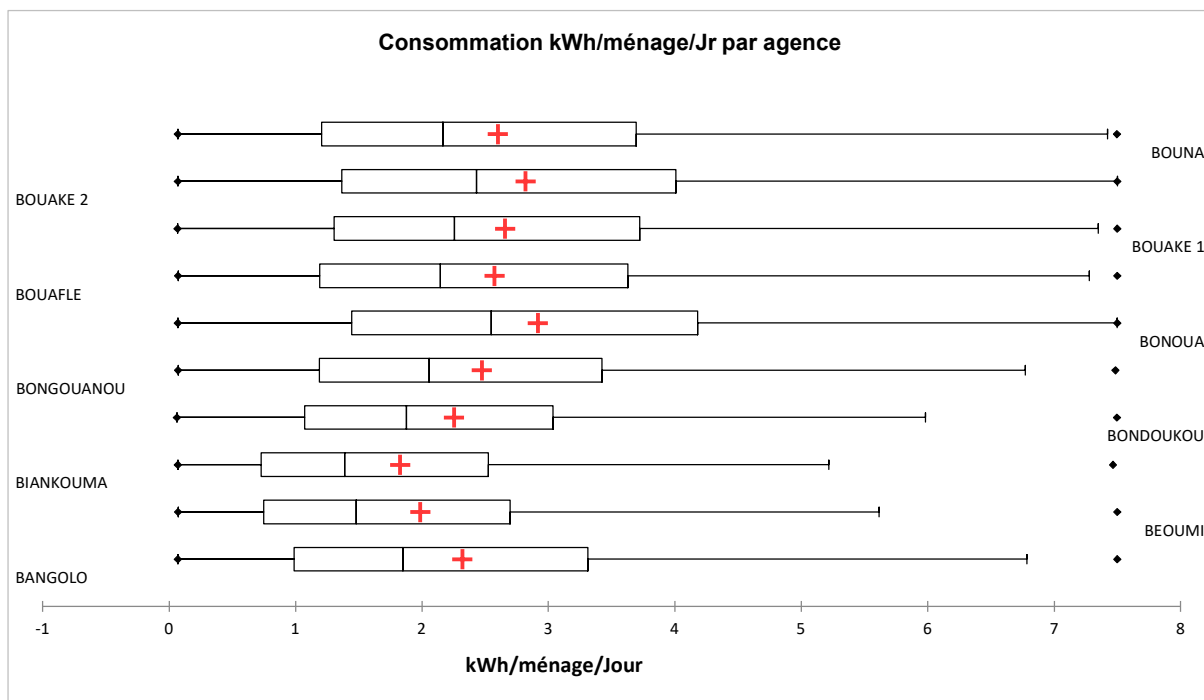


Figure 81. Histogrammes des Statistiques descriptives par intervalle de consommation de chaque localité à électrifier

5. Cartographie de base des consommations

Nous représentons sur une carte toutes les données de consommation des localités proxy. Nous avons représenté les agences CIE en tenant compte des consommations spécifiques par Agence et par ménage. Cette représentation est surfacique. La symbologie en fonction des quantités, nous a permis de classer les entités en fonction du niveau de consommation, suivant des couleurs graduées proportionnelles aux données représentées (voir légende de la figure 82).

Ainsi le logiciel QGIS nous a permis d'élaborer la cartographie proxy des consommations moyennes par jour par ménage pour les localités à électrifier.

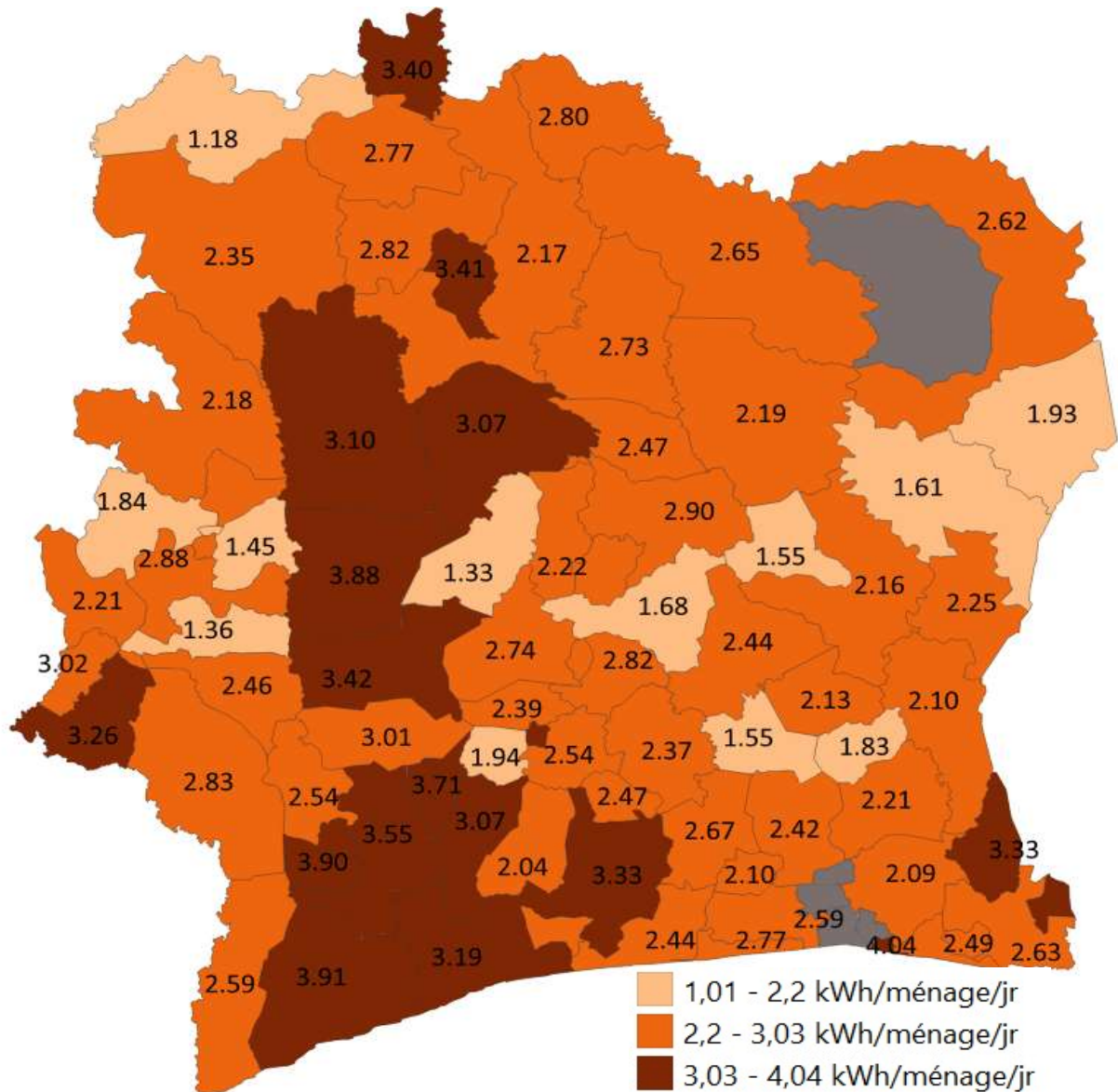


Figure 82. Cartographie base des consommation moyenne par jour par ménage pour les localités à électrifier

6. Conclusion

Au terme de ce chapitre, la comparaison des deux méthodes (mesurage versus enquête et modélisation) indique une meilleure précision pour la mesure et une erreur de 25 % sur les consommations énergétiques.

Pour autant, les deux méthodes ont donné des profils de charge similaires avec un plancher de consommation en période entre 00 h et 06 h du matin et des pics de consommations en 18 h et 23 h. Ces données ont été obtenues après l'installation de plans de mesurages dans quatre (4) villages localisés en différentes régions de la Côte d'Ivoire.

La méthode basée sur l'association d'une enquête de terrain et une modélisation, présente toutefois un intérêt si nous souhaitons réaliser une étude de sensibilité de la consommation énergétique aux changements d'usages et d'efficacité des équipements énergivores.

Pour construire la courbe de charge d'une localité non électrifiée nous avons bâti une méthode innovante basée sur l'identification des profils de charge et des consommations des localités de proximité (proxy) électrifiées. La carte des consommations énergétiques permettant d'identifier les proxys de référence est le résultat d'une analyse des données massives de la CIE sur les consommations de **700.000 ménages**.

En définitive, cette étude nous a permis d'identifier avec une bonne précision les profils de charges de toute localité non électrifiée à partir des données de mesurage (profil de charge) et des données de consommations par localités (proxy électrifié).

Chapitre 5 : *Proposition d'un système de production décentralisée d'électricité répondant aux besoins du village d'ELOKATO*

Après avoir identifié et modélisé la demande en consommation d'un village situé en zone rurale. Puis identifié et modélisé les ressources qui permettront de couvrir ces besoins. Nous proposerons dans ce chapitre, un système de production électrique décentralisé fiable et viables. Pour ce faire, nous étudierons la viabilité technico-économique, sur la base de différents scénarios de micro-réseaux électriques avec des sources de productions d'énergies renouvelables, autonomes et alimentées par le réseau interconnecté. Le logiciel de simulation et d'optimisation HOMER Pro 3.13.3, est utilisé pour l'évaluation des différents scénarios techniques et économiques des composants du système, en vue d'obtenir la configuration la plus rentable. L'étude de cas du village d'ELOKATO permet d'identifier les options optimales de l'utilisation des énergies renouvelables pour l'électrification rurale en vue d'accroître le taux de couverture électrique.

1. Présentation des logiciels

1.1. Modélisation et simulation sur HOMER

Le logiciel de simulation du micro-réseau HOMER Pro 3.13.3, développé par le National Renewable Energy Laboratory des États-Unis, est utilisé dans le cadre de cette étude. C'est un outil d'aide indispensable à la décision pour les projets de conception optimisée des micro-réseaux décentralisés. Dans ce domaine il est l'un des standards les plus utilisés dans le monde. Cet outil est utilisé dans tous les secteurs, de l'approvisionnement en électricité des villages isolés et des services publics insulaires aux sites connectés au réseau. Homer Pro, ou HOMER (optimisation hybride de plusieurs énergies renouvelables électriques), apporte une assistance remarquable par la simplification des tâches d'évaluation de la conception des systèmes d'alimentation hors réseau et connecté au réseau. Il permet de sélectionner les meilleurs composants du système et d'identifier pour chaque composant les tailles et caractéristiques efficaces pour couvrir les besoins énergétiques du site.

Dans son fonctionnement HOMER requiert, des données d'entrée sur les besoins journaliers (kWh/jour), des paramètres de ressources énergétiques disponibles du site étudié, une proposition architecturale des composants du micro-réseau, des indicateurs économiques et des données environnementales. Le logiciel utilise ces données d'entrée, pour simuler différentes configurations système ou combinaisons de composants et génère des résultats affichables sous forme de liste de configurations réalisables rangées par coût net actuel. HOMER affiche également les résultats des simulations dans une grande variété de tableaux et de graphiques en vue de comparer les configurations et de les évaluer sur le plan économique et technique. Il permet aussi de faire des analyses de sensibilité dans le but d'explorer les impacts des changements de facteurs, tels que la disponibilité des ressources et les conditions économiques, sur le rapport coût-efficacité de différentes configurations de système.

2. Paramètres du système

2.1. Demande

Les données obtenues par mesurage, ont été formatées puis importées ensuite dans HOMER Pro, comme valeurs de référence de consommation du village, par pas de temps de 1 heure en paramètres d'entrée pour établir le profil de charge journalière [8760 lignes de données].

2.1.1. Choix du village de Elokato comme site expérimental

Eloka (Akoualo en ethnie Ébrié) est un petit village, situé au bord du littoral ivoirien, à quelque 40 kilomètres de la capitale économique Abidjan, dans la Région des Lagunes. Cette bourgade, chef-lieu de commune, et peuplé par les Ebrîés (groupe Akan), est constituée de deux entités à savoir Eloka-té et Eloka-to. Elle fait partie de la sous-préfecture de Bingerville. Les conditions de réussite de notre projet consistaient à identifier un village volontaire, comme site expérimental, non loin du centre des affaires Abidjan et du centre des métiers de l'électricité de Bingerville de la CIE (Compagnie Ivoirienne d'Electricité). Ce site devrait permettre l'installation d'un plan de comptage pour l'évaluation des besoins et répondre aux critères suivants :

- *Accès facile au village ;*
- *Proximité du village d'Abidjan (agglomération moderne) ;*
- *Adhésion des populations au projet d'énergies renouvelables ;*
- *Disponibilité des ressources énergétiques (vent, cours d'eau, biomasse, faible gisement solaire comparativement au reste du Pays).*



Figure 83 : Situation géographique du village d'Elokato [Google map]

2.1.2. Profil (journalier, mensuel, annuel) – village ELOKATO

La consommation moyenne journalière enregistrée sur une année est de **662,08 kWh/jour** pour une charge alternative (AC).

Les données recueillies et stockées pendant une année dans le logiciel Energy Sentinel, nous ont permis d'établir le profil de charge à pas horaire pour le village d'Elokato.

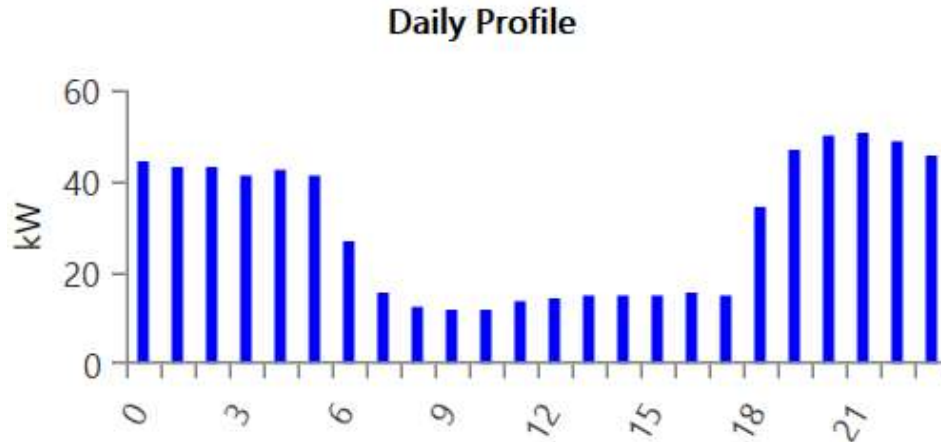


Figure 84. Consommation d'électricité - Profil journalier (Source : Homer Energy 3.13.2 Pro)

On observe que les charges journalières suivent une distribution concentrée majoritairement plus la nuit que le jour : une première tranche de 18 h à 23 h et une deuxième tranche de 00 h à 06 h du matin. La charge de pointe est observée entre 20 h et 22 h.

Comme le montre la courbe, la pointe annuelle de consommation est observée dans le mois de décembre.

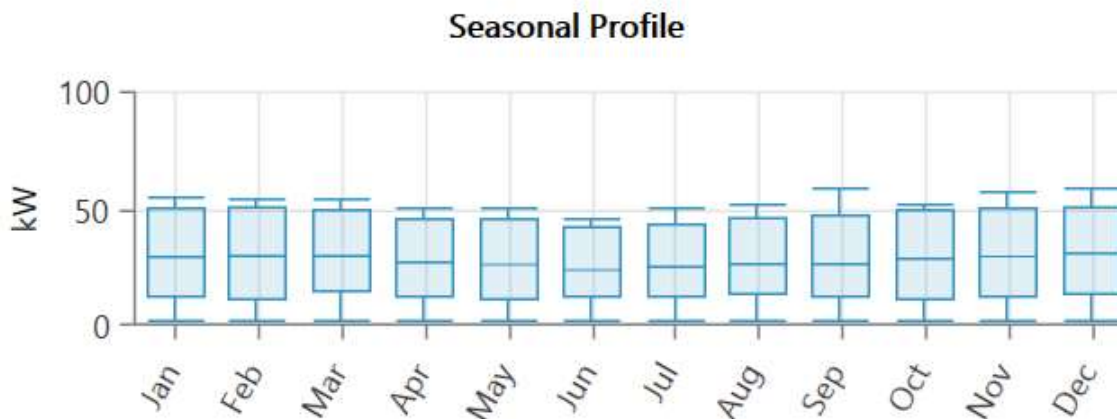


Figure 85. Consommation d'électricité - Profil mensuel ELOKATO

Les besoins en électricité sont les plus élevés au cours du premier et dernier trimestre de l'année, qui correspondent respectivement à la période de forte chaleur et à la période des fêtes de fin d'année (génération, culturelle, ...)

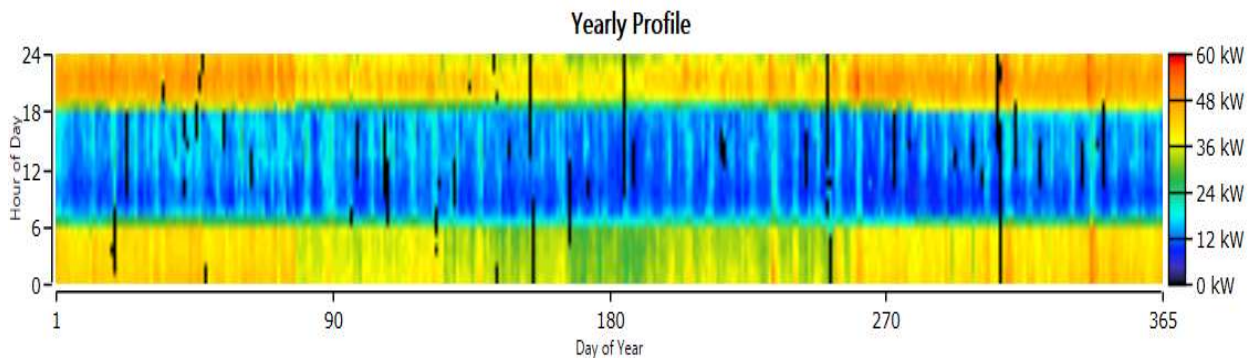


Figure 86. Consommation d'électricité - Profil Annuel ELOKATO

2.2. Ressources et composants disponibles pour couvrir les besoins du village d'Elokato

Le logiciel HOMER Pro 3.13.3 est utilisé pour la simulation et l'optimisation du micro-réseau à prévoir. Il permet d'avoir un aperçu des différentes configurations et des combinaisons de sources de productions possibles afin de minimaliser les coûts des composants du micro-réseau.

Les ressources énergétiques disponibles, facilement mobilisables sur le site d'Elokato, pour produire de l'électricité sont les sources solaires photovoltaïques, hydraulique (petite hydraulique) et éoliennes.

Les composants essentiels du système hybride choisis pour le micro-réseau dans le cadre de ce projet sont les suivants : un système photovoltaïque, une hydrolienne, un système de stockage chimique (batterie), un générateur diésel, le réseau national, un convertisseur DC/AC.

Les sessions suivantes donnent plus de détails sur les ressources et les composants permettant de construire un système de production d'électricité de sources renouvelables (solaire, éolien, hydrolienne).

2.2.1. Panneau photovoltaïque

2.2.1.1. Irradiation solaire

Ne disposant pas de données complètes, mesurées sur une année du site de l'étude. Dans le cadre de cette étude, les données d'irradiation solaire et de clarté du village d'Elokato sont issues de la base de données du National Solar Radiation Database.

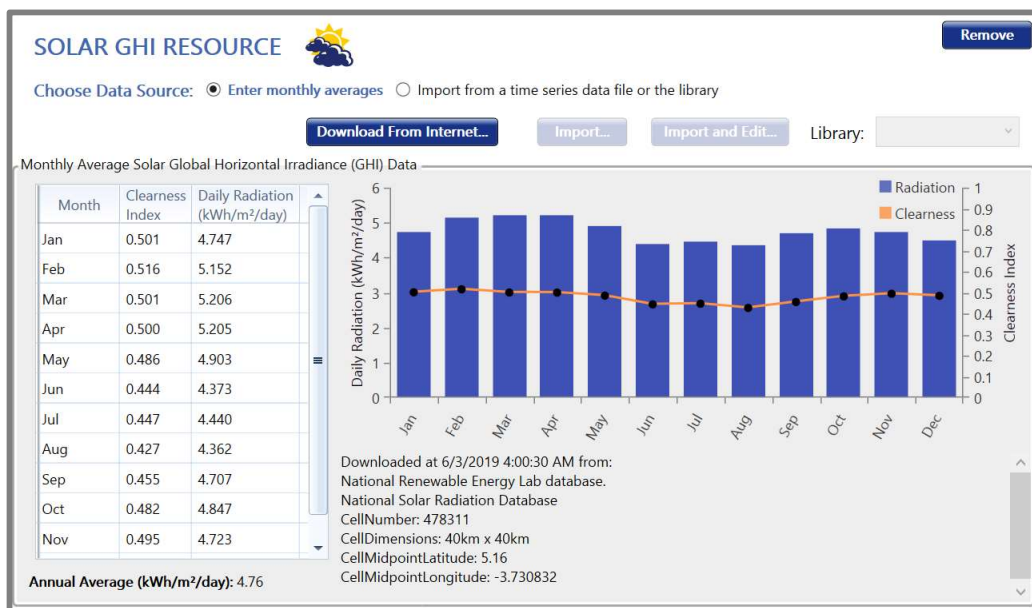



Figure 87. Rayonnement horizontal solaire annuel (source : Homer Energy)

Le rayonnement solaire horizontal annuel global est présenté à la figure ci-dessus. La moyenne quotidienne sur l'année est de **4,76 kWh/m²**.

2.2.1.2. Module photovoltaïque (PV)

Pour l'étude, le module PV choisi est de type silicium monocristallin, fabriqué par **Jinko Solar**.

Tableau 26 : Caractéristiques et coût des composants photovoltaïques

COMPOSANTS			
<p><i>Module Photovoltaïque (PV)</i></p>  <p>JKM300M-60 Mono-crystalline PERC 156x156mm (6 inch)</p>	Characteristics	STC	NOCT
	Maximum Power (Pmax)	300Wp	224Wp
	Maximum Power Voltage (Vmp)	32.6V	30.6V
	Maximum Power Current (Imp)	9.21A	7.32A
	Open-circuit Voltage (Voc)	40.1V	37.0V
	Short-circuit Current (Isc)	9.72A	8.01A
	Module Efficiency STC (%)	18.33%	18.33%
	Operating Temperature (°C)	-40°C~+85°C	
	Maximum system voltage	1000VDC (IEC)	
	Maximum series fuse rating	15A	
	Power tolerance	0~+3%	
	Temperature coefficients of Pmax	-0.39%/°C	
	Temperature coefficients of Voc	-0.29%/°C	
	Temperature coefficients of Isc	0.05%/°C	
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C		

COMPOSANTS		
Costing Input data in HOMER		
○ Cost	Capital (\$)	\$214 947
	Remplacement (\$)	\$164 086.52
	Operation and Maintenance (\$)	\$3000
	Lifetime (years)	25
○ Site Specific Input	Derating Factor (%)	88%
	Electrical Bus	DC

Le facteur de déclassement qui a été appliqué pour calculer la puissance restituée réduite dans des conditions de fonctionnement réelles par rapport aux conditions nominales est de 88 %.

2.2.1.3. Coût des modules photovoltaïques

La figure ci-dessous, nous montre que le coût en capital initial du composant photovoltaïque est de 214 945 \$ et que le coût de remplacement par kilowatt du système photovoltaïque vaut 164 068 \$. Aussi, il montre que les coûts annuels d'exploitation et de maintenance par kilowatt valent 3 000 \$.

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
284.09	214,947.00	164,086.52	3,000.00

Lifetime
time (years): 25.00 More...

Figure 88. Eléments de coûts du générateur photovoltaïque choisi pour ELOKATO (source : Homer Energy)

2.2.2. Eolienne

2.2.2.1. Potentiel de l'éolien : Vitesse de vent

Les valeurs utilisées dans le cadre de cette étude sont issues des données météorologiques de la NASA disponible dans la base de données de HOMER Pro. La vitesse annuelle moyenne était d'environ **3,28 m/s**, mesuré à une hauteur d'anémomètre de 50 m.

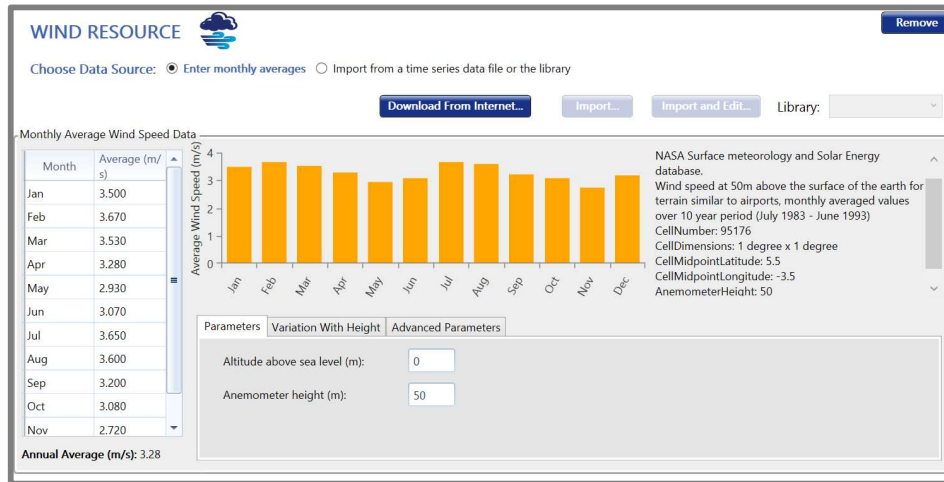


Figure 89. Monthly average wind speed data ELOKATO (source: Homer Energy)

HOMER calcule la puissance de sortie de l'éolienne à chaque pas de temps en utilisant un processus en trois étapes :

- Calcul de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu de l'éolienne.
- Calcul de la quantité d'énergie produite par l'éolienne à cette vitesse du vent avec une densité d'air standard.
- Ajustement de la valeur de la puissance en fonction de la densité de l'air réelle.

2.2.2.2. Générateur éolien

Le générateur éolien utilisé pour les simulations est de type générique Eolien Generic 3 kW-G3 de la base de données de HOMER Energy. C'est une éolienne de 3 kW connectée sur le bus AC.



Figure 90. Eolien Generic 3kW-G3

2.2.2.3. Coût du générateur éolien

La figure ci-dessous, nous montre que le coût en capital initial du composant photovoltaïque est de 214 945 \$ et que le coût de remplacement par kilowatt du système photovoltaïque vaut 164 068 \$. Aussi, il montre que les coûts annuels d'exploitation et de maintenance par kilowatt valent 3 000 \$.

Costs

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)	
1	\$18,000.00	\$18,000.00	\$180.00	✕
Click here to add new item				
Multiplier:	⊖ ⊕	⊖ ⊕	⊖ ⊕	

Figure 91. Eléments de coûts du générateur éolien choisi pour ELOKATO (source : Homer Energy)

2.2.3. Hydrolienne

2.2.3.1. Potentiel Hydrolien : Vitesse du courant marin disponible pour alimenter le générateur

La courbe de puissance de la turbine hydro cinétique nous indique la quantité de puissance produite en fonction de la vitesse de l'eau. En effet, pour des vitesses inférieures à 2 m/s, la turbine produira une quantité de puissance inférieure à 10 kW. Mais pour des vitesses supérieures à 2 m/s, le générateur pourra générer une quantité de puissance équivalente à 20 kW, ce qui lui permettra de fonctionner à plein régime.

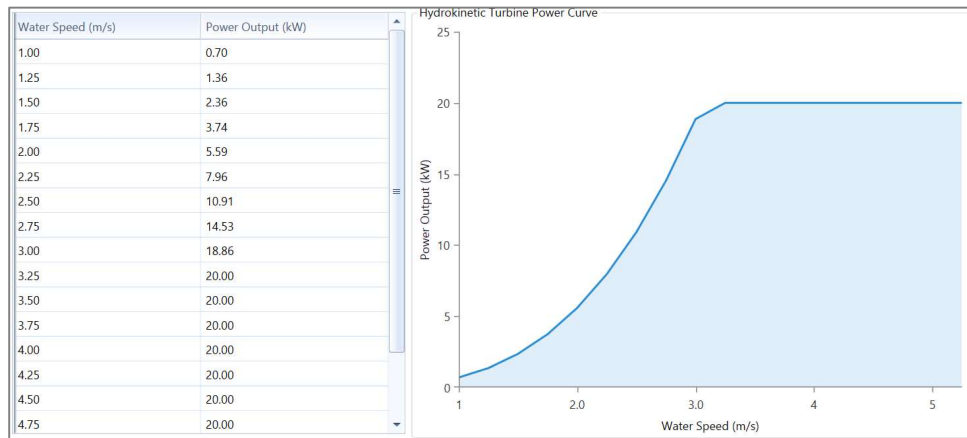


Figure 92. Courbe caractéristique du générateur Hydrolienne choisi pour ELOKATO (source : Homer Energy)

2.2.3.2. Générateur hydro éolien

Une hydrolienne de Guinard Energies de **20kW** (P154) est choisie comme source de production hydraulique dans le cadre de cette étude. C'est un générateur connecté sur le bus AC, avec les caractéristiques suivantes :

- Dimensions : **2m x 3m**
- Poids : **750kg**
- Diamètre du rotor : **1540mm**
- Profondeur d'immersion requise : **3m**



Figure 93. Une hydrolienne de Guinard Energies de **20kW** (P154)

2.2.3.3. Coût du générateur hydro éolien

La figure ci-dessous montre que le coût en capital et le coût de remplacement du générateur éolien est de 35 000 \$. Le coût d'exploitation et de maintenance, coûterait 3 500 \$/année.

Costs

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)	
1	\$35,000.00	\$35,000.00	\$3,500.00	X
Click here to add new item				
Multiplier:	{..}	{..}	{..}	

Site Specific Input

Lifetime (years): {..}

Figure 94. Eléments de coûts du générateur Hydrolienne choisi pour ELOKATO (source : Homer Energy)

2.2.4. Système de stockage

2.2.4.1. Caractéristiques des batteries

Le modèle de batterie choisie a les caractéristiques suivantes :

- Type : Kinetic Battery Model - La batterie BAE SECURA SOLAR 20PVV3800-OPZV est une batterie gel scellée, sans entretien et ne demandant aucun remplissage d'eau
- Tension nominale : 2V
- Capacité nominale : 7,37 kWh
- Capacité maximale : 3800 Ah
- Etat de charge minimale (SOC) : 30%
- Le système de stockage est câblé en 48V
- Nombre de string : 24
- Fabricant : BAE SECURA PVV SOLAR Batteries



Figure 95. La batterie BAE SECURA SOLAR 20PVV3800-OPZV

2.2.4.2. Coût des batteries

La figure ci-dessous, nous montre que le coût d'achat initial et le coût de remplacement des batteries est d'environ 25 187 \$ US. Le coût de remplacement interviendra à partir de la vingt-cinquième année. Le coût de fonctionnement et d'entretien du parc batterie serait de 1 500 \$/année.

Cost			
Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
24	25,187.96	25,187.96	1,500.00
Lifetime			
throughput (kWh):	81,982.42	27	More...
time (years):	25.00	{..}	

Figure 96. Eléments de coûts du système de stockage (batteries) choisi (source : Homer Energy)

2.2.5. Groupe électrogène

2.2.5.1. Générateur diesel

Pour améliorer la fiabilité du système, nous avons choisi un générateur diesel de 25kW. C'est un générateur connecté sur le bus AC. La figure ci-dessous, nous présente ces caractéristiques :

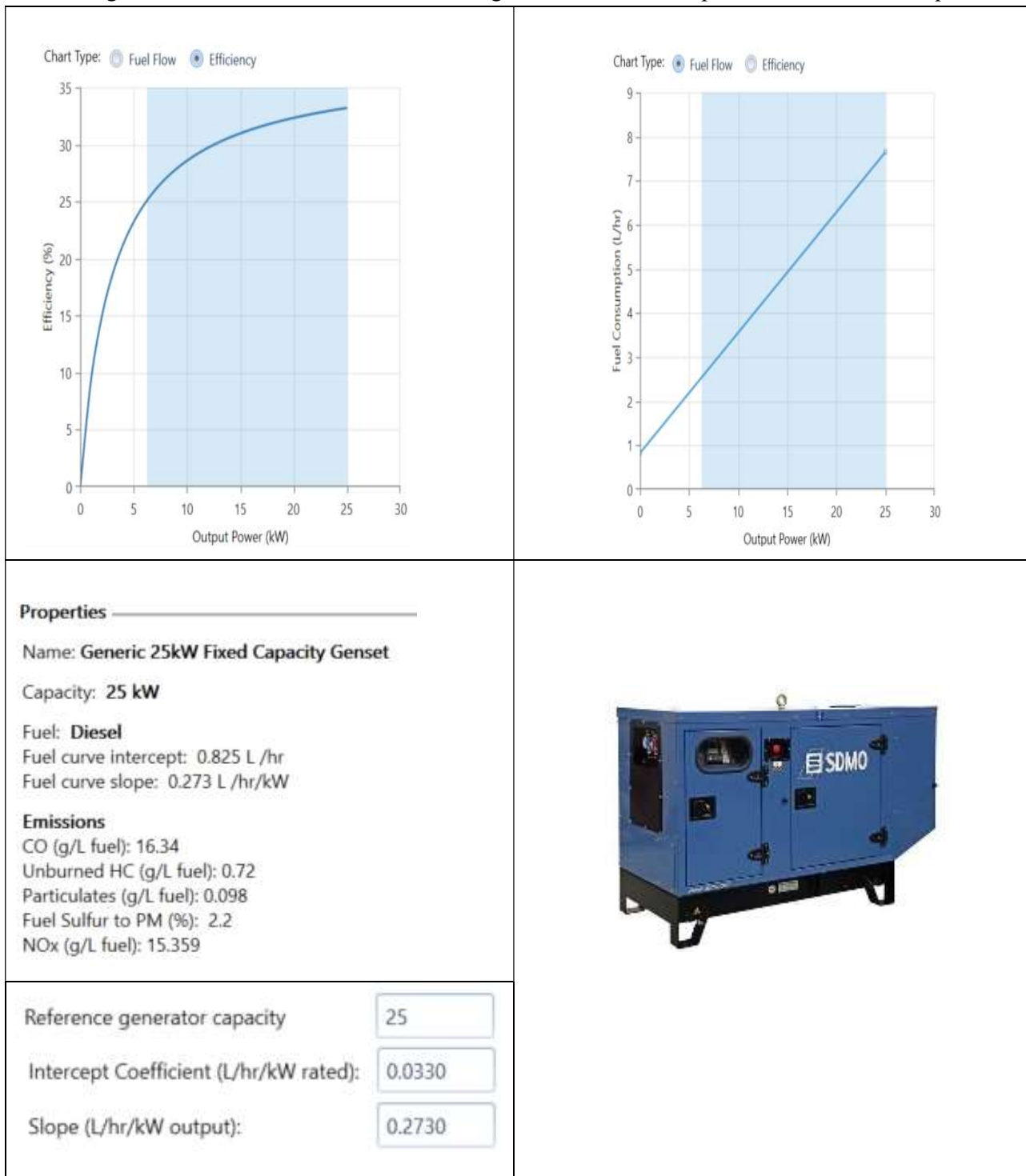


Figure 97. caractéristiques du générateur genset (source : Homer Energy)

2.2.5.2. Coût du générateur diesel : Genset

La figure ci-dessous, nous indique que le coût en capital initial et le coût de remplacement du groupe diesel est de 12 500 \$. Le coût annuel d'exploitation et de maintenance est de 0,750 \$/heure. Quant au prix du fuel, il est variable. Mais au moment où nous faisons notre étude, le coût du fuel est de 1,2 \$/L.

Site Specific	
Minimum Load Ratio (%):	25.00
Lifetime (Hours):	15,000.00
Generator Cost	
Initial Capital (\$):	12,500.00
Replacement (\$):	12,500.00
O&M (\$/op. hour):	0.750
Fuel Price (\$/L):	1.200

Figure 98. Eléments de coûts du groupe électrogène choisi pour Elokato (source : Homer Energy)

3. Paramètres du système : Critères d'évaluation des performances technico-économiques du système

Dans le cadre de cette étude les indicateurs de viabilité économique, de fiabilité technique et d'impact environnemental ont été utilisés comme critères d'évaluation des performances technico-économiques du système.

3.1. Indicateur de viabilité économique

Le coût du cycle de vie, est pris comme indicateur d'optimisation et d'évaluation des performances économiques du système du micro-réseau du village d'Elokato. Pour évaluer ces performances économiques, les avantages économiques, les coûts d'exploitation du système, et les coûts d'investissement initiaux et de remplacement ont été pris en compte.

Dans l'approche HOMER, le coût total net actuel (NPC) est équivalent au coût du cycle de vie du système, ce coût est composé de tous les coûts engagés pendant la durée de vie du micro-réseau [78]. Le NPC a permis d'ordonner et de trouver les scénarios au coût minimum. Le NPC est obtenu en déduisant des revenus de la valeur actuelle les charges engagées durant la durée de vie du micro-réseau. Le coût total net à prendre en compte est la somme des coûts en capital initial, les coûts de remplacement, les coûts liés à l'exploitation et à la maintenance, le coût des achats de combustibles et de l'électricité, et des taxes sur les émissions polluantes. Le total des produits est composé de la valeur de récupération à la clôture du projet et des revenus issus de la commercialisation de l'électricité au réseau [78] le COE (Cost of energy) et f (facteur de récupération du capital) permettent de faire une évaluation pertinente du NPC, les équations ci-dessous peuvent être utilisées [78]:

$$C_{NPC} = \frac{C_{TAC}}{f} \quad (52)$$

Où : C_{TAC} est le coût total annualisé ; f est le facteur de récupération du capital, donné par l'équation

$$COE = \frac{C_{TAC}}{E_{Load} + E_{grid,sales}} \quad (53)$$

Où : E_{demand} est la charge annualisée desservie par le micro-réseau [kWh / an] ; $E_{grid,sales}$ représente les énergies vendues au réseau interconnecté par an [kWh / an]. Dans notre étude de cas aucune vente n'est encore possible sur le réseau interconnecté en Côte d'Ivoire pour l'instant.

$$f = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (54)$$

i : taux d'intérêt annuel

N : Nombre d'année

3.2. Indicateur de la fiabilité technologique (pénurie de capacité)

La fraction de pénurie de capacité ou d'insuffisance de capacité est choisie comme indicateur pour évaluer les performances de fiabilité technologique du micro-réseau. La fraction de pénurie de capacité est le ratio entre la pénurie totale et la demande totale d'électricité, cette valeur doit être comprise entre 0 et 1. La fiabilité technologique du système est élevée quand ce ratio tend vers 0. Dans notre cas d'étude un maximum de 5 % a été fixé comme objectif.

CONSTRAINTS ⓘ

Maximum annual capacity shortage (%): ⓘ

Minimum renewable fraction (%): ⓘ

Operating Reserve

As a percentage of load

Load in current time step (%): ⓘ

Annual peak load (%): ⓘ

As a percentage renewable output

Solar power output (%): ⓘ

Wind power output (%): ⓘ

Figure 99. Valeur objective de l'indicateur de pénurie de capacité (source : Homer Energy)

Le calcul de la valeur de la pénurie de capacité est fait avec l'équation suivante :

$$F_{CS} = \frac{E_{CS}}{E_{demand}} \leq 5\% \quad (55)$$

Où : E_{CS} est la pénurie totale de capacité [kWh / y], E_{demand} est la demande électrique totale [kWh / y].

3.3. Indicateur d'impact environnemental

La fraction renouvelable est l'indicateur choisi pour l'évaluation de l'impact environnemental de ce micro-réseau. Les générateurs diesels utilisant des combustibles fossiles et les réseaux externes sont les principaux émetteurs de polluants atmosphériques. Pour évaluer cet indicateur la formule ci-dessous est utilisée :

$$F_{ren} = 1 - \frac{(E_{nonren} - E_{gs}) + H_{nonren}}{E_{ser} + H_{ser}} \quad (56)$$

Où : E_{nonren} est la production électrique non renouvelable [kWh / y], H_{nonren} est la production thermique non renouvelable [kWh / y], E_{gs} est l'énergie vendue au réseau interconnecté [kWh / y], E_{ser} est la charge électrique totale desservie [kWh / a], H_{ser} est la charge thermique totale desservie [kWh / y].

3.4. Paramètres de simulation

La durée de vie du projet a été fixée à **25 ans**, avec un taux d'intérêt réel annuel de **5.88**, qui est utilisé pour calculer les facteurs d'actualisation et les coûts annualisés à partir des coûts actuels nets.

ECONOMICS ⓘ 

Nominal discount rate (%):	<input type="text" value="8.00"/>		Real discount rate (%): 5.88
Expected inflation rate (%):	<input type="text" value="2.00"/>		
Project lifetime (years):	<input type="text" value="25.00"/>		
System fixed capital cost (\$):	<input type="text" value="0.00"/>		
System fixed O&M cost (\$/yr)	<input type="text" value="1,000.00"/>		
Capacity shortage penalty (\$/kWh):	<input type="text" value="0.00"/>		
Currency:	<input type="text" value="US Dollar (\$)"/>		

Figure 100. Les facteurs d'actualisation et les coûts annualisés

Dans HOMER, deux stratégies principales de gestion du système de stockage sont utilisées pour administrer le fonctionnement du groupe électrogène et du groupe de batteries lorsque survient une pénurie de production d'énergies renouvelables pour satisfaire la charge : **cycle de charge (CC) et suivi de charge (LF)** :

- *Pour la stratégie de suivi de la charge (LF), chaque fois que le groupe électrogène fonctionne, seule la puissance nécessaire à la charge (demande) peut être générée, et le groupe de batteries ne peut pas être chargé.*
- *Pour la stratégie de charge cyclique (CC), le groupe électrogène fonctionnera au maximum de sa capacité et le surplus de puissance générée sera utilisé pour charger le groupe de batteries*

La stratégie adoptée dans cette étude est la LF (suivi de charge), ce qui signifie que les batteries seraient chargées par le champ PV, l'éolienne et l'hydrolienne que par l'excès de la production après satisfaction de la demande par le système. Le générateur diesel sera mobilisé seulement qu'en cas de déficit de production du sous-système (PV, Eolien, Hydrolien) et du parc batteries. Pour éviter de consommer du carburant et de générer des émissions polluantes pour l'environnement.

4. Résultats et discussions

4.1. Scénarios optimisés

HOMER a modélisé des micro-réseaux avec différentes configurations pour obtenir la stratégie la plus rentable et la plus viable, en utilisant des entrées de dimensionnement des composants. Le tableau 27 répertorie les résultats d'optimisation classés en fonction de différentes configurations pour le système autonome. Également, il fournit les résultats pour le système de micro-réseaux connecté au réseau. Tous les résultats ont été ordonnés selon une diminution de TNPC.

Après les différentes simulations, HOMER a identifié plus de 60 000 scénarii dont treize (13) scénarios et configurations jugés les plus rentables, à partir des paramètres renseignés pour l'architecture initiale dans le cadre de cette étude. Les résultats ont été classés par ordre décroissance de valeur du NPC (Coût net actuel) et LCOE (coût actualisé de l'énergie). Ces données sont illustrées dans le tableau ci-dessous.

Aussi, les configurations sans composants photovoltaïques ont des COE élevés et des coûts d'investissement initiaux très élevés de l'ordre de plusieurs millions de dollars américains, dans notre étude de cas.

Tableau 27. Résultats d'optimisation classés en fonction de différentes configurations pour mini-réseau Elokato (source : Homer Energy)

Architecture										Cost			
	PV Jinko60/300 (kW)	Eolien	Genset 25 (kW)	Batt. BAE	Hydrolienne	Hybride 150KTL (kW)	Dispatch	NPC (\$)	COE (\$)	Operating cost (\$/yr)	Initial capital (\$)	Ren. Frac. (%)	
	189		25.0	120	1	67.5	LF	\$619,919	\$0.203	\$20,571	\$353,990	94.6	
	257		25.0	144		70.5	LF	\$641,188	\$0.210	\$18,895	\$396,918	95.0	
	189	1	25.0	120	1	72.5	LF	\$642,446	\$0.210	\$20,696	\$374,893	94.7	
	269			144	1	69.1	LF	\$653,880	\$0.216	\$17,455	\$428,228	100	
	304	1	25.0	120		69.1	LF	\$661,820	\$0.217	\$18,324	\$424,942	94.8	
	269	1		144	1	69.1	LF	\$673,492	\$0.222	\$17,627	\$445,622	100	
	308			168		110	LF	\$683,984	\$0.226	\$16,521	\$470,413	100	
	246	1		216		67.7	LF	\$705,313	\$0.233	\$18,361	\$467,955	100	
		398	25.0	600	1	200	CC	\$9.81M	\$3.17	\$144,110	\$7.95M	75.1	
		525		2,256	1	255	LF	\$15.1M	\$4.99	\$244,095	\$12.0M	100	
		617	25.0	1,104		593	CC	\$15.4M	\$5.01	\$217,786	\$12.6M	75.1	
		803		3,120		657	LF	\$22.6M	\$7.49	\$351,092	\$18.1M	100	
			25.0	22,848	1	26.4	LF	\$43.0M	\$13.75	\$1.46M	\$24.0M	78.8	

4.2. Solution la plus économique

La configuration la plus rentable est le système hybride PV/Hydro/Stockage/Genset. Elle présente les plus faibles NPC (coût net actuel= 620 000 \$) et LCOE (coût actualisé de l'énergie= 0,203 \$/kWh).

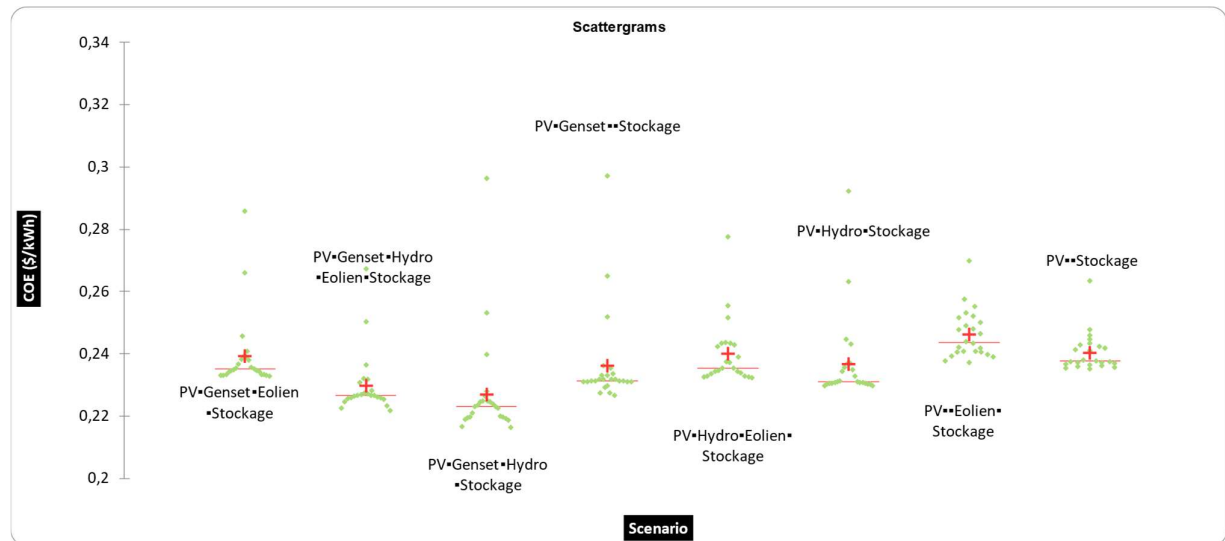


Figure 101. Comparaison des scénarios selon leur COE (source : Homer Energy)

4.3. Coût du système optimisé pouvant couvrir les besoins

Le système optimisé, pouvant couvrir les besoins du village a un coût d'installation d'environ 620 000 \$. Les générateurs d'électricité à énergie renouvelable nécessitent des investissements initiaux élevés (plus de 300 000 \$) et des coûts d'exploitation relativement faibles. Mais les systèmes hybrides avec des systèmes photovoltaïques présentent un bien plus grand intérêt que sans champ solaire.

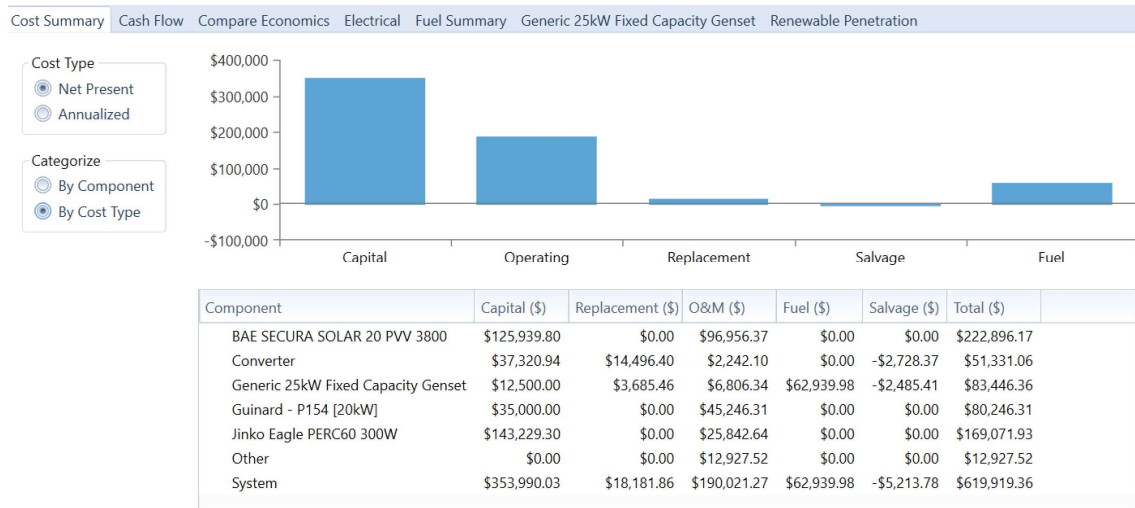


Figure 102. Coût du système hybride installé (source : Homer Energy)

4.4. Coût des différents équipements du système optimisé

Les coûts les plus importants du système hybride PV/ HYDROLIENNE/ BATTERIE/ GENSET sont générés par le parc batterie (223 000 \$) et ensuite les panneaux photovoltaïques (170 000 \$). Les coûts moyens sont générés par les générateurs diesels (84 000 \$) et hydrolienne (80 000 \$). Les convertisseurs d'énergie sont les moins coûteux (51 000 \$) parmi tous ces équipements.

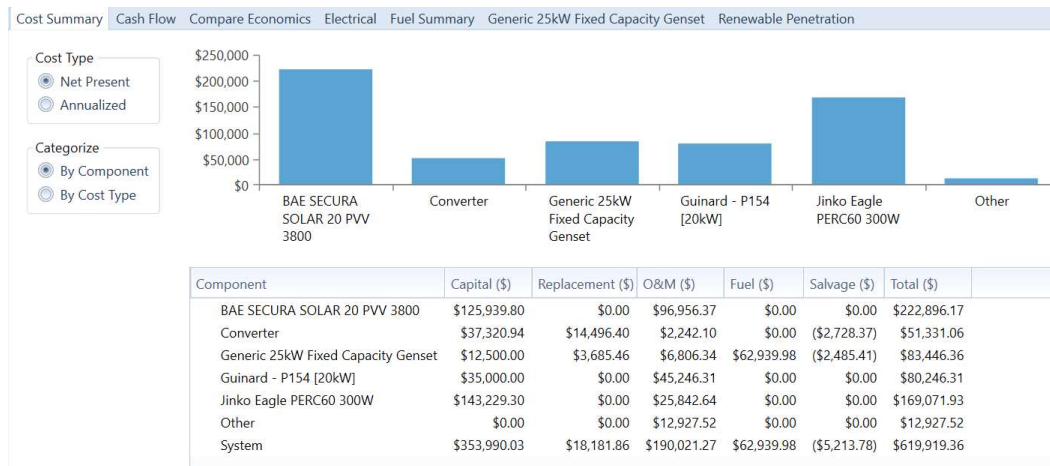
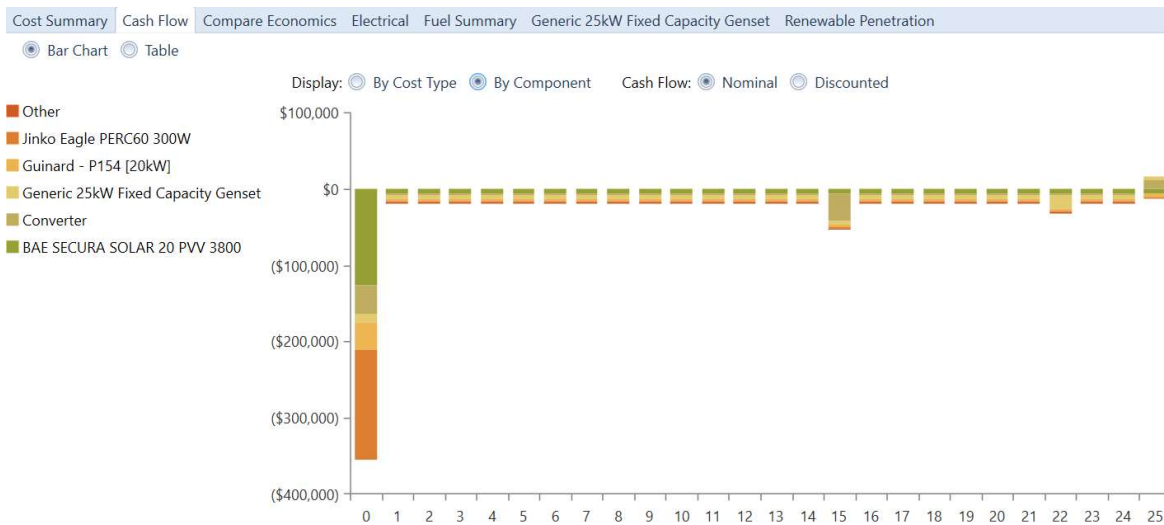


Figure 103. Coût des équipements du système (source : Homer Energy)

4.5. Durée de vie des équipements

La figure ci-dessous présente les flux de trésorerie chronologiques tout le long du cycle de vie du système. Le coût en capital est plus important la première année, car tous les composants du système doivent être installés au début du projet. Le coût de remplacement, surviendrait lorsque l'équipement doit être remplacé d'ici la fin de sa durée de vie. Comme le montre la figure ci-dessous, le coût de remplacement des stations de travail, des modules photovoltaïques et des batteries interviendrait au cours de la quinzième année, de la vingt-deuxième année et de la huitième année, respectivement. De plus, le coût stable de la consommation de carburant et du fonctionnement du système peut exister dans le système à micro-réseau autonome. Le système connecté au réseau a une propriété de flux de trésorerie similaire à celle du micro-réseau autonome, sauf que : 1) le coût d'achat de carburant a été remplacé par celui de l'énergie supplémentaire fournie par les réseaux externes, et 2) le coût de remplacement des batteries étendu aux treizièmes années



4.6. Part des énergies renouvelables dans la solution proposée

On peut s'assurer que la combinaison système PV-Hydrolienne-diesel-batterie est la conception la plus rentable dans les cas autonomes du point de vue du TNPC (Total Net Present Cost), qui présente une fraction élevée de l'énergie éolienne (WT) et une fraction modérée de l'énergie solaire (de puissance 1725 kW) combinée avec 400 batteries et l'énergie fossile. C'est également une combinaison respectueuse de l'environnement, car les émissions de polluants sont directement liées aux consommations de carburant, parmi lesquelles la consommation de diesel dans cette combinaison représente jusqu'à 41 % du système. Si un système électrique sans WT (Wind Turbine) a une plus grande capacité en énergie solaire photovoltaïque et en batterie (capacité solaire photovoltaïque augmentée à 4 fois et stock d'énergie augmentée à 5.5 fois), le système aurait un coût total de traitement maximum de 36,4 millions de dollars.

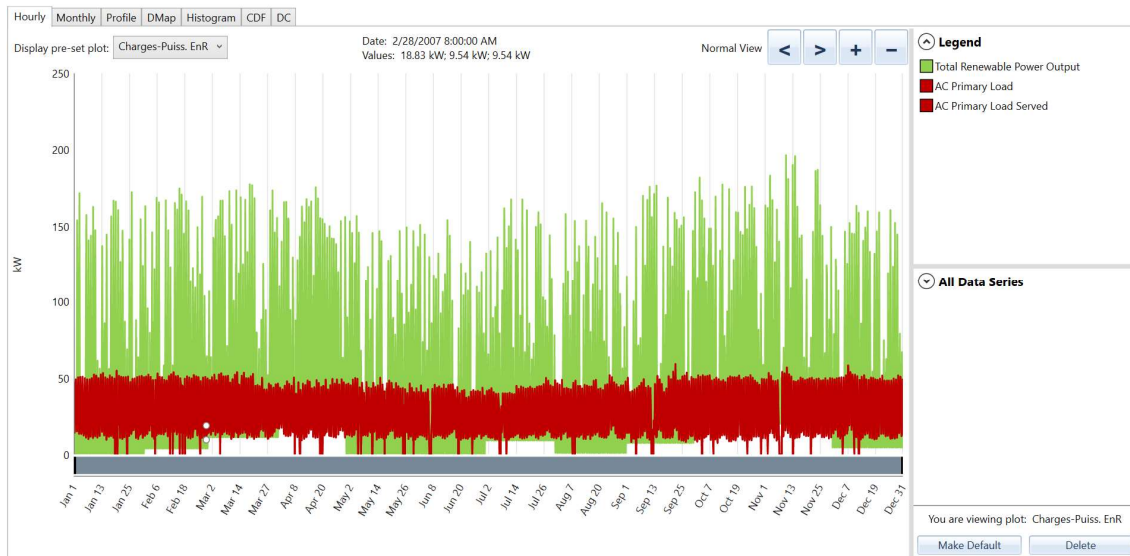


Figure 105. Répartition des quantités d'énergies utilisées pendant toute l'année (source : Homer Energy)

4.7. Simulation du scénario de production durant une année

La figure ci-dessous, nous montre une simulation de la production d'électricité de la solution hybride PV-Hydrolienne-Genset-Stockage. La production d'électricité pour couvrir les besoins se fera en majorité par le photovoltaïque et représente environ 76,5 % de la production. L'hydrolienne assurera les 19,9 % de production. Le générateur diesel Genset sera utilisé pour couvrir les besoins en cas de faible irradiation et de faible vitesse de courant. Il ne représente que 3 % de la production.

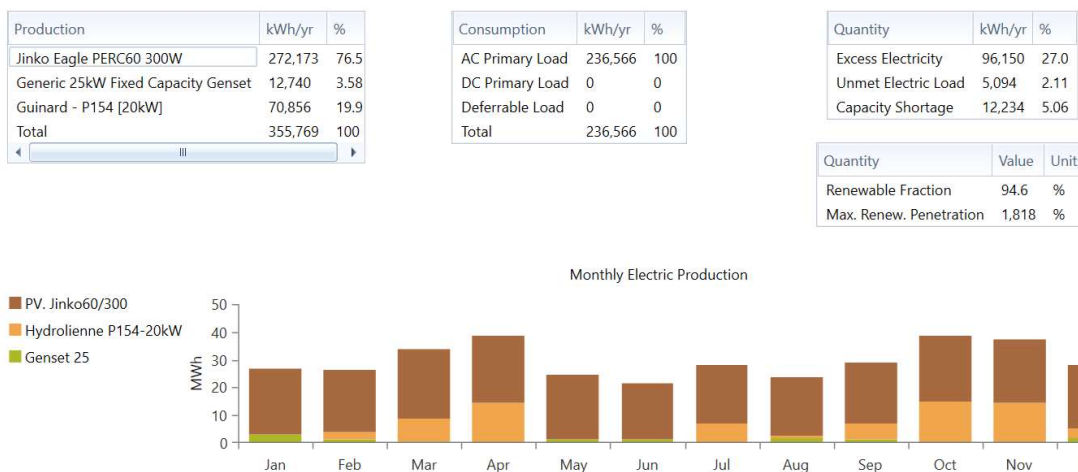


Figure 106. Scénario de simulation de la production du système durant une année (source : Homer Energy)

5. Discussion sur la distance d'extension du réseau à l'équilibre : Mini-réseau Vs Réseau interconnecté

5.1. Comparaison des coûts d'installation : Mini réseau vs Réseau interconnecté

Dans sa stratégie de développement du secteur électrique un plan directeur dédié à l'électrification rurale a été élaboré par le ministère de l'Energie.

Le coût du PDER (Plan Directeur de l'Electrification Rurale) est donné dans le Tableau 28 : Coût total du Plan Directeur de l'Electrification Rural - RCI [2015-2020] pour le scénario de référence 2015-2020. [Mise à jour de février 2018 – Document de référence]

Tableau 28 : Coût total du Plan Directeur de l'Electrification Rural - RCI [2015-2020]

<i>Sources : CI-ENERGIES - Rapport Développement du secteur de l'électricité de la Côte d'Ivoire - Document de Référence - Page 52/103 - Février 2018</i>	
Coût Total Plan Directeur Electrification Rurale [2015-2020] – Milliards XOF	578,4242
Principaux résultats	
<i>Nombre de localités à électrifier</i>	4968
<i>Nombre de pôles (regroupement)</i>	200
<i>Population couverte sur la période du projet [2015-2020]</i>	5 385 325
<i>Longueur de Réseaux MT (km)</i>	
Investissement (US \$)	\$993 907 240
1. Réseaux MT (Réseau HTA)	\$366 858 786
2. Renforcement HTA (Réseau HTA)	\$207 633 083
3. Réseaux BTA (Réseau de Distribution)	\$318 970 057
4. Transformateurs (Réseau de HTA)	\$59 126 157
5. Compteurs et raccordements électriques (Réseau de Distribution)	\$41 146 273
Indicateurs	
Coût du réseau de Distribution / localité (US \$)	\$84 389
Coût du réseau HTA / localité (M FCFA)	\$115 638
Investissement total / localité (US \$)	\$200 062
Investissement total / habitant (US \$)	\$185
Coût moyen de raccord / abonné (US \$)	\$3 517
Coût moyen / km réseau HTA (US \$)	\$51 292,644

La figure ci-dessous, nous montre que le coût capital du réseau interconnecté est de 51 292 US\$/km. Puis que le coût d'exploitation et de maintenance, est de 2 200 US\$/an/km. Enfin, elle nous montre que le coût de l'énergie du réseau interconnecté est de 0,15 US\$/kWh.

ADVANCED GRID  Name:

Simple Rates
 Real Time Rates
 Scheduled Rates
 Grid Extension

Grid Extension ⓘ

Capital cost (\$/km): ⓘ

O&M cost (\$/yr/km): ⓘ

Grid power price (\$/kWh): ⓘ

Figure 107. Eléments de coûts du réseau interconnecté - Prix unitaire du kWh (source : Homer Energy)

5.2. Distance d'extension du réseau à l'équilibre : Mini-réseau Vs Réseau interconnecté

La distance d'extension du réseau à l'équilibre est la distance par rapport au réseau qui rend le coût actuel net de l'extension du réseau égal au coût actuel net du système autonome. **Plus loin du réseau, le système autonome est optimal.** Plus près du réseau, l'extension du réseau est optimale.

HOMER calcule la distance d'extension du seuil de rentabilité en utilisant l'équation suivante :

$$D_{grid} = \frac{C_{NPC} \cdot CRF(i, R_{proj}) - C_{power} \cdot E_{demand}}{C_{cap} \cdot CRF(i, R_{proj}) + C_{om}} \quad (57)$$

Où :

C_{NPC} = coût total net actuel du système d'alimentation autonome [\\$]

$CRF(i, R_{proj})$ = facteur de récupération du capital

i = taux d'actualisation réel [%]

R_{proj} = durée de vie du projet [année]

E_{demand} = demande électrique annuelle totale (primaire plus différable) [kWh / an]

C_{power} = coût de l'électricité du réseau [\$/ kWh]

C_{cap} = coût en capital de l'extension du réseau [\$/ km]

C_{om} = Coût d'exploitation et de maintenance de l'extension du réseau [\$/ an / km]

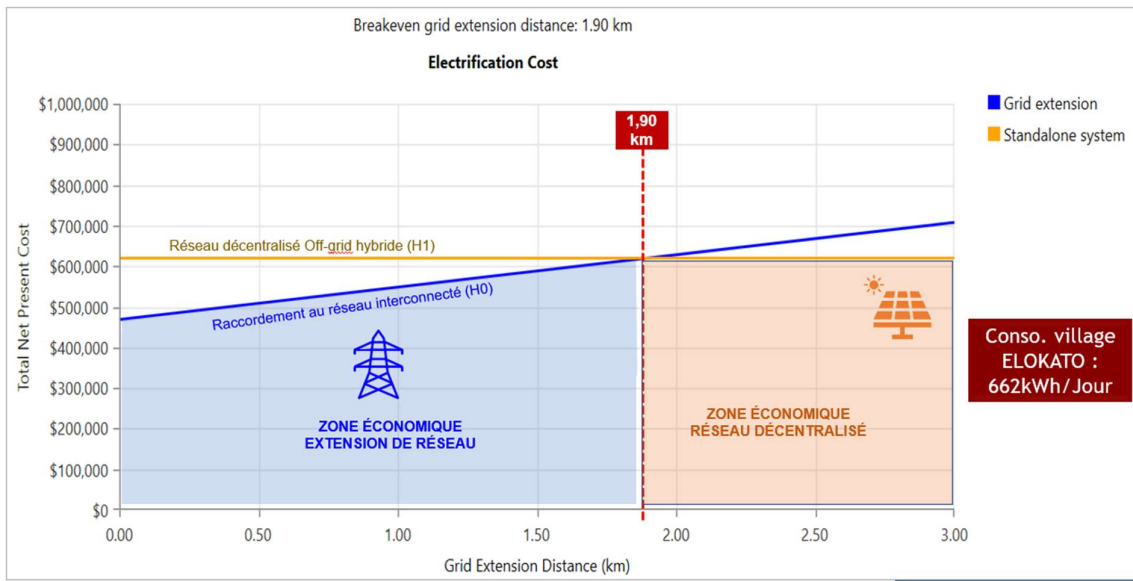


Figure 108. Le coût du seuil de rentabilité de l'extension du réseau électrique comparé au système hybride [Source : TOURE 2020]

La figure ci-dessus montre le coût du seuil de rentabilité de l'extension du réseau électrique comparé aux systèmes hybrides analysés. Le système hybride PV/hydrolienne/Batterie/Genset n'est rentable que si la distance du village au poste de transformation est supérieure à 1.90 km.

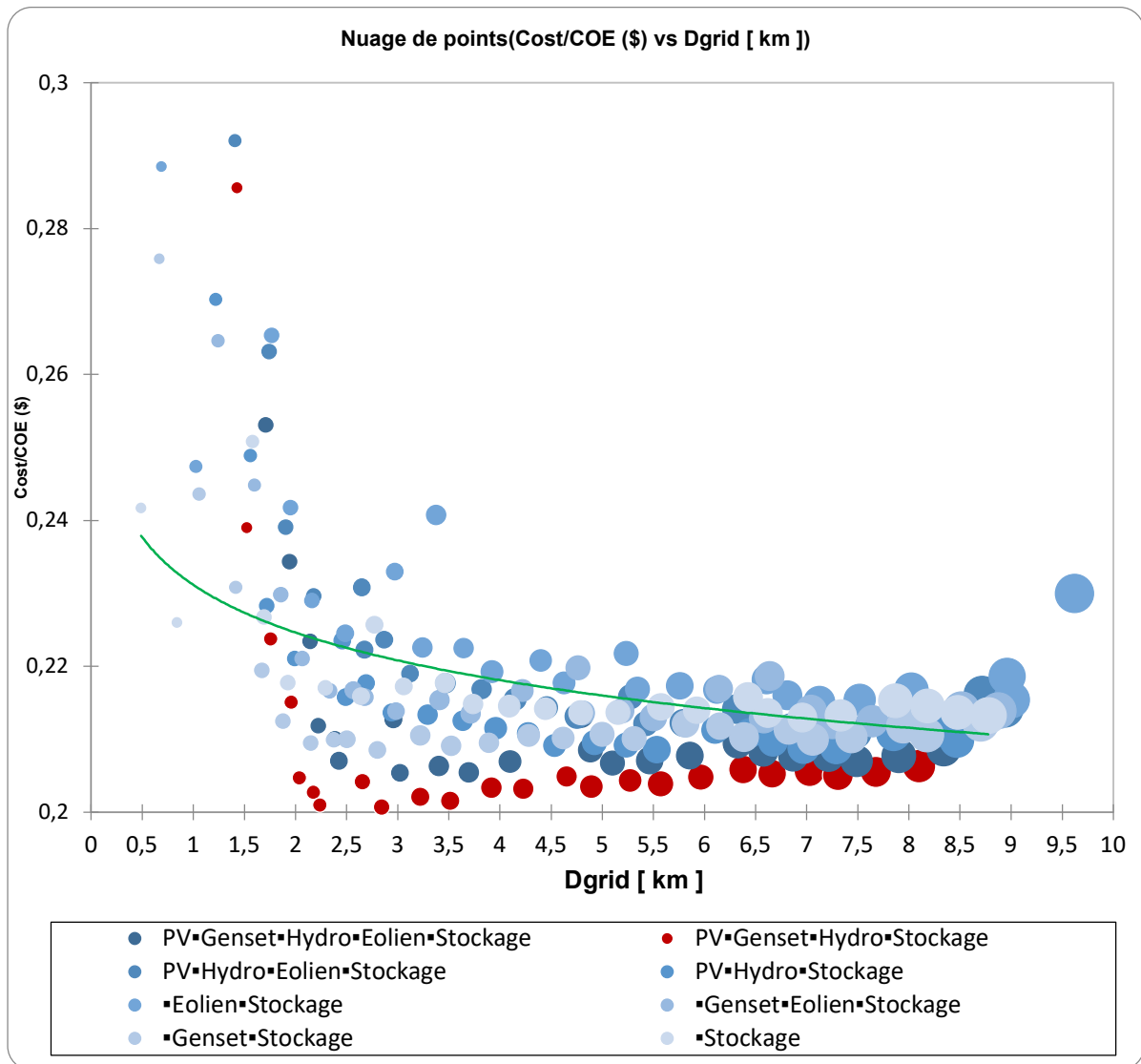


Figure 109. Comparaison du coût en fonction de la distance d'extension [Source : TOURE 2020]

L'analyse montre que de :

- 0 à 1,5 km : le coût actualisé de l'énergie de la solution PV/Hydro/Genset/Stockage est de 0,283 \$/kWh ;
- 1,5 et 2 km, nous remarquons une baisse du coût actualisé de l'énergie (LCOE entre 0,24 et 0,21 \$/kWh) de la solution PV/Genset/Hydro/Stockage.
- Pour une distance supérieure à 2 km, le coût actualisé de l'énergie de la solution PV/Hydro/Genset/Stockage devient stable et est d'environ 0,203 \$/kWh.

Nous pouvons donc dire que pour une distance inférieure à 1,5 km, notre solution est plus chère par rapport au réseau interconnecté et les autres solutions. Mais pour une distance supérieure à 2 km, une baisse de 28 % du coût de l'énergie de la solution **PV/Hydro/Genset/Stockage**. Notre solution est donc plus optimale au bout de 2km, par rapport au système interconnecté.

5.3. Les énergies renouvelables accélérateur de l'électrification rurale décentralisée

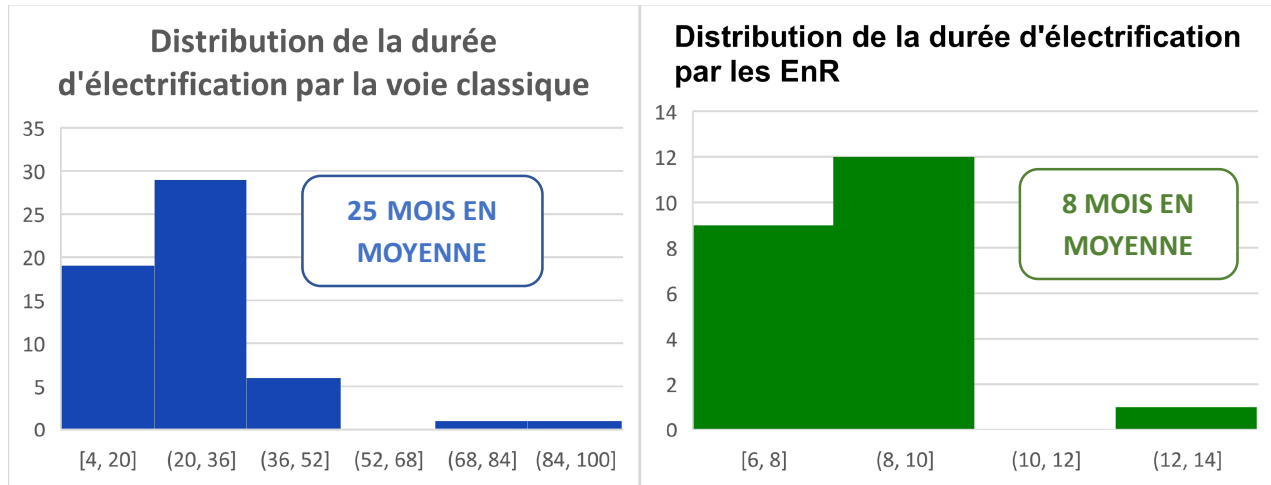


Figure 110. Comparaison du coût en fonction de la distance d'extension [Source : TOURE 2020]

Nous nous proposons de montrer qu'il est plus rapide d'électrifier des localités à partir des EnR que par la voie classique. Pour ce faire, nous avons collecté les données relatives (notamment la date de début des travaux et la date de fin des travaux) aux projets d'électrification par voie classique et par les EnR. Ces données nous ont permis de déterminer la durée de de chaque projet. A partir de ces données de durée, nous avons construit les histogrammes ci-dessus.

▪ **Observations :**

Nous observons que la majorité des projets d'électrification par la voie classique ont une durée comprise entre **20 et 36 mois** (avec une **moyenne de 25 mois** et un **écart-type de 17 mois**), **soit pratiquement 2 ans**, alors que ceux par les EnR ont une durée comprise entre **8 et 10 mois** (avec une **moyenne de 8 mois** et un **écart-type de 2 mois**), soit moins d'un an.

Par ailleurs, en raison de cette facilité de déploiement des solutions d'EnR et de leur caractère distribué, toutes les localités considérées ici ont été électrifiées au cours de la même année.

▪ **Rappel des formules :**

Soit d_i la durée d'un projet i et supposons que nous avons N pour l'une des 2 voies (classique et EnR).

La moyenne des durées se calcule comme suit :

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^N \frac{d_i}{N} \quad (58)$$

L'écart-type des durées se calcule comme suit :

$$\sigma_d = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(d_i - \bar{d})^2}{N - 1}} \quad (59)$$

6. Conclusion

Dans notre étude de cas, après les différentes simulations, HOMER PRO a identifié 13 scénarios et configurations jugés les plus rentables, à partir des paramètres et des configurations choisis.

Le scénario le plus rentable pour couvrir les besoins est le système hybride PV/hydrolienne/Genset/Stockage. Notre système à caractère renouvelable nécessite donc des investissements initiaux élevés de l'ordre de 620 000 dollars et d'un coût d'énergie relativement faible de l'ordre de 0,203 dollars/kWh.

Les coûts les plus importants de notre système sont générés par le parc batteries puis viennent les panneaux photovoltaïques. Notre système hybride **PV/hydrolienne/Genset/stockage** à un coût d'investissement plus élevé mais devient rentable si la distance du village au poste de transformation est supérieure à **1,90 km**.

Les résultats montrent que notre système peut couvrir les besoins en électricité d'un village et être une solution pour l'électrification rurale décentralisée. Mais de manière pragmatique, pour les villages ne disposant pas de cours d'eau, la solution la plus réaliste est le **PV/Genset/Batterie**.

L'étude montre également que la maîtrise de la demande par une démarche d'économie d'énergie pour optimiser la production est un levier de consolidation de la viabilité économique du système.

Conclusion générale

Nous observons que l'accès à l'énergie est inégalement réparti dans les pays africains. Ce manque de service énergétique de base affecte les possibilités de développement.

En milieu rural, le taux d'accès à l'électricité reste particulièrement insuffisant. Cela s'explique d'une part par la faible densité de population dans ces zones (moins de 500 habitants), où les villages forment souvent des habitats dispersés non lotis parfois, et d'autre part du fait que ceux-ci sont éloignés à plus de 20 km des centres urbains et du réseau national interconnecté.

L'un des enjeux majeurs pour accélérer l'électrification rurale est de proposer une offre de service énergétique qui s'adapte aux besoins locaux et qui se rapproche des zones de consommations. Cela consistera à la construction d'infrastructures de production décentralisées utilisant les ressources disponibles in-situ, où il ne sera plus nécessaire de construire des réseaux de transport d'électricité HTB et/ou HTA pour alimenter ces villages.

Pour ce faire, une meilleure caractérisation des besoins devient donc un critère essentiel de dimensionnement des systèmes de production décentralisés, à base d'énergies de sources renouvelables ou en hybridation avec d'autres sources ; faciles à mettre en œuvre avec diligence. Notre travail de thèse est une contribution prépondérante à cet effet.

Cette thèse nous a permis de :

- *Etablir des profils de charge fiables par enquête et par mesurages dans plusieurs villages de Côte d'Ivoire ;*
- *Etudier la faisabilité de l'électrification rurale via les mini-réseaux décentralisés avec les énergies de sources renouvelables comme alternative crédible pour accélérer l'électrification. Nous avons utilisé HOMER ENERGY à cet effet ;*
- *Elaborer, pour la première fois en Côte d'Ivoire, une cartographie des consommations spécifiques par jour par ménage, pour servir de référentiel pour les autres chercheurs. A cet effet, nous avons utilisé une base de données de la CIE (plus de 600 000 ménages).*

A l'issue de nos travaux, dans le cadre de l'électrification rurale décentralisée, la solution la plus optimale identifiée par le logiciel de simulation énergétique HOMER ENERGY est la configuration **PV/Hydrolienne/Genset/batterie**, d'un coût d'investissement initial de 620 000 \$(US) et d'un coût du kWh de 0,203 \$(US). Ce scénario et sa variante **PV/Genset/batterie**, pour les localités qui n'ont pas de cours d'eau, sont des alternatives crédibles à l'électrification rurale par extension de réseaux. Bien que, ces solutions aient des coûts d'investissement initiaux plus élevés que les coûts d'extension de réseaux, elles présentent néanmoins des coûts d'exploitation et des impacts environnementaux faibles. Elles deviennent plus rentables lorsque les villages à électrifier sont à une distance supérieure à 1,90 km du réseau national interconnecté.

Ces solutions devraient être déployées dans les zones rurales africaines qui disposent d'importants gisements de ressources énergétiques à caractères renouvelables. Ces dernières années ont vu se développer les technologies de stockage d'énergie, à l'aune de l'émergence des véhicules électriques. Ce développement est devenu une opportunité de déploiement des solutions d'électrification rurale décentralisée, par les sources de production hybrides (photovoltaïques, stockages...). Pour les scénarii envisagés, il est de toute nécessité d'intégrer également des solutions de type biomasse si ce secteur se développe davantage.

Les objectifs du gouvernement Ivoirien pour un taux de couverture de 100 %, à l'horizon 2030, sont ambitieux et réalisables, si les énergies renouvelables sont intégrées dans la chaîne de valeur de l'électrification rurale, comme alternative crédible et viable dans les projets et les politiques d'électrification.

En perspective, il est d'opportunité d'établir un modèle énergétique robuste qui tient compte des spécificités socio-économiques de chaque village (modes de vie et de consommations). A cet effet, l'approfondissement des enquêtes terrains et l'identification précise du potentiel énergétique de chaque région est une nécessité (atlas des vents, ...), pour mieux caractériser la demande de façon plus précise, comme abordé dans le village pilote d'Elokato par enquêtes et par mesurages, de nuit comme de jour. Intégrer également des solutions de type biomasse au mix énergétique, si ce secteur se développe davantage. Et enfin, réaliser une étude d'optimisation des centrales autonomes hybrides pour garantir leur performance.

En définitive, pour la fiabilité de la carte de référence (kWh/ménage/jour), que nous avons élaboré, pour la 1^{ère} fois en Côte d'Ivoire, dans le cadre de notre étude grâce aux villages proxys (villages déjà électrifiés à proximité des villages non-électrifiés), il conviendra de toute nécessité de faire la mise à jour régulière de cette carte, pour un dimensionnement plus optimal et plus précis des mini-réseaux dans chaque région.

Références

- [1] UNITED NATION. *Transforming our world : The 2030 agenda for sustainable development*, [En ligne], New York, World Bank, Septembre 2015, [référence du Décembre 2021], (<https://sustainabledevelopment.un.org/>)
- [2] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE. *World Energy Outlook 2020*. [En ligne], Paris, AIE, Octobre 2020, [référence du Décembre 2021], (<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>)
- [3] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE. *World Energy Outlook 2019*. [En ligne], Paris, AIE, Novembre 2019, [référence du Février 2020], (<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>)
- [4] SUSTAINABLE ENERGY FOR ALL. *Sustainable Energy for All Analysis progress, 2021*. [En ligne], New York, August 2021, [référence du Février 2022], (<https://www.seforall.org/publications/sustainable-energy-for-all-annual-report-2021>)
- [5] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE. *World Energy Outlook 2021*. [En ligne], Paris, AIE, Octobre 2021, [référence du Décembre 2021], (<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>)
- [6] IEA, IRENA, UNSD, BANQUE MONDIALE, OMS. *Suivi de l'ODD 7 : les progrès énergétiques*. [En ligne], Washington DC, Banque mondiale, Juin 2022, [référence du Juillet 2022], (https://trackingsdg7.esmap.org/data/files/download-documents/sdg7-report2022-full_report.pdf)
- [7] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE. *Data and statistics : Germany Electricity 2020*. [En ligne], Germany, AIE, Février 2020, [référence du Février 2021], (<https://www.iea.org/reports/germany-2020>)
- [8] DEBOYSER B, *Revolution énergétique : En Allemagne, la part du solaire dans le mix électrique, Revolution énergétique*, [En ligne], 2020, [référence de Septembre 2021]
- [9] Global Wind Atlas, [référence du Mars 2021], <https://globalwindatlas.info/fr>
- [10] PRINSLOO J. AND AL. *Scoping exercise to determine load profile archetype reference shapes for solar co-generation models in isolated off-grid rural African villages. Journal of Energy in Southern Africa*, [en ligne], 2016, [référence du février 2018].
- [11] NAMAGANDA J.K AND AL. *Improving the Load Estimation Process in the Design of Rural. Energies*, [en ligne], 2021, [référence du février 2021]

- [12] CRISTINA D. AND AL. *Estimation des profils de charge d'éclairage horaire des ménages ruraux en Afrique de l'Est en appliquant une caractérisation basée sur les données du comportement des occupants et de la propriété des dispositifs d'éclairage. Development engineering*, [en ligne], 2021, volume 6, [référence du Mars 2021]. (<https://doi.org/10.1016/j.deveng.2021.100073>)
- [13] INNOGENCE CONSULTING, *État des lieux du marché des kits solaires en Afrique : Acteurs, Marchés, Investissements, Produits et Tendances*. p. 34p, 2018.
- [14] L'INITIATIVE REGIONALE POUR L'ENERGIE DURABLE. *Stratégie de résolution durable de la crise de l'énergie électrique dans les Etats membres de l'UEMOA*. [En ligne], IRED, 2006, [référence du Avril 2018].(<http://www.uemoa.int/fr/>)
- [15] AUTORITE NATIONALE DE REGULATION DU SECTEUR DE L'ELECTRICITE DE COTE D'IVOIRE, *Rapport d'activité Annuel 2020*, Abidjan, ANARE-CI, 2020, 154 p.
- [16] Institut National de Statistique, [référence du Mars 2018], <http://www.ins.ci/>
- [17] CENTRE REGIONAL DES POUR LES ENERGIES RENOUVELABLES ET L'EFFICACITE ENERGETIQUE DE LA CEDEAO, *Plan d'Actions National des Energies Renouvelables (PANER)*, [En ligne], CERECE, 2016, [référence du Janvier 2018], <https://www.ecreee.org/>
- [18] COMPAGNIE IVOIRIENNE D'ELECTRICITE, *Rapport d'activité Annuel 2020*. Abidjan, CIE, 2020, 120 p.
- [19] CATHERINE FOURNET-GUERIN, *L'Afrique des idées reçues, Géographie et cultures*, [En ligne], 2007, p. 62, [référence du Avril 2018]
- [20] CATHERINE, T ; COLLE, J. *La transition énergétique : 2020-2050 : un avenir à bâtir, une voie à tracer, Les éditions du journal officiel*. [En ligne], 2013, p.122, [référence du Avril 2018]
- [21] CEDEAO/UEMOA. *Livre blanc pour une politique régionale. Sur l'accès aux services énergétiques des populations rurales et périurbaines pour l'atteinte des Objectifs du Millénaire pour le Développement*. [En ligne], CEDEAO/UEMOA, Janvier 2006, [référence du Avril 2018], (<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>)
- [22] INSTITUT DE L'ENERGIE ET DE L'ENVIRONNEMENT DE LA FRANCOPHONIE, *Parlement de la francophonie, La diversité culturelle à*

- l'Université*, [En ligne], 2008, [référence du Mars 2018], (<http://apf.francophonie.org/IMG/pdf/pf12.pdf>)
- [23] ECREEE, *Rapport de base pour la Politique en matière d'énergies renouvelables de la CEDEAO : PERC*. [En ligne], ECREEE, 2012, [référence du Avril 2018], 216 p.
- [24] CENTRE REGIONALDES POUR LES ENERGIES RENOUVELABLES ET L'EFFICACITE ENERGETIQUE DE LA CEDEAO, *Plan d'Actions National des Energies Renouvelables (PANER)*, [En ligne], CEREC, 2016, [référence du Janvier 2018], (<https://www.ecreee.org/>)
- [25] CODE DE L'ELECTRICITE DU SECTEUR ELECTRIQUE IVOIRIEN, *LOI N° 2014-132 DU 24 MARS 2014 PORTANT CODE DE L'ELECTRICITE*, 15p
- [26] CEREEC. *Atelier de Validation Regional sur utilisation des Systèmes d'Informations Geographies (SIG) dans le secteur de l'énergie : la planification de l'énergie et l'électrification rurale (Côte d'Ivoire)*. [En ligne], Dakar, CEREEC, Juillet 26-28, 2016, [référence du Avril 2018].(<https://www.ecreee.org/>)
- [27] CEREEC. *Rapport d'étape sur les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique de la CEDEAO*, [En ligne], CEREEC, 2014, [référence du Avril 2018]. (http://www.ecreee.org/sites/default/files/documents/basic_page/ren21_fr.pdf)
- [28] Côte d'Ivoire Energies, [référence du Mars 2021], (<https://www.cinergies.ci/>)
- [29] KAMGA, JoSEPh ; ATINOUE, Amadou. *Droit et politiques de l'énergie en Afrique subsaharienne : les tendances d'harmonisation. Revue des Juristes de Sciences Politique*. [En ligne], 2013, volume Automne N°8, p16. [Référence du Janvier 2018]
- [30] HEURAUX, Christine ; GUINEBAULT Alain. *Énergie, croissance et développement durable*, Paris, 17 décembre 2010
- [31] Institut numérique, [référence du Mai 2018], (<https://www.institut-numerique.org/>)
- [32] DJUIKOM, Marthe. *Impacts des initiatives et stratégies locales d'électrification rurale : Gambie-Cameroun. Conférence internationale, axée sur la chronologie des initiatives et travaux pour l'énergie rurale en Afrique, Québec*, 2008, p. 13
- [33] CLUB DES AGENCES ET STRUCTURES AFRICAINES EN CHARGE DE L'ÉLECTRIFICATION RURALE (), *Le Partenariat Public-Privé dans les programmes d'électrification rurale en Afrique*. [En ligne], Club-ER, Décembre 2010, [référence du Avril 2018], (<https://www.club-er.org/ressources/publications/publications-thematiques-22.html>)

- [34] MUNASINGHE, Mohan. *Environmental issues and economic decisions in developing countries*. *World Development*, [en ligne], 1993, Volume 21, Issue 11, pp. 1729-1748, [référence du Mai 2018]. ([https://doi.org/10.1016/0305-750X\(93\)90080-S](https://doi.org/10.1016/0305-750X(93)90080-S))
- [35] BERNARD and TORERO, *A Methodological Note on Using a Voucher-Based Approach to Assess the Impact of Infrastructure Projects*. *International Food Policy Research Institute*, [en ligne], 2011, p. 1078, [référence du Mai 2018].
- [36] BOUDIA M. *Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique*. Mémoire de magister, Ecole Doctorale, 2010, p. 109.
- [37] Solaire off-grid, [référence du 15 Mars 2021], <http://www.solaire-offgrid.com/le-solaire-et-ses-applications/architectures-solaire-photovoltaique/>
- [38] KALOGIROU Soteris A, *Solar thermal collectors and applications*, *Progress in Energy and Combustion Science*, [en ligne], 2004, p. 231-295, [référence du Mai 2018]. ([doi:10.1016/j.peccs.2004.02.001](https://doi.org/10.1016/j.peccs.2004.02.001))
- [39] MURTHY K.S.R, RAHI OP. *A comprehensive review of wind resource assessment*. *Renew Sustain Energy*. [en ligne], 2017, vol. 72, pp. 1320-1342, [référence du Mai 2018]. ([DOI: 10.1016/j.rser.2016.10.038](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.038))
- [40] TONG W , *Wind power generation and wind turbine design technology and engineering*. *WIT Press*, [en ligne], 2010, pp. 6-19, [référence du Mai 2018].
- [41] CHEN, L ; PONTA F.L., LAGO, L.I. *Perspectives on innovative concepts in wind-power generation*. *Energy for sustainable development*. [En ligne], 2011, vol. 15, p. 398–410, [référence du Mai 2018]
- [42] AMIGUN B, MUSANGO JT, STAFFORD W, *Biofuels and sustainability in Africa*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [En ligne], 2011, vol. 15, pp. 1360-72, [référence du Mai 2018]
- [43] INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, *Renewable Energy and Jobs- Annual Review*. [En ligne], IRENA, MAY 2013, [référence du Avril 2018], (<https://www.irena.org/>)
- [44] BENBOUZA Chaouki, *Production et performance des capteurs hybrides (PV/T) à eau intégrés dans le bâtiment-cas de l'Algérie*, Mémoire de magister, Université de Tlemcen faculté de technologie Département de Génie Mécanique, 2016. p.77.

- [45] GHELLAB A et al., *Les retombées technicoéconomiques d'un capteur hybride photovoltaïque /thermique à air*, *Revue des Energies Renouvelables*, [En ligne], vol. 16, pp. 425-440, 2013. [référence du Mai 2018]
- [46] RETERI Ahmed, *Etude du refroidissement des capteurs hybrides photovoltaïque-thermique (PV/T) à l'aide des MCP*, [En ligne], 2013. [référence du Mai 2018]
- [47] ELHADIDY et al., *Feasibility of hybrid (wind + solar) power systems for Dhahran, Saudi Arabia*. *Renewable Energy*, [En ligne], 1999, vol. 16, pp. 970-976. [référence du Mai 2018].
- [48] KHELIF ; FATNASSI, L. *The hybrid power stations. 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, [En ligne], Barcelona, Spain, 6-10 June 2005, pp. 2947-2951, [référence du Mai 2018]
- [49] BERNAL-Agustín et al. *Design of isolated hybrid systems minimizing costs and pollutant emissions*. *Renewable Energy*, [En ligne], vol. 31, pp. 2227–2244, 2006. [référence du Mai 2018]
- [50] BHAVE A. *Hybrid solar-wind domestic power generating system-a case study*. *Renewable Energy*, [En ligne], 1999 , vol. 17, pp. 355-358. [référence du Mai 2018].
- [51] EL-TAMALY et al., *Impact of interconnection photovoltaic/wind system with utility on their reliability using a fuzzy scheme*. *Renewable Energy*, [En ligne], 2006, vol. 31, pp. 2475–2491, [référence du Mai 2018]
- [52] ELHADIDY, M.A. *Performance evaluation of hybrid (wind/solar/diesel) power systems*. *Renewable Energy*, [en ligne], Juillet 2002, Vol. 26, Issue 3, p 401-413. [référence du Mai 2018]
- [53] STEINHÜSER et al. *Photovoltaics and fuel cells for a decentralised power supply at "Rappenecker Hof". 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Paris, France, 7-11 June 2004, , pp. 2278-2280.
- [54] PINHO et al. *Wind-PV-diesel hybrid system for the electrification of the village of Sao Tome-municipality of Maracana-Brazil. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Paris, France , 7-11 June 2004, pp. 3511-3514.
- [55] THAIN I et al. *Hybrid geothermal-biomass power plants: applications, designs and performance analysis. Proceedings of the World Geothermal Congress*, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015, p. 17.
- [56] ENERGY EFFICIENCY COUNCIL, *National Energy Efficiency Conference*, Melbourne, Australia, 17-18 Novembre 2015, .

- [57] VALDIMARSSON P. *Geothermal power generation. Hessen Energy, Enex, University of Iceland*, 2008. [référence du Mai 2018]
- [58] AYUB, Mohammad ; MITSOS, Alexander ; GHASEMI, Hadi. *Thermo-economic analysis of a hybrid solar-binary geothermal power plant. Energy*, [en ligne], 2015. Volume 87, p. 326-335 [référence du Mai 2018]
- [59] ANDERSON D and LUND J. *Direct utilization of geothermal energy: a technical handbook, Medium ED*, [En ligne], 1979, p. 249, [référence du Mai 2018]
- [60] LUND, J ; BOYD, T. *Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. In: Proceedings of the Conference Direct utilization of geothermal, worldwide review*, Melbourne, Australia, 2015, pp. 19-25.
- [61] CENTRE REGIONALDES POUR LES ENERGIES RENOUVELABLES ET L'EFFICACITE ENERGETIQUE DE LA CEDEAO, *Les Énergies Renouvelables en Afrique de l'Ouest*, [En ligne], CERECEC, 2012, [référence du Avril 2018], <https://www.ecreec.org/>
- [62] WIJAYA and TEZUKA, *Une étude comparative des caractéristiques de consommation d'électricité des ménages en Indonésie : une analyse technico-socio-économique, Énergie pour le développement durable*, [En ligne], 2013, pp. 596 - 604, [référence du Mai 2018]
- [63] COOK, Paul. *Infrastructure, rural electrification and development, Energy for Sustainable Development*, [En ligne], vol. 15, pp. 304-313, [référence du Mai 2018]. ([DOI:10.1016/j.esd.2011.07.008](https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.07.008))
- [64] OZTURK , *A literature survey on energy–growth nexus*,» *Energy Policy*. [En ligne], 2010, vol. 38, pp. 340-349. [référence du Mai 2018]. (doi.org/10.1016/j.enpol.2009.09.024)
- [65] WOLDE, Yemane. *Electricity consumption and economic growth: a time series experience for 17 African countries*, *Energy policy*, [En ligne], 2006, vol. 34, pp. 1106-1114, 2006. [référence du Mai 2018]. (doi.org/10.1016/j.enpol.2004.10.008)
- [66] AHLBORG H, et al.. *Moteurs et obstacles à l'électrification rurale en Tanzanie et au Mozambique - technologies d'extension du réseau, hors réseau et d'énergie renouvelable. Énergies renouvelables*, [En ligne], 2014, pp. 117 – 124, [référence du Mai 2018].
- [67] DIAZ, P ; ARIAS, CA ; PEÑA, R. ; SANDOVAL, D. *Loin du réseau : une étude de terrain sur l'électrification rurale. Énergie renouvelable*, [En ligne], 2010, pp. 2829 - 2834, [référence du Mai 2018].

- [68] MULDERA, P, TEMBE, J. *L'électrification rurale dans un monde imparfait : une étude de cas au Mozambique*, *Energy Policy*, [En ligne], 2008, vol. 36, pp. 2785-2794, [référence du Mai 2018].
- [69] CENTRE REGIONALDES POUR LES ENERGIES RENOUVELABLES ET L'EFFICACITE ENERGETIQUE DE LA CEDEAO, *Les Énergies Renouvelables en Afrique de l'Ouest*, [En ligne], CEREEC, 2012, [référence du Avril 2018], <https://www.ecreee.org/>
- [70] HARTVIGSSON ; EHNBERG ; AHLGREN ; MOLANDER. Évaluation des profils de charge dans les mini-réseaux : un cas en Tanzanie. *Power Engineering Conference (UPEC), 50th International Universities*, United Kingdom 2015, pp. 1 – 5. [référence du Mai 2018].
- [71] SARANGI, G.K et al. *Poverty Amidst Plenty: Renewable Energy-Based Mini-Grid Electrification in Nepal*. *Green Energy and Technology*, [en ligne], 2014, pp. 343 – 371. [référence du Mai 2018].
- [72] CROSS ; GAUNT. *Application des courbes de charge horaire résidentielle rurale dans la modélisation énergétique*, *Conférence IEEE Power*
- [73] TERRADO, CABRAAL , MUKHERJEE, *Orientations opérationnelles pour le personnel du Groupe de la Banque mondiale chargé de la conception de projets d'électrification rurale hors réseau durables : principes et pratiques*, *Banque mondiale* , [en ligne], 2008, Washington DC. [référence du Mai 2018].
- [74] NFAH EM et al., *Simulation des options de production hors réseau pour les villages reculés du Cameroun*, *Renouveler. Énergie*, [En ligne], 2008, pp. 1064 – 1072. [référence du Mai 2018].
- [75] SEN R ; BHATTACHARYYA. *Production d'électricité hors réseau avec des technologies d'énergie renouvelable en Inde : une application de HOMER*, *Énergies renouvelables*. [En ligne], 2014, p 388-398. [référence du Mai 2018].
- [76] BOAIT et al. *Estimation de la diversité de la demande et du profil de la demande quotidienne pour l'électrification hors réseau dans les pays en développement*, *Énergie pour le développement durable*. [En ligne], 2015, p 135-141. [référence du Mai 2018].
- [77] Energyteam, [référence du Octobre 2020], <https://www.energyteam.it/>
- [78] Homer Energy Pro, [référence du Octobre 2020], <https://www.homerenergy.com/>

Liste des tableaux

Tableau 1. Présentation des plans directeurs [Source : CI-ENERGIES, 2016]	30
Tableau 2. Programmes d'électrification rurale [Source : CI-ENERGIES, 2016].....	33
Tableau 3: Réseau de distribution en moyenne tension (HT) et en basse tension (BT) des niveaux de tension de 220 V et 380 V [Sources : CI-ENERGIES et CIE].	39
Tableau 4. Comparaison des postes sources HTB/HTA [31]	41
Tableau 5. Nombre de clients et taux d'accessibilité [Source : CIE]	42
Tableau 6 : Avantages et inconvénients des différentes technologies du CSP	55
Tableau 7 : Applications, technologies et type de circulation des CSP	56
Tableau 8: Avantages et inconvénients des éoliennes horizontales et verticales	60
Tableau 9. Technologies disponibles avec leur potentiel d'application en Côte d'Ivoire (source : CI-Energies)	82
Tableau 10. Appareils susceptibles d'être utilisés pour chaque usage.....	90
Tableau 11. Répartition des consommations (source : Toure 2019)	92
Tableau 12. Récapitulatifs des équipements à usage individuel du village d'Elokato	97
Tableau 13. Puissance électrique et consommation journalière des équipements.....	98
Tableau 14. Puissance électrique de l'éclairage public	103
Tableau 15 : Type d'équipements du ménage à faible consommation [Source : TOURE, 2020]	106
Tableau 16 : Répartition des consommations des équipements par tranche horaire [Source : TOURE, 2020]	107
Tableau 17 : Type d'équipements du ménage à moyenne consommation [Source : TOURE, 2020]	108
Tableau 18: Répartition des usages par tranche horaire pendant toute la journée [Source : TOURE, 2020] .	109
Tableau 19: Type d'équipements du ménage à forte consommation [Source : TOURE, 2020]	110
Tableau 20 : Répartition des usages par tranche horaire pendant toute la journée [Source : TOURE, 2020]	111
Tableau 21 : Répartition des usages par tranche horaire pendant toute la journée du village d'Elokato [Source : TOURE, 2020]	113
Tableau 22 : Répartition par tranche horaire des équipements à usages communautaires pendant toute la journée du village d'Elokato [Source : TOURE, 2020].....	117
Tableau 23 : Répartition par tranche horaire des équipements à usages communautaires pendant toute la journée du village d'Elokato [Source : TOURE, 2020].....	118
Tableau 24 : Equipements des ménages selon les différentes catégories des besoins domestiques Source : TOURE, 2020	121
Tableau 25 : Segmentation des usages domestiques (Source : TOURE, 2020).....	122
Tableau 26 : Caractéristiques et coût des composants photovoltaïques.....	169
Tableau 27. Résultats d'optimisation classés en fonction de différentes configurations pour mini-réseau Elokato (source : Homer Energy)	180
Tableau 28 : Coût total du Plan Directeur de l'Electrification Rural - RCI [2015-2020].....	184

Liste des figures

Figure 1. Émissions des différentes sources d'énergie au long de leur cycle de vie (source : IPCC)	18
Figure 2. Energie produite par chaque centrale hydraulique et thermique [Source : CIE]	34
Figure 3. Répartition de la production et de la consommation brutes en 2020 [Source : CIE]	35
Figure 4: construction et l'intensification des extensions de réseaux HTA/BT	38
Figure 5: construction de réseau HTA/BT	40
Figure 6: Raccordement par l'électrification rurale décentralisée via des ENR	43
Figure 7. Principe de fonction d'un système solaire PV	49
Figure 8: Système autonome connecté au réseau [37].	50
Figure 9: Système Autonome avec batteries [37]	50
Figure 10. Principe de fonctionnement des CSP.....	52
Figure 11. a) capteur plan plat ; b) capteur cylindro-parabolique ; c) capteur cylindro-parabolique ; d) Centrale à tour, e) capteur linéaire de Fresnel ; f) Capteur parabolique [38]	54
Figure 12. Principe de fonctionnement d'une éolienne	57
Figure 13. Eolienne horizontale à une pale ; deux pales et trois pales	58
Figure 14. Eolienne à axe vertical	58
Figure 15. Les éoliennes futures à cerf-volant [41].	59
Figure 16. Principe de fonctionnement de la biomasse	61
Figure 17. Processus et applications de la biomasse.....	64
Figure 18. Principe de fonctionnement de l'hydroélectricité	65
Figure 19. Principe de fonctionnement de la marémotrice.....	66
Figure 20. Principe de fonctionnement de l'hydro éolienne	67
Figure 21. Principe de fonctionnement d'un système hybride PV/EOLIE/NE/BATTERIES.....	69
Figure 22. Principe de fonctionnement d'un système hybride PV/DIESEL/BATTERIES	69
Figure 23. Principe de fonctionnement d'un système hybride PV/T à eau.....	70
Figure 24. Principe de fonctionnement d'un système hybride PV/T à air	71
Figure 25. Principe de fonctionnement de l'énergie géothermique	73
Figure 26. Schéma de principe d'une centrale à fluide binaire [Source : ESMAP, modifié de Dickson and Fanelli 2004]	74
Figure 27. Schéma de principe d'une centrale flash.....	75
Figure 28. Système de conversion de l'énergie géothermique.....	75
Figure 29. Cartographie du Potentiel hydraulique de la Côte d'Ivoire (Source : CI-Energies)	77
Figure 30. Centrale hydroélectrique de Soubré (Source : CI-Energies)	78
Figure 31. Cartographie du Potentiel solaire de la Côte d'Ivoire (Source : CI-Energies).....	78
Figure 32. Minicentrale hybride de Dybikro (Source : CI-Energies)	79
Figure 33. Cartographie du Potentiel de la biomasse en Côte d'Ivoire (Source : CI-Energie)	80
Figure 34 Cartographie du Potentiel éolien de la Côte d'Ivoire (Source : ECREE)	81
Figure 35. Situation géographique du village d'Elokato.....	93
Figure 36. Photo de famille des enquêteurs.....	94
Figure 37. Entretiens avec la population	94
Figure 38. Répartition des équipes par zone à ELOKATO	95
Figure 39. Dernières consignes aux équipes avant de commencer l'enquête	96
Figure 40. Séance avec les populations.....	96
Figure 41. Répartition de la consommation d'électricité des équipements des ménages	99
Figure 42. Répartition de la consommation d'électricité des lampes	100
Figure 43. Répartition détaillée de la consommation d'électricité des lampes.....	101
Figure 44. Répartition de la consommation électrique des usages électroménagers.....	102
Figure 45. Répartition de la consommation électrique des usages de climatisation	103
Figure 46. Répartition générale de la consommation de l'éclairage	104
Figure 47. Répartition générale de la consommation de l'éclairage	104
Figure 48. Courbe de charge du ménage de faible consommation [Source : TOURE, 2020]	107

Figure 49. Courbe de charge du ménage de moyenne consommation [Source : TOURE, 2020]	109
Figure 50. Courbe de charge du ménage de forte consommation [Source : TOURE, 2020]	111
Figure 51. Profil de charge du village d'Elokato : modélisation de la pointe horaire sur une subdivision des tranches horaires de la journée.....	113
Figure 52. Profil de charge du village d'Elokato : modélisation de la pointe horaire sur une subdivision des tranches horaires de la journée.....	114
Figure 53. Profil de charge de la consommation des besoins communautaires du village d'Elokato.....	117
Figure 54. Profil de charge de la consommation journalière moyenne du village d'Elokato obtenue à partir des enquêtes.....	118
Figure 55. Courbe de charge de la consommation journalière d'un village situé en zone rurale.....	132
Figure 56. Principe d'un système PV.....	133
Figure 57. Différentes parties d'une unité de production de biogaz	135
Figure 58. Présentation des composantes d'une éolienne.....	137
Figure 59. Les potentiels du X-METER	141
Figure 60. Logiciel XLSTAT	142
Figure 61. Logiciel de cartographie QGIS	143
Figure 62 : Système de comptage - Transformateur de puissance et microcontrôleur X-METER.....	143
Figure 63 : : Lieux de collecte des données des quatre villages (plan de mesurage)	144
Figure 64. Consommation d'électricité - Profil journalier à pas horaire (Source : Energy sentinel)	146
Figure 65. Consommation d'électricité - Profil mensuel	146
Figure 66. Consommation d'électricité - Profil Annuel.....	147
Figure 67 : Profil de charge journalier des consommations du village d'Elokato et de l'éclairage public (Sources : TOURE, 2020, Energy Sentinel [77])	147
Figure 68 : Profil de charge journalier des consommations du village d'ELOKATO avec et sans éclairage public (Sources : TOURE, 2020, Energy Sentinel [77])	148
Figure 69 : Courbes de charge des consommations journalières du village d'Elokato, de l'éclairage public et de la résidence du Chef de village (Sources : TOURE, 2020, Energy Sentinel [77])	149
Figure 70 : Profil de charge journalier des consommations du village d'ATTIEKOI (Sources : TOURE, 2020, Energy Sentinel [77])	149
Figure 71 : Profil de charge de la consommation journalière du village d'Ouffoué-diékro (Sources : TOURE, 2020, Energy Sentinel [77])	150
Figure 72 : Profil de charge de la consommation journalière du village de Dokaha (Sources : TOURE, 2020, Energy Sentinel [77])	151
Figure 73. Courbes de charge du village d'Elokato : modélisation de la pointe horaire sur une subdivision des tranches horaires de la journée.....	152
Figure 74 : Profil de charge de la consommation journalière moyenne du village d'Elokato obtenue à partir des enquêtes.....	153
Figure 75 : Profil de charge journalier des consommations du village d'ELOKATO (Sources : TOURE, 2020, Energy Sentinel [77])	153
Figure 76 : profil de charge par catégorie de ménage du village Tororo en Ouganda [11]	154
Figure 77 : Estimation du profil de charge du village de Tororo en Ouganda obtenue par mesurage [11]	155
Figure 78 : Histogramme des Statistique descriptives par intervalle de consommation	159
Figure 79 : Histogramme des Statistique descriptives, consommation kWh/ménage/jour pour chaque type de tarif.....	160
Figure 80 : Histogramme des Statistique descriptives par intervalle de consommation pour chaque type de tarif.....	161
Figure 81. Histogrammes des Statistique descriptives par intervalle de consommation de chaque localité à électrifier	161
Figure 82. Cartographie base des consommation moyenne par jour par ménage pour les localités à électrifier.....	162
Figure 83 : Situation géographique du village d'Elokato [Google map].....	166

Figure 84. Consommation d'électricité - Profil journalier (Source : Homer Energy 3.13.2 Pro).....	167
Figure 85. Consommation d'électricité - Profil mensuel ELOKATO.....	167
Figure 86. Consommation d'électricité - Profil Annuel ELOKATO	168
Figure 87. Rayonnement horizontal solaire annuel (source : Homer Energy).....	169
Figure 88. Eléments de coûts du générateur photovoltaïque choisi pour ELOKATO (source : Homer Energy).....	170
Figure 89. Monthly average wind speed data ELOKATO (source: Homer Energy)	171
Figure 90. Eolien Generic 3kW-G3	171
Figure 91. Eléments de coûts du générateur éolien choisi pour ELOKATO (source : Homer Energy)	172
Figure 92. Courbe caractéristique du générateur Hydrolienne choisi pour ELOKATO (source : Homer Energy)	172
Figure 93. Une hydrolienne de Guinard Energies de 20kW (P154)	173
Figure 94. Eléments de coûts du générateur Hydrolienne choisi pour ELOKATO (source : Homer Energy)....	173
Figure 95. La batterie BAE SECURA SOLAR 20PVV3800-OPZV	174
Figure 96. Eléments de coûts du système de stockage (batteries) choisi (source : Homer Energy)	174
Figure 97. caractéristiques du générateur genset (source : Homer Energy)	175
Figure 98. Eléments de coûts du groupe électrogène choisi pour Elokato (source : Homer Energy).....	176
Figure 99. Valeur objective de l'indicateur de pénurie de capacité (source : Homer Energy).....	177
Figure 100. Les facteurs d'actualisation et les coûts annualisés.....	178
Figure 101. Comparaison des scénarios selon leur COE (source : Homer Energy).....	180
Figure 102. Coût du système hybride installé (source : Homer Energy)	181
Figure 103. Coût des équipements du système (source : Homer Energy).....	181
Figure 104. Flux de trésorerie de notre système optimisé (source : Homer Energy)	182
Figure 105. Répartition des quantités d'énergies utilisées pendant toute l'année (source : Homer Energy).	183
Figure 106. Scénario de simulation de la production du système durant une année (source : Homer Energy)	183
Figure 107. Eléments de coûts du réseau interconnecté - Prix unitaire du kWh (source : Homer Energy).....	185
Figure 108. Le coût du seuil de rentabilité de l'extension du réseau électrique comparé au système hybride [Source : TOURE 2020]	186
Figure 109. Comparaison du coût en fonction de la distance d'extension [Source : TOURE 2020]	187
Figure 110. Comparaison du coût en fonction de la distance d'extension [Source : TOURE 2020]	188

Liste des abréviations

Sigle	Définition
AIE	Agence Internationale de l'Energie
ANARE-CI	Autorité Nationale de Régulation du secteur de l'Électricité de Côte d'Ivoire
BM	Banque Mondiale
BT	Basse Tension
CEDEAO	Communauté Economique des États de l'Afrique de l'Ouest
CIE	Compagnie Ivoirienne d'Electricité
CI-ENERGIES	Côte d'Ivoire Energies
EECI	Energie Electrique de Côte d'Ivoire
EnR	Energies nouvelles et Renouvelables
ENV	Enquête sur le Niveau de Vie
ERD	Electricité Réseau de Distribution
HT	Haute Tension
HTA	Haute Tension de type A (ou Moyenne Tension)
HTB	Haute Tension de type B
IEPF	Institut de l'Energie et de l'Environnement de la Francophonie
IRENA	International Renewable Energy Agency (Agence internationale pour les énergies renouvelables)
MT	Moyenne Tension
BT	Basse tension
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Economiques
ONG	Organisation Non Gouvernementale
PEPT	Programme Electricité Pour Tous
PRONER	Programme National d'Électrification Rurale
PTDAE	Projet de transport, Distribution et Accès à l'Électricité en Côte d'Ivoire
PV	Photovoltaïque
CSP	Concentrated solar power (Concentration solaire photovoltaïque)
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine (Eolienne à axe vertical)
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine (Eolienne à axe horizontal)
TNPC	Total Net Present Cost (coût total net actuel)

Sigle	Définition
COE	Cost Of Energy (Coût de l'énergie \$/kWh)
LCOE	Levelized Cost Of Energy (Coût actualisé de l'énergie)
LCOS	Levelized Cost Of Storage (Coût actualisé du stockage)

Annexes

Annexe 1 : Formulaire d'entretien à usage collectif et individuels

Exemplaire du Formulaire pour la collecte des usages individuels

Activités	Personnes par ménages								
Veuillez préciser votre d'activité	Veuillez préciser le nombre de personnes du ménage	Nombre de jours de travail en moyenne par semaine	Lundi Durée Moy. de travail (HEURE)	Mardi Durée Moy. de travail (HEURE)	Mercredi Durée de Moy. travail (HEURE)	Jeudi Durée de Moy. travail (HEURE)	Vendredi Durée Moy. de travail (HEURE)	Samedi Durée Moy. de travail (HEURE)	Dimanche Durée Moy. de travail (HEURE)

Incandescence 25 W			Incandescence 50 W			Incandescence 60 W			Incandescence 70 W		
Nombre d'ampoules à incandescence en fonction des puissances électriques [25 W]	Temps en Heure de fonctionnement des ampoules à incandescence [25 W]	Conso (kWh/Jour)	Nombre d'ampoules à incandescence en fonction des puissances électriques [50 W]	Temps en Heure de fonctionnement des ampoules à incandescence [50 W]	Conso (kWh/Jour)	Nombre d'ampoules à incandescence en fonction des puissances électriques [60 W]	Temps en Heure de fonctionnement des ampoules à incandescence [60 W]	Conso (kWh/Jour)	Nombre d'ampoules à incandescence en fonction des puissances électriques [70 W]	Temps en Heure de fonctionnement des ampoules à incandescence [70 W]	Conso (kWh/Jour)

Exemplaire du Formulaire pour la collecte des usages collectifs

	Activités					Modes de vie						
	Agriculteur	Pêche	Artisanat	Elevage	Commerce	Jeunesse active	Fête de génération	Orienté tradition	Orienté modernité	Mutuelle de développement active	Association des femmes	Coopérative métiers
Réponses Oui ou non												

	Ecole		Dispensaire				Adduction d'eau			Administration		Machine outils (Nombre)		
Eclairage public	Ecole primaire	Lycée	Services	Lits	Lieux de culte	Centre de loisirs polyvalents	Château d'eau	Pompage électrique	Pompage solaire	Sous-préfecture	Autres	Electrique	Gasoil/Essence	Autres (à préciser)
Nombre														

	Restauration (Nombre)						
	Maquis	Buvette	Bar	Salon de coiffure	Boutique	Blanchisserie	Autres
Nombre							

Annexe 2 : Répartition des consommations des usages par tranche horaire

Tableau 1 : Répartition des usages par tranche horaire pendant toute la journée [Source : TOURE, 2020]

Heures	Audio (radio)	Lampes	Chargeur portable	Total
Puissance(W)	30	10	10	50
0h-1h	0	0	0,001	0,001
1h-2h	0	0	0,001	0,001
2h-3h	0	0	0,001	0,001
3h-4h	0	0	0,001	0,001
4h-5h	0	0	0,001	0,001
5h-6h	0,01	0,03	0	0,04
6h-7h	0,01	0,03	0	0,04
7h-8h	0	0	0	0
8h-9h	0	0	0	0
9h-10h	0	0	0	0
10h-11h	0	0	0	0
11h-12h	0	0	0	0
12h-13h	0,01	0	0	0,01
13h-14h	0,01	0	0	0,01
14h-15h	0	0	0	0
15h-16h	0	0	0	0
16h-17h	0	0	0	0
17h-18h	0,1	0,01	0	0,11
18h-19h	0,1	0,02	0	0,12
19h-20h	0,1	0,03	0	0,13
20h-21h	0,1	0,03	0	0,13
21h-22h	0,1	0,03	0	0,13
22h-23h	0	0	0,01	0,01
23h-0h	0	0	0,01	0,01
Nb heures/j	7	5	5	0,745

Annexe 3 : Tableau de Répartition des usages par tranche horaire pendant toute la journée
 [Source : TOURE, 2020]

Heures	Audio (k7)	Lampes	Télé	Chargeur téléphone	Ventilateur	TOTAL
Puissance (W)	30	90	70	30	60	280
0h-1h	0	0	0	0,003	0,06	0,063
1h-2h	0	0	0	0,003	0,06	0,063
2h-3h	0	0	0	0,003	0,06	0,063
3h-4h	0	0	0	0,003	0,06	0,063
4h-5h	0	0	0	0,003	0,06	0,063
5h-6h	0,03	0,054	0	0,003	0,06	0,147
6h-7h	0,03	0,054	0	0	0	0,084
7h-8h	0	0	0	0	0	0
8h-9h	0	0	0	0	0	0
9h-10h	0	0	0	0	0	0
10h-11h	0	0	0	0	0	0
11h-12h	0	0	0	0	0	0
12h-13h	0	0	0,07	0	0,06	0,13
13h-14h	0	0	0,07	0	0,06	0,13
14h-15h	0	0	0	0	0	0
15h-16h	0	0	0	0	0	0
16h-17h	0	0	0	0	0	0
17h-18h	0,03	0,036	0	0	0	0,066
18h-19h	0,03	0,054	0,07	0	0	0,154
19h-20h	0,03	0,072	0,07	0	0	0,172
20h-21h	0	0,09	0,07	0	0	0,16
21h-22h	0	0,09	0,07	0	0	0,16
22h-23h	0	0,036	0,07	0	0,06	0,166
23h-0h	0	0	0	0,03	0,06	0,09
Nb heures/j	5	8	7	7	10	1,774

Annexe 4 : Tableau de répartition des usages par tranche horaire pendant toute la journée [Source : TOURE, 2020]

Heures	Audio (k7)	Lampes	TV	Chargeur téléphone	Fer à repasser	PC	Climatiseur	Chaine hi-fi	Ventilateur	Réfrigérateur	TOTAL
Puissance(W)	50	160	100	60	1000	60	1200	50	60	300	
0h-1h	0	0	0	0,006	0	0	1,2	0	0,06	0,3	1,566
1h-2h	0	0	0	0,006	0	0	1,2	0	0,06	0,3	1,566
2h-3h	0	0	0	0,006	0	0	1,2	0	0,06	0,3	1,566
3h-4h	0	0	0	0,006	0	0	1,2	0	0,06	0,3	1,566
4h-5h	0	0	0	0,006	0	0	1,2	0	0,06	0,3	1,566
5h-6h	0,05	0,08	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,43
6h-7h	0,05	0,08	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,43
7h-8h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,3
8h-9h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,3
9h-10h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,3
10h-11h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,3
11h-12h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,3
12h-13h	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0,06	0,3	0,46
13h-14h	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0,06	0,3	0,46
14h-15h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,3
15h-16h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,3
16h-17h	0	0	0	0	0	0	0	0,05	0	0,3	0,35
17h-18h	0,05	0,08	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,43
18h-19h	0,05	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,45
19h-20h	0,05	0,12	0,1	0	0	0	0	0	0	0,3	0,57
20h-21h	0,05	0,16	0,1	0	0	0	0	0	0	0,3	0,61
21h-22h	0,05	0,16	0,1	0	1	0,06	0	0	0	0,3	1,67
22h-23h	0	0,16	0,1	0	0	0,06	1,2	0	0	0,3	1,82
23h-0h	0	0	0	0,06	0	0	1,2	0	0	0,3	1,56
Nb heures/j	7	8	6	6	1	2	7	1	7	24	19,17

Annexe 5 : Tableau de répartition des usages par tranche horaire pendant toute la journée du village d'Elokato [Source : TOURE, 2020]

Heures	Total		Total		Total		Energie totale
0h-1h	0,001	0,005	0,063	0,315	1,566	6,63	6,95
1h-2h	0,001		0,063		1,266		6,95
2h-3h	0,001		0,063		1,266		6,95
3h-4h	0,001		0,063		1,266		6,95
4h-5h	0,001		0,063		1,266		6,95
5h-6h	0,04	0,1	0,084	0,428	0,13	0,63	1,158
6h-7h	0,04		0,084		0,13		1,158
7h-8h	0		0		0		1,158
8h-9h	0		0		0		1,158
9h-10h	0		0		0		1,158
10h-11h	0		0		0		1,158
11h-12h	0		0		0		1,158
12h-13h	0,01		0,13		0,16		1,158
13h-14h	0,01		0,13		0,16		1,158
14h-15h	0		0		0		1,158
15h-16h	0		0		0		1,158
16h-17h	0	0	0,05	1,158			
17h-18h	0,11	0,64	0,066	0,968	0,13	5,01	6,618
18h-19h	0,12		0,154		0,15		6,618
19h-20h	0,13		0,172		0,27		6,618
20h-21h	0,13		0,16		0,31		6,618
21h-22h	0,13		0,16		1,37		6,618
22h-23h	0,01		0,166		1,52		6,618
23h-0h	0,01		0,09		1,26		6,618

Annexe 6 : Tableau des équipements utilisés pour les usages communautaires du village d'Elokato [Source : TOURE, 2020]

Equipements utilisés pour des besoins communautaires
Besoins en électricité de l'éclairage public
Lampadaires (PLAMPA, TLAMPA, NLAMPA, NJLAMPA)
Besoins en électricité de l'infrastructure de santé
Lampes d'urgences (PLAMUR, TLAMUR, NLAMUR, NJLAMUR)
Lampes d'éclairage (PLAMP, TLAMP, NLAMP, NJLAMP)
Ventilateur (PVEN, TVEN, NVEN, NJVEN)
Radio-téléphone (PRAT, TRAT, NRAT, NJRAT)
Réfrigérateur (PRAT, TRAT, NRAT, NJRAT)
Chauffe-eau (PCHE, TCHE, NCHE, NJCHE)
Besoins en électricité de l'infrastructure d'éducation (école)
Lampes d'éclairage (PLAMP, TLAMP, NLAMP, NJLAMP)
Télévision (PTV, TTV, NTV, NJTV)
Ventilateur (PVEN, TVEN, NVEN, NJVEN)
Ordinateur (POR, TOR, NOR, NJOR)
Imprimante (PIMP, TIMP, NIMP, NJIMP)
Besoins en électricité de l'infrastructure d'éducation (école)
Lampes d'éclairage (PLAMP, TLAMP, NLAMP, NJLAMP)
Télévision (PTV, TTV, NTV, NJTV)
Ventilateur (PVEN, TVEN, NVEN, NJVEN)
Ordinateur (POR, TOR, NOR, NJOR)
Imprimante (PIMP, TIMP, NIMP, NJIMP)
Besoins en électricité des Lieux de culte
Lampes d'éclairage (PLAMP, TLAMP, NLAMP, NJLAMP)

Ventilateur (PVEN, TVEN, NVEN, NJVEN)
Ampli (PAMP, TAMP, NAMP, NJAMP)
Besoins en électricité de la salle polyvalente
Lampes d'éclairage (PLAMP, TLAMP, NLAMP, NJLAMP)
Ventilateur (PVEN, TVEN, NVEN, NJVEN)
Ampli (PAMP, TAMP, NAMP, NJAMP)
Télévision (PTV, TTV, NTV, NJTV)
Ordinateur (POR, TOR, NOR, NJOR)
Besoins en électricité du pompage
Pompe hydraulique (PPOMP, TPOMP, NPOMP, NJPOMP)
Besoins en électricité de la sous-préfecture
Lampes d'éclairage (PLAMP, TLAMP, NLAMP, NJLAMP)
Ventilateur (PVEN, TVEN, NVEN, NJVEN)
Climatiseur (PCLIM, TCLIM, NCLIM, NJCLIM)
Ordinateur (POR, TOR, NOR, NJOR)
Imprimante (PIMP, TIMP, NIMP, NJIMP)
Télévision (PTV, TTV, NTV, NJTV)
Radio-téléphone (PRAT, TRAT, NRAT, NJRAT)

Annexe 7 : Tableau de répartition des équipements utilisés pour les usages communautaires par tranche horaire

Heures	Lampadaire	Lampes d'urgences	Lampes d'éclairage	Radio-	Téléphone	Réfrigérateur	Chauffe-eau	Télévision	Ventilateur	Ordinateur	Imprimante	Climatiseur	Ampli	Conso/Heure
Puissance (w)	150													
0h-1h	151,2		11,5		11,4	7,2			1,4					182,7
1h-2h	151,2		11,5		11,4	7,2			1,4					182,7
2h-3h	151,2		11,5		11,4	7,2			1,4					182,7
3h-4h	151,2		11,5		11,4	7,2			1,4					182,7
4h-5h	151,2		11,5		11,4	7,2			1,4					182,7
5h-6h	151,2		11,5		11,4	7,2	0,75		1,4					183,45
6h-7h				1,04		7,2			1,4					66
7h-8h		1,12		1,04		7,2			1,4					66
8h-9h		1,12				7,2			1,4	4,08	0,0742	48	5	66,8742
9h-10h		1,12				7,2		0,98	1,4	4,08	0,0742	48	5	67,8542
10h-11h		1,12				7,2		0,98	1,4	4,08	0,0742	48	5	67,8542
11h-12h		1,12				7,2		0,98	1,4	4,08	0,0742	48	5	67,8542
12h-13h		1,12		1,04	11,4	7,2	0,75	0,98	1,4	4,08		48	5	80,97
13h-14h		1,12		1,04	11,4	7,2		0,98	1,4	4,08		48	5	80,22
14h-15h		1,12				7,2		0,98	1,4	4,08		48	5	67,78
15h-16h		1,12				7,2		0,98	1,4	4,08		48	5	67,78
16h-17h		1,12				7,2		0,98	1,4	4,08		48	5	67,78
17h-18h		1,12				7,2		0,98	1,4	4,08		48	5	67,78
18h-19h	151,2		11,5			7,2		0,98	1,4					172,28
19h-20h	151,2		11,5			7,2		0,98	1,4					172,28
20h-21h	151,2		11,5			7,2		0,98	1,4					172,28
21h-22h	151,2		11,5			7,2	0,75	0,98	1,4					173,03
22h-23h	151,2		11,5			7,2			1,4					171,3
23h-0h	151,2		11,5			7,2			1,4					171,3

Annexe 8 : Rôle de l'X-METER

Le XMETER est un Analyseurs de réseaux électriques et enregistreurs de données. Il permet l'analyse de la puissance active, réactive, apparente, le facteur de puissance, le courant, la tension soit au total 50 grandeurs électriques. Les mesures s'effectuent grâce à des pinces de mesure du courant et de tension. Il a rapport de transmission de 100/5. L'appareil a plusieurs interfaces ou protocole de communications (ETPRO, modbus, IP, GSM) et grâce au logiciel de gestion vous pourrez effectuer le transfert de données enregistrées vers un PC ou un smartphone.



Figure 1 : compteur
MTX



Figure 2 : coffret MTX
posé sur le transformateur
d'ELOKATO

Annexe 9 : Schéma de montage

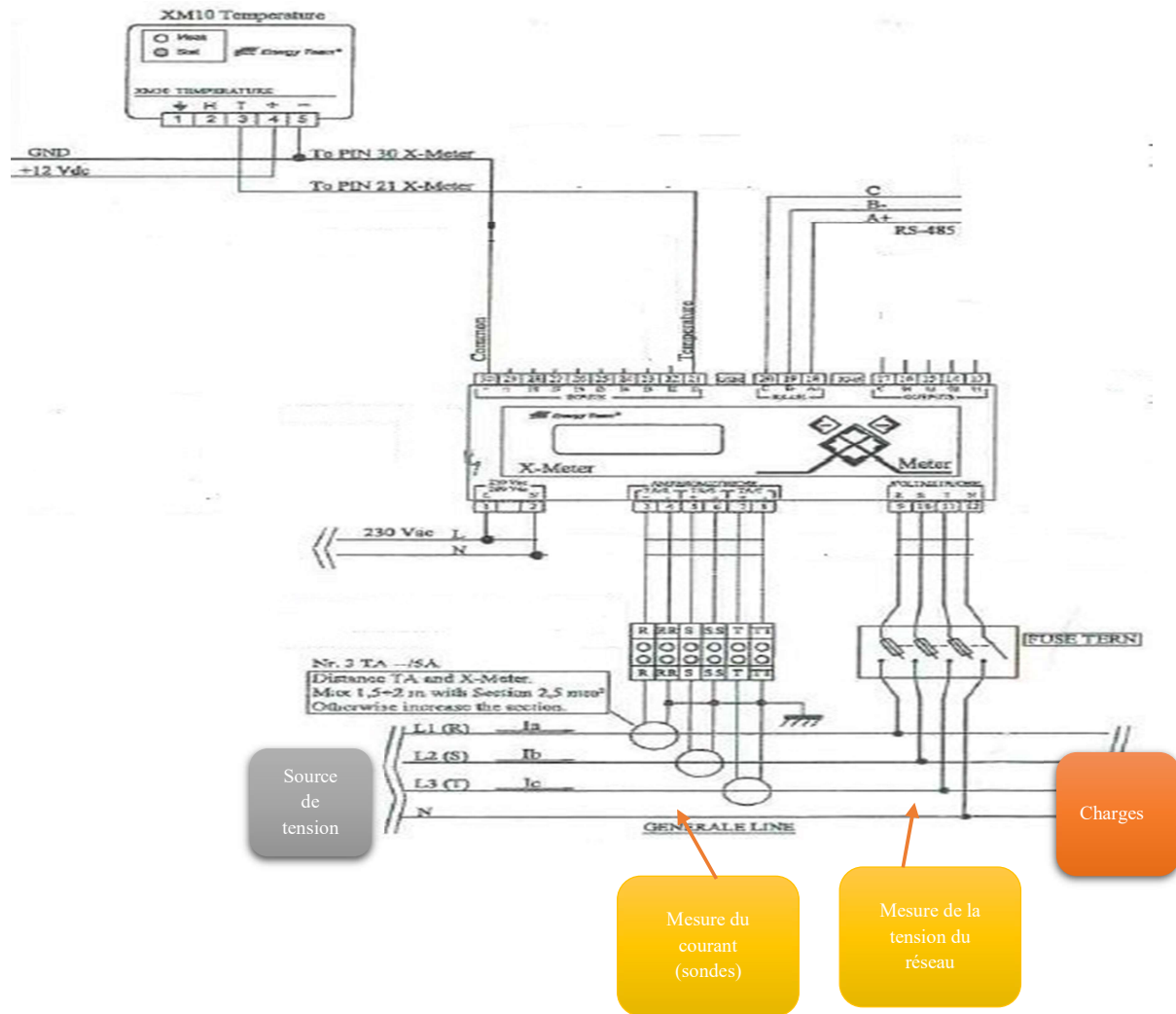


Figure 3 : Schéma de montage d'un X-METER

Annexe 10 : Fiche technique de l'X-METER

X-Meter DIN

Analyseur réseau électrique et DATALOGGER dans un seul instrument.

Disponible dans la version 5A (***) ou avec des entrées de tension (***)



Options

XM1	- Extension de Mémoire et Communication
XM2	- Mod.A Bridge 232/485 Mod.B Bridge USB/485
XM3	- Mod.8 Entrées Numériques
XM4	- Mod. Modem Gsm/Gprs
XM5	- Mod. Réseau Ethernet
XM6	- Enregistrements Harmoniques
Es3	- Software de Supervision

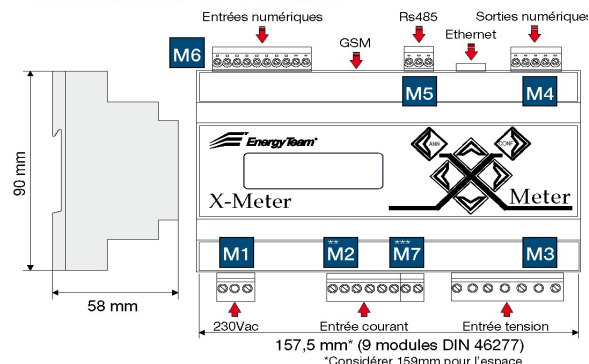
Informations Techniques

Mesures sur réseau 50/60HZ	
Tension	Vac
Puissance Active	W
Puissance Réactive	VAR
Puissance Apparente	VA
Puissance de Distorsion	VA
Courant Equivalent Triphasé	A
Courant de Ligne	A
Cosφ	
Facteur de Puissance	
Energie Active Distribuée	Wh
Energie Active Absorbée	Wh
Energie Réactive Inductive	VARh
Energie Réactive Capacitive	VARh
Fréquence	Hz
Précision	+/- 0.25% del F.S. Val.Mis.
Alimentation	
Tension d'alimentation	100-250 Vac / 100-350 Vdc
Fréquence	50-60 Hz
Consommation	5 Va
Généralités	
3 Entrées Tension	100 o 400 Vac
Entrées Courants	(**) 3 entrées courants avec sortie tension 5ARMS (***) 3 entrées courant spécifique pour senseurs avec sortie tension 1VtRMS
2 Sorties d'impulsions (Att./Reatt.)	
Sorties Optomos (1 Min et 1 Max)	100 mA / 24 Vdc
Niveau de protection	IP 20
Poids	400 gr
Dimensions LxHxW 9 modules	157,5 x 90 x 58 mm
Display	Grafico
Température de fonctionnement	-10°C + 55°C
Humidité relative	95% sens condensation

- > Compteur Bidirectionnel (Energie importée/vendue)
- > 50 Mesures Effectuées
- > Mesures en valeur effective
- > Mesures sur 4 cadrans
- > Display graphique avec dimension des caractères réglable
- > Indications étendues et claires des mesures détectées
- > 6 touches clavier avec alertes sonores
- > Sorties Impulsions Configurables de toutes les quantités mesurées
- > Sorties d'alarmes configurables des quantités mesurées
- > Visualisation graphique de Tension, Courant, Puissances et COSφ fdrs d'énergie sur 4 cadrans avec réinitialisation et mot de passe
- > Indication en € d'énergie absorbée et vendue
- > Horloge et Calendrier
- > Récipient de Guide DIN 46277 (9 Modules)
- > Bornes amovibles pour faciliter le montage
- > Sonde de température à l'intérieur de l'instrument
- > Fonction d'inversion Logiciel Transformateur d'Ampères et Transformateur de tension
- > Extension et modularité (mémoire, entrées numériques, modem GSM/GPRS, ethernet, e-mail, qualité de l'approvisionnement)

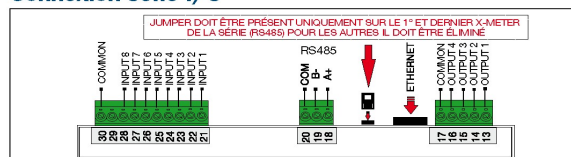
Les avantages sont clairs: Coût dans la moyenne d'un simple appareil multifonctions avec caractéristiques initiales supérieures, (display graphique, sorties impulsions pour Act/Réact. détectées, bref archivage des consommations mémorisées) en outre la possibilité de le transformer en un véritable instrument Power Quality sans avoir à le remplacer. Créez votre X-Meter quand et comme vous voulez, consultez la liste des options disponibles.

Dimensions et Bornes



M1	Alimentation - Section maximale des câbles: 2 mm ² (16AWG)
M2**	Entrée Courant - Section maximale des câbles: 2.5 mm ² (14AWG)
M3***	Entrée signal en Tension (Mesures Courants) Section maximale des câbles: 0.75 mm ² (14AWG)
M3	Entrée Tension - Section maximale des câbles: 2.5 mm ² (14AWG)
M4	Sorties numériques - Section maximale des câbles: 0.75 mm ² (18AWG)
M5	Rs485 - Section maximale des câbles: 0.75 mm ² (18AWG) Belden 9841
M6	Entrées numériques - Section maximale des câbles: 0.75 mm ² (18AWG)

Connexion série I/O



Annexe 11 : Les options de L'X-METER

Options

XM1 - Extension Mémoire et Communication

Pour interfacer le logiciel de l'appareil Es3 vous devez activer cette fonction. Cette option vous permet d'augmenter considérablement la capacité de stockage, vous permettant d'enregistrer tous les paramètres mesurés de l'instrument et d'étendre la capacité de stockage des jours enregistrables, jusqu'à une archive historique de 250jrs. (Temps d'intégration de 15' des valeurs suivantes: tension concaténée et de phase, courant de ligne triphasée, puissance active triphasée, puissance réactive triphasée, facteur de puissance triphasé). En outre, en utilisant le port RS485 de communication qui permet l'utilisation de l'ordinateur via le module BRIDGE (non inclus) on peut connecter ensemble une série de dispositifs EnergyTeam.

XM2 - Mod. A Bridge 232/485 Mod. B Bridge USB/485

Le module de conversion Bridge 232/485 alimenté à 230Vac dans un boîtier de 4 modules Din, convertit le signal 485 de la X-Meter en série 232 vers le port de communication du PC. Egalement disponible l'USB/485. Le module convertit le signal 485 de la X-Meter vers le port USB de l'ordinateur. L'isolation galvanique de la connexion USB assure une protection maximale de l'ordinateur contre les perturbations ou surtensions provenant du terrain. Conçu avec des caractéristiques industrielles il est unique en son genre. Aucun besoin d'alimentation externe encombrante car autoalimenté.

XM3 - Module à 8 entrées numériques

Module à 8 entrées numériques autoalimentées à 12Vdc, il permet d'obtenir positions on/off, impulsions de compteurs externes gaz, eau, air, etc. Vous pouvez aussi archiver séparément les différents canaux d'acquisition, interroger les journaux mémorisés, en utilisant le logiciel approprié (non inclus). L'utilisation est disponible avec au moins la fonction XM1 activée.

XM4 - Module GSM/GPRS

Le module modem GSM / GPRS inséré dans l'appareil X-Meter, vous permet d'envoyer des e-mail et SMS associés à les positions on/off et alertes provenant du «champ», liés à la fonction XM3 (Module 8 entrées numériques). De plus l'utilisation de ce module permet la visualisation à distance de l'instrument X-Meter, pour la fourniture du service publication données sur le Web, via notre site web www.energyteam.it; en recevant le mot de passe et l'identifiant qui permet la consultation personnelle à tout moment et lieu, les données visualisées peuvent être converties en format Excel et Access puis téléchargées sur votre PC. L'utilisation est disponible au moins avec la fonction XM1 activée.

XM5 - Module Réseau Ethernet

La Carte Ethernet insérée à l'intérieur du dispositif vous permet de connecter l'X-Meter au réseau Ethernet ou intranet de l'entreprise, l'interrogeant à partir de plusieurs lieux de collecte et de monitoring des données grâce à l'attribution d'une simple adresse IP. L'utilisation est disponible uniquement avec les fonctions XM1 et le logiciel Es3 activés.

XM6 - Module Régistration Harmonique

Module pour les mesures harmoniques qui permet de les mesurer et de les stocker jusqu'à la 25^e.

XM7 - Module horloge programmable

Le module firmware " des horloges programmables avec calendrier annuel perpétuel ", permet aux 4 sorties optomios de l'X-Meter DIN de gérer automatiquement par l'enclenchement et déclenchement de certains services (charges contrôlables par exemple éclairage, moteurs, ventilateurs, etc.) sur chaque X-Meter vous pouvez programmer jusqu'à 12 profils quotidiens + 2 périodes spéciales + 20 jours spéciaux. Chaque profil définit 8 changements de positions dans le cadre des 24 heures journalière pour chacune des 4 charges associées. Raccordables jusqu'à 128 X-Meter pour un total de 512 charges contrôlables. L'utilisation est disponible avec la fonction XM1 activée.

XM8 - Canal Analogique Galvanique Isolé

Inséré dans un boîtier 1 Mod.Din, il interface des signaux de tension ou de courant provenant du terrain, aux entrées de X-Meter permettant la visualisation et l'archivage des mesures relevées. L'appareil

X-Meter est capable d'alimenter jusqu'à 2 modules XM8, les modules supplémentaires auront besoin d'alimentateur 12Vdc (non inclus) . 11 sont Les configurations d'interface possibles aux signaux en tension ou courant. Précision garantie égale à 0,5 % de la valeur de fond d'échelle.

XM9 - Module Interface sonde PT 100 - 500 - 1000

Contenu dans un boîtier 1 Mod. Din , il permet l'interfaçage des sondes de température PT100, PT500 et PT1000, aux entrées de X-Meter permettant la visualisation et l'archivage des températures relevées. L'appareil X-Meter est capable d'alimenter jusqu'à 2 modules XM8, les modules supplémentaires auront besoin d'alimentateur 12Vdc (non inclus). Précision garantie égale à 0,5 % de la valeur de fin d'échelle.

XM10 - Module de Température Ambiante

Boîtier approprié pour être fixé au mur, il capte la température ambiante (fourchette -10 °C + 65 °C ± 1,5 °C) et l'affecte aux entrées de X-Meter permettant la visualisation et l'archivage des températures relevées. L'appareil X-Meter est capable d'alimenter jusqu'à 2 modules XM10, les modules supplémentaires auront besoin d'alimentateur 12Vdc (non inclus). Particulièrement adapté pour la surveillance et l'enregistrement des températures ambiantes dans le centre de données, Cabine BT / MT, entrepôts, etc.

XM11 - Module de Température et Humidité ambiante

Boîtier approprié pour être fixé au mur il capte la température et l'humidité ambiante, et l'affecte aux entrées de X-Meter permettant la visualisation et l'archivage des températures et humidités relevées. L'appareil X-Meter est capable d'alimenter jusqu'à 2 modules XM11, les modules supplémentaires auront besoin d'alimentateur 12Vdc(non inclus) .Particulièrement adapté à la surveillance et l'enregistrement de la température et de l'humidité dans l'industrie alimentaire. Gamme d'humidité (hum. 0-100% relative) Précision ± 2 % dans la fourchette d'hum. relative. 10% 90% gamme Temp. (-10 °C + 65 °C) Précision ± 0,8 °C à 25 °C ± 0,3 °C.

XM12 - Modem USB/GSM (connexion PC/X-Meter)

Le modem GSM pour le relevé à distance des données et la programmation à distance est facile à connecter au PC via la connexion USB intégrée.

XM14 - Qualité de l'alimentation

Module d'enregistrement des manques et des pics de tension, avec une résolution de 10 ms. La mesure et l'archivage jusqu'à la 25e harmonique est aussi disponible soit sous tension que sur courant. Activer une alerte locale, quand l'événement précédemment défini se produit.

XM15 - Module Relais d'interface charges

Pour utiliser les 4 sorties pour piloter des charges standard insérées dans le réseau monophasé 220Vac, il faut les interfacier à ce module XM15. Alimenté à 220Vca, il fournit 4 relais totalement indépendants avec possibilité de commuter toute charge jusqu'à 16A.

XM18 - Module de gestion des charges

Grâce au contrôle des 4 sorties, réalisé par un algorithme sophistiqué, il est possible d'intervenir activement sur la gestion des charges électriques, afin d'éliminer ou réduire que la puissance outrepassé les limites contractuelles du fournisseur d'énergie.

XM UPS - UPS DIN Dédié

Onduleur de dimension extrêmement réduite en 6 modules Din, avec des piles de pointe (lithium-polymère), dédié pour alimenter un appareil X-Meter pour un maximum de 4 heures.

Logiciel de supervision

Logiciel de supervision et de contrôle. Demandez la documentation technique ou consultez notre Site www.energyteam.it.

Annexe 12 : Listes des mesures

Listes mesures

Mesures directes monophasées

- > Tension de phase neutre L1-N
- > Tension de phase neutre L2-N
- > Tension de phase neutre L3-N
- > Tension phase-phase L1-L2
- > Tension phase-phase L2-L3
- > Phase de tension à la phase L3-L1
- > Courant de ligne L1
- > Courant de ligne L2
- > Courant de ligne L3

Mesures dérivées monophasées

- > puissance Active bidirectionnelle L1 (positif = importés (Q1eQ4)), (négative = exporté (Q2 et Q3))
- > Puissance active bidirectionnelle L2 (positive = importé, exporté = négative)
- > Puissance active L3 bidirectionnelle (positive = importé, exporté = négative)
- > Puissance réactive bidirectionnelle L1 (positif = importés (Q1eQ4))
- > Puissance réactive bidirectionnelle L2 (positif = importé)
- > Puissance réactive bidirectionnelle L3 (positif = importé)
- > Puissance distorsion L1 (indice de présence harmoniques de courant)
- > Puissance distorsion L2 (indice de la présence harmoniques de courant)
- > Puissance distorsion L3 (indice de la présence harmoniques de courant)
- > Puissance apparente L1
- > Puissance apparente L2
- > Puissance apparente L3
- > Facteur de puissance L1
- > Facteur de puissance L2
- > Facteur de puissance L3

Principales mesures système triphasé

- > Phase-neutre tension équivalente triphasée
- > Phase-phase tension équivalente triphasée
- > Courant équivalent triphasée

- > Puissance active triphasée (positive = importé (Q1eQ4), négative = exporté) bidirectionnelle
- > Puissance réactive triphasée (positive = importé (Q1eQ2)) bidirectionnelle

Mesures secondaires système triphasé

- > Puissance distorsion équivalente triphasé
- > Puissance apparente équivalente triphasé
- > Facteur de puissance équivalente triphasée
- > Calcul du Courant Neutre
- > Tension neutre du centre étoile idéal N-O
- > Fréquence (mesurée sur entrée de tension L)

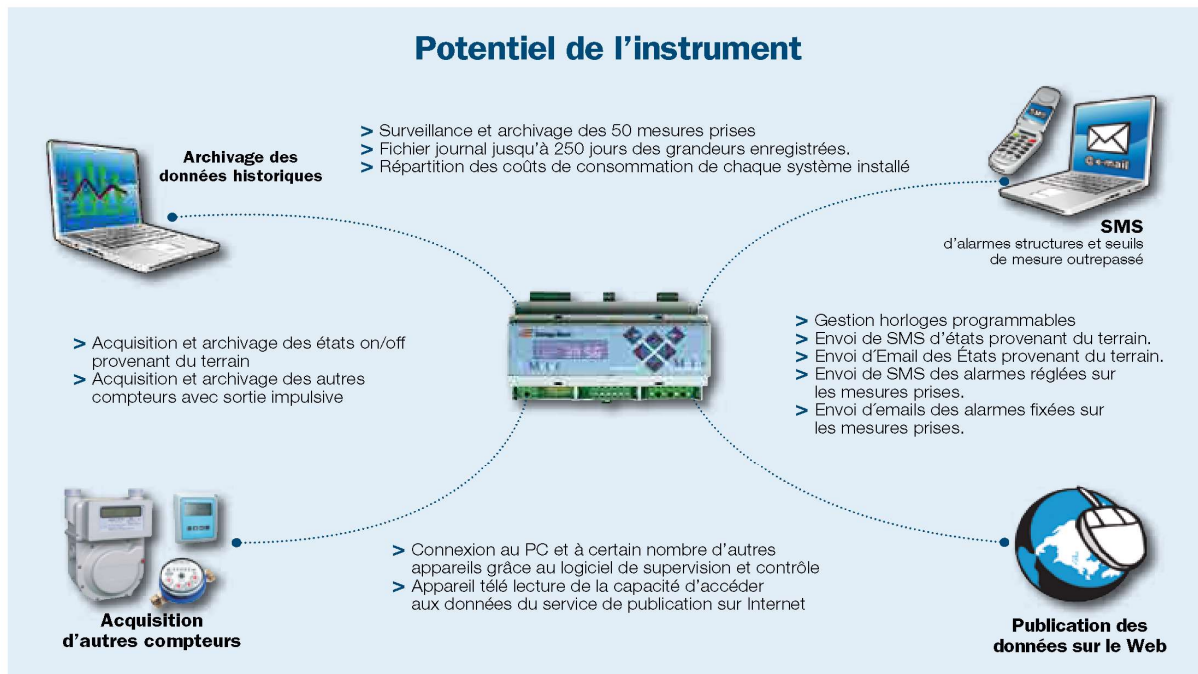
Grandeurs Intégrés Energie système triphasé

- > Energie active importée (Q1 et Q4)
- > Puissance Active importée (Q1 et Q4)
- > Energie active exportée (Q2 et Q3)
- > Energie réactive importée (Q1)
- > Energie réactive importée (Q2)
- > Energie réactive importée (Q3)
- > Energie réactive importée (Q4)
- > Puissance Active importée (Q2 et Q3)
- > Puissance Active importée (Q1)
- > Puissance Active importée (Q2)
- > Puissance Active importée (Q3)
- > Puissance Active importée (Q4)

Conformité

Normes Appliquées

- > EN 55011 (classe A)
- > EN 61000-4-2 - EN 61000-4-5
- > EN 61000-4-6
- > EN 61000-4-11
- > EN 61000-4-3
- > EN 61000-4-4
- > EN 60204-1



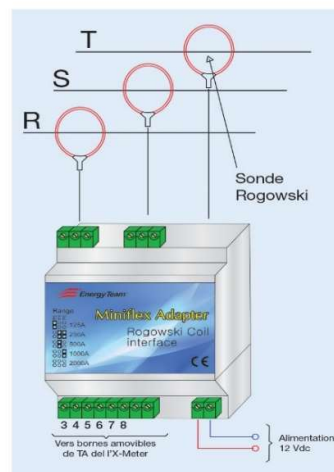
Sondes Ampérométrique Rogowski



La bobine de Rogowski est un appareil électrique pour la mesure des courants alternatifs et des courants de type impulsif. Le principal avantage d'une bobine Rogowski sur les autres méthodes de mesure (transformateurs de courant ou TA, senseur de sonde de Hall, etc.) consiste en la souplesse et déformabilité de la sonde, ce qui permet l'enroulement autour d'un conducteur sous tension sans déranger. En outre, étant donné qu'une bobine Rogowski n'est pas enroulée sur un noyau en fer, elle présente une faible inductance qui permet la mesure des courants qui varient au fil du temps, même à grande vitesse.

Données techniques

Capteur de courant	
Capteurs	Flexibles et à ouverture
Diamètre utile	100mm ou 200mm
Cable sortie	3 m de câble blindé
Précision	Classe 1
Amplificateurs Rogowski	
Type	Taille mono-triphasé (1-3 capteurs)
Porter à pleine échelle avec diamètre	62,5,125,250,500,1000 et 2000 A Opt.échelle double
Alimentation	12 Vdc
Boîtier	En plastique DIN 4 modules
Connexion	Bornes amovibles
Utilisation	X-Meter modifié avec entrées Ampérométrique de tension
Précision	Classe 1
Option	extension de câble blindé longueur spéciale 5 m



Transformateurs ampérométrique ouvrable et sortie de tension

COD. Art. Energy Team	Dimension int (mm) [Ø]	Dimension Ext (mm) [LxAxP]	fond échelle (A)	Classe
XXXXTA	24	46 x 66 x 34,2	50	1
XXXXTA	24	46 x 66 x 34,2	100	1
XXXXTA	24	46 x 66 x 34,2	150	1
XXXXTA	24	46 x 66 x 34,2	200	1



Energy Team® Services innovateurs et solutions intégrées pour le rendement énergétique

Energy Team S.p.A. Via della Repubblica, 9 20090 Trezzano s/Naviglio (MI) Italy - Tel. +39 02 48405033 - Fax +39 02 48405035
P.IVA 11680670152 - Web: www.energyteam.it - ISO 50001:2011 Certified Company - Cert. n° 580512



03/15

Besoins en électricité par USAGES : ELOKATO

Cette enquête vise à identifier les besoins en électricité des ménages domestiques, communautaires et des activités génératrices de revenus du village

*Obligatoire

Collecte des besoins



1. Indiquer le nom et prénoms du propriétaire/locataire *

2. Indiquez le numéro du compteur CIE existant *

3. Avez vous besoin d'un autre compteur CIE? *

Une seule réponse possible.

- Oui
- Non

Annexe 15 : Formulaire Google forms

30/10/2022 11:33

Besoins en électricité par USAGES : ELOKATO

4. Veuillez préciser le nombre de personnes du ménage *

5. Seriez-vous intéressés par une solution solaire Photovoltaïque? *

Une seule réponse possible.

Oui

Non

6. Veuillez préciser votre d'activité *

Plusieurs réponses possibles.

Agriculteur/cultivateur

Artisan

Cadre/Entrepreneur

Commerçant

Couturier

Employé

Enseignant

Fonctionnaire

Profession libérale

Ouvrier

Pêcheur

Retraité

Ménagère

Annexe 16 : Formulaire Google forms

30/10/2022 11:33

Besoins en électricité par USAGES : ELOKATO

7. Veuillez renseigner vos jours d'activités

Plusieurs réponses possibles.

	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dim
Agriculteur/cultivateur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[
Artisan	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[
Cadre/Entrepreneur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[
Commerçant	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[
Couturier	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[
Employé	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[
Enseignant	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[
Fonctionnaire	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[
Profession libérale	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[
Ouvrier	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[
Pêcheur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[
Retraité	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[
Ménagère	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[

